

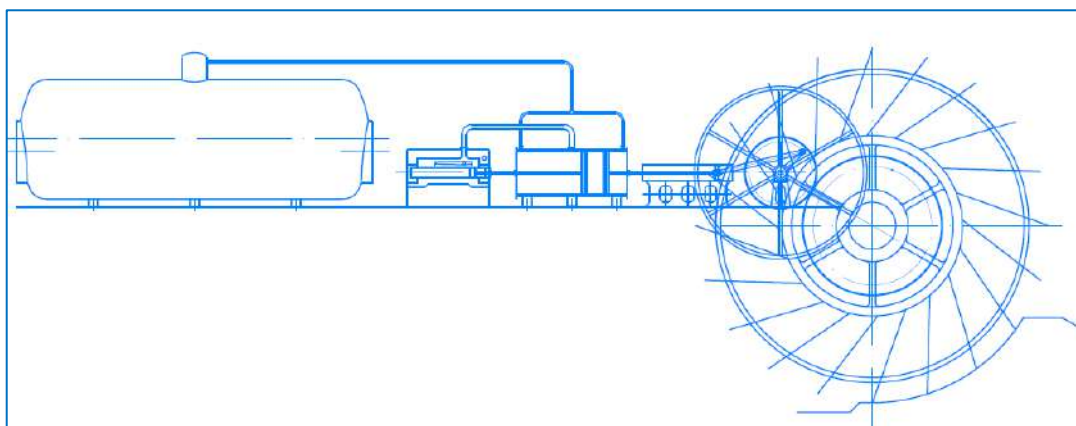
Leidraad kennisborging

Stoomgemalen

Deel IV

Gedetailleerde algemene technische informatie

Versie 25 november 2021



Colofon

Uitgave	De Nederlandse Gemalenstichting (NGS) www.gemalen.nl
Projectgroep kennisborging	G.P. Dalhuisen, bestuurslid NGS, projectleider J.E.F. Landman, J.H. Reijnen, bestuursleden NGS C.D. van Rijn, J. van Raaij, adviseurs NGS
Tekst, samenstelling en redactie	C.D. van Rijn, J. van Raaij
Druk	Koninklijke Rijnja B.V.
Aantal pagina's	578
Datum	25 november 2021

Deze Leidraad is gemaakt in opdracht en onder auspiciën van de NGS, bij wie de auteursrechten berusten. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand en/of openbaar gemaakt door middel van druk, microfilm, fotokopie of op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van de NGS.

De tekst van de Leidraad is zowel in digitale vorm als op hard copy beschikbaar gesteld aan de beheerder en/of eigenaar van het betreffende gemaal. De NGS beheert de digitale bestanden. Eventuele aanvullingen, wijzigingen en/of verbeteringen kunnen alleen door de NGS worden doorgevoerd.

Getracht is rechthebbenden van de gebruikte afbeeldingen te achterhalen. Zij die menen alsnog aanspraak te kunnen maken op zekere rechten, worden verzocht contact op te nemen met de NGS.

Inhoud Deel IV

Algemene technische informatie	9
4.1 Gemaal opzet.....	9
4.2 Aandrijfvorm	9
4.3 Stoom.....	10
4.3.1 Stoomvolume	13
4.3.2 Stoomsoorten.....	13
4.3.3 Warmte inhoud.....	14
4.4 Stoomketel	15
4.4.1 Definitie stoomketel.....	15
4.4.2 Inrichting stoomketel	15
4.4.3 Begrippen en definities.....	17
4.4.4 Warmte overdracht in de stoomketel	18
4.5 Soorten stoomketels	23
4.5.1 Onderscheid.....	23
4.5.2 Cornwall-ketel	26
4.5.3 Lancashire-ketel.....	28
4.5.4 Vlampiepketels	29
4.5.5 Waterpiepketels.....	39
4.5.6 Babcock & Wilcox sectieketel	40
4.6 Voedingswater voor stoomketels	43
4.6.1 Eisen ketel voedingswater	43
4.6.2 Verontreinigingen	44
4.7 Ketelvoedingwatersysteem	52
4.7.1 Injecteur	52
4.7.2 Zuigerpompen	53
4.7.3 Waaierpompen.....	59
4.8 Brandstoffen en verbranding.....	61
4.8.1 Brandstoffen, begrippen en definities.....	61
4.8.2 Vaste brandstoffen	61
4.8.3 Bepaling van de verbrandingswaarde.....	64

4.8.4	Vloeibare brandstoffen	66
4.8.5	Gasvormige brandstoffen	74
4.8.6	Verbranding	75
4.8.7	Benodigde hoeveelheid verbrandingslucht	78
4.8.8	Stoken met steenkool	81
4.8.9	Stoken met stookolie	93
4.9	Stookinrichting (vuurgang, vuurhaard en roosters)	95
4.9.1	Vuurgangen	95
4.9.2	Fabricage vuurgang	99
4.9.3	Vuurhaarden	100
4.9.4	Kolen-stookinrichting	101
4.9.5	Olie-stookinrichting	103
4.9.6	Stookinstallatie onderdelen	104
4.9.7	Luchtregister	112
4.9.8	Oliebranders	116
4.10	Schoorsteen en ketelbemetseling	120
4.10.1	Schoorsteen	120
4.10.2	Natuurlijke trek	120
4.10.3	Schoorsteenconstructie	123
4.10.4	Kunstmatige trek	125
4.10.5	Stoomketel bemetseling	126
4.10.6	Roetblazers	131
4.11	Appendages	134
4.11.1	Algemeen	134
4.11.2	Materialen voor appendages	134
4.11.3	Veiligheidstoestellen	137
4.11.4	Hoofdstoom en hulpstoomafsluiters	145
4.11.5	Peilglazen en peiltoestellen	148
4.11.6	Niveau-beveiliging	156
4.11.7	Manometer	157
4.11.8	Voedingswater-afsluiterklepkasten en -kraanklepkasten	160
4.11.9	Spui-inrichtingen	161

4.12	Materiaal voor stoomketels	167
4.12.1	Bereiding van ruwijzer uit ertsen	167
4.12.2	IJzerertsen	167
4.12.3	De hoogoven	168
4.12.4	Het ruwe ijzer	170
4.12.5	Bereiding van gietijzer en staal uit ruwijzer	172
4.12.6	Gietijzerbereiding	173
4.12.7	Staalbereiding	177
4.12.8	Staal voor constructie- machine- en apparatenbouw	181
4.12.9	Ketelmateriaal en vervaardiging van ketels	182
4.12.10	Eisen aan ketelstaal	183
4.12.11	Het keuren van stoomketelmateriaal	184
4.12.12	Bewerkingen van ketelplaat	192
4.12.13	Plaatverbindingen	195
4.12.14	Klinken	196
4.12.15	Lassen	197
4.12.16	Bevestigen van pijpen	203
4.12.17	Materiaalspanningen	207
4.12.18	Sterkte van een klinknaad	210
4.12.19	Plaatdikte van een geklonken romp	215
4.12.20	Plaatdikte van een gelaste romp	215
4.13	Vergunningen en beproevingen	219
4.13.1	Vergunning	221
4.13.2	Keuring en beproeving	226
4.14	Stoommachine	228
4.14.1	Soorten stoommachines	228
4.14.2	Begincondensatie en naverdamping meervoudige expansie	233
4.14.3	Inrichting en werking zuigerstoommachine	237
4.14.4	Excentriek	240
4.14.5	Stoomverdeling	243
4.14.6	De reguleur	259
4.14.7	Stoomcilinder en schuifspiegel	269

4.14.8	Schuifspiegel.....	280
4.14.9	Pakkingbus.....	282
4.14.10	Zuiger, zuigerstang en zuigerveren	288
4.14.11	Kruishoofd en drijfstang.....	297
4.14.12	Krukas	306
4.14.13	Fundatie en Frame	313
4.14.14	Lagers en lagervoeringen.....	318
4.14.15	Vliegwiel	342
4.14.16	Smeermiddelen	356
4.15	Arbeid en de bepaling ervan	374
4.15.1	Drukverloop in een stoomcilinder.....	374
4.15.2	Expansie en expansievoud	379
4.15.3	Compressie en compressievoud.....	384
4.15.4	Theoretisch P-V diagram	389
4.15.5	Indicateurdiagram	390
4.15.6	Indicateur	391
4.15.7	Het nemen van diagrammen.....	393
4.15.8	Berekenen van het machinevermogen	396
4.15.9	Interpretatie diagrammen.....	401
4.16	Condensorinstallaties.....	406
4.16.1	Vacuüm.....	406
4.16.2	Condensordruk.....	410
4.16.3	Inrichting van condensors	412
4.16.4	Injectie of mengcondensors	413
4.16.5	Oppervlaktecondensor	420
4.16.6	Condensor gebruik en onderhoud	425
4.16.7	Condensor circulatiewaterpomp.....	427
4.16.8	Behandeling wees en condensaat	428
4.16.9	Behandeling injectie- en circulatiewater.....	432
4.17	Overbrenging	434
4.17.1	Directe overbrenging.....	435
4.17.2	De indirecte overbrenging.....	442

4.18	Opvoerwerktuigen	472
4.18.1	Soorten opvoerwerktuigen	474
4.18.2	Natte pad.....	475
4.18.3	Zuigerpompen	482
4.18.4	Schepraderen.....	503
4.18.5	Vijzels.....	511
4.18.6	Stromingspompen	521
4.18.7	Vacuümsystemen.....	556
	Stoomejecteur	556
4.19	Eenheid voor eenheden en symbolen.....	565
4.19.1	Internationaal eenheden stelsel	566
4.20	Geraadpleegde bronnen en verantwoording illustraties.....	573
4.20.1	Geraadpleegde Bronnen.....	573
4.20.2	Verantwoording Illustraties.....	576
4.20.3	Websites	576
Bijlage 1	Vliegwieltberekening	577



Kenmerk

KB04ALG-JVR-V25-11-21

Algemene technische informatie

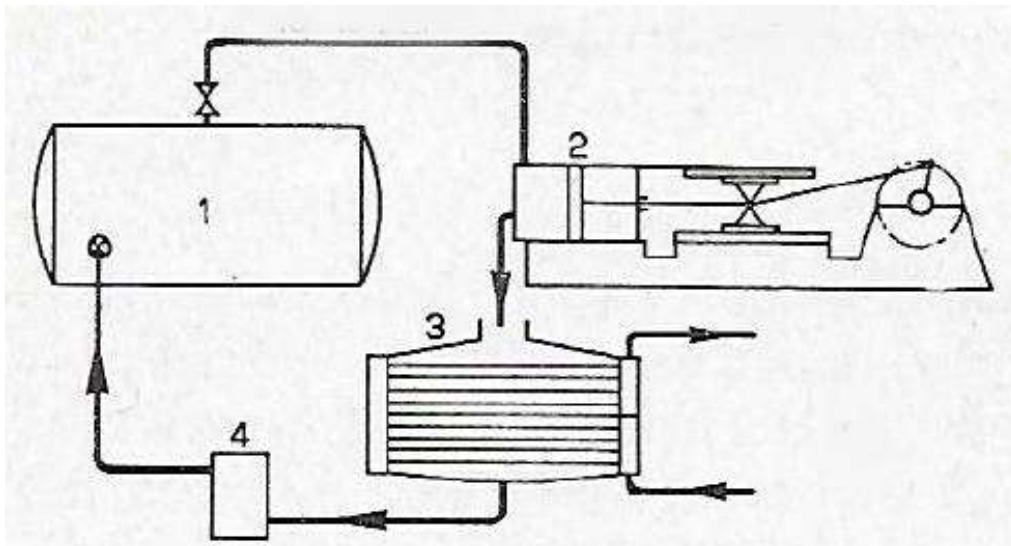
In dit deel van de leidraad wordt de gedetailleerde algemene technische informatie met betrekking tot de toegepaste energie voor de aandrijving, de aangewende brandstof, de soort aandrijving, de hulpwerktuigen, de overbrenging en de voorkomende opvoerwerktuigen beschreven. Behandeld worden de van belang zijnde theoretische grondslagen, de praktische uitgangspunten, de toe te passen materialen en de daaraan te stellen eisen. Voorts wordt ingegaan op de basale dan wel principiële bediening en het onderhoud van de benoemde installaties of onderdelen ervan.

4.1 Gemaal opzet

Een stoomgemaal bestaat meestal uit een door een zuigerstoommachine aangedreven opvoerwerktuig. De stoom voor de hoofdstoommachine en de hulpwerktuigen wordt bereid in een of meerdere meestal met steenkolen gestookte stoomketels. Het gemaal bemaalt een polder of boezem en slaat uit op een hoger gelegen watergang, een rivier of direct op zee.

4.2 Aandrijfvorm

Voor het verkrijgen van de draaiende en in sommige gevallen de heen- en weergaande beweging van het opvoerwerktuig en de energie om het water te verpompen is meer nodig dan alleen de hoofdstoommachine. Alle benodigde werktuigen, hulpwerktuigen en installatieonderdelen die samen het aandrijfproces in standhouden moeten in een bepaalde volgorde zijn geschakeld en goed op elkaar zijn afgestemd. Voor een stoomgemaal, ziet dit proces er als volgt uit.



Principe schema krachtbedrijf met zuigerstoommachine

1. Stoomketel 2. Stoommachine 3. Condensor 4. Ketelvoedingswaterpomp

4.3 Stoom

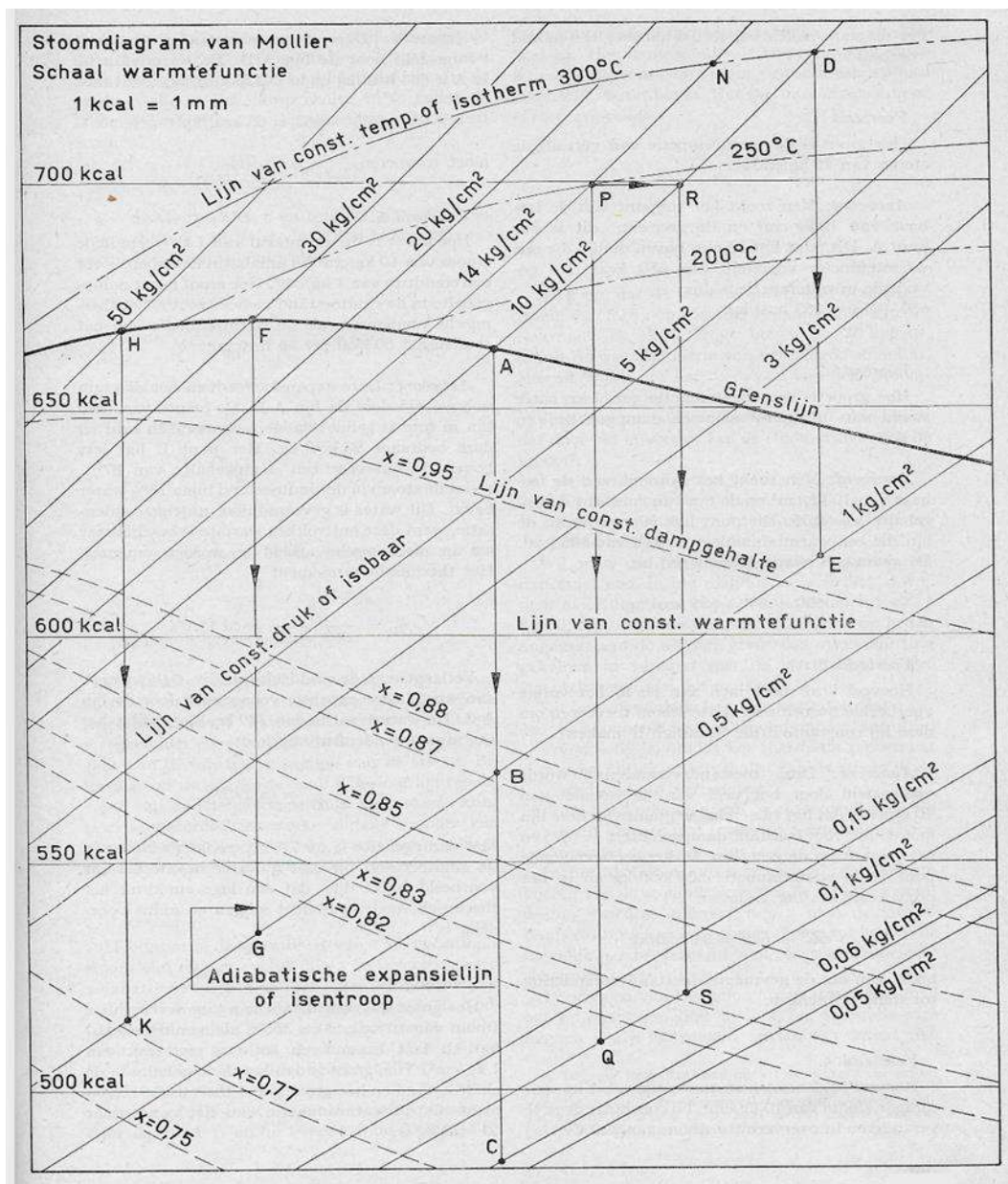
Stoom is de energiedrager en transportmiddel van warmte voor de stoommachine. De in de stoom opgeslagen energie wordt in de stoommachine omgezet in arbeid. Deze arbeid wordt bij een gemaal aangewend om polderwater te verpompen.

Stoom is de gasvormige aggregatietoestand van wateren wordt verkregen door water te verhitten of de druk boven het vloeistofoppervlak te verlagen. Onder atmosferische omstandigheden kookt water bij ongeveer 100 °C. Als men de druk verlaagt dan wel verhoogt zal dit bij respectievelijk een lagere dan wel een hogere temperatuur plaatsvinden. Wanneer water kookt, en bij welke temperatuur, is berekend dan wel proefondervindelijk vastgesteld en wordt cijfermatig tot achter de komma in zogeheten stoomtabellen aangegeven. Dezelfde waarden kunnen met behulp van gekleurde lijnen in een diagram weergegeven worden; het zogeheten Mollier diagram. Het aflezen van de waarden in een Mollier diagram is minder nauwkeurig vergeleken met de waarden in de stoomtabel en vereist bovendien enige oefening.

Ten onrechte wordt de benaming stoom gegeven aan een nevel van water zoals bijvoorbeeld de kleine zichtbare druppeltjes water boven een fluitketel. Echte stoom, ook wel waterdamp genoemd, is onzichtbaar en bovendien reukloos. Stoomlekkages kun je daarom het beste opsporen met een aan een steeltje bevestigd metalen spiegeltje. De uit het lek ontsnappende stoom condenseert dan op het koude spiegel- oppervlak en geeft zodoende aan waar het lek zit. Geoefende machinisten gebruiken hiervoor vaak, zij het niet altijd succesvol, de rug van hun blote hand.

1	2	3	4	5	6	7
	Druk in					
ata	lbs/□"	Stoomtem- peratuur °C	Volume in m³/kg	Gewicht in kg/m³	En-thal- pie kcal/kg	Verdampings- warmte totaal kcal/kg
0,1	1,42	45,5	14,95	0,067	617,0	571,6
0,2	2,84	59,7	7,80	0,128	623,1	563,5
0,3	4,27	68,9	5,33	0,188	626,6	558,2
0,4	5,69	75,4	4,07	0,246	629,5	554,1
0,5	7,11	80,9	3,30	0,303	631,6	550,8
0,6	8,53	85,6	2,78	0,359	633,4	548,0
0,7	9,96	89,4	2,41	0,415	634,9	545,5
0,8	11,38	93,0	2,13	0,470	636,2	543,2
0,9	12,80	96,2	1,90	0,525	637,4	541,2
1,0	14,2	99,1	1,725	0,58	638,5	539,4
2	28,4	119,6	0,902	1,11	645,8	525,9
3	42,7	132,9	0,617	1,62	650,3	516,9
4	56,9	142,9	0,471	2,12	653,4	508,8
5	71,1	151,1	0,382	2,62	655,8	503,7
6	85,3	158,1	0,321	3,11	657,8	498,5
7	99,6	164,2	0,278	3,60	659,4	493,8
8	113,8	169,6	0,245	4,08	660,8	589,5
9	128,0	174,5	0,219	4,57	662,0	485,6
10	142,2	179,0	0,198	5,05	663,0	481,8
11	156,5	182,3	0,181	5,53	663,9	478,3
12	170,7	187,1	0,166	6,01	664,7	475,0
13	184,9	190,7	0,154	6,49	665,4	471,9
14	199,1	194,1	0,143	6,97	666,0	468,9
15	213,3	197,3	0,134	7,45	666,6	466,0
16	227,6	200,4	0,126	7,92	667,1	463,2
17	241,8	203,3	0,119	8,40	667,5	460,4
18	256,0	206,1	0,113	8,89	667,9	457,8
19	270,2	208,8	0,107	9,37	668,2	455,2
20	284,5	211,4	0,102	9,85	668,5	452,7
25	355,5	222,9	0,081	12,26	669,4	440,9
30	426,7	232,8	0,068	14,70	669,7	430,2
35	497,8	241,4	0,058	17,18	669,5	420,1
40	568,9	249,2	0,051	19,69	669,0	410,8
45	639,9	256,2	0,045	22,25	668,2	401,7
50	711,1	262,7	0,040	24,85	667,3	393,1
60	853,3	274,3	0,033	30,21	665,0	376,6
70	995,5	284,5	0,028	35,78	662,1	361,2
80	1138	293,6	0,024	41,60	658,9	346,3
90	1280	301,9	0,021	47,71	655,1	331,5
100	1422	309,5	0,018	54,21	651,1	317,1

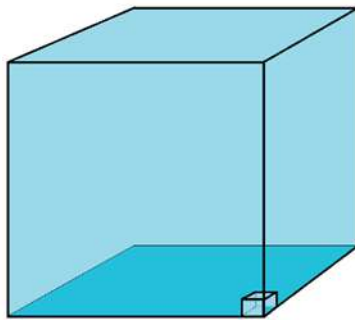
Stoomtabel volgens Dr. W Koch V.D.I. Wasserdampftafeln 1937



Mollierdiagram

4.3.1 Stoomvolume

Uit de stoomtabel kan worden afgeleid dat het volume van stoom gevormd uit één liter water (1 kg) bij atmosferische druk ongeveer 1.700 liter bedraagt. Dit betekent dat als er een lek ontstaat,



bijvoorbeeld in de vuurgang van de ketel, de hete waterinhoud van de stoomketel door de stoomdruk naar buiten wordt geperst en spontaan overgaat in stoom. De uitwerking en de gevolgen hiervan laten zich gemakkelijk raden en zijn de reden dat het in werking hebben van stoomketels in het algemeen en het waterhoudende gedeelte daarvan in het bijzonder, aan strenge regels is gebonden. Met behulp van de hieronder getoonde kubussen wordt het enorme verschil in volume van de stoom die is gevormd uit een liter water en het volume van de oorspronkelijke liter water, weergegeven..

Volume verhouding water -stoom

4.3.2 Stoomsoorten

Met betrekking tot stoom worden de volgende soorten onderscheiden:

Natte stoom

Natte stoom is stoom waarin kleine waterdeeltjes zweven. Deze soort stoom ontstaat in de stoomruimte van de ketel bij het opstoken. Indien natte stoom verhit wordt, dan zullen allereerst deze waterdeeltjes verdampen. Bij voldoende verwarming maar ook bij drukverlaging raakt deze stoom verzadigd. Natte stoom kan ook ontstaan bij het opkoken van de stoomketel en afkoeling in leidingsystemen. Ook in de stoommachine zijn er tijdens het arbeidsproces momenten dat de stoom condenseert of verdampt. Te natte stoom kan in een stoommachine leiden tot waterslag en dientengevolge ernstige schade.

Verzadigde stoom

Wanneer in een gesloten ruimte water en stoom met elkaar in evenwicht zijn noemt men de stoom verzadigd. De ruimte boven het wateroppervlak in de stoomketel bevat dan de maximaal mogelijke hoeveelheid stoomdeeltjes. De druk van de stoom wordt bepaald door de temperatuur van het water en de stoom. De druk is gelijk aan de maximale dampspanning welke bij die temperatuur hoort. Verzadigde stoom condenseert bij verlaging van de temperatuur of verhoging van de druk. Deze stoom is vanwege de zogenoemde snijdende werking ongeschikt voor het aandrijven van een stoomturbine, maar voldoet prima voor het aandrijven van een stoommachine of voor de overdracht van warmte.

Oververhitte stoom

Oververhitte stoom noemt men in de natuurkunde ook wel "Onverzadigde stoom". Om oververhitte stoom te maken moet er extra warmte aan de stoom worden toegevoegd. In een fluitketel kan dat niet, omdat daar alleen het water wordt verwarmd. De temperatuur van de gevormde stoom blijft bij de temperatuur die hoort bij de maximale dampspanning dus ongeveer 100 °C.

In een stoomketel gebeurt hetzelfde, echter de geproduceerde verzadigde stoom wordt eerst door een zogenoemde oververhitter geleid. De verzadigde stoom stijgt in temperatuur bij gelijkblijvende druk en wordt dan oververhitte stoom genoemd. Bij verlies van warmte, bijvoorbeeld in de transportleiding naar de stoommachine, zal deze stoom afkoelen zonder dat er direct minuscule waterdruppeltjes ontstaan. Een ander maar minstens zo belangrijk feit is dat de warmte-inhoud van oververhitte stoom groter is dan die van verzadigde stoom en daardoor meer energie per kg bevat.

4.3.3 Warmte inhoud

Om aan een stoominstallatie te kunnen rekenen of om bepaalde prestaties hiervan te kunnen inschatten is het belangrijk de warmte-inhoud of enthalpie van de toegepaste stoomsoort te kennen. Deze waarden kunnen in de stoomtabel worden opgezocht of uit het Mollier diagram worden gehaald. Als men niet over een tabel of diagram beschikt kan men met de formule van Regnault vrij nauwkeurig de warmte inhoud van verzadigde stoom berekenen. Deze formule luidt als volgt:

$$W_{\text{stoom}} = 606,5 + 0,305 \times t \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right]$$

W_{stoom} is de berekende warmte-inhoud of enthalpie uitgedrukt in kcal/kg van verzadigde stoom met een temperatuur van t graden Celsius. Passen we deze formule toe op bijvoorbeeld verzadigde stoom met een temperatuur van $194,1^\circ\text{C}$ dan is de uitkomst $665,7$ kcal/kg. De stoomtabel geeft hiervoor $666,0$ kcal/kg en een absolute stoomdruk van 14 kg/cm^2 . De druk die de manometer op de stoomketel aangeeft is altijd de overdruk ten opzichte van de atmosferische druk en bedraagt in dit geval 13 kg/cm^2 .

4.4 Stoomketel

4.4.1 Definitie stoomketel

Een stoomketel is in het algemeen een gesloten stalen vat, zodanig ingericht dat daarin door de toevoer van warmte, uit water, onder druk stoom ontwikkeld kan worden. De vorm van de stoomketel kan zeer verschillend zijn en is afhankelijk van de toegepaste soort brandstof of hete gassen, de wijze waarop de verbrandingsgassen worden doorgevoerd, de stoomproductiecapaciteit alsmede de druk en de temperatuur.

De stoomwet definieert de stoomketel als volgt:

Een stoomketel is een toestel, waarin water wordt verhit door vuur of hete gassen, zodanig dat het water in dat toestel een temperatuur kan bereiken, die hoger is dan 100 °C

De term 'hete gassen' in bovenstaande definitie is in deze leidraad niet aan de orde omdat voor zover bekend alle tot dusver bij gemalen toegepaste stoomketels direct gestookt zijn. Dit betekent dat de warmte in de ketel zelf wordt ontwikkeld.

4.4.2 Inrichting stoomketel

In het algemeen onderscheidt men in een stoomketel de volgende onderdelen.:

Waterruimte

De waterruimte is dat gedeelte van de stoomketel dat met water gevuld is en waar de uit de brandstof ontwikkelde warmte wordt overgedragen om stoom te vormen. Het water voorkomt dat de met de verbrandingsgassen in aanraking komende delen een te hoge temperatuur aannemen. Deze delen zullen des te beter gekoeld worden naarmate er een sterkere (natuurlijke) circulatie van het water in de ketel plaats vindt. De keteldelen moeten zowel water- als vuur- of rookgaszijdig schoon zijn om de warmteoverdracht niet te belemmeren en (plaatselijke) oververhitting te voorkomen. In dit verband noemen we roet, ketelsteen en eventueel met het ketelvoedingswater meegevoerde smeerolieresten.

Bij plotselinge sterke belastingwisseling en afhankelijk van de waterinhoud van de stoomketel kan het waterpeil snel stijgen of dalen. Een sterk toenemend stoomverbruik zorgt namelijk voor een drukdaling waardoor het aanwezige water sneller verdampt en het waterpeil daalt. Bij een sterk verminderde afname van de belasting vindt juist het omgekeerde plaats.

Stoomruimte

In de stoomruimte, het bovenste gedeelte van de stoomketel, verzamelen zich de in het water ontwikkelde dampbellen. De stoomruimte bevindt zich boven de waterruimte en heeft een zodanige afmeting dat enige waterpeil verandering zonder bezwaar kan worden toegelaten. Een te laag waterpeil brengt het gevaar mee van oververhitting van bepaalde keteldelen met als gevolg een ketelexplosie terwijl bij een te hoog peil, water met de stoom mee naar de stoommachine wordt gevoerd met als gevolg waterslag en daardoor machinebreuk.

Verwarmd oppervlak

Onder het verwarmd oppervlak, aangegeven met VO, wordt het aan de vuur- dan wel aan de gaszijde gemeten oppervlak van de ketel verstaan dat enerzijds wordt bestreken door de hete gassen en anderzijds door het water. Soms wordt over verwarmend oppervlak gesproken. Dit is het eveneens met VO aangeduide oppervlak maar dan waterzijde gemeten. Tussen het verwarmd oppervlak en het verwarmend oppervlak kan een verschil in grootte bestaan van wel 10 % -vergelijk dat met het binnen- en buitenoppervlak van een dikwandige buis- met als gevolg dat hierover misverstand kan ontstaan.

Vuurhaard

De vuurhaard is de ruimte waarin de voor de stoomvorming benodigde warmte wordt ontwikkeld door middel van verbranding van een daartoe geschikte brandstof. De vuurhaard hoeft zich niet noodzakelijkerwijs binnen de contour van de ketel te bevinden, echter voor zover bekend is dat bij stoominstallaties voor polderbemaling wel altijd het geval geweest. De buiten de contour variant wordt daarom hier verder buiten beschouwing gelaten. De vorm en de grootte van de vuurhaard zijn afhankelijk van het keteltype, de ketelcapaciteit, de soort brandstof en de wijze waarop de brandstof wordt verstoekt. In de vuurhaard wordt een volkomen verbranding nagestreefd.

Roosters

In met vaste brandstoffen gestookte stoomketels zoals toegepast bij de polderbemaling wordt in de vuurgang een rooster aangebracht. Op dit rooster wordt de brandstof verbrand. De hiervoor benodigde lucht wordt in een bepaalde verhouding onder en boven het rooster toegelaten. Deze zogenoemde onder- en bovenlucht zorgt niet alleen voor de verbranding maar ook voor de afkoeling van de gietijzeren roosterstaven. Onder het roosteroppervlak (RO) wordt het totale werkzame oppervlak verstaan wat zich bij vaste roosters uitstrekt van de voorkant, het zogenoemde doodbed, tot de vuurbrug. Onder het zogenoemde vrije roosteroppervlak wordt de som van de luchtspleten tussen de roosterstaven verstaan; dit wordt uitgedrukt in procenten van het RO. De breedte van de luchtspleten wordt bepaald door de kwaliteit en de soort te verstoken brandstof. Voor bijvoorbeeld magere, niet bakkende fijne steenkool moet het vrije oppervlak klein zijn. Bij stoomketels waar een vloeibare brandstof wordt verstoekt, bijvoorbeeld stookolie, vervalt het rooster en wordt in het stookfront op de plaats van de vuurdeur een brander geplaatst. Aangetekend moet worden dat voor het verstoken van vaste brandstof (steenkolen) ontworpen stoomketels niet zonder meer kunnen worden omgebouwd voor het gebruik van een vloeibare brandstof.

Oververhitter

In de oververhitter wordt met behulp van de in de vuurhaard ontwikkelde hete gassen de in de stoomruimte gegenereerde verzadigde stoom bij gelijkblijvende druk tot de gewenste oververhittingstemperatuur verhit. De oververhitter bestaat uit een buizenstelsel dat in de rookgasstroom van de ketel is geplaatst. Het spreekt voor zich dat hoe verder de oververhitter van de vuurhaard is verwijderd des te lager de te bereiken oververhittingstemperatuur is. Bij stoomketels voor stoominstallaties van gemalen is de oververhitter meestal tegen het achterfront geplaatst of bovenop de ketel. Gezorgd moet worden dat de oververhitter pijpen niet verbranden. Dit wordt bereikt door stoom af te nemen bijvoorbeeld door het af te blazen. Ook, en dat is de meest

voorkomende situatie bij gemaal-installaties, door de rookgasstroom om te leiden. Om voornoemde reden moet de veiligheid-voorziening van de oververhitter eerder afblazen dan die van de stoomruimte in de ketel.

Appendages

Onder de appendages worden die onderdelen verstaan die het (veilig) gebruik van de ketel mogelijk moeten maken. Hieronder vallen de peilglazen, de drukbeveiliging (veiligheidstoestellen) en de laagwaterbeveiliging (Blackfluit). Deze onderdelen zullen in deze leidraad elk apart behandeld worden waarbij de specifieke functie nader zal worden toegelicht

4.4.3 Begrippen en definities

Om aan stoominstallaties te kunnen rekenen dan wel deze onderling qua prestaties te kunnen vergelijken is in de loop der tijd een aantal begrippen ontwikkeld. De volgende veel gebruikte begrippen worden hierna nader aangeduid en toegelicht.

Ketelbelasting

Onder ketelbelasting wordt de hoeveelheid stoom verstaan die een ketel per uur produceert. Men drukt deze belasting uit in kilogrammen per uur bij kleine- en in tonnen per uur bij grote stoomketels, dus (kg/h of t/h).

Specifieke ketelbelasting

Omdat de ontwikkeling van stoom sterk afhankelijk is van het verwarmd oppervlak (VO) wordt hiermee een relatie gelegd. We noemen dit de specifieke ketelbelasting die we als volgt schrijven (kg/m² VO. h).

Vuurhaardbelasting

Onder de vuurhaardbelasting wordt de totaal in de vuurhaard ontwikkelde energie verstaan, bestaande uit de warmteontwikkeling uit de brandstof en uit de warmte-inhoud van de aan de vuurhaard toegevoerde verbrandingslucht. Zij wordt uitgedrukt in (kcal/m³).

Roosterbelasting

Onder roosterbelasting wordt het aantal kilogrammen steenkool verstaan dat per vierkante meter rooster oppervlak (RO) per uur verstookt kan worden. De roosterbelasting uitgedrukt in kg/m².VO.h is afhankelijk van de hoeveelheid verbrandingslucht die men kan toevoeren, de brandstofsoort en de kwaliteit daarvan (de stookwaarde), alsmede de toegestane maximale vuurhaardbelasting. Afhankelijk van de steenkool-soort is bij natuurlijke trek een roosterbelasting te bereiken van 80 - 120 kg/m².VO.h.

Verdampingsvoud

Onder het verdampingsvoud ook wel verdampingscijfer genoemd, verstaat men het aantal kg stoom van een bepaalde druk en temperatuur dat per kg brandstof uit het beschikbare ketelvoedingswater wordt gevormd. Het verdampingsvoud is een onbenoemd getal en zou als (kg/kg) kunnen worden geschreven.

Het verdampingsvoud is groter naarmate de stookwaarde van de toegepaste brandstof en het rendement van de stoomketel groter is. Het verdampingsvoud is bij gebruik van steenkool 8 à 10 kg/kg en bij gebruik van stookolie 11 à 14 kg/kg.

De energie, dus het aantal calorieën of tegenwoordig Joules, dat nodig is voor het vormen van 1 kg stoom van de vereiste druk en temperatuur uit het beschikbare ketelvoedingswater is zeer verschillend. Dit komt doordat de warmte inhoud (enthalpie) van zowel het ketelvoedingswater als de stoom verschillend kunnen zijn. Om toch de prestaties van stoomketels onderling te kunnen vergelijken wordt het verdampingsvoud in kg standaardstoom of normaalstoom weergegeven. De warmte-inhoud van 1 kg van de te beschouwen stoom wordt dan gedeeld door die van 1 kg normaalstoom dat wil zeggen 1 kg verzadigde stoom van 100 °C gevormd uit water van 0 °C. De enthalpie van normaalstoom is 638,9 kcal/kg.

$$\text{Normaalstoom [kg]} = \frac{\text{Enthalpie te beschouwen stoom} \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right]}{\text{Enthalpie normaal stoom} \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right]}$$

Voor de vorming van bijvoorbeeld oververhitte stoom van 310 °C met een druk van 14 kg/cm² en een ketelvoedingswater temperatuur van 50 °C is 680,7 kcal/kg nodig.

De hoeveelheid stoom uit dit voorbeeld komt dus overeen met $680,7 / 638,9 = 1,07$ kg normaal stoom. De uitkomst is het getal waarmee het verdampingsvoud van de individuele stoomketel vermenigvuldigd moet worden om deze met andere stoomketels te kunnen vergelijken.

4.4.4 Warmte overdracht in de stoomketel

De warmte die vrijkomt bij de verbranding van brandstof kan op het water, de stoom of de lucht in een ketelinstallatie worden overgedragen door convectie, geleiding en door straling. In een ketelinstallatie gaat warmteoverdracht door geleiding steeds gepaard met die door convectie of stroming.

Convectie

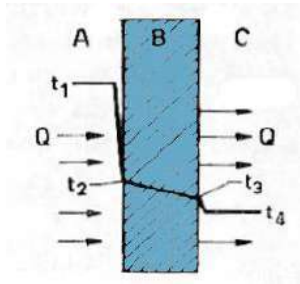
Warmte wordt overgedragen door convectie wanneer een (stof)deeltje (lucht, rookgas, water) waaraan een hoeveelheid warmte afgegeven is, zich naar een gebied begeeft met een lagere temperatuur en daar zijn warmte aan een andere stof afgeeft. Zo zal een rookgasdeeltje zijn warmte uit de vuurhaard meevoeren naar de wand van bijvoorbeeld de vuurgang, vlam- of waterpijp. De temperatuur van het ontvangende keteldeel zal daardoor stijgen.

Geleiding

Warmte wordt overgedragen door geleiding wanneer de stofdeeltjes van eenzelfde vast lichaam hun warmte aan elkaar doorgeven of wanneer twee lichamen met elkaar in aanraking zijn. De stofdeeltjes blijven hierbij aan hun plaats gebonden. Bij vloeistoffen en gassen treedt altijd verplaatsing op van de stofdeeltjes zodat van overdracht door geleiding geen sprake is. Bovendien geleiden vloeistoffen en gassen, uitgezonderd kwik, de warmte slecht.

Convectie en geleiding

Stel dat van een stof, die zich in ruimte A bevindt, een hoeveelheid warmte Q kcal/h door een wand



B overgedragen moet worden aan de stof in de ruimte C. We nemen hierbij aan dat er een constante stroming van warmte in één richting plaats vindt, zodat het aantal calorieën, dat per vierkante meter aan de ene zijde door de wand wordt opgenomen, gelijk is aan het aantal calorieën dat door de wand aan de andere zijde wordt afgegeven. Dit proces kan worden onderscheiden in de volgende drie fasen.

1^{ste} fase Warmteoverdracht van de stof in de ruimte A op de wand B

In de ruimte A heerst een temperatuur van t_1 °C. De warmte moet door de stof in A op de wand B worden overgedragen waarvan het oppervlak aan die zijde een temperatuur heeft van t_2 °C. Het aantal kilocalorieën Q dat per m^2 overgaat is recht evenredig met het temperatuursverschil tussen de stof in ruimte A en die van het wandoppervlak. Verder is deze afhankelijk van:

- Het materiaal waaruit de wand bestaat.
- De gesteldheid van het oppervlak (ruw, glad, vlak of gegolfd).
- De wijze waarop de warmte afgeevende stof beweegt (rechtlijnige (laminair) of wervelende (turbulente) stroming).

Deze factoren vat men samen in de grootheid α_1 die de warmte-overgangscoëfficiënt wordt genoemd. Deze factor wordt uitgedrukt in kcal/ m^2 ·°C·h. De hoeveelheid warmte die wordt overgedragen bedraagt dus:

$$Q = \alpha_1 (t_1 - t_2) \text{ [kcal}/m^2 \cdot h]$$

Het temperatuursverschil is:

$$t_1 - t_2 = \frac{Q}{\alpha_1} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

2^e fase Warmteoverdracht door geleiding in de wand

De weerstand, die de wand biedt tegen het transport van de warmte, is recht evenredig met de dikte. Het geleidingsvermogen van de wand is dus recht evenredig met 1/dikte van het toegepaste wandmateriaal.

Rood koper geleidt warmte beter dan staal, terwijl poreuze stoffen zoals roet en ketelsteen, de warmte slecht geleiden. Het geleidingsvermogen van vloeistoffen, denk daarbij aan smeerolie die met het ketelwater kan worden meegevoerd, en gassen is eveneens zeer gering.

Het aantal kilocalorieën dat per m^2 oppervlak per m wanddikte, per graad temperatuursverschil en per uur door een vaste stof wordt geleid noemen we de warmte-geleidingscoëfficiënt. We duiden deze grootheid aan met λ met de notatie kcal/ m^2 ·°C·h.

Is t_3 de temperatuur van het warmte afgevend oppervlak van de wand in graden Celsius en δ de dikte in meters dan geldt:

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} (t_2 - t_3) \text{ [kcal/m}^2 \cdot \text{h]}$$

Zodat het temperatuursverschil is:

$$t_2 - t_3 = \frac{Q}{\frac{\lambda}{\delta}} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

3^e fase Warmteoverdracht van de wand B op de stof in de ruimte C

Het proces in deze fase komt overeen met die van de eerste fase met dien verstande dat er nu warmte overdracht in omgekeerde richting plaatsvindt namelijk van de wand naar een stof. Noemen we de warmte- overgangscoefficiënt hier α_2 dan geldt, indien de wand evenveel warmte afgeeft, als hij heeft opgenomen:

$$Q = \alpha_2 (t_3 - t_4) \text{ [kcal/m}^2 \cdot \text{h]}$$

Zodat hier het temperatuursverschil is:

$$t_3 - t_4 = \frac{Q}{\alpha_2} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Tellen we de hiervoor afgeleide formules voor de temperatuursverschillen bij elkaar op dan ontstaat de volgende vergelijking:

$$t_1 - t_4 = Q \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\frac{\lambda}{\delta}} + \frac{1}{\alpha_2} \right) \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Of anders geschreven:

$$t_1 - t_4 = Q \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right) \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Stelt men nu

$$\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} = \frac{1}{k}$$

Dan is

$$t_1 - t_4 = Q \frac{1}{k} [^{\circ}\text{C}]$$

En

$$Q = k (t_1 - t_4) [\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h}]$$

In deze formule is k de totale warmte doorgangscoefficiënt, die het aantal kcal dat per uur weergeeft, per m² oppervlak en per °C temperatuursverschil van een stof met hoge temperatuur, bijvoorbeeld rookgas, via een scheidingswand overgaat op een stof met een lagere temperatuur, bijvoorbeeld water stoom of lucht. De breuk 1/k stelt dan de som van de weerstanden voor die de warmte doorgang ontmoet.

Bezien we de grootte van de factoren die k bepalen dan blijkt α₁ van het rookgas op het verwarmd oppervlak (VO) groter naarmate:

- De rookgassnelheid groter is.
- De rookgastemperatuur hoger is.
- De diameter en de steek van de eventueel toegepaste vlampijpen kleiner is.
- De plaatsing van de pijpen (waterpijpketels), zigzag patroon in plaats van recht boven elkaar, of een gegolfde vuurgang die sterkere wervelingen veroorzaakt hebben eveneens een vergrotend effect.

Bij benadering is de warmte doorgangscoefficiënt (α)

α van rookgas op vlampijpen	20	kcal/m ² .°C.h
α van rookgas op zigzag geplaatste 1¼" waterpijpen (gassnelheid 8m/sec)	50	kcal/m ² .°C.h
α van condenserende stoom op condensorpijpen (25mm)	4000	kcal/m ² .°C.h
α van stilstaand water in pijpen	2000	kcal/m ² .°C.h
α van een wand op niet kokend water (afhankelijk van de circulatie snelheid)	3000...5000	kcal/m ² .°C.h

Bij benadering is de warmte geleidingscoëfficiënt (λ)

λ van staal	50	kcal/m.°C.h
λ van koper	320	kcal/m.°C.h
λ van ketelsteen	0,06...3	kcal/m.°C.h
λ van asbest	0,19	kcal/m.°C.h
λ van slakkenwol	0,05	kcal/m.°C.h
λ van roet	0,1	kcal/m.°C.h
λ van olie	0,1	kcal/m.°C.h
λ van water	0,54	kcal/m.°C.h
λ van ijs	0,79	kcal/m.°C.h
λ van waterdamp	0,01405	kcal/m.°C.h
λ van lucht	0,019	kcal/m.°C.h

Uit de bovenstaande tabel kan worden opgemaakt dat de geleidingscoëfficiënten van roet en olie ongeveer even groot zijn en in hoge mate de warmtedoorgang belemmeren. In het geval van roet betekent dit dat de energie niet voor de stoomopwekking wordt benut. Olie belemmert de warmte afgifte aan het water wat betekent dat ter plaatse van de oliefilm het ketelmateriaal oververhit raakt hetgeen tot een ketelexplosie kan leiden. Ketelsteen bezit dezelfde onhebbelijkheid als smeerolie met daarenboven het risico dat delen plotseling los kunnen raken en dat door het relatief koude water een schokgolf teweeg kan worden gebracht die eveneens een ketelexplosie tot gevolg kan hebben. Het spreekt voor zich dat niet alleen uit economisch oogpunt maar ook voor een veilig stoombedrijf uiterste zorg aan de behandeling van het ketelwater moet worden besteed.

Straling

Warmte overdracht door straling vindt plaats door tussenkomst van de ether, een gewichtsloze denkbeeldige stof die de ruimte tussen de moleculen van alle stoffen opvult. De moleculen van een stof, bijvoorbeeld de gloeiende kolenlaag of hete rookgassen, veroorzaken een verstoring van de evenwichtstoestand van de ether. Een deel van het arbeidsvermogen van de moleculen van de stof wordt aan de ether afgegeven. Deze energie wordt overgedragen door de ether op een lichaam dat zich op afstand van de kolenlaag of rookgassen bevindt waardoor dit lichaam vervolgens een temperatuurverhoging ondergaat. Een en ander is te vergelijken met de zon die de aarde verwarmt. In de vuurhaard zal de warmte in hoofdzaak door straling worden overgedragen, verderop in de ketel, richting de schoorsteen zal de warmte meer door convectie en geleiding aan het water worden meegegeven.

In een vuurhaard geven niet alleen een groot aantal witgloeiende kooldeeltjes, maar ook de bij de verbranding gevormde waterdamp en kooldioxide (CO₂) warmte af. Ongekoelde delen, zoals metselwerk, kaatsen de warmte bijna geheel terug naar de vlammen en naar het V.O. Hierdoor daalt de temperatuur van de gasmassa.

De hoeveelheid warmte die door straling wordt overgebracht is recht evenredig met het verschil van de vierde machten van de absolute temperaturen T₁ en T₂ van respectievelijk de stralende gassen en het bestraalde lichaam. Verder is zij afhankelijk van de aard van het bestraalde oppervlak. Gladde of gepolijste oppervlakken stralen de warmte minder goed uit en absorberen de warmtestralen ook minder goed dan doffe, ruwe oppervlakken. Zo zal een nikkelen deel van een kolenkachel minder warmte uitstralen dan de zwarte schacht in zijn onmiddellijke nabijheid en zal daarom een hogere temperatuur hebben. In de formule is daarom de stralingsconstante c ingevoerd.

$$Q_s = c \left\{ \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right\} [\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h}]$$

De stralingsconstante c varieert van 4,95 voor een absoluut dofzwart lichaam tot 1,33 voor een gepolijst stuk staal. Metselwerk heeft bijvoorbeeld een stralingsconstante van 4,6.

4.5 Soorten stoomketels

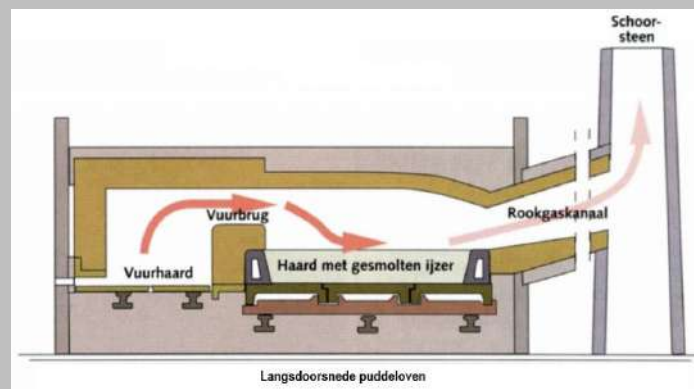
Er bestaat een groot aantal soorten stoomketels. Zij onderscheiden zich hoofdzakelijk door de wijze waarop de warmteoverdracht plaatsvindt. Bij de stoominstallaties van polder- en boezemgemalen in Nederland is slechts een beperkt aantal soorten toegepast. De eerste ontwikkeling van de stoomketel heeft in Engeland plaatsgevonden. Een aantal soorten zijn daarom naar de streek genoemd waar de ketel is ontwikkeld en werd toegepast.

4.5.1 Onderscheid

Omstreeks 1725 is men begonnen stoomketels uit ijzeren platen samen te stellen. De stoomketels van voor deze datum waren qua vorm afgeleid van brouwerijketels. De stoomketels werden in de tijd van Newcomen (1663-1729) vaak uit het gemakkelijk te bewerken maar weinig sterke koper samengesteld. In dit soort vaten werd slechts water gekookt en was er nauwelijks sprake van enige stoomdruk zodat er minder makkelijk explosies konden plaatsvinden. Van ijzer dat uit de hoogovens kwam kon men in die tijd, onder andere door ontkolen, de eigenschappen enigszins naar eigen hand zetten. Van staal, zoals we ijzer tegenwoordig meestal noemen, en zeker van gelegerde staalsoorten was in die tijd nog geen sprake. Ook ontbrak het aan inzicht dan wel kennis van het krachten spel dat zich afspeelde in een stoomvat onder druk en de hoge temperatuur van de stoom. Ook ontbrak de kennis wat betreft de eigenschappen van de in de vuurgang verstoekte brandstof.

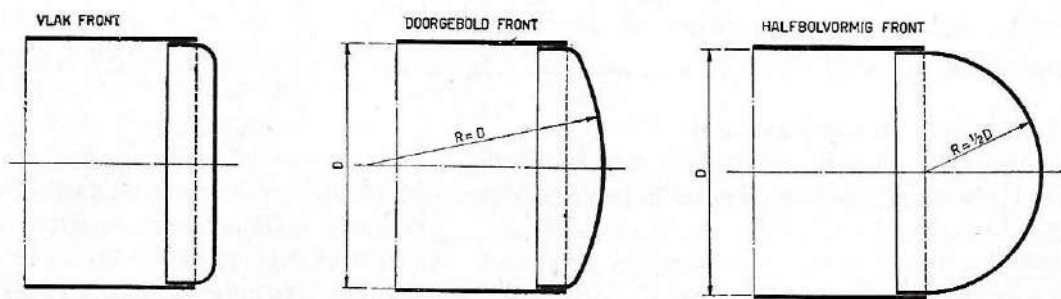
Smeedijzer

Het oudste verwerkingsproces om van ruwijzer smeedijzer of staal te maken wordt puddelen genoemd, afgeleid van de bewegingen die met een grote haak in de zogenoemde puddeloven gemaakt moeten worden.



Het product dat met dit proces wordt vervaardigd noemt men daarom ook wel puddelijzer. Henry Cort vond in 1784 het dry-puddeling uit waarbij het ruwijzer tijdens het ontkolingsproces in een deegachtige toestand werd gehouden. Later werd in 1839 door Joseph Hall het wet- puddeling-procedé ontwikkeld waarbij het ruwijzer eerst werd gesmolten en vervolgens ontkoold. Bij het natte proces werd aan het ruwijzer ook schroot toegevoegd en later ook hamerslag (ijzerschilfers die vrijkomen bij het walsen en smeden van ijzer). Door deze toevoeging werd het puddelproces heftiger en verliep het sneller en efficiënter. Er kon zodoende meer worden geproduceerd.

Het duurde echter tot einde van de 18^e eeuw voor de stoomketel zijn huidige en lang toegepaste gestalte kreeg. Het was de Engelsman Richard Trevithick (1771-1833) uit Cornwall die zich onder andere met het verbeteren van het rendement van de stoommachine bezig hield en streefde naar hogere stoomdrukken. Hij ontwierp hiervoor een lange cilindervormig stoomketel met eivormige fronten.



Soorten ketelfronten

Deze in 1812 (volgens diverse bronnen zelfs al in 1803 of 1806) ontwikkelde stoomketel,) was samengesteld uit smeedijzeren platen en gietijzeren onderdelen. Het vuur van deze stoomketels, waaruit hij later de overbekende Cornisch- of Cornwall-ketel met één vuurgang ontwikkelde, lag onder de ketel. De stoomdruk van deze tot 1844 immens populaire stoomketel bedroeg 4 kg/cm². In voornoemd jaar namen Sir William Fairbairn (1789-1878) en John Hetherington uit Manchester een patent op een eveneens cilindrische stoomketel maar dan met twee vuurgangen: de Lancashire-ketel. Van alle stoomketels werd in de 19^e en begin 20^e eeuw de cilindrische vuurgangketel verreweg het meest toegepast vanwege de robuuste en betrekkelijk simpele constructie en het bedieningsgemak. Omstreeks 1850 waren bijvoorbeeld in de toen al sterk geïndustrialiseerde graafschappen Lancashire en Yorkshire niet minder dan 1.200 van dit type ketels in gebruik. Zowel de Cornwall als de Lancashire stoomketel zijn veel toegepast bij polderbemaalingsinstallaties en tot op de dag van vandaag zelfs naast elkaar nog in gebruik, zoals bij het gemaal de Tuut in Appeltern. . Nederlandse fabrikanten van dit type stoomketels waren de Gebr. Stork, Backer & Rueb en Werkspoor respectievelijk gevestigd te Hengelo, Breda en Amsterdam.

Uit de vuurgangketels ontstonden verschillende types met grote kookbuizen, de zogenoemde Galloway buizen, in de vuurhaard met als doel de circulatie en daarmee de stoomproductie te bevorderen. Ketels van dit type werden onder andere bij de firma Edwards in Parijs gemaakt en stonden bekend als 'Franse ketels'. Voor de spoorwegen werd de vlampijpketel met vuurkist ontworpen. De geestelijk vader van de vlampijpketel is de Fransman Marc Seguin (1786 – 1875), De ontwikkeling en de praktische toepassing van deze vinding uit 1827 staat echter op naam van het Engelse duo Henry Booth (1700 - 1845) en George Stephenson (1781 - 1848).

Voor schepen, waar met de ruimte gewoekerd moest worden, ontstond omstreeks 1890 de vuurgang-vlampijpketel met de vlampijpen boven de vuurgang waardoor de rookgassen in de richting van de stoker werden geleid. Deze ketels waren weliswaar voorzien van een isolerende schil maar hadden geen ommetseling meer nodig voor isolatie en het langs de ketelromp leiden van de rookgassen.

Naast deze ketels waar de rookgassen door vuurgangen en vlampijpen werden gevoerd ontstond reeds in 1847 de waterpijpketel. De pionier van dit type ketel, waarbij het water in plaats van de rookgassen door de pijpen stroomt, is de Duitser dr. Ernst Alban (1791-1856).. Voor zijn hogedruk stoommachine ontwierp hij een ketel met hellende waterpijpen en een stoomdruk van maar liefst 40 kg/cm².

Er bestaat een scala aan fabrikanten die zelf of in licentie waterpijpketels bouwden, respectievelijk lieten bouwen. Een zeer bekend en in de industrie en de scheepvaart toegepast type en fabricaat was de Babcock & Wilcox sectieketel. Dit door Stork in licentie gebouwde type is bij het Stoomgemaal Halfweg toegepast en daar nog steeds te bewonderen.

Omdat het ondoenlijk is om in het kader van deze leidraad alle soorten en types stoomketels te behandelen zullen de omschrijvingen beperkt blijven tot de in de loop der tijd bij bemalingsinstallaties toegepaste soorten en types.

Vuurgangketels

Bij vuurgangketels wordt de door middel van verbranding opgewekte energie door de vuurgang en de romp van de ketel aan het water overgedragen. Voor de overdracht van de warmte aan de romp is een ommetseling van de ketelinstallatie nodig. De verbranding van de brandstof bij dit type ketels vindt plaats in het eerste deel van de zogenoemde vuurgang.

Vuurgang-vlampijpketels

De vuurgang-vlampijpketels maken naast de vuurgang gebruik van vlampijpen om de warmte over te dragen. Deze vlampijpen zijn achter of boven de vuurgang aangebracht. Ook zijn er installaties waar de vlampijpen in een aparte drum zijn aangebracht. Ook bij deze ketels vindt de verbranding plaats in het eerste deel van de vuurgang. De oudere keteltypes zijn meestal nog van een ommetseling voorzien. De relatief jongere keteluitvoeringen hebben een omhulling van plaatstaal met daartussen isolatiemateriaal.

Vuurgang-vlampijp- waterpijpketels

Bij de vuurgang vlampijp- waterpijpketels zijn in de vlamkast een aantal waterpijpen aangebracht met als primair doel de watercirculatie in het achterste deel van de ketel te bevorderen. Dit in het begin van de 20^e eeuw op de markt gebrachte type, meestal als Schotse ketel, (zie 1.5.4) werd uitsluitend van een uit plaatstaal en isolatiemateriaal bestaande omhulling voorzien, dus niet meer ingemetseld. De warmteoverdracht voor de stoomvorming vindt uitsluitend plaats via de vuurgang vlam- en waterpijpen.

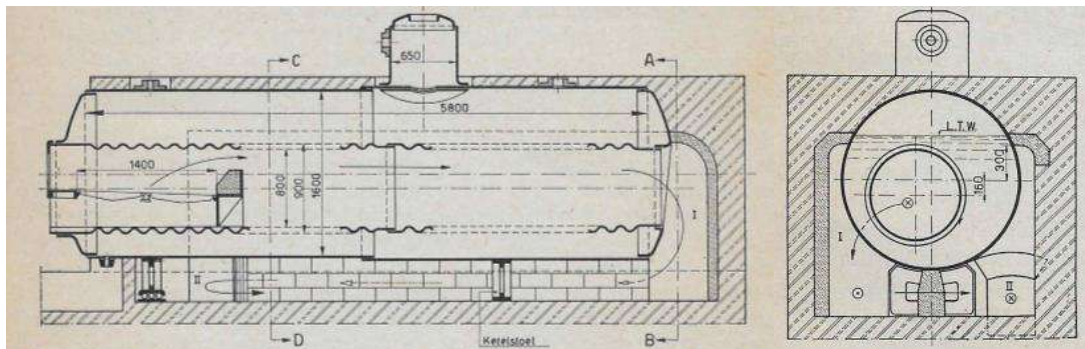
Waterpijpketels

Bij waterpijpketels wordt de door middel van verbranding opgewekte energie door een groot aantal waterpijpen aan het water overgedragen.

Bij waterpijpketels vindt de verbranding plaats in de speciaal daarvoor ingerichte gemetselde vuurhaard. In Nederland kennen we slechts één voorbeeld van een waterpijpketeltoepassing. Dit is bij het stoomgemaal Halfweg waar omstreeks 1932 de Lancashire vuurgangketels, door twee door Stork in licentie gebouwde Babcock & Wilcox sectie- ketels zijn vervangen.

4.5.2 Cornwall-ketel

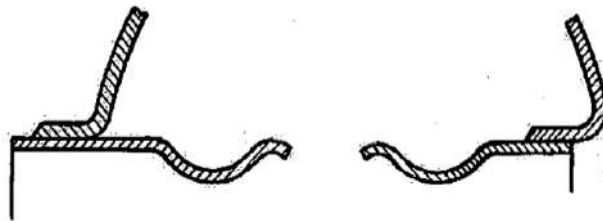
De in het verleden veel toegepaste Cornwall-ketel zoals wij die heden ten dage nog tegenkomen in poldergemalen bestaat uit een horizontale cilindrische romp waarin één vuurgang is geplaatst; aan beide zijden afgesloten met een half-bolvormig front. De asymmetrisch geplaatste vuurgang reikt van het voorfront, de stookplaats, tot het achterfront van deze relatief lange en slanke ketel.



Langs en dwarsdoorsnede Cornwall stoomketel

De grootte van het VO van deze ketels bedraagt tussen de 20 - 80 m². De rompdiameter, als de lengte van de ketel er in wordt betrokken, bepaalt de uiteindelijke waterinhoud van de ketel. Deze wordt afgeleid van het VO en bedraagt een kwart van de vierkantswortel uit het verwarmd oppervlak ($D \sim 0,25 \sqrt{VO}$) dus tussen de 1,30 - 2,20 m. De romp is 4 tot 8 m lang en bestaat in de regel uit een oneven aantal aan elkaar geklonken ringen. De halfbolle fronten welke aan de uiteinden van de ringen zijn geklonken, hebben een kromtestraal ter grootte van vijf kwart van de rompdiameter ($R = 1,25 D$). De kromtestraal van de fronten bij de overgang naar het cilindrische gedeelte mag in verband met scheurvorming, welke kan ontstaan tijdens de fabricage, niet kleiner of gelijk zijn dan één tiende van de rompdiameter ($R \leq 0,1 D$). De kleinste diameter van de aan deze fronten geklonken (gegolfde) vuurgang in de ketel bedraagt ongeveer de helft van de rompdiameter ($d = 0,5 D$).

De verbinding met de vuurgang bij geklonken ketels komt tot stand door felsranden die aan het voorfront naar buiten en bij het achterfront naar binnen zijn gebogen. Op deze wijze kan het vuurraam waarop de roosters liggen eenvoudig worden aangebracht, echter de klinknaad ter plaatse kan men maar aan één zijde koken (zie 1.1.14). Verder heeft deze constructiewijze als gevolg dat er een nauwe opening ontstaat waarin zich vuil verzamelt dat daar aantasting van het ketelmateriaal veroorzaakt. Aan deze plek moet daarom bij ketelinspecties extra aandacht worden besteed.



Bevestiging vuurgang aan voorfront en achterfront

Aan deze plek moet daarom bij ketelinspecties extra aandacht worden besteed.

Het midden van de vuurgang bij Cornwall-ketels plaatst men op een afstand van $0,1 D$ naast en onder de hartlijn van de romp om de circulatie te bevorderen. Het laagste waterpeil in de ketel ligt overeenkomstig het stoombesluit tenminste 10 cm boven het hoogste punt van het verwarmde oppervlak, de vuurgang of de romp. De hoogte van de stoomruimte is maximaal $0,35 D - 10 \text{ cm}$ en bedraagt bij de eerder genoemde rompdiameters slechts 35 - 65 cm.

De stoomketel is meestal voorzien van een zogeheten stoomdom waarop de hoofdstoomafsluiter is geplaatst. De afstand tot de waterspiegel wordt hiermee vergroot waardoor er minder makkelijk waterdruppels worden meegesleurd. Omdat de stoomdom een verzwakking van de ketelromp betekent moet deze ter plaatse worden versterkt. Dit is de reden dat jongere versies van dit keteltype van een zogenoemde binnenstoompijp zijn voorzien waardoor, vanwege de kleinere diameter hiervan, de romp minder wordt verzwakt. Deze pijp is aan de bovenzijde van brede zaagsneden voorzien waardoor er minder makkelijk waterdruppels met de stoom kunnen worden meegenomen. In de bovenzijde van de stoomdom wordt ook het mangatdeksel aangebracht. Dit ellipsvormige deksel heeft een voorgeschreven minimale afmeting van 300 x 400 mm en dient om de ketel waterzijdig te kunnen inspecteren. De ellipsvorm van het deksel zorgt er voor dat deze van binnen uit kan worden aangebracht en de stoomdruk het deksel tegen de zitting drukt. Mangat deksels worden uit een vlakke plaat gemaakt of in een gegolfde vorm geperst volgens het patent Mac Neil. Een volgens dit patent vervaardigde deksel is minder zwaar en daardoor makkelijker te hanteren bij (de)montagewerkzaamheden.

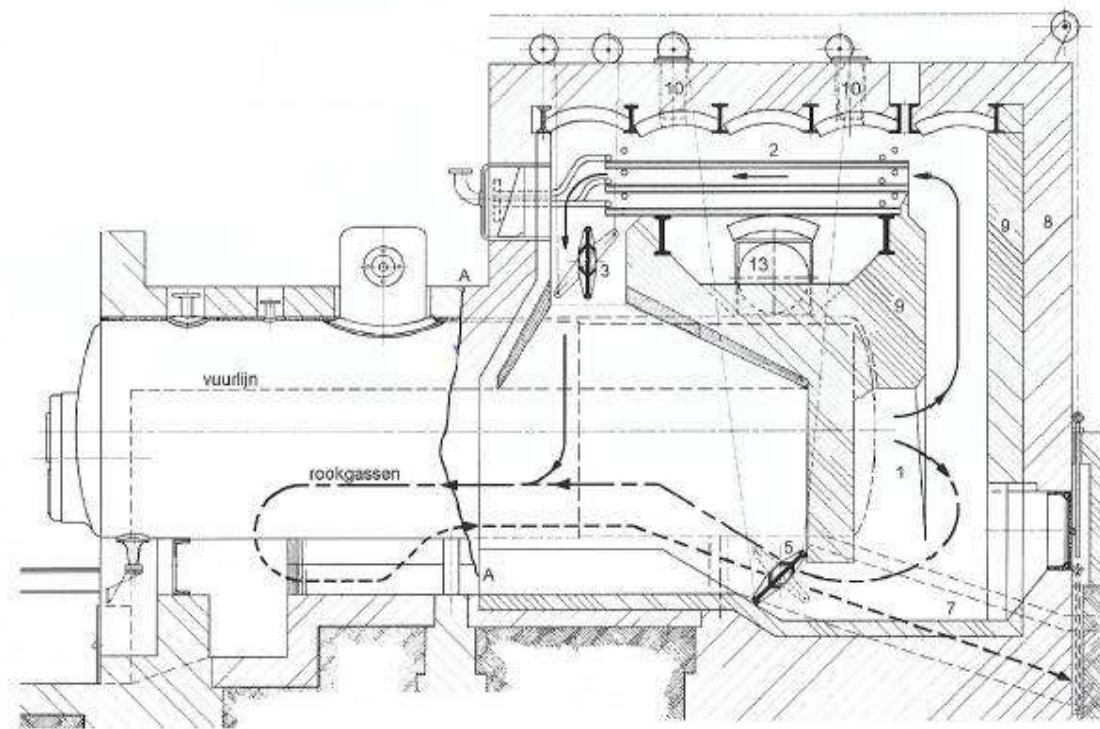
De ketel wordt opgelegd op gietijzeren stoelen op een zodanige wijze dat er voldoende doortocht is voor de rookgassen en inspectie werkzaamheden. De uitzetting van de romp wordt opgevangen door de voorste stoelen, dus aan de stookzijde, van rollen te voorzien. De achterzijde van de ketel die verbonden is met de gemetselde rookkanalen blijft bij het uitzetten op zijn plaats waardoor een gasdichte aansluiting is gegarandeerd.

Op het vuurraam in de vuurgang zijn gietijzeren roosters geplaatst. Boven het vuur en over een korte afstand daarachter vindt de warmteoverdracht hoofdzakelijk plaats door straling en convectie, in het verdere deel door geleiding, convectie en enige straling.

De verbrandingstemperatuur van de steenkool bedraagt ongeveer 1200 - 1450 °C. De rookgassen verlaten de vuurgang met een temperatuur van ongeveer 500 - 600 °C. en gaan vervolgens langs de buitenzijde van de romp en de ommetseling om verder warmte af te geven.

Het eerste rookkanaal, waarin de gassen naar de voorzijde van de ketel stromen ligt aan de zijde waar de vuurgang het dichtst bij de romp ligt. Het water tussen de vuurgang en de romp wordt hier aan twee zijden verwarmd waardoor een krachtige omhoog gerichte stroming ontstaat en er meer warmte per tijdseenheid wordt overgedragen. In het tweede kanaal stromen de rookgassen naar achteren en bereiken via de rookschuif en het gemetselde rookkanaal uiteindelijk de schoorsteen. De rookgassen zijn dan afgekoeld tot een temperatuur van ongeveer 350 - 400 °C.

Bij de toepassing van een oververhitter wordt het rookkanalenstelsel, naast de reguliere rookschuif naar de schoorsteen, van kleppen voorzien en zodanig ingericht dat de rookgassen geheel of gedeeltelijk via de oververhitter kunnen worden omgeleid. Met de kleppen wordt de temperatuur van de stoom geregeld, maar ook als er geen stoom wordt afgenomen, en er dus onvoldoende koeling plaats vindt van de pijpen, worden deze hiermee behoed tegen oververhitting.

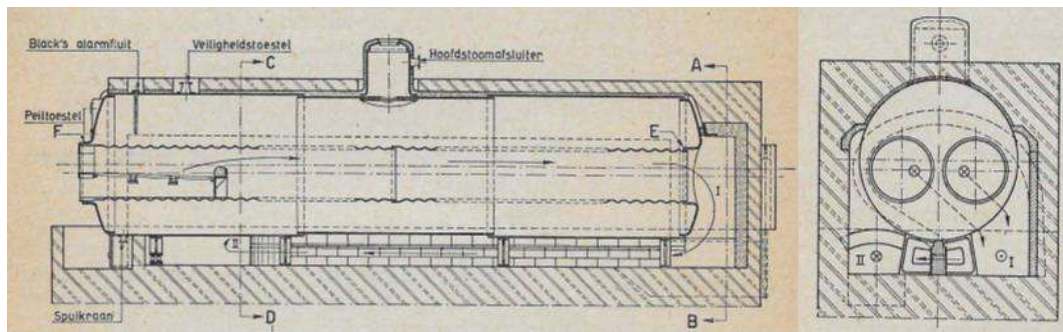


Langsdoorsnede Cornwall-ketel met oververhitter

4.5.3 Lancashire-ketel

De Lancashire-ketel vertoont veel overeenkomsten met de Cornwall-ketel met dien verstande dat dit type ketel in plaats van één, twee vuurgangen heeft.

Met deze twee symmetrisch geplaatste vuurgangen wordt een aanzienlijk groter verwarmd oppervlak gecreëerd en neemt de ketelcapaciteit evenredig toe. Dit laatste betekent dat met een veel kleiner vloeroppervlak en navenant kleiner bouwwerk kan worden volstaan.



Langs en dwarsdoorsnede Lancashire stoomketel

De grootte van het VO van deze ketels bedraagt tussen de 60 - 140 m². De rompdiameter bij dit type ketel is $D = 0,24 \sqrt{VO}$ voor de kleinste tot $D = 0,21 \sqrt{VO}$ voor de grootste afmetingen dus 1,80 - 2,50 m. De grootste diameter van de vuurgangen is $d = 0,5 D - 0,25$ m, oftewel 0,65 - 1,15 m. De hartafstand van de vuurgangen ligt op $d + 0,20$ m. De horizontale hartlijn van de vuurgangen ligt 0,1 D - 70 mm onder de hartlijn van de romp. De ruimte tussen de twee vuurgangen- 20 cm- is te nauw om iemand te laten passeren ten behoeve van bijvoorbeeld inspectie of onderhoud. Het voorfront is daarom aan de onderzijde voorzien van een tweede mangat.

De hoogte van de stoomruimte bedraagt 0,65 - 0,75 m en is daarmee iets groter dan die van de Cornwall-ketel. De in de twee vuurgangen ontwikkelde rookgassen gaan door afzonderlijke kanalen naar de voorkant van de ketel en komen daar bij elkaar. Vervolgens gaan de rookgasstromen gezamenlijk onder de ketel door via de rookgasschuif naar de schoorsteen. In situaties waar het gemeenschappelijke kanaal niet onder de ketel kan worden aangelegd worden de gasstromen bij het verlaten van de vuurgang direct gebundeld en langs de zijkanten van de ketel geleid. Een bijkomstig voordeel daarbij is dat de kanalen groter en daardoor beter toegankelijk zijn voor inspectie en onderhoud. De doortocht van de kanalen bedraagt 25 - 50 % van het roosteroppervlak (RO).

Evenals bij de Cornwall-ketel moet ook bij de Lancashire-ketel in geval van toepassing van een oververhitter het rookkanalenstelsel hiervoor zijn ingericht en van kleppen zijn voorzien om de temperatuur van de oververhitte stoom te kunnen regelen dan wel het buizenstelsel geheel van de rookgasstroom af te kunnen sluiten om oververhitting te voorkomen.

4.5.4 Vlampijpketels

Als het VO, dat gevormd wordt door cilindrische vlakken met grote diameter zoals de vuurgang en de romp van de ketel, grotendeels vervangen wordt door vlampijpen dan krijgt men:

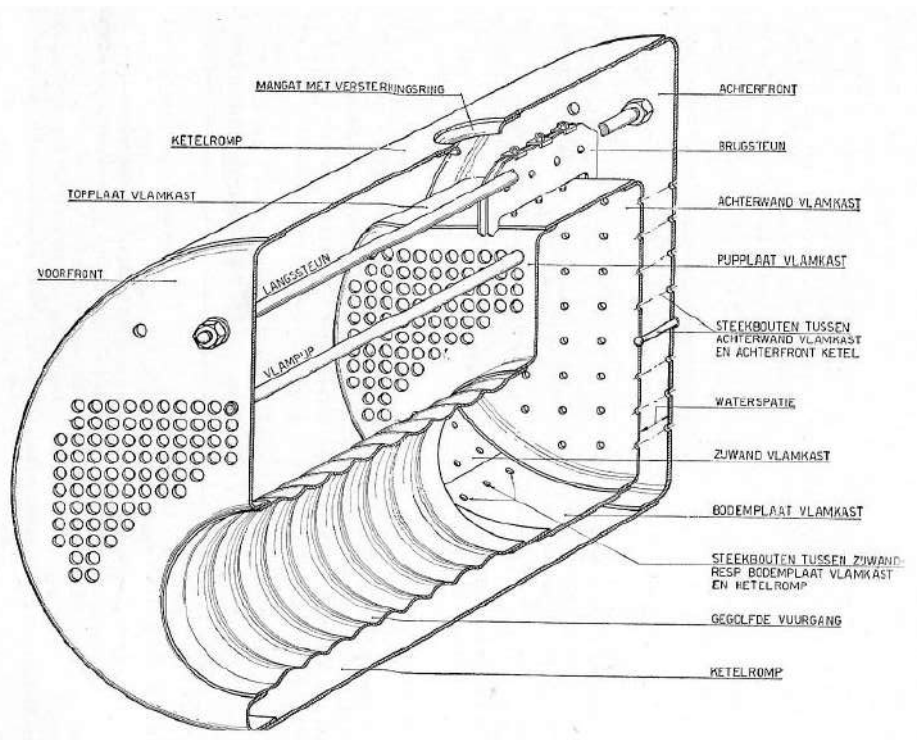
- Een grotere warmteoverdracht per m² VO
- Een kleinere ketel omdat het VO gevormd door pijpen aanzienlijk minder ruimte inneemt.

Ter illustratie: van een gegolfde vuurgang van 1 m inwendige diameter is het oppervlak per meter lengte $3,6 \text{ m}^2$. ($3,14 \times 1 \times 1,15$). In 1 m^3 kan men ongeveer 81 pijpen met een lengte van 1 m en inwendige diameter van 70 mm plaatsen. Deze pijpen vertegenwoordigen een oppervlak van 18 m^2 ($3,14 \times 0,07 \times 1$) hetgeen 5 keer zoveel is vergeleken met de gegolfde vuurgang.

- Een lagere eindtemperatuur van de rookgassen waardoor het rendement toeneemt c.q. de brandstofkosten dalen.
- Een ketel zonder gemetselde rookkanalen waardoor de gewichtsbelasting en de plaatsruimte afnemen. Per vierkante meter vloeroppervlak levert een Cornwall ketel ongeveer 25, de Lancashire ketel met zijn twee vuurgangen ongeveer 45 en de vlampijpketel tussen de 80 en de 200 kg stoom
- Een ketel met een goede circulatie hetgeen de tijd van opstoken verkort

Schotse ketels

De bezwaren van een groot ruimte beslag, lange opstooktijd en matig rendement die tegen Cornwall- en Lancashire- stoomketels kunnen worden aangevoerd hebben geleid tot de constructie van ketels waarvan een groot deel van het VO bestaat uit vlampijpen. De hete rookgassen worden niet aan de buitenkant van de ketelrump maar door vlampijpen gevoerd. Ketels waar deze vlampijpen boven de vuurgang zijn geplaatst worden met Schotse ketel aangeduid; dit is afgeleid van het patroon waarin de pijpen zijn geplaatst en wat doet denken aan de Schotse ruit van een kilt.

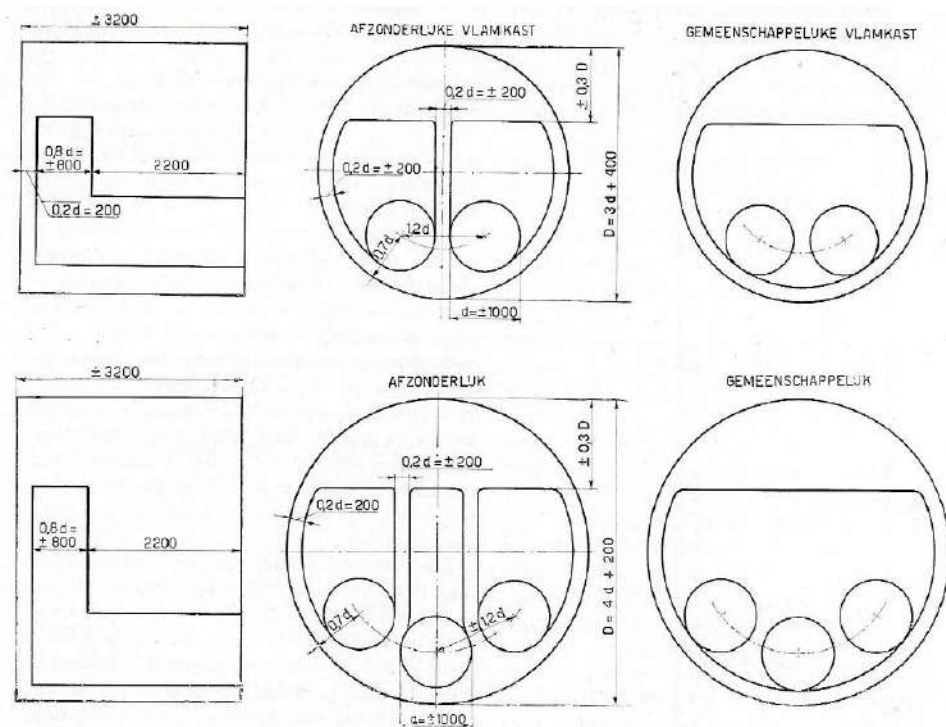


Geklonken Schotse ketel met een vuurgang

In de figuur op de voorgaand bladzijde is een zogenoemde tweetreks Schotse ketel weergegeven met één vuurgang en zonder oververhitter.

De Schotse ketel is voornamelijk ontwikkeld voor de scheepvaart vanwege de uiterst compacte bouw. Zoals te doen gebruikelijk werden bij bemalingsinstallaties van de goede ervaringen die elders met machines en installaties waren opgedaan gebruik gemaakt, dus ook van dit keteltype. Het in 1920 gestichte ir D.F. Woudagemaal te Lemmer is sinds 1955 uitgerust met vier door Werkspoor geleverde ketels van dit type. De stoomketels van dit gemaal zijn hier indertijd geplaatst ter vervanging van de zes twee drums ketels waarbij de vlampijpen in de bovenste drum zijn geplaatst: de zogenoemde Pied Boef ketels.

De Schotse ketel, waarvan een (groot) aantal varianten bestaan, bestaat uit een betrekkelijk korte romp van grote middellijn met één, twee of voor een nog grotere capaciteit, zelfs drie vuurgangen, elk voorzien van een vlamkast. Boven de vuurgang zijn tussen het voorfront van de stoomketel en de vlamkast de vlampijpen aangebracht.

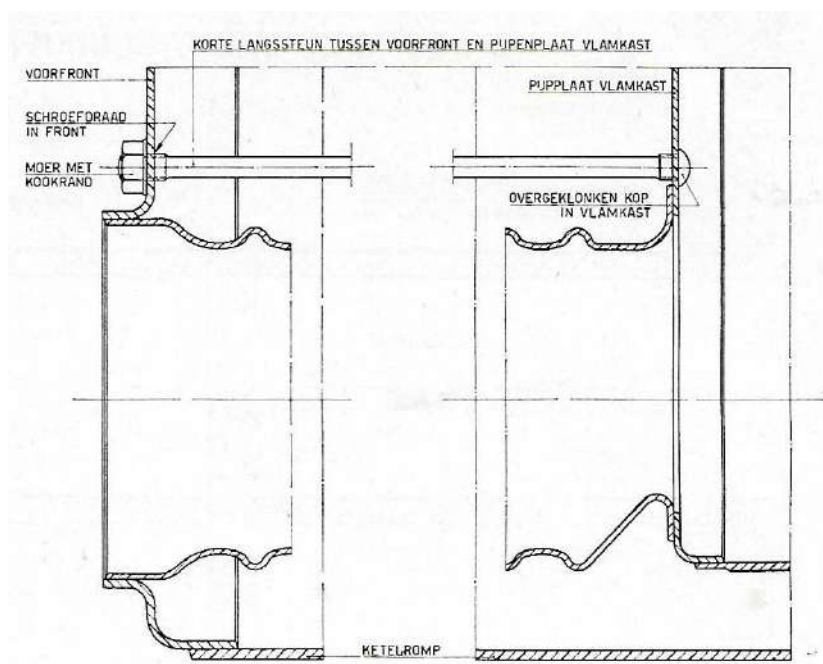


Schotse ketel met twee of drie vuurgangen en gemeenschappelijke of afzonderlijke vlamkast

De vlamkast heeft een rechthoekige langsdoorsnede en volgt in dwarsdoorsnede de contouren van de waterspiegel, de romp van de ketel of de er naast gelegen vlamkast als er sprake is van meerdere vuurgangen. De vlampijpen vormen ongeveer 80 % van het VO. Zij zijn recht boven elkaar geplaatst met 25 tot 30 mm tussenruimte zodat de grote hoeveelheid op de vuurgang gevormde stoom (ongeveer $120 \text{ kg/m}^2/\text{h}$) er tussendoor op kan stijgen. De ruimte tussen twee pijpenbundels en tussen een pijpenbundel en de romp moet groot genoeg zijn om een volwassen persoon te kunnen laten passeren voor inspectie en onderhoudswerkzaamheden.

De vlamkast dient niet alleen als verbindingkanaal tussen de vuurgang en de vlampijpen, maar ook als verbrandingskamer voor de uit de brandstoflaag ontwijkende brandbare gassen. Bij meerdere vuurgangen zijn deze elk met een afzonderlijke of één gemeenschappelijke vlamkast uitgevoerd.

De manier waarop de vuurgang aan het voorfront en aan de vlamkast is bevestigd is in onderstaande figuur aangegeven.



Bevestiging vuurgang aan voorfront en vlamkast

Evenals bij de vuurgangbevestiging van de Cornwall en de Lancashire stoomketel moet bij inspecties en onderhoud zorg worden besteed aan de mogelijke vervuiling, het schoonmaken en de algehele toestand van de slecht bereikbare aansluitingen van de vuurgang aan het front en aan de vlamkast.

De wijze van luchttoevoer (natuurlijk of door kunstmatige trek) is van invloed op de grootte van het rooster en die van het VO bij een bepaalde stoomproductie. Bij natuurlijke trek is de roosterbelasting ongeveer 70 kg/m²RO/ h en is het VO ongeveer 30 keer zo groot als het RO. De roosterbelasting bij kunstmatige trek bedraagt ongeveer 120 kg/m²RO/h en is het VO 42 keer groter dan het RO.

De diameter van de vlampijpen bij Schotse ketels zonder oververhitter en natuurlijke trek bedraagt 3" - 3½". Bij kunstmatige trek waar de gasweerstand op mechanische wijze wordt overwonnen worden doorgaans pijpen met een diameter van 2½" - 3" toegepast. Ook in de lengte van de pijpen wordt onderscheid gemaakt. Bij natuurlijke trek wordt een pijplengte van 30 keer de vlampijpdiameter aan gehouden dus ongeveer 2,30 - 2,70 m.

Bij kunstmatige trek kiest men voor een pijplengte van 40 keer de vlampijpdiameter en komt men uit op een lengte die varieert tussen de 2,50 - 3,00 m.

Het feit dat men de vlampijpen boven de vuurgang plaatst, is de oorzaak, dat dit type stoomketel een geringe lengte heeft (2,80 - 3,50 m) doch een vrij grote diameter. Daardoor wordt het aantal m² VO en ook de stoomproductie per m² grondoppervlak aanmerkelijk groter dan van de Cornwall en de Lancashire stoomketels. De waterinhoud van een Schotse ketel is ongeveer 100 kg/m² VO. Dit is iets minder dan die van een Lancashire-ketel.

Onderhoud

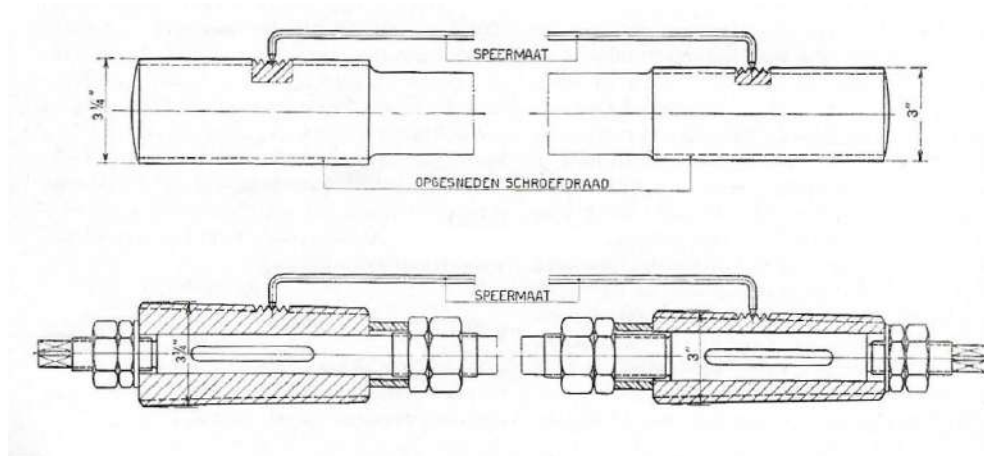
De compact samengestelde Schotse ketel heeft als gevolg dat verschillende onderdelen slecht of in het geheel niet voor reiniging en onderhoud toegankelijk zijn. Waar in het verleden bij bepaalde tankketeltypes het mechanisch verwijderen van ketelsteen (bikken) nog aan de orde was kan dat niet of slechts ten dele bij de relatief modernere Schotse ketels. Dit maakt het noodzakelijk dat de uiterste zorg aan de ketelwaterbehandeling moet worden besteed om de vorming van ketelsteen te voorkomen. Mocht zich onverhoopt toch ketelsteenvorming hebben voorgedaan dan kan dit alleen verwijderd worden door de ketel te zuren. Hierbij wordt de ketel geheel opgevuld met verdund citroen- zwavel- of salpeterzuur. De inhoud wordt met behulp van een speciale pomp net zo lang rond gepompt tot alle ketelsteen door het zuur is opgelost. Na het verwijderen van het zuur met de daarin opgeloste ketelsteen wordt de ketel inwendig met schoon water gespoeld met daaraan toegevoegd een alkali (base) om de achtergebleven zuurresten te neutraliseren.

Steunen

Schotse ketels worden met vlakke ketelfronten uitgerust waardoor zowel de vuurgang als het grote aantal vlampijpen eenvoudiger kunnen worden aangebracht. Door de druk in de ketel willen deze fronten echter bol gaan staan. De vlakke en ook enkele van de cilindrische wanden moeten daarom gesteund worden. Dit geschiedt met de hierna te bespreken steekbouten, langssteunen, steunpijpen, brugsteunen en verdubbelingsplaten.

Langssteunen

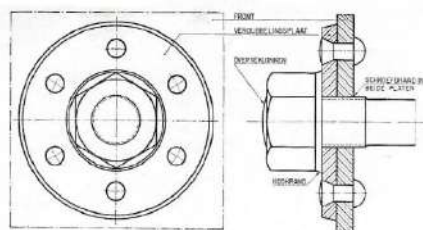
De fronten, althans het deel dat door de stoomruimte begrensd wordt, worden aan elkaar verbonden door zware stalen stangen die van front tot front lopen evenwijdig aan de lengte-as van de romp. De van schroefdraad voorziene stangen worden bij geklonken ketels vaak in zowel het plaatmateriaal van de fronten als in de bij behorende verdubbelingsplaten geschroefd.



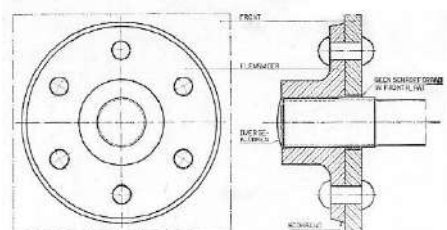
Langssteun en bijbehorende schroefdraadtappen met speermaat.

De steunen worden dan eerst van schroefdraad voorzien waarna met een verlengde tap, waarvan de schroefdraad is onderbroken, gelijktijdig de schroefdraad in zowel het voor- als achterfront wordt getapt. De steek van de schroefdraad wordt met behulp van een speermaat van de steun overgenomen en overgebracht op de twee verstelbare tapdelen vóór men de schroefdraad in het front en de verdubbelingsplaat aanbrengt. Bij vervanging van een steun moet men in omgekeerde volgorde te werk gaan danwel ook de verdubbelingsplaat vervangen.

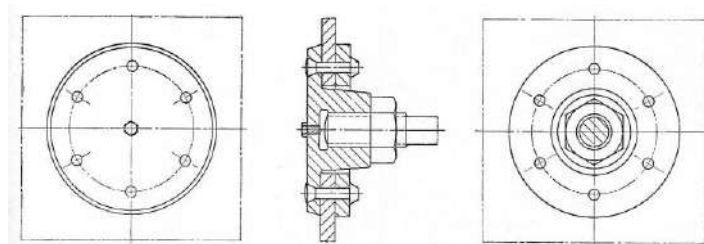
Soms, zoals hier onder is aangegeven, worden de krachten alleen via de schroefdraad in de speciale verdubbelingsplaten op de fronten overgebracht. Ook zijn er ketelfabrikanten die gebruik maken van doorlopende gaten in het front en moeren met een borst die na het bevestigen worden gekookt. Het grote voordeel van deze laatste methode is dat het lastige op de juiste steek tappen van de schroefdraad komt te vervallen en de ruimte tussen de steun en het gat in de frontplaat geheel wordt afgesloten.



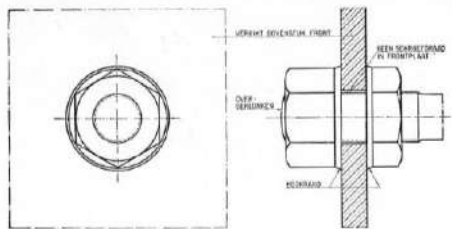
Schroefdraad in front- en verdubbelingsplaat



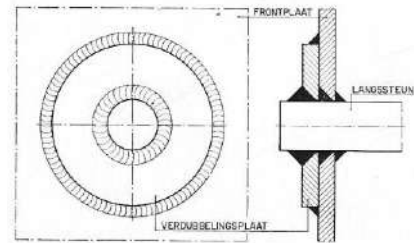
Alleen schroefdraad in verdubbelingsplaat



Verbinding met blind gat en schroefdraad in verdubbelingsplaat



Zonder verdubbelingsplaat en schroefdraad

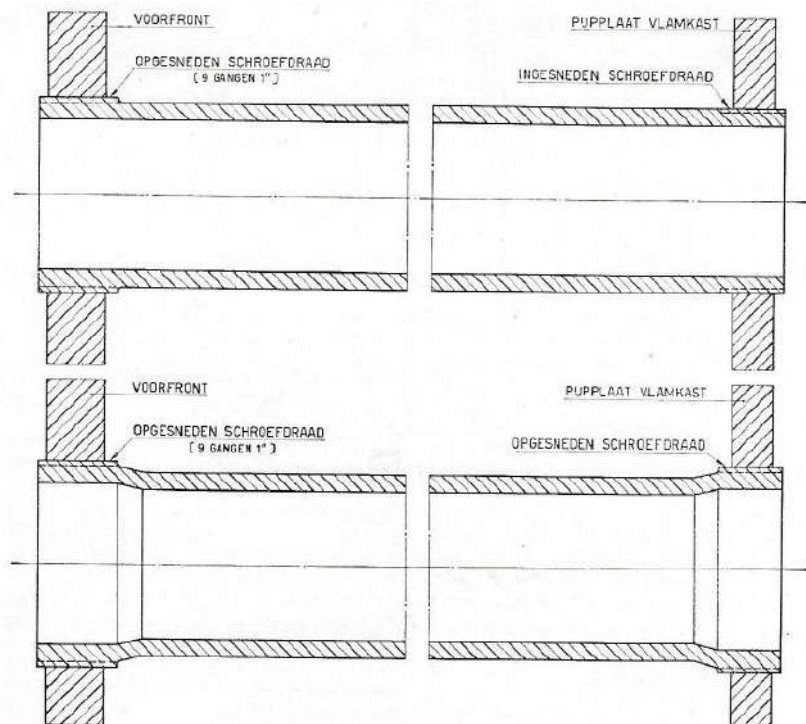


Gelaste verbinding met verdubbelingsplaat

Bij gelaste ketels past men een verdubbelingsplaat toe die met de steun en het front door middel van lasnaden is verbonden, een en ander zoals in de bovenstaande afbeelding is aangegeven. Bij vervanging van de steun moet zowel de verdubbelingsplaat als de langssteun zelf door middel van slijpen en of gutsen worden weggenomen.

Steunpijpen

Het vlakke voorfront en de pijpplaat van de vlamkast worden eveneens gesteund door deze onderling te verbinden. Alhoewel het vlak waarop de keteldruk wordt uitgeoefend door het grote aantal vlampijpen verkleind wordt is het afsteunen noodzakelijk omdat de gerolde vlampijpen bij de hoge temperatuur en druk in bedrijfstoestand, niet voldoende zijn om de krachten tussen de vlamkast en het voorfront op te nemen. Men doet dit door middel van zogenoemde steunpijpen.

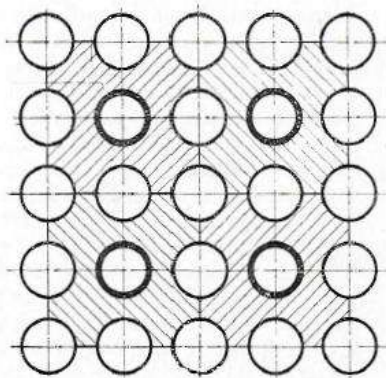


Steunpijpen met op- en ingesneden schroefdraad

Deze steunpijpen zoals in bovenstaande figuur zijn aangegeven hebben een grotere wanddikte dan de normale vlampijpen en zijn ter plaatse van het voorfront al of niet getrompt en van op- of ingesneden schroefdraad voorzien.

De uitwendige diameter van de pijp ter plaatse van de vlamkast is kleiner dan die bij het voorfront van de ketel. Het aanbrengen is daardoor eenvoudiger, want de pijp wordt vanaf het voorfront door het grootste gat geschoven en daarna gelijktijdig in de beide platen geschroefd.

Na het inschroeven van de pijpen worden ze gerold zodat er aan beide zijden van de front- en de vlamkastplaat een borst wordt gevormd. Door het uitrollen wordt een stoomdichte verbinding



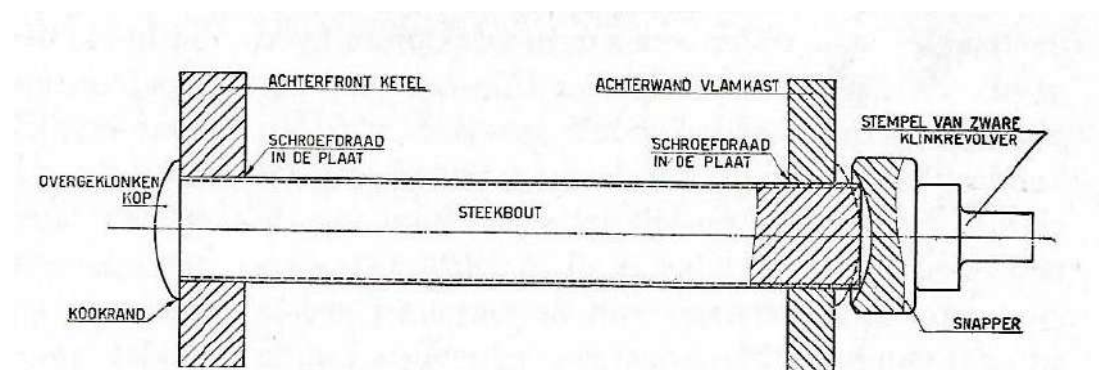
verkregen en wordt voorkomen dat in belaste toestand de pijp uit de plaat wordt getrokken.

In de figuur hiernaast wordt doormiddel van de arcering aangegeven welk deel van de pijpplaat door één steunpijp gesteund wordt. Verder zien we dat, om de andere pijp een steunpijp wordt geplaatst, waardoor het aantal steunpijpen ongeveer 1/3 is van het totaal aantal toegepaste pijpen.

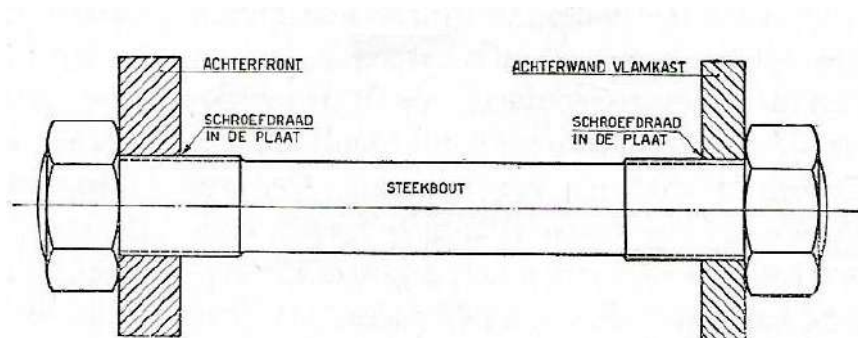
Pijppatroon met steunpijpen

Steekbouten

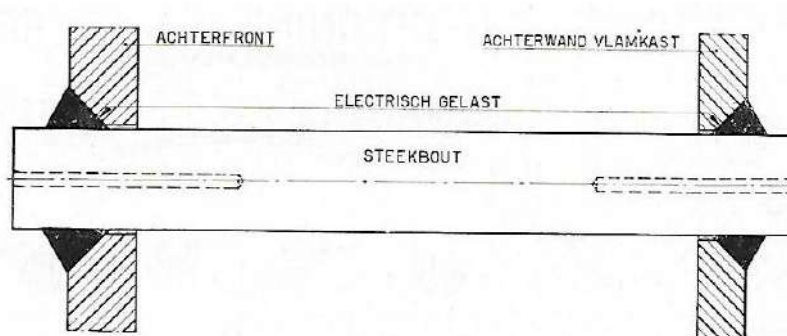
Als de afstand tussen twee af te steunen platen betrekkelijk gering is en niet toegankelijk, zoals tussen de achterwand van de vlamkast en het achterfront van de ketel, de zijwanden van de vlamkasten en de vlamkast en de ketelromp dan worden zogenoemde steekbouten toegepast. Steekbouten worden altijd met schroefdraad in de beide platen bevestigd. De gaten worden in beide platen gelijk geboord en van een lange tap met een relatief fijne schroefdraad voorzien. Hieronder zijn enige gebruikelijke voorbeelden gegeven van deze steekbouten.



Steekbout met over de volle lengte schroefdraad en omgeklonken steel



Steekbout met verjongde steel en moer

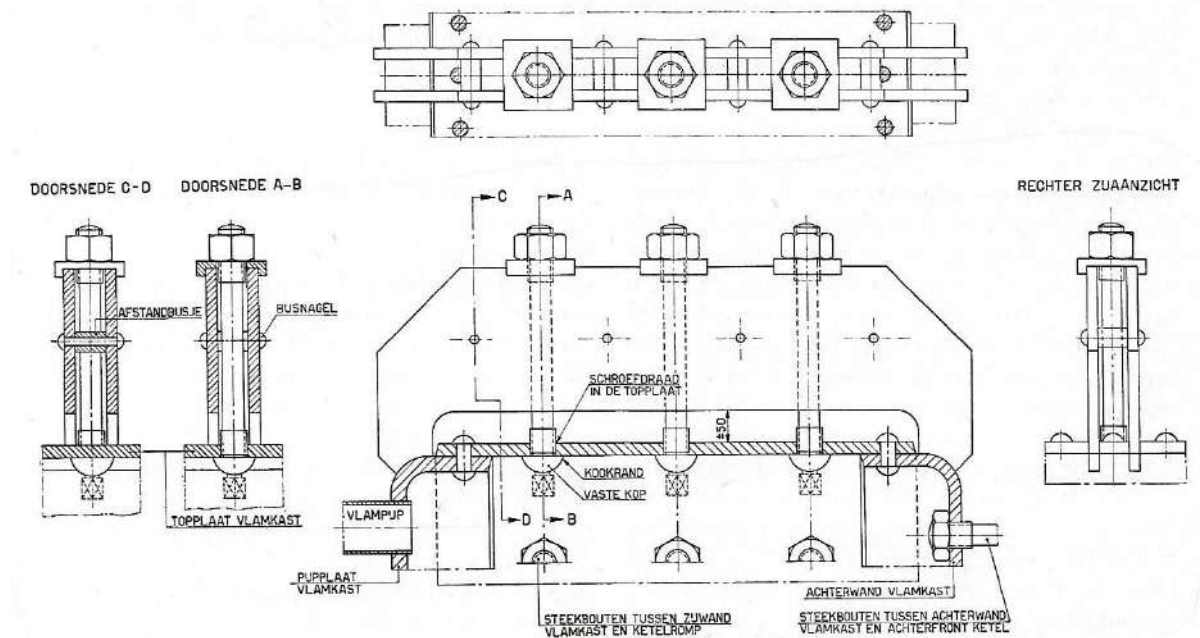


Gelaste steekbout

De uiteinden van de steekbouten kan men voorzien van een opgeschroefde moer of omklinken. De eerste methode heeft de voorkeur omdat de opgelegde kracht niet alleen door de schroefdraad in de plaat maar ook gedeeltelijk door de moer wordt opgenomen. Ook is het door de moer gesteunde vlak groter. Een nadeel vormen de uitstekende moeren die makkelijker zullen wegbranden. De gelaste steekbouten bestaan uit gladde staven die met enige speling in de gaten van de platen passen en daarmee met een zogenoemde kelklas worden verbonden. Deze steekbouten zijn aan beide zijden ingeboord zodat breuk of ernstige intering, door lekkage direct merkbaar wordt.

Brugsteunen

Brugsteunen worden op de top van de vlamkast geplaatst om de topplaat tegen indrukking te beschermen. Een en ander voor geklonken ketels samengesteld zoals hieronder is aangegeven.

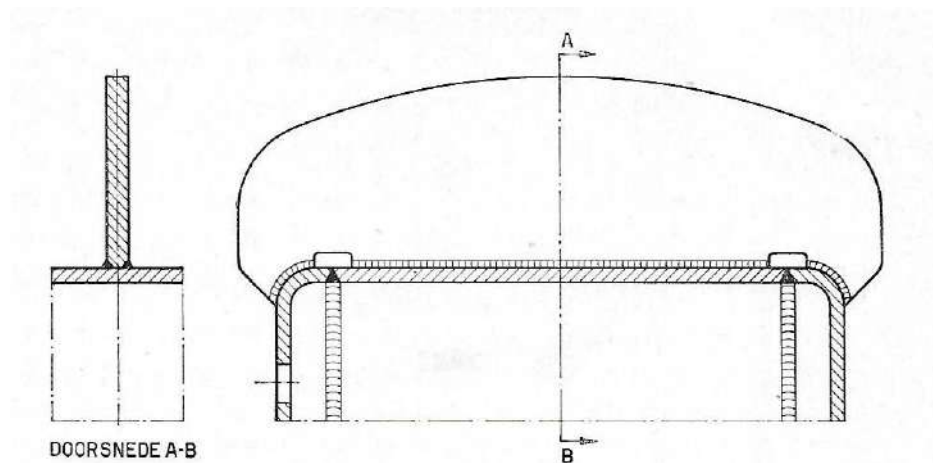


Constructiedetails samengestelde brugsteun

Een opgebouwde brugsteun bestaat uit twee platen van ongeveer 20 mm dik, verbonden en op afstand gehouden door enige zogenoemde bus nagels. De steekbouten, die door de topplaat van de vlamkast geschroefd worden kunnen juist tussen de beide platen van de steun passeren en worden aan de boven- zijde voorzien van een dikke sluitplaat en een moer. Deze moeren worden licht vastgezet om te voorkomen dat de topplaat wordt doorgezet. De moeren worden na het aanzetten iets omgeklonken om losdraaien te voorkomen. De poten van de steunen die zo klein als mogelijk zijn gehouden om oververhitting te voorkomen, rusten alleen op de afronding van de pijpplaat en de achterwand van de vlamkast. De onderkant van de brugsteun blijft ongeveer 50 mm vrij van de topplaat van de vlamkast om er zeker van te zijn dat het ketelwater onder de steun kan doorstromen ter voorkoming van oververhitting.

Bij een eventueel watergebrek in de stoomketel komt de topplaat van de vlamkast het eerst droog te staan waardoor deze inclusief de bouten oververhit raakt. Dit is de reden dat de steekbouten van de brugsteun in de topplaat van een vaste bolle kop zijn voorzien en niet van een moer die bij oververhitting snel afstroopt waardoor de topplaat onvoldoende of in het geheel niet meer wordt afgesteund. Het gevaar van oververhitting speelt bij de steekbouten in de zij- en achterwand een kleinere rol vandaar dat deze wel van een moer zijn voorzien. De in de figuur gestippelde vierkantjes onderaan de vaste kop worden er bij het aanbrengen van de steekbouten afgedraaid.

Bij gelaste ketels van dit type stoomketel worden de brugsteunen aan de topplaat gelast. Om zogenoemde spanningssprongen te voorkomen worden bij elkaar kruisende lasnaden de steunen onderbroken. De onderstaande afbeelding laat deze opmerkelijk eenvoudige constructie zien.



Opgelaste brugsteun

De geleiding via de steunen brengt veel warmte van de topplaat op het ketelwater over, zodat er geen gevaar van plaatselijke oververhitting ontstaat.

4.5.5 Waterpijpketels

Algemeen

Bij een waterpijpketel bevindt het water zich in de pijpen en stromen de hete gassen daar omheen. Deze ketels bestaan uit een of meer hellend geplaatste bundels pijpen die verbonden zijn met één of meer water- en stoomhouders. De pijpen zijn boven en bij de latere uitvoeringen ook rondom de vuurhaard geplaatst.

Een aantal typische kenmerken van een waterpijpketel zijn:

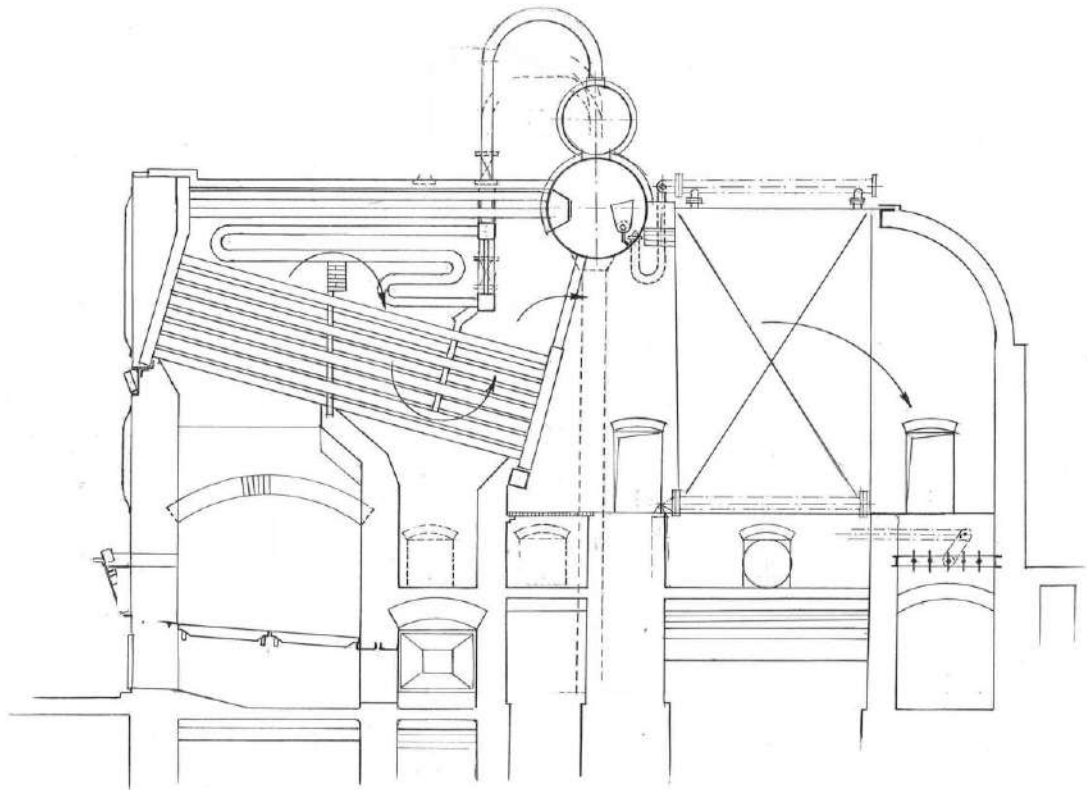
- Alle delen onder druk hebben een relatief kleine doorsnede zodat hoge stoomdrukken kunnen worden toegepast.
- De onderdelen die warmte opnemen, de waterpijpen, hebben een geringe wanddikte zodat er geen overmatige materiaalspanningen kunnen optreden. De min of meer flexibele constructie voorkomt bovenmatige spanningen in de verbindingen bij het opstoken en bij belastingschommelingen
- Waterpijpketels zijn samengesteld uit delen van betrekkelijk geringe afmetingen en gewicht, zodat het mogelijk is met de in de fabriek gemaakte onderdelen de ketel op locatie op te bouwen
- Het gewicht aan stoom dat per uur geleverd kan worden wordt in de eerste plaats bepaald door het roosteroppervlak. Bij met de hand gestookte stoomketels is deze beperkt omdat steenkool niet over een lengte groter dan 2 m handmatig kan worden opgeworpen. Op het grondoppervlak nodig voor de op deze wijze gestookte waterpijpketels kan dus niet bespaard worden. Wel kan de roosterbelasting, het aantal kg steenkool dat per m² RO/h verstuikt kan worden, opgevoerd worden naar 150 kg/m² RO/h. Hierdoor kan toch met een ketel met een kleiner grondoppervlak worden volstaan
- De waterpijpketel heeft ten opzichte van de capaciteit een kleine waterinhoud. Enerzijds maakt dat de ketel gevoelig voor drukschommelingen als gevolg van veranderingen in de

stoomafname, anderzijds kunnen belastingschommelingen snel gevolgd worden omdat er een kleinere hoeveelheid water opgewarmd hoeft te worden

4.5.6 Babcock & Wilcox sectieketel

Voor zover bekend is voor de mechanische bemaling in Nederland alleen bij het Stoomgemaal Halfweg een met steenkolen gestookte waterpijpketel toegepast. Dit was een zogenoemde B & W-sectieketel vervaardigd door de firma Stork uit Hengelo. De typische kenmerken van deze stoomketel bestaan hieruit dat het VO is opgebouwd uit zogenoemde secties, elk bestaande uit een aantal recht onder elkaar geplaatste pijpen die aan beiden einden in gegolfde smeedijzeren kasten van vierkante doorsnede zijn gerold. Deze pijpen maken een hoek van 15° met de horizontaal en zorgen voor een hoge stroomsnelheid en daardoor een snelle circulatie c.q. warmteoverdracht. De sectiekasten worden vanuit de bovenketel- ook wel drum genoemd- van water voorzien. De vervolgens in de hellende pijpen gevormde stoom wordt per sectiekast met een pijp naar dezelfde bovenketel afgevoerd.

Van dit type ketel bestaan drie hoofdtypen die worden aangeduid met W.I.F.-type (Wrought Iron Fittings) waarmee de smeedijzeren sectiekasten worden bedoeld, Cross-type omdat hier de bovenketel in tegenstelling tot het W.I.F.-type niet in lengterichting maar haaks op de waterpijpen is geplaatst en het Series-type die zo wordt genoemd omdat de oververhitter, de economiser en de luchtverhitter in serie zijn geplaatst. Ook bij dit type ligt de bovenketel haaks op de bundels waterpijpen. Verder kent men nog een aantal door verschillende fabrikanten bedachte specifieke constructiedetails. Bij de stoomketel van het gemaal Halfweg is dat de cilindervormige en liggende stoomdom boven op de stoomdrum. Ook de latere toepassing van verticale koelpijpen rondom de vuurhaard is een voorbeeld van een afwijking op de basisconstructie. Deze aanvulling op de met vaste brandstof gestookte basisuitvoering is overigens pas mogelijk geworden na de invoering van het verstoken van vloeibare brandstoffen.



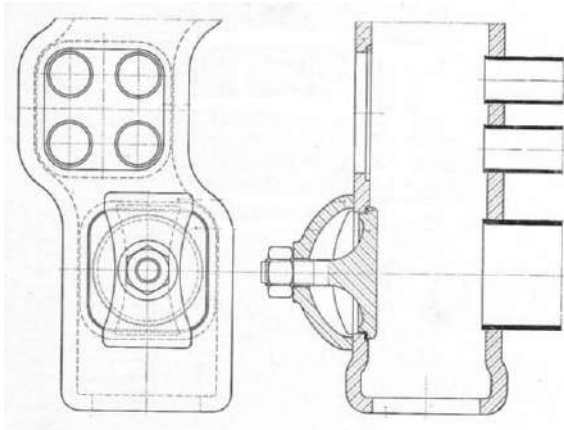
B & W crossdrumsectieketel met OV en ECO (Gemaal Halfweg)

B & W sectieketel Cross-type

Zoals hiervoor opgemerkt ligt de stoomdrum bij dit type haaks op de waterpijpen. Het voordeel hiervan is dat men bij de toepassing van een groot aantal secties kan volstaan met één stoomdrum. De eigenlijke ketel bestaat uit een aantal secties, elk samengesteld uit twee gegolfde waterkasten met daar tussen verspringend geplaatste 4" pijpen. De voorste sectiekasten voeren het water-stoommengsel met circulatiepijpen af naar de bovenketel. De achterste sectiekasten, dus aan lage zijde, zijn eveneens door pijpen verbonden met de stoomdrum en zorgen voor de watertoevoer naar de hellende waterpijpen waarin de stoom wordt gevormd. Onder deze secties is een zogenoemde slikkast aangebracht. Op deze slikkast is een afsluiter aangebracht om regelmatig dan wel continue de ketel te spuien. In de rookgasstroom tussen de waterpijpen zijn schotten aangebracht die er voor zorgen dat de gasstroom in een drievoudige golfbeweging, trekken genoemd, de pijpen- bundels passeert en de warmte aan de pijpen en het hierin aanwezige water- stoommengsel afstaat. Tussen de eerste en tweede trek is in de rookgasstroom de oververhitter geplaatst. Dit is de plaats waar de rookgassen nog een voldoende hoge temperatuur hebben om de in de ketel gevormde verzadigde stoom tot de gewenste oververhittingstemperatuur te verhitten.

Constructie details

Een in het oog springend constructiedetail maar tevens ook een onderhouds- gevoelig onderdeel van de B & W waterpijpketels zijn de gegolfde kasten met de handgatdekseltjes die de secties vormen en waarin de waterpijpen zijn gerold. De gegolfde vorm van de vierkante smeedstalen kasten met een inwendige diameter van 150 x 150 mm heeft ten doel de waterpijpen in een zig-zag patroon boven elkaar te kunnen plaatsen waardoor de warmteoverdracht groter is dan bij plaatsing in een rechte lijn. In de waterkasten zit tegenover elke waterpijp een, bij vroege uitvoeringen ovaal en bij latere uitvoeringen vierkant gat. Deze gaten zijn aan de binnenzijde, dus waterzijdig, van een mechanisch bewerkte rand voorzien waarop met behulp van een pakkingring en de zogenoemde handgatdeksel het gat wordt afgedicht. De gaten zijn noodzakelijk voor het bij nieuwbouw kunnen



aanbrengen of eventueel later vervangen van de waterpijpen alsmede inspectie en onderhoud. Bij inspectie en onderhoud zoals het mechanisch verwijderen van ketelsteen moeten de dekseltjes stuk voor stuk worden verwijderd en na de verrichte handelingen opnieuw weer worden aangebracht. In de B&W waterpijpketels van het gemaal Halfweg zijn alleen al in de secties 160 handgatdeksels aangebracht, het spreekt dan ook voor zich dat dit een zeer tijdrovende bezigheid is die bovendien met de nodige zorgvuldigheid en vakmanschap dient te worden uitgevoerd.

Handgatdeksels

Ontsnappende stoom heeft een snijdende werking. Een eenmaal ontstane beschadiging van het afdichtingsvlak, meestal zichtbaar in de vorm van een scherpe snede, kan niet worden hersteld. Een handgat deksel kan in dat geval nog worden vervangen een beschadiging van een dichtingsvlak op enige plaats van de sectiekast betekent het afkeuren van deze kast en een uitgebreide en kostbare reparatie. Lekkage openbaart zich in de vorm van een hoog ketelwaterverbruik tijdens bedrijf. Bij inspectie is ter plaatse van de lekkage een witte verkleuring waar te nemen. Deze verkleuring wordt veroorzaakt door de in het ketelwater aanwezige en met behulp van chemicaliën neergeslagen ketelsteenvormers Calcium en Magnesium.

4.6 Voedingswater voor stoomketels

Het water dat in een stoomketel wordt gebruikt voor de vorming van stoom moet van een bepaalde kwaliteit zijn omdat anders de ketel vervuilt en dit zelfs oorzaak kan zijn van ernstige schade. Een van de grootste boosdoeners is ketelsteen dat zich als er geen of onvoldoende maatregelen worden getroffen op de vuurgangen in de vlam- of waterpijpen afzet. Ketelsteen kan de oorzaak zijn van ketelexplosie. Het mechanisch verwijderen is een zeer arbeidsintensieve ingreep en moet voorkomen worden door aan het voedingswater chemicaliën toe te voegen. Ook kan men de ketelsteen verwijderen door de ketel als zij buiten bedrijf is te vullen met een zuur dat de gevormde ketelsteen oplost en dit vervolgens doormiddel van spoelen af te voeren.

4.6.1 Eisen ketel voedingswater

Voor het vullen van de stoomketel en het voor het aanvullen van de lekverliezen heeft men zuiver water nodig. Bij niet aan zee gelegen bemalingsinstallaties kan men beschikken over dak- of regenwater wat meestal in daarvoor aangelegde regenwaterputten wordt opgevangen, polderwater en al of niet zelf gewonnen pomp-of leidingwater, en het condensaat uit de injectie- of oppervlakte-condensor van de stoominstallatie. Bij aan zee gelegen stoombemalingsinstallaties is het polderwater in de buurt van het gemaal meestal brak en kan niet zonder meer in een stoomketel worden gebruikt. Het moet daar met behulp van een verdamper uit het brakke water worden gewonnen.

Het voedingswater van stoomketels moet aan de volgende eisen voldoen:

- Zoveel mogelijk vrij zijn van zuurstof (O_2) en kooldioxide (CO_2), die in een ketel intering veroorzaken.
- Een uiterst laag gehalte aan keukenzout ($NaCl$) bevatten, omdat dit zout het opkoken bevordert.
- Een laag gehalte aan zogenoemde tijdelijke hardheidsvormers bevatten, omdat die onder andere het ongewenste CO_2 -vormen.
- Een zeer laag gehalte aan blijvende hardheidsvormers bevatten, omdat die ketelsteen kunnen vormen en de toepassing van chemicaliën nodig maken en het onderhoud laten toenemen.
- Een beetje alkalisch ($pH > 7$) zijn, om eventuele zuren ($pH < 7$) te neutraliseren en intering van het ketelmateriaal te voorkomen.

Zeewater

Zeewater bevat per liter circa 33 gram zouten, voor 78 % bestaande uit wat we keukenzout ($NaCl$) noemen en verder uit magnesiumchloride ($MgCl_2$), magnesiumsulfaat ($MgSO_4$), calciumsulfaat ($CaSO_4$) en calciumcarbonaat ($CaHCO_3$). Bovendien bevat zeewater nog organische stoffen van planten en dieren alsmede in het water opgeloste schadelijke gassen. Deze stoffen veroorzaken het zogenoemde opkoken, het vormen van ketelsteen aantasting van het ketelmateriaal en vervuiling van het inwendige van de ketel. Zeewater is daarom ongeschikt als ketelvoedingswater.

Polderwater

Polderwater bestaat over het algemeen overwegend uit regenwater en wordt als zacht water aangemerkt en is daardoor, mits ontdaan van de organische stoffen, uitstekend geschikt als ketelvoedingswater. Echter in gevallen waar sprake is van zoute kwel, zoals bij diepe polders, moet

het gebruik weer worden afgeraden. Ook het gebruik van polderwater waar veel ijzer in is opgelost, herkenbaar aan de roestbruine kleur, moet vanwege het hoge zuurstof gehalte hiervan, ten zeerste worden ontraden.

Grond- en leidingwater

Grondwater wat terplekke wordt opgepompt en of aan het openbare waternet onttrokken water (leidingwater) bevat een vrij hoog gehalte aan calciumzouten die ketelsteen kunnen vormen en is daarom wel geschikt voor consumptie maar niet voor het voeden van de stoomketel. Ook in zelf opgepompt water kan een overmatige hoeveelheid ijzer voor komen; het moet daarom niet in stoomketels worden gebruikt.

Condensaat

Condensaat van stoominstallaties met een injectiecondensor bevat naast de smeerolieresten van de stoommachine ook stoffen die in het injectiewater, meestal polderwater, voor komen. Deze stoffen moeten met behulp van flotatie en filtratie uit het voedingswater verwijderd worden. Hiervoor is in de regel een filterbak in het circuit opgenomen.

Bij een condensatie installatie met een oppervlakte-condensor gelden dezelfde maatregelen alleen wordt daar het condensaat niet, tenzij gebruikt als suppletiewater, in contact gebracht met het polderwater. Soms, zoals bij het ir D.F. Woudagemaal, wordt bij oppervlakte-condensatie de flotatie gescheiden van de filtratie uitgevoerd.

Gedestilleerd water

Gedestilleerd water wordt verkregen door zout of brak water te verdampen. Door opkoken kunnen kleine hoeveelheden zuurstof (O₂), koolstofdioxide (CO₂) en blijvende hardheidsvormers in het condensaat voorkomen. Deze verontreinigingen moeten door middel van het behandelen van het ketelwater onschadelijk worden gemaakt.

4.6.2 Verontreinigingen

Hardheidsvormers

De hardheid van water wordt veroorzaakt door calcium- en magnesiumzouten. Men noemt water hard als het met zeep moeilijk schuim vormt. Men onderscheidt de hardheid in tijdelijke en blijvende hardheid. Kookt men water bij circa 110 °C, dan wordt een deel van de bij kamertemperatuur opgeloste stoffen onoplosbaar en slaat neer. De hardheid die zo verdwijnt noemen we de tijdelijke hardheid. De overige stoffen die bij 110 °C nog in oplossing blijven veroorzaken de blijvende hardheid. De som van de tijdelijke en de blijvende hardheid noemen we de totale hardheid. De hardheid vormers kunnen als volgt worden ingedeeld.

Calciumbicarbonaat	Ca (HCO ₃) ₂	tijdelijke hardheid	
Magnesiumbicarbonaat	Mg(HCO ₃) ₂		
Calciumsulfaat (gips)	CaSO ₄	blijvende hardheid	totale hardheid

Magnesiumsulfaat	MgSO ₄		
Calciumchloride	CaCl ₂		
Magnesiumchloride	MgCl ₂		

De tijdelijke hardheid wordt ook wel de carbonaathardheid genoemd. Deze bicarbonaten zijn oplosbaar in water van lage temperatuur. Op plaatsen waar de temperatuur boven de 110 °C stijgt worden de oplosbare bicarbonaten ontleed waarbij onoplosbare carbonaten ontstaan welke in de vorm van slib bezinken of als ketelsteen op de natte wanden van de stoomketel wordt afgezet. De chemische reactie bij de zure carbonaten calcium en magnesium verlopen achtereenvolgens als volgt:

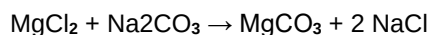
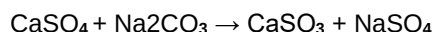


Het calciumcarbonaat CaCO_3 is onoplosbaar in water. Het gevormde magnesium carbonaat daarentegen is vrij goed in water oplosbaar en gaat over in het onoplosbare basische magnesiumcarbonaat $\text{Mg}_2(\text{OH})_2 \text{CO}_3$ volgens de volgende reactie vergelijking:

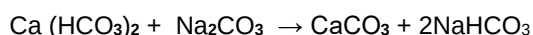


Bij deze chemische reactie ontstaan tevens koolzuur en water. Het gevormde koolzuur is ongewenst, omdat het in de aanwezigheid van zuurstof staal aantast. Het vormt dan het zogenaamde ferrocarbonaat (FeCO_2) dat weer uiteenvalt in ijzerroest (Fe_2O_3) en koolzuur (CO_2). Het aldus gevormde CO_2 tast opnieuw het ketelmateriaal aan.

Voor het bestrijden van de blijvende hardheid, ook wel de mineraalzuurhardheid genoemd, wordt onder andere soda (Na_2CO_3) toegepast. Het opgeloste gips of calciumsulfaat (CaSO_4) en magnesium-chloride (MgCl_2) worden door soda omgezet in respectievelijk het onoplosbare calcium carbonaat CaCO_3 en het in water oplosbare magnesiumcarbonaat MgCO_3 . Door de aanwezigheid van kalk verandert de magnesium vervolgens in het onoplosbare basische magnesiumcarbonaat $\text{Mg}_2(\text{OH})_2 \text{CO}_3$. De chemische reacties met soda bij calciumsulfaat en magnesiumchloride verlopen als volgt:



Met soda verwijdert men niet alleen de blijvende hardheid maar ook de tijdelijke volgens de volgende reactie met als resultaat de producten krijgt (CaCO_3) en natriumcarbonaat (2NaHCO_3).



Het krijgt (CaCO_3) slaat neer in de vorm van slib terwijl het Natriumcarbonaat (2NaHCO_3) bij hoge temperatuur ontleedt in soda (Na_2CO_3) en koolzuur (CO_2). De chemische reactie hiervan verloopt als volgt:

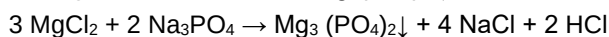
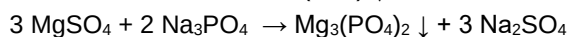
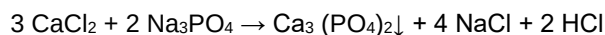
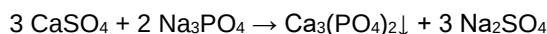
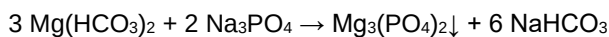
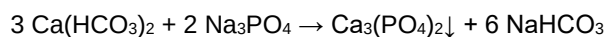


Soda is voor het ontharden van ketelwater minder danwel in het geheel niet geschikt voor ketels met een druk hoger dan 12 kg/cm², omdat de soda ontleedt waarbij het schadelijke koolzuurgas ontstaat. Bij een druk van 40 kg/cm² wordt bijna 100% van de soda ontleed en kan daardoor niet bijdragen aan het ontharden. Bij het in de tijd toenemen van de keteldrukken is men voor de eerder genoemde blijvende hardheidsvormers overgegaan op het ontharden met fosfaat. Bij het ontharden met fosfaat ontstaat bij de chemische reactie niet het schadelijke koolzuur.

Bij het ontharden met fosfaat maakt men gebruik van één van de volgende middelen.

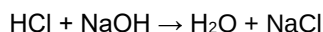
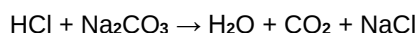
Na_3PO_4	trinatriumfosfaat	basisch
Na_2HPO_4	dinatriumfosfaat	zwak zuur
$\text{Na}_2\text{H}_2\text{PO}_4$	mononatriumfosfaat	sterk zuur
$(\text{NaPO}_3)_6$	natriumhexametafosfaat	basisch

De calcium- en magnesiumzouten slaan dan neer in de vorm van fosfaten. De reactievergelijkingen bij de toepassing van trinatriumfosfaat zien er voor de tijdelijke en de blijvende hardheidsvormers calcium en magnesium dan als volgt uit:



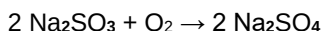
De gevormde neerslagen kunnen weer door bezinken, spuien of filteren uit het ketelwater worden verwijderd.

Bij de hiervoor aangegeven reactie van trinatriumfosfaat met de blijvende hardheidvormers calcium- en magnesiumchloride zien we zoutzuur (HCl) ontstaan dat, als er geen maatregelen worden getroffen, het ketel materiaal aantast. Om het aldus gevormde zure ketelwater alkalisch (basisch) te maken, en zo de schadelijke inwerking op het ketelmateriaal te voorkomen voegt men een sterke base in de vorm van soda (Na_2CO_3) of caustische soda (natronloog) (NaOH) toe met als resultaat de volgende reactie vergelijking:



Bij deze reactie vergelijking zien we bij de toevoeging van soda het schadelijke koolstofdioxide (CO_2) ontstaan, zodat de voorkeur uitgaat naar natronloog. Bij beide soorten chemicaliën wordt keukenzout (NaCl) gevormd.

Om de corrosie veroorzakende vrije zuurstof in het ketelwater te binden wordt onder andere natriumsulfiet (Na_2SO_3) gebruikt. Bij de hierna aangegeven reactie van natriumsulfiet met zuurstof wordt het goed oplosbare natriumsulfaat (Na_2SO_4) gevormd.



Een ander hulpmiddel voor het verwijderen van zuurstof is hydrazine (N_2H_4) echter deze stof is zeer ontvlambaar, vluchtig en ontplofbaar met een geur van ammoniak. In contact met lucht ontstaat rook. Het is ook zeer giftig voor mens en dier. Mensen nemen de geur pas waar bij een concentratie die boven de giftige dosis van 2 à 3 ppm (parts per million) ligt. Hydrazine is daarnaast mogelijk kankerverwekkend, al is weinig bekend over de toxiciteit van hydrazine bij de mens. Blootstelling van de huid, slijmvliezen en ogen aan hydrazine kan brandwonden veroorzaken. Ook kan de stof door de gezonde huid in het lichaam binnendringen. Hydrazine irriteert de bovenste luchtwegen. Het spreekt voor zich dat het gebruik van dit middel met de grootste zorgvuldigheid dient te gebeuren en eigenlijk niet is weggelegd voor de machinisten van een doorsnee stoom-museumgemaal.

Tegenwoordig kan men beschikken over kant en klare chemicaliën cocktails. De fabrikant danwel leverancier levert deze met de instructies voor bemonstering van het ketelwater en de wijze van doseren. Tevens kan men bij onregelmatigheden en of problemen met betrekking tot de ketelwaterbehandeling terugvallen op deskundige ondersteuning.

Ontgassen van water

De in het voedingswater opgeloste gassen ontwijken, als dit water wordt verwarmd onder een bepaalde druk tot het daarbij behorende kookpunt. Bij stoominstallaties van gemalen gebeurt dit in de stoomketel. Hier voor is aangegeven dat nog in het voedingswater aanwezige of door ontleding van carbonaten door de toevoeging van soda onschadelijk worden gemaakt. Zuurstof wordt gebonden door het natronloog (NaOH) dat door de ontleding van soda ontstaat of door het toegevoegde natriumsulfiet (Na_2SO_3).

Keukenzout

Als gevolg van de ketelwaterbehandeling met fosfaten en bij aan zee gelegen gemalen kan keukenzout (NaCl) in het voedingswater terecht komen. Bij dit laatste geval komt keukenzout in het voedingswater terecht bij voorbeeld als gevolg van een lekkende condensor of het opkoken van de verdamper. Het zout kan niet zoals bij de bicarbonaten, met behulp van chemicaliën in onoplosbare verbindingen worden omgezet en kan daarom alleen door regelmatig, danwel continue spuien, uit de ketel worden verwijderd.

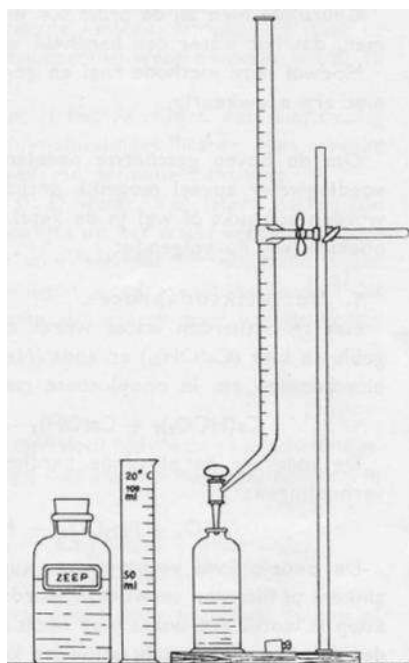
Controle ketelvoedingswater

Men controleert het ketelvoedingswater bij de bron, meestal het polderwater, daarna in de warmwater- of filterbak en tenslotte in de ketel zelf. Deze controle dient ten eerste om zich een oordeel te vormen van de kwaliteit van het water, vervolgens om te bepalen hoeveel en welke stoffen dienen te worden toegevoegd om ketelsteenvorming te voorkomen dan wel hoeveel

ketelwater er gespuid moet worden voor het in stand houden van de kwaliteit. Alle monsters, behalve die uit de onder (hoge) druk staande stoomketel, kunnen geschept worden uit de watergang of de waterbak. Bij de stoomketel wordt een kleine hoeveelheid water via een speciale stoomkoeler afgetapt.

Hardheid

De hardheid van water wordt uitgedrukt in graden, waarbij men Duitse, Franse en Engelse graden onderscheidt. In Nederland gebruiken we de Duitse hardheidsgraden. Iedere 10 mg calciumoxide (CaO) of de equivalente hoeveelheid van 7,14 mg magnesiumoxide (MgO) vormen 1 Duitse hardheidsgraad. Dit wordt aangeduid met 1° dH. Gedestilleerd water waar dus geen Calcium of



magnesium meer in voorkomt heeft dus een hardheid van 0° dH. Om de hardheid van het water te bepalen brengt men een alcoholische zeepoplossing van een bepaalde sterkte in een buret. In een flesje met een goed sluitende stop brengt men 100 ml van het te onderzoeken water en laat nu druppelsgewijs net zo lang via de buret de zeepoplossing toe, tot men na krachtig schudden een schuim ziet ontstaan dat ongeveer 10 minuten blijft staan. De in de handel voor komende zeepoplossingen zijn zo gemaakt dat één ml hiervan één Duitse graad hardheid vertegenwoordigt. Gebruikt men bij een proef bijvoorbeeld 12 ml zeepoplossing dan bedraagt de hardheid 12° dH. Middelmatig hard leidingwater heeft een hardheid die varieert tussen de 2,2° dH (gemeente Epe) en 12° dH (gemeente Delfzijl). De hardheid van oppervlaktewater is, afhankelijk van de plaats, de grondsoort en de toepassing van meststoffen in het stroomgebied, maar ook het jaargetijde, meestal lager dan de minimumwaarde van leidingwater.

Buretopstelling

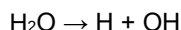
Alkaliniteit

De term alkaliniteit of alkaliteit wordt gebruikt voor zuur bufferende capaciteit. Oftewel het vermogen van een oplossing om zuren te neutraliseren. Het ketelvoedingswater wordt steeds zo behandeld dat dit basisch, het tegenovergestelde van zuur is, dat wil zeggen voldoende alkalisch is en het ketelmateriaal niet aantast. Dit controleert men met phenolftaleïne, een indicator die zoals we verderop zullen zien, basisch water rood kleurt.

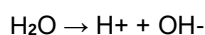
pH-waarde

Als men van scheikundige verbindingen die atomen H- of OH-groepen bevatten een kleine hoeveelheid oplost in water dan worden de moleculen van die verbindingen gesplitst. Er vormen zich in het water deeltjes die bestaan uit H-atomen en OH-moleculen en verder uit atomen en

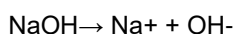
atoomgroepen, overgebleven van de oorspronkelijke verbinding. Van zuiver water zijn reeds enkele moleculen gesplitst en wel als volgt:



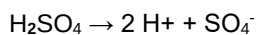
Er ontstaan zo evenveel H- als OH-deeltjes. De door de splitsing van watermoleculen en van opgeloste stoffen ontstane H en OH deeltjes, hebben elk een elektrische lading welke ionen worden genoemd. De ionen van het atoom H zijn positief en de ionen van de OH molecuul daarentegen negatief geladen. Men schrijft daarom:



De splitsing van een in water opgeloste base, bijvoorbeeld natrium hydroxyde (NaOH) ook wel caustische soda of natronloog genoemd, waarbij uit elk molecuul NaOH een positief geladen Na-ion en een negatief geladen OH-ion ontstaat schrijft men aldus:



Van een in water opgelost zuur bijvoorbeeld zwavelzuur (H_2SO_4) splitsen de moleculen zich volgens:



De atoomgroep SO_4^{2-} heeft een dubbele negatieve lading en compenseert de twee positieve ladingen van de twee H^+ -ionen, zodat de oplossing elektrisch neutraal is.

De zure eigenschap van een oplossing die wordt aangetoond met het rood kleuren van violet lakmoes wordt veroorzaakt door de H^+ -ionen.

De basische eigenschap van een oplossing daarentegen wordt zichtbaar met een blauwe verkleuring van violet lakmoes en wordt veroorzaakt door de ontstane OH^- -ionen.

De na afsplitsing van H^+ en OH^- -ionen overblijvende atomen en atoomgroepen hebben geen invloed op het zure of basische gedrag van een oplossing.

In zuiver water komen evenveel H^+ als OH^- -ionen voor, zodat het water noch zuur noch basisch is en derhalve als neutraal wordt aangemerkt.

Lost men een base op in zuiver water, dan worden de OH^- -ionen afgesplitst en neemt het aantal hiervan toe. Er ontstaat een overmaat aan OH^- -ionen en het water reageert basisch en is alkalisch. Voegt men aan dit basische water druppel voor druppel een verdund zuur toe dat H^+ -ionen afsplitst, dan vermindert eerst de overmaat aan OH^- -ionen, daarna worden de aantallen OH^- en H^+ -ionen gelijk, het water is dan neutraal, vervolgens ontstaat een overmaat aan H^+ -ionen en is het water zuur. Men kan aan zuur water een verdunde base toevoegen. Het omgekeerde vindt dan plaats en is vergelijkbaar met de reactie die in een stoomketel plaatsvindt bij het toedienen van verschillende chemicaliën aan het ketelvoedingswater.

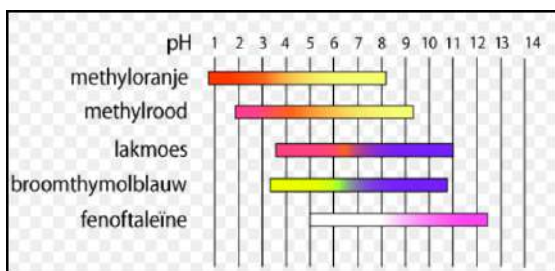
Als in water een aantal H^+ -ionen voor komt dat bijvoorbeeld 1/10.000 is van het aantal watermoleculen, dan noemt men dat een concentratie van 1/1.000 of anders genoteerd 1/103. De concentraties H^+ en OH^- -ionen zijn afhankelijk van elkaar en wel zodanig dat bij een bepaalde

temperatuur het product constant is, namelijk $1/1014$. Als de concentratie aan H-ionen bijvoorbeeld $1/108$ is dan is die aan OH-ionen $1/106$ immers: $1/108 \times 1/106 = 1/1014$.

Men kan de concentratie bijvoorbeeld die van $1/108$ ook schrijven als 10^{-8} . Om echter het gebruik van negatieve getallen te voorkomen gebruikt men voor het aangeven van de pH de omgekeerde exponent van de H-ionen concentratie. De H-ionen concentratie van $1/108$ schrijft en drukt men uit als pH 8.

De pH-waarde is de omgekeerde exponent van de concentratie aan H-ionen
 $\text{pH} < 7$ zuur, $\text{pH} = 7$ neutraal, $\text{pH} > 7$ basis.

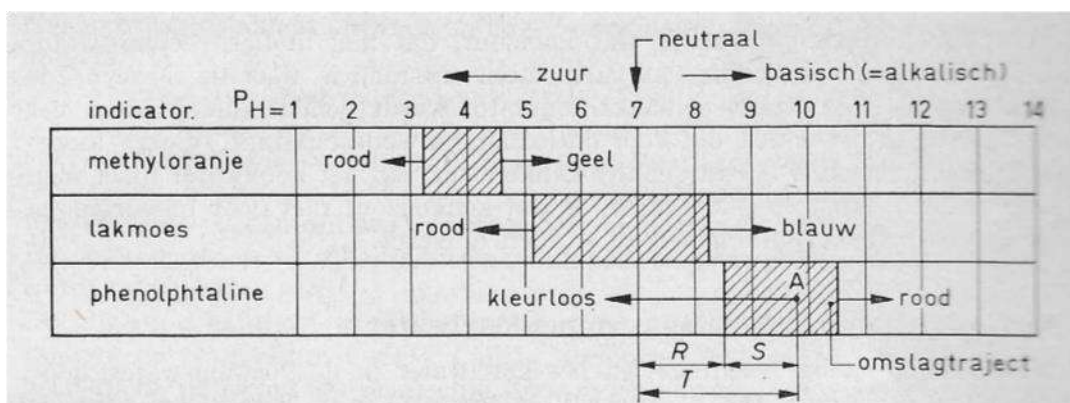
Bij $\text{pH} = 7$ ontstaat er, vooral in ketels met hoge stoomdrukken, toch aantasting van het ketelmateriaal en is er geen compensatie aanwezig voor een vergroting van de zuurgraad van het voedingswater. Behalve de zuren en CO_2 die het ketelvoedingswater kan bevatten ontstaat er in de ketel CO_2 bij het gebruik van bijvoorbeeld natriumcarbonaat bij de ontharding. Deze zuren en het zuurvormende CO_2 -gas, worden geneutraliseerd door het ketelwater op een pH van circa 9 te houden. Er bestaat een groot aantal indicatoren om de pH van ketelwater te bepalen. Een paar



ervan wordt hierna aangegeven. Als een monster ketelwater na indruppelen van phenolftaleïne en goed schudden rood kleurt, dan is de pH circa 9. Druppelt men nu een verdund zuur in het monster dan verdwijnt de kleur. De hoeveelheid verdund zuur van bekende sterkte is een maat voor de pH van het monster.

Kleur en kleurovergang pH indicatoren

De indicatoren hebben elk een specifiek traject waarbij ze in een andere kleur overgaan. Bij lakmoes (rode koolsap) bijvoorbeeld ligt deze overgang bij pH7 dus neutraal.



Omslagtraject pH indicatoren

Spuien

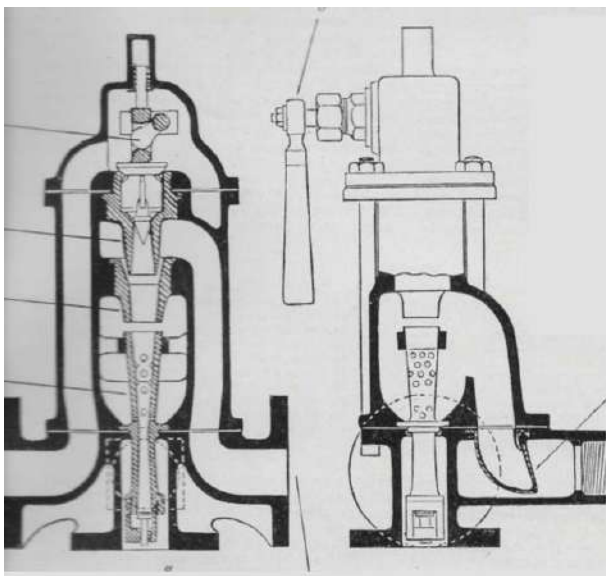
Ten gevolge van de stoomproductie wordt het ketelwater als het ware ingedikt en neemt dus de totale concentratie aan zouten sterk toe. Om aan de eisen voor een verantwoord gebruik van de ketel te voldoen en om negatieve effecten zoals corrosie, afzettingen, opkokers, slibvorming, et cetera te voorkomen, dient er naast een conditioneringsprogramma dat wil zeggen een programma waarin is aangegeven, hoeveel en welke chemicaliën er moeten worden toegediend, tevens een bepaalde hoeveelheid water gespuid te worden. Spuien is noodzakelijk om de concentratie opgeloste stoffen in het ketelwater te beperken tot de maximaal toelaatbare waarden. Om water en energie te besparen, is het echter noodzakelijk te streven naar de maximale toelaatbare indikking en dus een minimale hoeveelheid spuiwater. Het spuien van het ketelwater kan zowel continu als discontinu worden uitgevoerd.

4.7 Ketelvoedingwatersysteem

4.7.1 Injecteur

Pompen hebben om water door middel van stoom in de stoomketel te pompen een tusseninrichting zoals zuigers, waaiers assen of kleppen nodig. Bij de injecteur wordt de stoom rechtstreeks hiervoor aangewend. De werking berust op het omzetten van de snelheid van stoom in druk op het ketelvoedingwater.

In het hier naast afgebeelde toestel bevinden zich drie koperen kegels, de bovenste, de stoomkegel, is afsluitbaar door een van buitenaf bedienbare klep. Op de klepsteel is daartoe een handel aangebracht die als deze bediend wordt de stoom toelaat. Tegen de linker flens sluit de



stoomtoevoerleiding aan. De rechter flens is verbonden met de zuigleiding van de ketelvoedingwater-voorraadtank en sluit aan op de middelste kegel, de mengkegel, waar de stoom met hoge snelheid water meesleurt. De onderste kegel, de zogenoemde drukkegel, is evenals de bovenste kegel dubbel kegelvormig gemaakt en zorgt er voor dat de snelheid van het water omgezet wordt in druk. Tussen de mengkegel en de drukkegel is een verbinding aangebracht met een klep de zogenoemde morsklep. Deze klep opent naar buiten en voert bij het opstarten van de injecteur een water/stoommengsel af naar een trechter.

Injecteur

Om met de injecteur water in de ketel te brengen opent men langzaam de stoomklep, waardoor stoom in het toestel stroomt en eerst lucht en vervolgens water wordt aangezogen. Dit mengsel van stoom, lucht en water wordt aanvankelijk afgevoerd via de morsklep. Op een gegeven moment wordt als gevolg van condensatie van de stoom aan het relatief koude aangezogen voedingswater de snelheid zo groot dat er voldoende drukopbouw plaatsvindt in de drukkegel om het water via de kleppenkast in de ketel te persen.

Is het toestel of het voedingswater te warm (35 a 40 ° C) dan wordt de warmteval van de stoom te gering en vindt er onvoldoende snelheidsopbouw in de stoomkegel plaats. De injecteur slaat dan af, wat te zien is aan het ontwijken van stoom en water via de morsleiding. Men kan dit tegengaan door natte doeken op de injecteur te leggen maar beter nog door te zorgen voor kouder voedingswater.

Ook het aanzuigen van lucht, bijvoorbeeld doordat de voedingswater-zuigleiding lekt, zorgt er voor dat de injecteur afslaat en de ketel niet gevoed wordt. Verder kunnen vaste deeltjes zoals roest of ketelsteen de straalbuizen geheel of gedeeltelijk verstoppen en de goede werking van de injecteur

beïnvloeden. Dit is dan ook de reden dat in de stoomleiding naar de injecteur een afsluiter of kraan is opgenomen om het toestel uit bedrijf te kunnen nemen en reparaties uit te voeren.

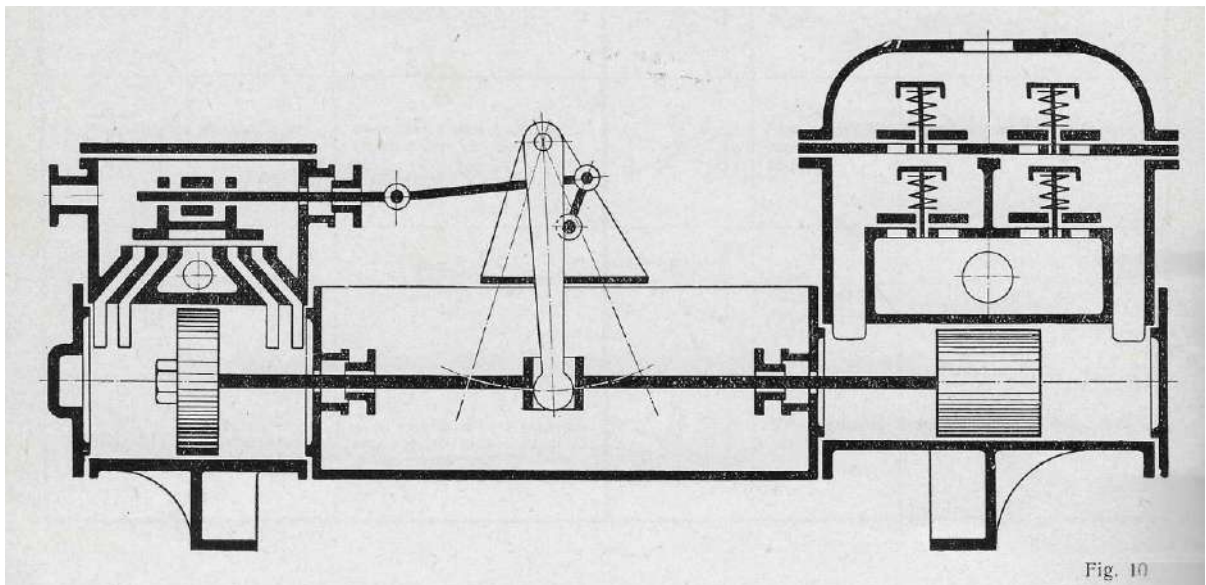
Een goed functionerende injecteur kan met 1 kg stoom ongeveer 15 kg water in de stoomketel brengen. Van iedere 16 kg stoom die gevormd wordt in de ketel heeft de injecteur dus 1kg nodig. Men heeft bij het voeden van een stoomketel met een injecteur dus $\frac{1}{16}$ deel van de opgewekte energie nodig. Een zuigerpomp, hetzij rechtstreeks door de hoofdstoommachine aangedreven, hetzij door een afzonderlijke inrichting, gebruikt slechts $\frac{1}{100}$ deel van de opgewekte energie. Men kan uit deze cijfers afleiden dat een injecteur 84 % meer stoom nodig heeft om eenzelfde hoeveelheid water in de ketel te brengen als een door stoom aangedreven zuigerpomp. De injecteur is wat betreft zijn energieverbruik sterk in het nadeel hetgeen een reden is dat dit toestel uitsluitend als reserve voedingsmiddel wordt gebruikt.

4.7.2 Zuigerpompen

Voor het voeden van de stoomketel worden naast de injecteur veelal door de stoommachine zelf of apart aangedreven stoomzuigerpompen gebruikt. In alle gevallen is stoom nodig om het toestel of de pomp te kunnen laten werken. De stoomketel werd daarom handmatig volgepompt of men liet bij niet al te lange bedrijfsonderbrekingen de ketel vol water staan. Tegenwoordig beschikken we over elektrisch aangedreven pompen waardoor het in werking stellen maar ook de bedrijfsvoering van een stoominstallatie aanmerkelijk is vereenvoudigd.

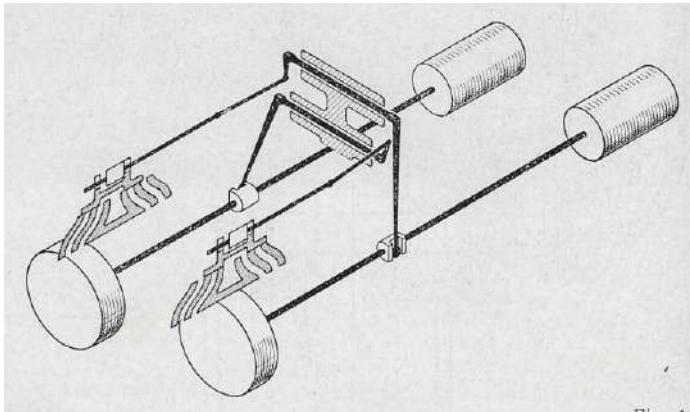
Duplex pomp

Bij de zogenoemde duplexpomp zijn twee gelijke stoomcilinders en twee gelijke pompcilinders achter elkaar geplaatst. De zuigerstang van de ene pomphelft beweegt met behulp van een ingenieus stangenstelsel de stoomschuif van de andere. De hierna afgebeelde figuur geeft een langs- en dwarsdoorsnede van de overbekende en veel gebruikte ketelvoedingswaterpomp van Worthington weer.



De beide stoomcilinders met de gemeenschappelijke schuifkast zijn tot een ijzeren gietstuk verenigd zodat met één stoomtoevoer en –afvoer kan worden volstaan. De stoomschuifjes, zuigers en zuigerveren zijn eveneens van gegoten ijzer.

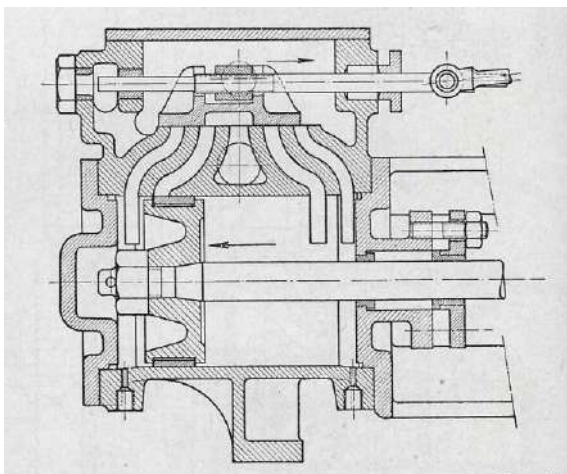
Zoals uit het schema van de stoomschuifbeweging blijkt beweegt de zuigerstang van de linker cilinder de stoomschuif van de rechter cilinder en omgekeerd. Hieruit volgt dat de stoomcilinders



niet onafhankelijk van elkaar kunnen werken. De verbinding van de beide hefbomen met de respectievelijke zuigerstangen wordt bewerkstelligd doormiddel van een kruishoofdblok. Deze stalen blokjes zijn ongeveer op het midden van de zuiger stangen vastgezet. In de blokjes zijn uitsparingen gemaakt waarin de afgeronde hefbomen zijn opgesloten.

Schema stoomschuifbeweging

Deze hefbomen brengen de van de zuigerstang afgeleide beweging over naar de stoomschuifjes. In afwijking van de normale uitvoering van een stoomcilinder heeft men de cilinders van deze pomp uitgevoerd met twee stoom-kanalen. De buitenste doen dienst als toevoer- en de binnenste als afvoerkanaal. Het doel van deze uitvoering is te voorkomen dat de zuigers aan het einde van de slag tegen het deksel of de bodem botsen waardoor breuk of beschadiging kan optreden . Bij een stoomwerktuig met een kruk-drijfslag mechanisme wordt de slag door dit mechanisme beperkt en treedt bij voldoende vrijslag geen beschadiging op. Veronderstel dat in de hiernavolgende figuur de

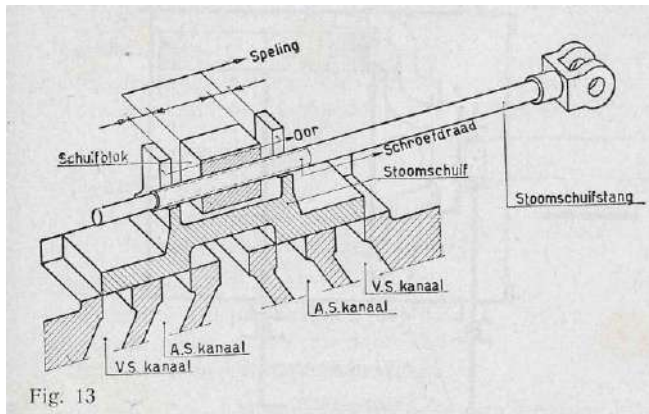


zuiger naar links beweegt. Op het moment dat ze het afvoerkanaal in de cilinder bereikt, heeft de stoomschuif het toevoerkanaal rechts van de zuiger ongeveer half gesloten zodat door smoring de stoomdruk in die ruimte vermindert. Tegelijkertijd sluit de stoomschuif de toevoer geheel af zodat de stoom aan die zijde van de zuiger wordt gecompriëerd. De drukdaling aan ene zijde van de zuiger en de compressie aan de andere zijde zorgen er samen voor dat de zuiger wordt afgeremd en niet het deksel of de bodem raakt. De sluitvlakken van de schuiven zijn zo lang dat ze in de middenstand alle poorten afsluiten.

Reminrichting stoomcilinder

Hieruit blijkt dat de pomp met volle toe- en afvoer werkt en dus een volledruk machine is. Uit energetisch oogpunt verdient een dergelijk werktuig geen aanbeveling ware het niet dat de afgewerkte stoom meestal nuttig wordt aangewend bij het voorwarmen van het ketelvoedingwater. De stoomcilinders zijn zowel aan de deksel- als aan de bodemzijde aan de onderzijde van een aftap voorzien om bij het opstarten of tijdens het gebruik van de pomp het condensaat te kunnen aftappen. Heeft zich namelijk te veel van het niet samendrukbare condensaat in de cilinder verzameld dan stopt de pomp of kan die niet worden gestart. Deze aftappen moeten ook worden gebruikt bij het voorwarmen vóór het in gebruik nemen van deze stoempompen.

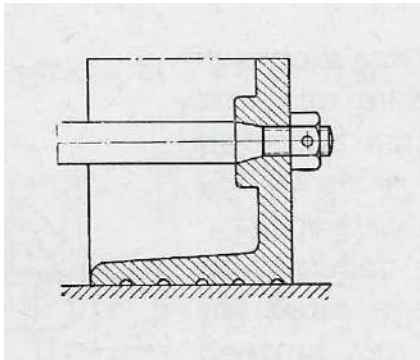
De verbinding van de schuif met de schuifstang wordt als volgt verkregen. De schuif heeft op de rug twee opstaande oren die van gleuven zijn voorzien en waarin de schuifstang is bevestigd. Het stalen schuifblokje dat tussen de oren enige speling heeft is met schroefdraad op de schuifstand



geplaatst. Dit zorgt er voor dat de schuifstang beweging vertraagd wordt doorgegeven aan de desbetreffende schuif, de zuigers in de uiterste standen even stilstaan en met een verschil van een halve slag achter elkaar aan lopen. Het opnieuw afstellen van de pomp bij voorbeeld na een revisie behoeft enige geoefendheid waarbij het kennen en begrijpen van het werkingsprincipes van evident belang is.

Schuifstangverbinding

De beide watercilinders met een deel van de kleppenkast van de pomp zijn eveneens uit één stuk gegoten ijzer gemaakt. Het rooster voor de perskleppen, de deksels van de kleppenkast en de cilinders zijn eveneens van gegoten ijzer. De cilindervoeringen, de zuigers, de klepzittingen en de kleppen zijn van brons. Bij de kleinere uitvoeringen is de doorlopende zuigerstang van brons



gemaakt. Bij de grotere uitvoeringen wordt de stoomzuigerstang van staal gemaakt. In dat geval zijn de zuigerstangen met schroefdraad in het kruishoofd bevestigd. De zuigerstangen zijn meestal van mangaanbrons gemaakt terwijl de kleppen uit het hardere fosforbrons zijn vervaardigd.

Ten gevolge van het toepassen van relatief lange zuigers, die men van groeven heeft voorzien en die als zodanig een labrynt vormen, zijn geen zuigerveren nodig.

Zuiger met groeven (labyrint)

De klepzittingen zijn met fijne schroefdraad in het kleppen rooster bevestigd. De schijfkleppen vinden geleiding om een, in het midden van de zitting geschroefde bronzen tapbout. De veerschotel doet tevens dienst als aanslag voor de klep. Spiraalveren van stug messingdraad drukken de geopende kleppen tegen het einde van de slag, als de volumestroom vermindert, geleidelijk aan op hun zitting. Men voorkomt hiermee dat de kleppen heftig op hun zitting slaan en de sluitvlakken beschadigen.

Wanneer men voedingswater door leidingen, afsluiters en klepkasten in een ketel pompt waarin bijvoorbeeld een druk heerst van 12 kg/cm² moet de persdruk hoger zijn dan die in de ketel om de weerstanden in het systeem te overbruggen. Werkt de pomp met stoom uit die ketel, wat bij gemalen altijd het geval is dan moet men de stoomzuiger een grotere diameter geven dan de pompzuiger immers de kracht op de stoomzuiger moet gelijk zijn aan die op de pompzuiger. Als de we de stoom- en waterdruk door respectievelijk P_s en P_w voorstellen en de diameter van de stoomzuiger en de waterzuiger door respectievelijk D_s en D_w , dan geldt bij een eenparige beweging en met verwaarlozing van de wrijvingsverliezen:

$$\frac{\pi}{4} \cdot D_s^2 \cdot P_s = \frac{\pi}{4} \cdot D_w^2 \cdot P_w$$

$$P_w = P_s \cdot \frac{D_s^2}{D_w^2}$$

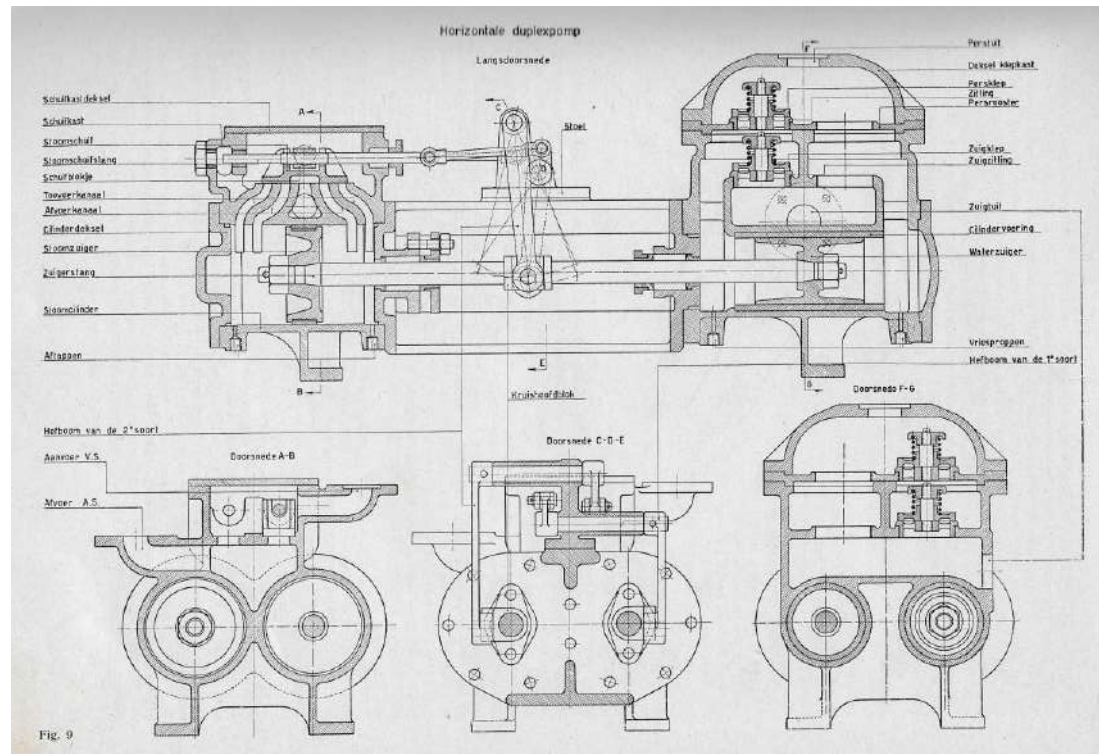
De diameter van de stoomzuiger maakt men in de regel 1,5 maal groter dan die van de pompzuiger. De hoogste pompdruk die dan bereikt kan worden is.

$$P_w = P_s \cdot \frac{(1,5)^2}{(1)^2} = P_s \cdot \frac{2,25}{1} = P_s \cdot 2,25$$

De hoogst bereikbare waterdruk is dus 2,25 keer de druk van de stoom waarmee de pomp wordt aangedreven .

De opbrengst van deze stoempomp wordt geregeld door de stoomtoevoerafsluiter verder open of dicht te draaien. Bij een niet te sterk wisselende stoomafname zal de stoker nauwelijks hoeven bijregelen en maakt de pomp een langzame beweging van enkele slagen per minuut. De pomp maakt daarbij een typisch knerpend geluid wat veroorzaakt wordt door de perskleppen van de pomp.

De zuigerstang en de zuiger zijn samengesteld uit bronzen onderdelen. In combinatie met het gietijzer en het ketelwater bezitten deze onderdelen voldoende glij-eigenschappen en hoeven niet gesmeerd te worden. Hiermee wordt voorkomen dat er smeeroil in de stoomketel komt. De stoomschuifjes en de cilinder worden gesmeerd met olie die met behulp van de stoomdruk in de stoomtoevoerleiding wordt geperst. De zuigerstang, het kruishoofd en de hefbomen worden met behulp van een oliespuit gesmeerd.



Horizontale duplexpomp van Worthington

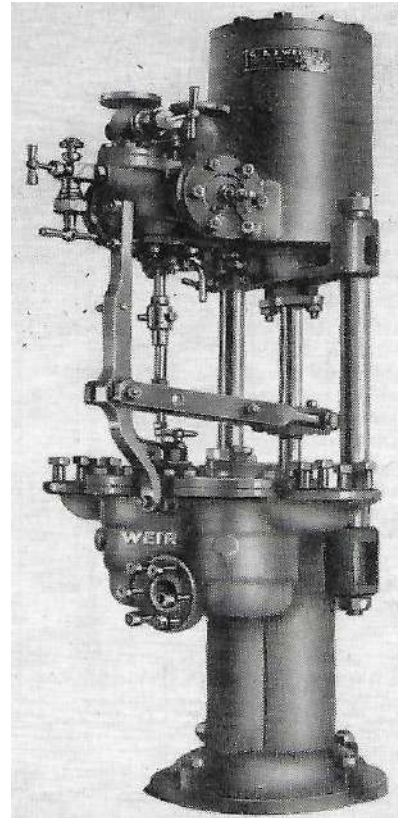
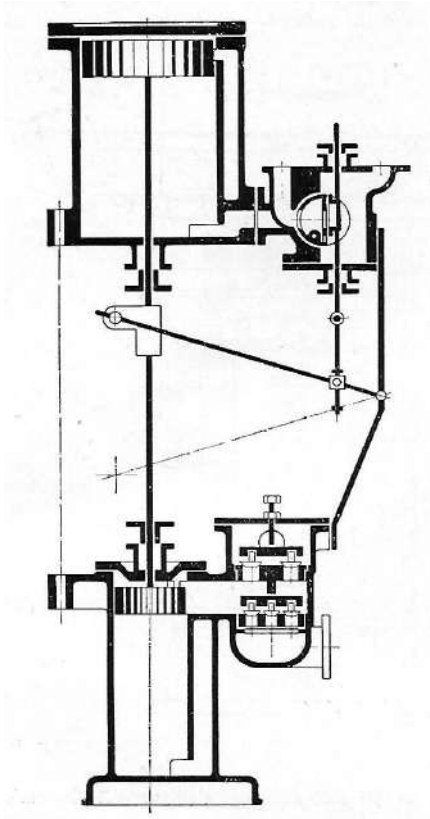
Simplexpompen

Bij de zogenoemde simplexpomp zijn de stoomcilinder en de pompcilinder achter elkaar geplaatst. De zuigerstang beweegt met behulp van een hefboomstelsel, een glijblok en aanslagnokken op de stoomschuifstang. Hiermee wordt beurtelings stoom boven- en onder de zuiger toegevoerd. Het aantal pompslagen en daarmee het debiet wordt geregeld door de stoomtoevoer meer of minder te knijpen. Men noemt deze pomp simplexpomp omdat het letterlijk vertaald enkelvoudige pomp betekent. Dit type pomp kan overigens ook als natte-luchtpomp, stookoliepomp of stookolie-transportpomp worden gebruikt.

Simplexpomp van Weir

De hierna afgebeelde figuur geeft een langdoorsnede van dit type pomp van Weir weer. De constructie is als volgt. De stoom- en watercilinder zijn met elkaar verbonden door twee stalen kolommen die men in aangegoten oren heeft bevestigd. De pompcilinder vormt een geheel met de aangegoten klepkast en het voetstuk van deze verticaal opgestelde pomp. Voor een werkdruk tot circa 20 kg/cm² maakt men het pomplichaam van gegoten ijzer en voor hogere werkdrukken van gegoten staal. De cilindervoering, evenals de zuiger, de kleppenroosters met kleppen en klepborging alsmede de zuigerstang maakt men van brons. Voor hogere werkdrukken vervaardigt men deze onderdelen van een koper-nikkel legering. De pompzuiger is van ebonieten zuigerveren voorzien. De kleppenkast is ten behoeve van onderhoud aan de kleppen van een eenvoudig wegneembaar deksel voorzien.

De stoomcilinder, de stoomzuiger met veren en de met een flens aan de cilinder bevestigde schuifkast zijn van gegoten ijzer gemaakt. De stalen stoomzuigerstang en de bronzen pompzuigerstang zijn met een stalen klemkoppeling met elkaar verbonden.

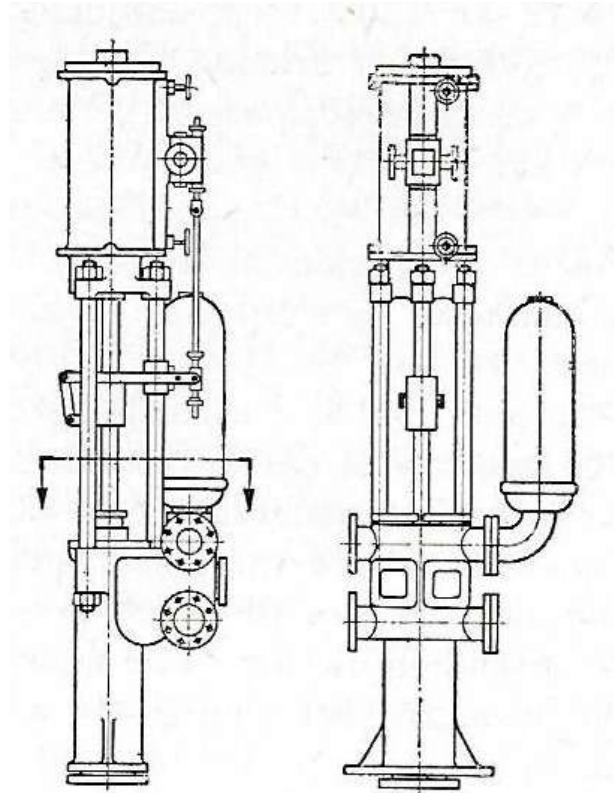
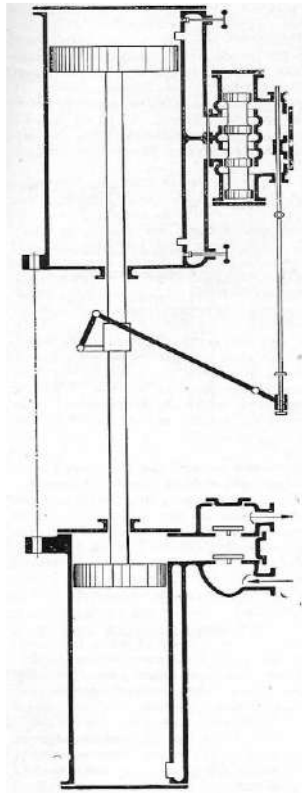


Simplexpomp van Wier

Simplexpomp van Worthington

De hierna afgebeelde figuur geeft een langsdoorsnede van de simplexpomp van Worthington weer. Het essentiële verschil van deze pomp met die van Weir is gelegen in de stoom toe- en afvoer. Bij de Weir pomp gebeurt dit met behulp van een tamelijk complex schuivenstelsel van vlakke schuiven, bij de Worthingtonpomp daarentegen wordt gebruik gemaakt van een combinatie van een vlakke en een ronde schuif oftewel bosschuif.

De gegoten ijzeren stoomcilinder van deze pomp is met een drietal stalen kolommen verbonden met de watercilinder die eveneens van gietijzer is gemaakt. De stalen stoomzuigerstang is met behulp van een klemkoppelbus verbonden met de bronzen waterzuigerstang. De achterzijde van de klembus is voorzien van een korte arm die met een slingerstang gekoppeld is aan de stoomschuifhefboom. Deze hefboom die de hulpschuif aandrijft is dubbel uitgevoerd evenals die van de Weir pomp zodat de klemkoppelbus er tussendoor kan bewegen. Het draaipunt van de stoomschuifhefboom wordt gevormd door een stoel die aan de voorste stalen kolom is vastgeklemd.



Simplexpomp van Worthington

Aan de korte arm van de hefboom is een draaibare meenemer bevestigd die voorzien is van een doorlopend gat waar doorheen het ondereinde van de stoomschuif-drijfstang passeert. Onder en boven de meenemer zijn op deze drijfstang ronde aanslagmoeren geschroefd, waarvan men de juiste stand met een boutje kan borgen.

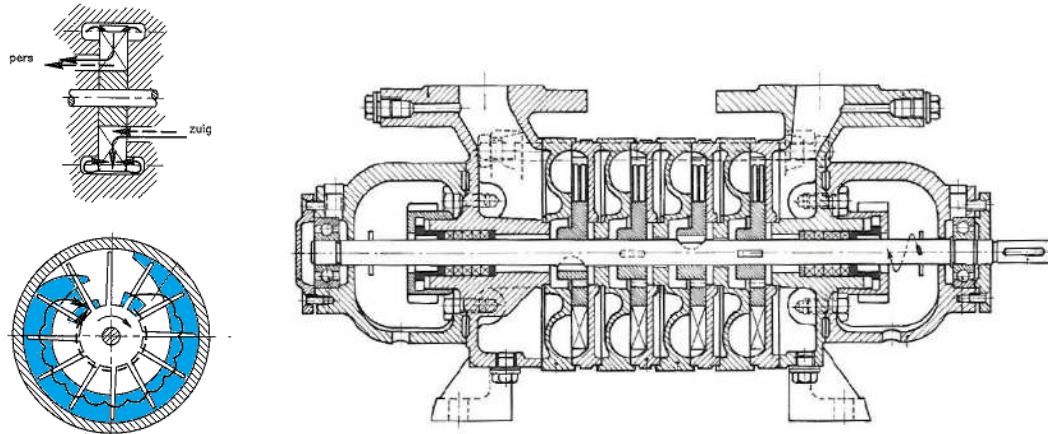
De watercilinder vormt met de klepkasten voor boven- en onderzijde één geheel. De watercilinder is van een bronzen voering voorzien welke aan de onderzijde van een aantal gaten is voorzien voor het doorlaten van het water. De bronzen waterzuiger is voorzien van een sponning waarin een vijftal rubber pakkingringen zijn aangebracht voor afsluiting van de zuiger in de voering.

4.7.3 Waaierpompen

Bij de jongere generaties stoomgemalen maar ook ter vervanging van versleten exemplaren bij reeds bestaande stoomketelinstallaties worden meertraps zijkanaalwaaierpompen toegepast. Dit type pomp is zelf-aanzuigend en kan dus ook een mengsel van water, lucht en waterdamp verpompen. Men spreekt vaak over "SiHi-pompen", afgeleid van Siemen & Hinch Itzehoe, de uitvinders van deze pomp.

Het werkingsprincipe berust op die van een wattering- en centrifugaalpomp. De pomp is voorzien van een concentrisch in het huis opgestelde waaier met rechte schoepen waarbij het pomphuis

terzijde van de waaier, aan de buitenomtrek is voorzien van groeven. Uit deze constructiewijze is de naam zijkanaalpomp ontstaan.



Zelfaanzuigende zijkanaalpomp

Over het eerste deel van het omloopkanaal waarbij de diepte van het kanaal toeneemt van nul – maximaal, wordt via de zuigopening een mengsel van water en lucht in de pompruimte gezogen. Het water wordt door het roterende schoepenwiel tegen de wand van het pomphuis geslingerd; terwijl de lucht zich verzamelt rond de naaf van het schoepenwiel. Aan de perskant wordt de vloeistof door het ondieper worden van het omloop- kanaal naar de uitstroomopening gestuwd en weggeperst, waarbij ook de lucht wordt meegenomen. Het omloopkanaal veroorzaakt bij het verpompen van alleen vloeistof nog een bijzondere werking. De vloeistof wordt naar de buitenomtrek in het zijkanaal geslingerd en komt aan de binnenomtrek van dat zijkanaal weer tussen de schoepen van het wiel. Op weg van de zuig- naar de persopening ondergaat de vloeistof een aantal malen dezelfde werking. Aan de vloeistof wordt daardoor voortdurend nieuwe snelheidsenergie toegevoegd. Hierdoor ontstaat een sterke drukverhoging die een veelvoud bedraagt van die bij een normale centrifugaalpomp met dezelfde omtreksnelheid van de waaier. Met dit type pomp wordt de meegevoerde lucht of damp tegelijk met de vloeistof, in dit geval het ketelvoedingswater, samengeperst. De zijkanalen kunnen zowel aan één zijde, zoals hierboven is aangegeven, maar ook aan beide zijden van het schoepenwiel worden aangebracht.

In de rechter figuur hierboven is een viertraps zijkanaalpomp afgebeeld. De pomp is van het zogenoemde gelede type. Hierbij zijn de tussenstukken, de zuig- en de persdeksel onderling door trekbouten verbonden. De geslepen roestvaststalen as is aan beide zijden gelagerd in een kogellager. De waaiers zijn schuivend op de as aangebracht waardoor ze zich gemakkelijk kunnen instellen en slijtage tot een minimum beperkt blijft. In normale uitvoering voor het voeden van stoomketels zijn deze pompen van gietijzer en de waaiers van brons.

4.8 Brandstoffen en verbranding

In de stoomketels bij gemalen werd in het verleden een aantal soorten brandstoffen toegepast. Tegenwoordig beperkt dit zich tot steenkool en stookolie. In een enkel geval wordt geklooft rondhout toegepast. De verbranding van de brandstof vindt uitsluitend plaats in de gasfase van de elementen waaruit de brandstof is opgebouwd. Voorafgaand hieraan heeft zich dus al een heel proces afgespeeld. Het is belangrijk, zeker voor de stoker, de verschillende stappen van dit proces te kennen om de ketel op de juiste wijze te bedienen en de brandstof te verstoken.

4.8.1 Brandstoffen, begrippen en definities

Om aan een stoominstallatie te kunnen rekenen maar nog meer om controle te kunnen uitoefenen op de kwaliteit van de toegepaste brandstof en het uiteindelijke verbrandingsproces in de vuurhaard zijn in de loop der tijd een aantal hierna nader te noemen begrippen en definities ontwikkeld.

Verbrandingswaarde

Onder de verbrandingswaarde wordt de hoeveelheid warmte-eenheden verstaan die bij volledige verbranding van 1 kg brandstof wordt ontwikkeld bij een begin- en een eindtemperatuur van 15° C. We drukken dit uit in kcal/kg. De verbrandingswaarde, ook wel bovenste verbrandingswaarde genoemd, is vanwege de lage eindtemperatuur inclusief de verdampingswarmte van het vrije water in de brandstof en de verdampingswaarde die bij de verbranding van de waterstof ontstaat.

In een stoomketel worden de rookgassen ver boven de condensatietemperatuur via de schoorsteen afgevoerd zodat men geen gebruik kan maken van deze verdampingswarmte. Een meer op de praktijk toegesneden begrip is daarom de stookwaarde. De bij de verbranding gevormde waterdamp wordt, vooral bij koud weer, maar ook bij het stoken met een te grote lucht overmaat, zichtbaar in de vorm van een witte pluim op de schoorsteen.

Stookwaarde

Onder de stookwaarde wordt de verbrandingswaarde verstaan, verminderd met de verdampingswarmte van het water dat in de brandstof aanwezig is en de verdampingswarmte die bij de verbranding van de waterstof ontstaat. De verdampingswarmte van de bij de verbranding gevormde waterdamp bedraagt 604 kcal/kg en kan uit de stoomtabel worden afgeleid. Ook de stookwaarde, ook wel de onderste verbrandingswaarde genoemd, wordt uitgedrukt in kcal/kg.

4.8.2 Vaste brandstoffen

Vaste brandstoffen zijn ontstaan uit planten(resten) en bestaan daarom hoofdzakelijk uit koolstof (C), waterstof (H) en zuurstof (O). Uit de omgeving hebben zij in de loop van de tijd, behalve water, minerale bestanddelen zoals zand opgenomen. Door rotting hebben zich via verschillende stadia langzaam asfaltachtige stoffen zoals bitumen gevormd. Uit deze koolwaterstofverbindingen is eveneens in een laag tempo de zuurstof en een klein deel van de waterstof ontweken waardoor het koolstofgehalte relatief groter wordt. Dit verklaart het verschil in de chemische samenstelling tussen de jonge vaste brandstoffen zoals hout en turf en de zeer oude brandstof antraciet, zoals in de tabel hierna is aangegeven. Het niet in de tabel opgenomen gehalte aan stikstof (N) en zwavel (S)

bedraagt meestal 1 %. In de praktijk tracht men een gehalte aan vluchtige koolwaterstoffen van 20 % te benaderen omdat dit gehalte een goede verbranding waarborgt.

Brandstofsoort	Gewichtspercentage brandstof				
	Koolstof (C)	Waterstof (H)	Zuurstof (O)	Water (H ₂ O)	Vluchtig
Hout	35	5	30	25	
Turf	40	5	25	25	70-60
Bruinkool	50-30	5	10	30-50	60-45
Steenkool	70-80	4	10-4	4-10	45-10
Antraciet	85	2	3	5	10-5
Fabriekscokes	87	1	2	5	

Chemische samenstelling vaste brandstoffen

Steenkool ontstond ongeveer 300 miljoen jaar geleden. Het is een van de laatste fasen in het transformatieproces van veen via bruinkool naar antraciet dat uiteindelijk uitmondt in grafiet en bij verdere samendrukking en hogere temperatuur in diamant. Steenkool komt meestal in de diepere aardlagen voor. Hoe dieper de laag is gelegen, des te langer is de kool aan het omzettingsproces onderworpen geweest en minder rijk aan gas of vluchtige koolwaterstoffen. Het gehalte aan vluchtige koolwaterstoffen is zeer belangrijk voor de ontsteking en de verbranding van de brandstof, dus voor het verbrandingsproces in de vuurgang of -haard. Bij verhitting komen eerst de koolwaterstoffen van verschillende samenstelling vrij. Deze vallen dan vervolgens uiteen in eenvoudige stoffen, als methaan (CH₄), acetyleen (C₂H₂) en ethyleen (C₂H₄) terwijl ook waterstof (H) vrijkomt. Men kan de eigenschap van de brandstof beïnvloeden door gasrijke steenkoolsoorten te mengen met de goedkopere minder gasrijke soorten.

Steenkoolsoort	Gehalte aan vluchtige stoffen %	Eigenschap van de cokes
Vlamkool	50-40	gesinterd tot poedervormig
Gas - vlamkool	45-35	zwak bakkend en zeer lange vlam
Smeedkool (gaskool)	35-30	
Cokeskool	30-20	bakkend en lange vlam
Esskool (stoomkool)	20-15	
Magere kool	15-10	niet bakkend, poedervormig en korte vlam
Antraciet	10-5	

Kenmerken steenkoolsoorten

Eigenschappen van cokes

Steenkool waaruit de vluchtige koolwaterstoffen zijn ontweken bestaat hoofdzakelijk uit koolstof en noemen we cokes en als er nog enige vluchtige bestanddelen in overgebleven zijn half cokes. De eigenschappen van de cokes zijn van belang in relatie met het verbrandingsrooster, de druk van de verbrandingslucht en de noodzaak het vuur te bewerken. Het zogenoemde bakken van cokes

vermindert de luchtdoorlaat van het rooster, hetgeen de verbranding vertraagt en het gevaar doet ontstaan van het verbranden van de roosterstaven. Bovendien moet bij de bakkende cokes het vuur regelmatig worden bewerkt, waarbij de vuurdeur open moet staan en er onnodig veel koude lucht wordt toegevoerd. Anderzijds voorkomt bakkende cokes het doorvallen van fijne kooldeeltjes en het wegvliegen van onverbrande kooldeeltjes. Voor een juiste mate van bakkend vermogen mengt men soms verschillende steenkoolsoorten. De verbrandingssnelheid van cokes is afhankelijk van het aanrakingsoppervlak met de verbrandingslucht. Poreuze cokes en kleine stukjes verbranden daarom sneller dan grote massieve stukken cokes. Ook blijkt cokes uit steenkool met veel vluchtige koolwaterstoffen sneller te verbranden dan cokes uit magere kool zoals antraciet.

Water en as

Het watergehalte van vaste brandstof bestaat uit vrij water ontstaan door de blootstelling aan regen of het wassen na het delven en gebonden water dat in de poriën van de kool aanwezig is. Aan het verbrandingsproces gaat verdamping van dit water vooraf. Er ontstaan dan kleine openingen in de brandstof, die de verbranding bevorderen. Het watergehalte van de steenkool is meestal kleiner dan 4 % voor gewassen kool en 8 à 10 % voor fijn kool. Het watergehalte van bruinkool is aanmerkelijk hoger en bedraagt 30 à 50 %.

Tussen de gedolven steenkool zitten zand en stenen of het gruis hiervan. Deze bestanddelen zijn niet brandbaar en bepalen het asgehalte van de brandstof. Het asgehalte wordt zoveel mogelijk beperkt door zeven en wassen van de brandstof nadat het is gedolven doch bedraagt minstens 4 %. De as vermindert de stookwaarde van de brandstof en moet verwijderd worden, waarbij ook brandbare deeltjes kool verloren kunnen gaan. De as-laag beschermt echter de roosterstaven en kan in bepaalde gevallen zelfs te dun zijn. Gesmolten as vormt een slak, die in vloeibare toestand de roosterstaven en ook vuurvaste stenen aantast, tussen de roosterstaven kan lopen en de luchtspleten verstopen, waarbij onverbrande kooldeeltjes ingesloten kunnen worden. Dit laatste leidt tot het ontstaan van harde brokken; sintels genaamd. Smelten van as treedt op als de smelttemperatuur van de as wordt overschreden. In voorkomende gevallen moet men de temperatuur van het brandstofbed verlagen door meer lucht aan te voeren of, als de mogelijkheid hiervoor aanwezig is, stoom in te blazen. De oorzaak voor de slakvorming is vaak het stoken met een te geringe luchttoevoer en gasarme brandstof waardoor de verbranding hoofdzakelijk in de brandstoflaag plaatsvindt en minder er boven.

Stukgrootte

Naast de kwaliteit van de brandstof is de stukgrootte van belang om een goede verbranding op het rooster te kunnen laten plaatsvinden. De stukken steenkool mogen sowieso niet te klein zijn omdat zij dan bij de geringste beweging in het brandstofbed onverbrand door het rooster vallen.



Ongesorteerde steenkool

Verder mogen de stukken in grootte niet te veel van elkaar verschillen omdat kleinere stukken eerder verbranden, waardoor er gaten in het brandstof bed vallen waar doorheen relatief koude lucht passeert.

De steenkool die wordt gedolven, komt vermengt met zand en in verschillende afmetingen boven de grond. Stukken groter dan 80 mm noemt men stukkool, kleinere afmetingen gruiskool. De gruiskool wordt weer naar grootte gesorteerd en in de handel aangeduid met "nootjes" met daarachter een Romeins cijfer. Het gruis met een afmeting kleiner dan 5 mm noemt men fijnkool. Deze koolsoort wordt al of niet met een bindmiddel (pek, teer, enz.) tot briketten of tot de

Soort naam	Afmeting
Stukkool	groter dan 80 mm
Gruiskool	kleiner dan 80 mm
Nootjes I	van 80 – 50 mm
Nootjes II	van 50 – 30 mm
Nootjes III	van 30 – 20 mm
Nootjes IV	van 20 – 10 mm
Nootjes V	van 10 – 5 mm
Fijnkool	kleiner dan 5 mm

zogenoemde eierkolen verwerkt. Als het stookrooster wat betreft de spleetwijdte daarvoor is ontworpen kunnen in principe alle soorten steenkool tot aan fijn kool toe verstoekt worden, echter om ontwerptechnische redenen (robuuster rooster) zal men meestal nootjes II en III gebruiken. Verder is het verstoken van fijnkool moeilijk omdat de lichte delen door de verbrandingslucht kunnen worden meegenomen en onverbrand met de rookgassen ontwijken

Steenkool grootte-aanduiding

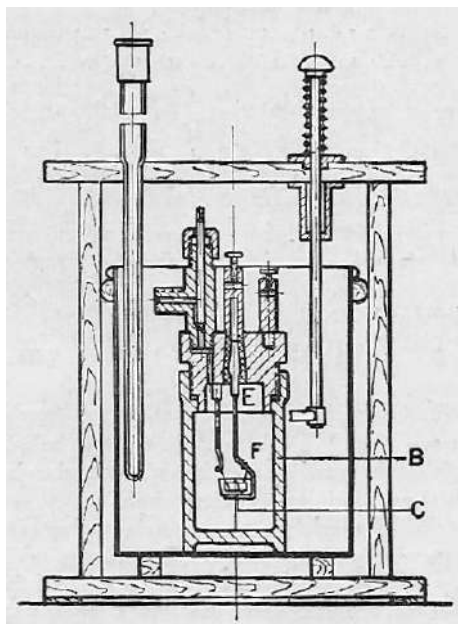
4.8.3 Bepaling van de verbrandingswaarde

De verbrandingswaarde van de diverse steenkoolsoorten is afhankelijk van de vindplaats, de ouderdom en het percentage onbrandbare bestanddelen. Voor het bedrijven van een stoominstallatie is het van belang om de hoeveelheid warmte die gedurende het verbrandingsproces ontwikkeld wordt te leren kennen.

Een methode hiertoe is om met een speciaal daarvoor ontwikkelde calorimeter van een steenkoolmonster de verbrandingswaarde vast te stellen en aan de hand daarvan de stookwaarde.

Deze hieronder afgebeelde calorimeter staat bekend als de bom van Berthelot Mahler en werkt als volgt:

Van het tot poeder gestoten steenkoolmonster wordt een nauwkeurig afgewogen hoeveelheid van 1 gram in het platina schaalje C gebracht, dat aan het schroefdeksel van de bom is bevestigd. De stalen bom is aan de binnenzijde verglaasd om de inwerking van zuren tegen te gaan. De bom



wordt na het opschroeven van het deksel met samengeperste zuurstof van ongeveer 25 kg/cm² gevuld en daarna in de calorimeter geplaatst. Hiervan zijn de temperatuur en de zogenoemde waterwaarde geijkt. De ontsteking van het brandstofmonster heeft plaats door het tot gloeien brengen van het ontstekings draadje van nikkeline met behulp van een elektrische stroom. Het geïsoleerde platina staafje EF waaraan het schaalje hangt is daartoe verbonden met de positieve pool van een accu, de negatieve pool is verbonden met de behuizing B van de bom en daardoor met de andere zijde van het nikkeline draadje. De afloop van het verbrandingsproces is merkbaar doordat de temperatuur van het water in de calorimeter niet meer stijgt. Deze temperatuur kan met behulp van de speciale thermometer in 1/100 °C worden afgelezen.

Bom van Berthelot-Mahler

Uit de temperatuurstijging, de waterwaarde van de calorimeter met de daarin opgestelde bom, en de hoeveelheid brandstof kan men als volgt de verbrandingswaarde berekenen

$$\frac{\text{Waterwaarde} \times \text{temperatuurverschil}}{\text{gewicht van de verbrande brandstof}} \quad [\text{kcal/kg}]$$

De verbrandingswaarde kan als de chemische samenstelling voldoende nauwkeurig bekend is ook aan de hand van de verbrandingswaarde van de afzonderlijke elementen worden berekend.

Bij verbranding verbinden de afzonderlijke bestanddelen van de elementen der brandstof zich met zuurstof in de verhouding van de atoomgewichten.

Koolstof (C)	Waterstof (H)	Zwavel (S)
$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	$2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$	$\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2$
12 kg + 32 kg = 44 kg	4 kg + 32 kg = 36 kg	32 kg + 32 kg = 64 kg
1 kg C = 32/12 = 8/3 kg O ₂	1 kg H ₂ = 32/4 = 8 kg O ₂	1 kg S = 32/32 = 1 kg O ₂

Verbinding van waterstof met de zuurstof die in de brandstof aanwezig is, geschiedt reeds vóór de verbranding en zó langzaam dat er geen warmte ontwikkeling is waar te nemen. Omdat 8 kg

zuurstof nodig is om 1 kg waterstof te binden zal er bij verbranding slechts $(H - O/8)$ kg waterstof in 1 kg brandstof beschikbaar zijn voor verbranding.

Bij volledige verbranding van 1 kg brandstof bestaande uit koolstof, waterstof en zwavel, worden al naar gelang het aandeel respectievelijk 8100 , 34400 en 2500 kcal ontwikkeld. Dus is de verbrandingswaarde V van 1 kg brandstof:

$$V = 8100 C + 34400 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2500 S \text{ [kcal/kg]}$$

Bij verbranding van 1 kg waterstof wordt $36/4 = 9$ kg water gevormd. Dit water en het water dat reeds in de brandstof aanwezig is verdampt bij de verbranding , waarvoor ongeveer 600 kcal per kg water nodig is. Omdat de energie in deze waterdamp met de rookgassen de schoorsteen verlaat en niet wordt benut moet de verbrandingswaarde hiermee als volgt worden gecorrigeerd om de stookwaarde W te verkrijgen.

$$W = V - 600 \times 9 \left(H - \frac{O}{8} \right) - 600 w \text{ [kcal/kg]}$$

Of:

$$W = 8100 C + 29000 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2500 S - 600 w \text{ [kcal/kg]}$$

In de formule is w het percentage vrij water in de brandstof hetgeen betekent dat de steenkool bij voorkeur overdekt moet worden opgeslagen of gedroogd voordat ze in de ketel wordt geschept.

De stookwaarde van steenkool kan variëren tussen de 6500-8600 kcal/kg. Over het algemeen wordt gebruik gemaakt van goed te verstoken steenkool die dan een verbrandingswaarde heeft van om en nabij de 7300 kcal/kg.

4.8.4 Vloeibare brandstoffen

Van de reeks vloeibare brandstoffen komt voor stoomketels alleen stookolie in aanmerking. Stookolie blijft over uit aardolie, nadat daaruit door middel van destillatie benzine, kerosine, petroleum, en gas- of dieselolie is gehaald.

Aardolie, in het verleden ook wel ruwe petroleum genoemd, is ontstaan uit het zogenoemde sapropelium; de resten van de onvolledige ontbinding van in water zwevende kleine dieren en planten. De uiteindelijke olievorming is een gevolg van natuurlijke destillatie onder hoge druk en temperatuur hetgeen zich diep onder het maaiveld afspeelt. De olie ligt opgeslagen in de bodem in zand, zand- of kalksteenaders, het zogenoemde petroleumsysteem, welke omgeven zijn door steenlagen die de olie en het daarbij aanwezige (aard)gas niet doorlaten. De druk bij dit destillatieproces diep onder de grond wordt voor een deel veroorzaakt door het gas dat niet door de steenlaag kan ontsnappen en is de oorzaak dat bij het aanboren van een nieuwe bron de olie naar boven wordt gestuwd. De ruwe aardolie is donkerbruin tot zwart gekleurd en bestaat uit een mengsel van een groot aantal soorten onverzadigde en verzadigde cyclische koolwaterstofverbindingen waarvan de atomen kettingvormig dan wel ringvormig met elkaar zijn verbonden. Deze

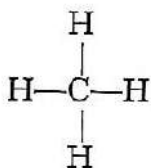
oorspronkelijke verbindingen verschillen in kookpunt, soortelijk gewicht en vloeibaarheid. We onderscheiden onder andere:

- Paraffinen of alkanen ($C_n H_{2n+2}$)
Dit zijn ketting vormige verzadigde koolwaterstoffen. Ze zijn chemisch weinig actief en bieden veel weerstand tegen invloeden op hun structuur
- Aromaten ($C_n H_{2n+6}$)
Dit zijn onverzadigde ringverbindingen met een vrij hoge stabiliteit. Ze hebben een laag waterstofgehalte en daardoor een lage verbrandingswaarde
- Olefinen of alkenen ($C_n H_{2n}$)
Dit zijn onverzadigde ketting verbindingen die als zodanig niet in aardolie voorkomen, maar tijdens het kraakproces ontstaan. Ze zijn chemisch zeer actief
- Naftenen of cyclanen ($C_n H_{2n}$)
De naftenen hebben dezelfde structuurformule als de olefinen. De naftenen hebben echter een ringvormige gesloten rijenstructuur én ze zijn verzadigd. Ze geven moeilijkheden bij de opslag, verwarming en verbranding van olie

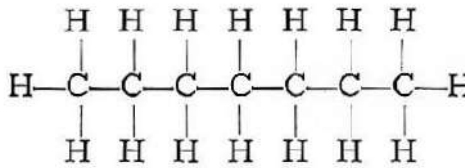
Uit de aardolie, een mengsel van de lichte en zware koolwaterstofverbindingen, ontwijken bij verwarming eerst de lichtste en daarna de steeds zwaardere fracties, dus achtereenvolgens benzine, petroleum en gasolie, totdat er een restant overblijft als er een temperatuur van ongeveer 340 °C is bereikt. Wat als restant bij die temperatuur overblijft heet residu en heeft een kookpunt dat hoger ligt dan 340 °C . Dit residu wordt onder andere als stookolie in de handel gebracht of verder in een kraakproces verwerkt tot benzine, dan wel in een destillatieproces verwerkt tot smeerolie.

Om de verlangde dunvloeibaarheid en een laag zwavelgehalte te bereiken wordt het residu in de raffinaderij wel vermengd met destillaat. Het zwavelgehalte van het destillaat is lager en dat van het residu is hoger dan dat van de oorspronkelijke aardolie, omdat de zwavel is gebonden aan zwaardere koolwaterstoffen.

Voor brandstoffen maar ook smeermiddelen is de reeks van verzadigde koolwaterstofverbindingen die kettingvormig zijn verbonden de belangrijkste. In het algemeen geldt voor koolwaterstoffen: hoe langer de koolstofketen, hoe zwaarder het molecuul, en hoe hoger het kookpunt. De lichtste verbindingen uit deze reeks van paraffinen of alkanen, zijn gassen die bij kamertemperatuur worden gevormd. Voorbeelden hiervan zijn methaan CH_4 , ethaan C_2H_6 , propaan C_3H_8 enz.



Methaan



Heptaan

Een voorbeeld van een vloeibare koolwaterstof verbinding uit de paraffinen- of alkanenreeks is heptaan C_7H_{16} , een benzine bestanddeel. Benzine is vloeibaar tot een temperatuur van $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Paraffine (kaarsvet) daarentegen, is een mengsel van een koolwaterstof- verbinding uit deze reeks met vaste kristallijne verbindingen van 16 tot wel 57 koolstofatomen, die bij kamertemperatuur een vaste stof vormen.

In het algemeen is de formule voor deze reeks die met de verzamelnaam paraffinen of alkanen wordt aangeduid : C_nH_{2n+2} , hetgeen betekent dat, als een lid van de reeks een aantal koolstof atomen (C) n bevat het een aantal waterstof atomen (H) $2n+2$ bevat. De waarde "n" van de reeks loopt van 1 tot over 50. De stoffen met een n- waarde tot 5 zijn bij kamertemperatuur en atmosferische druk gasvormig, die van 5 – 16 vloeibaar en die met een n- waarde groter dan 16, vast.

Omdat stookolie een mengsel is van overwegend lange koolwaterstofverbindingen waardoor er meer zwaardere koolstofmoleculen dan de lichtere waterstofmoleculen in de vloeistof aanwezig zijn, is deze zwaarder en is daarmee ook de hoge viscositeit (dikvloeibaarheid) van deze brandstof verklaard. Het percentage stookolie dat de ruwe aardolie bevat, is afhankelijk van de vindplaats. Sommige soorten aardolie bevatten minder dan 10 % stookolie, in andere komen in het geheel geen vluchtige bestanddelen voor en worden zonder nadere verwerking als stookolie gebruikt. Deze zeer wisselende samenstelling is een bezwaar voor het geven van een eng begrensde specificatie van de ruwe olie. Men mag uitgaan van een scheikundige samenstelling die bestaat uit 86 % Koolstof (C), 12,5 % waterstof (H) en 0,5 % andere bestanddelen. De stookwaarde is ongeveer 10.000 cal/kg en het soortelijk gewicht $0,85 - 1\text{ kg/dm}^3$.

Uit de hiervoor gegeven beschouwingen mag worden afgeleid dat stookolie een cocktail is van een groot aantal soorten koolwaterstofverbindingen met verschillende eigenschappen. Tegenwoordig wordt stookolie vermengd met zogenoemde biologische olie vervaardigd uit afvalstromen van de voedselindustrie.

De eigenschappen die men van stookolie ten behoeve van een gecontroleerde bedrijfsvoering van het stoombedrijf wil kennen, zijn:

- De viscositeit
De viscositeit in relatie met de temperatuur bepaalt de verpompbaarheid en de verstuijbaarheid
- Het stolpunt
Het stolpunt is van belang bij de opslag van de brandstof bij koude weeromstandigheden
- Het soortelijk gewicht
Olie wordt per gewichtseenheid verhandeld maar per volume-eenheden gemeten. Daarenboven geldt hoe dunner de olie des te lager het soortelijk gewicht en hoe beter de stook- en verbrandingswaarde
- De uitzettingscoëfficiënt
Is van belang bij opslag. Een overvolle opslagtank kan onder zomerse omstandigheden overlopen
- Het vlampunt
Van belang bij het inregelen van de stook-olietemperatuur voor de brander

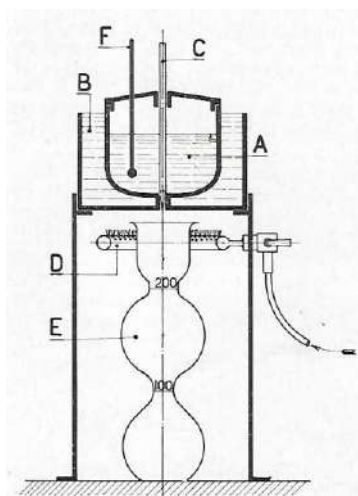
- Het brandpunt
Idem als voor het vlampunt
- De verbrandingswarmte
Van belang bij het toetsen van de bedrijfsvoering
- De stookwaarde
Idem als voor de verbrandingswarmte
- Het gehalte water, zwavel en mogelijk andere verontreinigingen
Nodig voor de bedrijfsvoering en toetsing van de geschiktheid van de brandstof voor de onderhavige stoomketel installatie. Denk hierbij aan zwavel en het dauwpunt hiervan.

Viscositeit

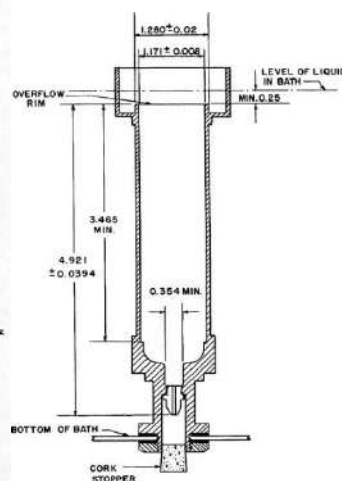
De viscositeit is een maat voor de inwendige wrijving die de stroming van een vloeistof door een leiding of een opening tegenwerkt. Een hoge viscositeit betekent dat de vloeistof dik vloeibaar is. Van stookolie neemt de viscositeit bij verwarming af. Om olie te kunnen verpompen en verstuiven moet men weten bij welke temperatuur dat mogelijk is.

De viscositeit wordt gemeten in zogenoemde viscosimeters. De meest gebruikte meters en ook gelijk de aanduiding voor de viscositeit voor brandstoffen zijn die van Engler, Redwood en Saybolt. In een dergelijke meter wordt van een bepaalde hoeveelheid olie, die op een van tevoren vastgestelde temperatuur wordt verwarmd, de uitstroombijde bepaald die de vloeistof nodig heeft om door een opening van geijkte vorm en afmeting te stromen.

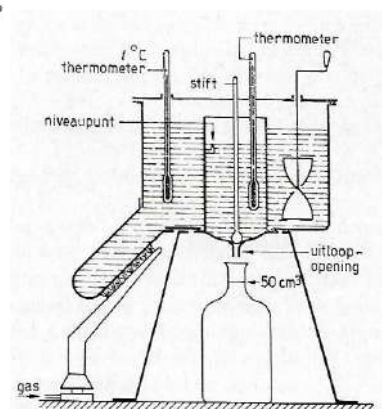
Bij de bepaling van de viscositeit met de toestellen van Redwood en Saybolt is de uitstroombijde van de vloeistof in seconden de maat voor de viscositeit. Je krijgt dan bij de stroperige stookoliesoorten waarden in de 1000-tallen die niet veel zeggen. Engler heeft dit ondervangen door de uitstroombijde te vergelijken met die van water bij 20 °C. De viscositeitswaarden die met het toestel van Engler worden bepaald, worden in tegenstelling tot die van Redwood en Saybolt niet in seconden uitgedrukt maar in graden.



Viscosimeter van Engler



Viscosimeter van Saybolt



Viscosimeter van Redwood

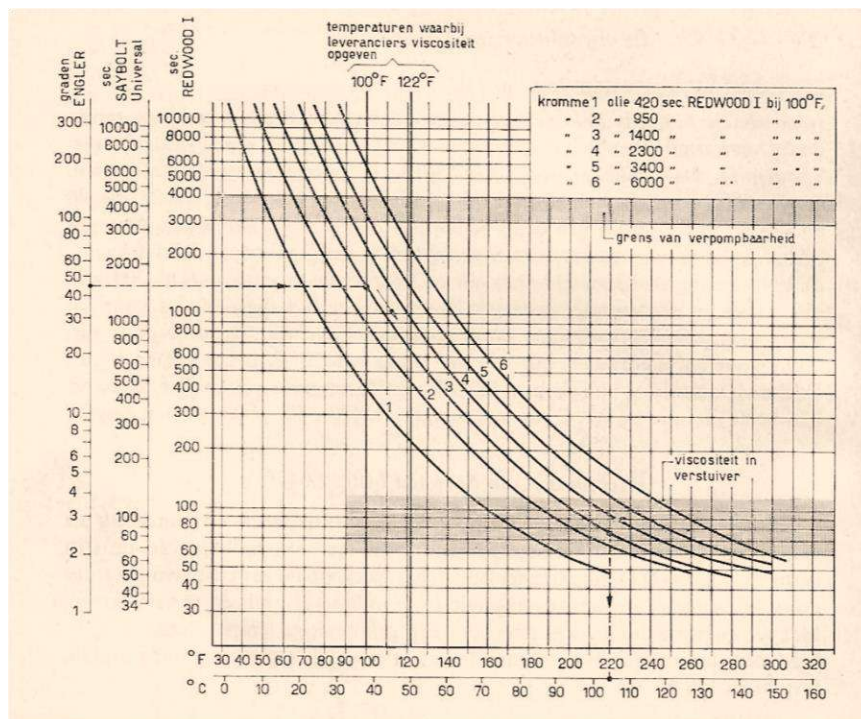
Bij de viscositeitsmeting met het toestel van Engler wordt als volgt te werk gegaan. In het bakje A wordt 250 cm³ olie langzaam en gelijkmatig verwarmd door het vloeistofbad B, dat op zijn beurt verwarmd wordt door de gasbrander D. De olie temperatuur kan op de thermometer worden afgelezen. Doorgaans wordt de viscositeit bepaald bij vier temperaturen, namelijk 20, 50, 80, en 100 °C. In de bodem van het bakje bevindt zich een gekalibreerde uitstroomopening die tijdens het verwarmen door de stift C gesloten wordt. Nadat men de stift C omhoog heeft getrokken, laat men van de 250 cm³ precies 200 cm³ uitstromen in een ondergelegen maatglas. De tijd die hiervoor nodig is wordt gedeeld door de tijd die nodig is voor het uitstromen van 200 cm³ water van 20 °C. Het quotiënt is het aantal graden Engler. Is die tijd voor een bepaalde oliesoort bijvoorbeeld 225 sec. bij 80 °C. en voor water 50 sec. bij 20 °C, dan heeft de olie een viscositeit van $225/50 = 4,5$ graden Engler.

Bij de viscositeitsmeting met het toestel van Redwood, dat veelal in de Angelsaksische landen wordt gebruikt, heeft het bakje een bepaalde verhouding van afmetingen en wordt dit tot het niveau punt gevuld. De uitloopopening wordt met een bolletje aan de stift gesloten. Men brengt het oliemonster in het bakje op de gewenste temperatuur door het water of de verwarmingsolie in de ruimte er omheen met een gasbrander te verwarmen. Met een roerinrichting zorgt men voor een gelijkmatige temperatuur. Men meet de uitlooptijd van 50 cm³ in seconden bij een of meer temperaturen, bijvoorbeeld 70 en 100 °F. Is de uitlooptijd van een oliemonster gemeten bij 100 °F bijvoorbeeld 3500 s, dan wordt de viscositeit aangeduid met 3500 sec. Redw. bij 100 °F.

In Amerika wordt veel gebruik gemaakt van de viscosimeter van Saybolt. Het toestel, waarvan in de hiervoor staande figuur alleen het binnenwerk is afgebeeld, werkt min of meer hetzelfde als het toestel van Redwood met dien verstande dat men 60 cm³ olie laat uitvloeien. Ook de uitstroomopening wijkt af van die bij Redwood (groter) waardoor de verkregen waarden uitgedrukt in seconden Saybolt Universal niet zonder meer zijn om te rekenen.

De natuurkunde tenslotte rekent met weer andere en theoretisch gefundeerde eenheden voor de viscositeit van een vloeistof, namelijk de Stokes of wel de centistokes (cS); genoemd naar de Engelse natuurkundige Stokes. De viscositeit wordt bepaald met een in principe afwijkende viscositeitsmeter. Vooral in de smeerolie techniek wordt hiervan gebruik gemaakt, onder andere om direct uit de fysische waarden van de viscositeit de draagkracht van een smeerfilm te berekenen. Omdat de verschillende viscositeitswaarden niet zondermeer met een eenvoudige factor in elkaar zijn om te zetten wordt voor het omrekenen van een bepaalde viscositeit van de ene schaal in de andere meestal gebruik gemaakt van tabellen en grafieken.

In de hierna afgebeelde grafiek staan links de meest gebruikte aanduidingen voor viscositeit. Van enige soorten stookolie is het verloop van de viscositeit bij verandering in de temperatuur daar te zien. Ook is aangeduid welke viscositeit de olie ongeveer moet hebben om verpompt dan wel verstoven te kunnen worden.



Verloop viscositeit afhankelijk van de temperatuur

De volgende tabel vermeldt de gegevens van enkele soorten stookolie.

	Dunne stookolie	I	Stookolie II	III	IV
Viscositeit bij 100°F sec Redw. I	30 .. 45	300 .. 500	800	3 500	6 500
Soort. massa bij 60/60°F (kg/dm³)	0,88		0,96		0,98
Vlampunt °C	90		95		100
Pourpoint (stolpunt) °F	—2		6		36
Verpompbaar bij °C		15	25	45	50
Verstuifbaar (druk) bij °C		65 .. 90	75 .. 110	105 .. 135	115 .. 150
Gehalte C gew. %	85,7	85,8	85,7	85,4	85,6
Gehalte H gew. %	13,2	11,7	11,5	11,3	11,0
Gehalte S gew. %	0,7	2,1	2,4	2,9	3,0
Theor. vol. lucht (n = 1) m³ norm./kg	11,09	10,72	10,68	10,63	10,61
Gehalte CO₂ + SO₂ in droog gas max. (n = 1) gew. %	15,4	15,9	15,9	16,0	16,1
Verbrandingswarmte MJ/kg	45,6	44,3	43,9	43,7	43,3
Stookwaarde MJ/kg	42,7	41,5	41,3	41,1	40,8

Gegevens van dunne en dikkere stookoliesoorten

Stolpunt

Het stolpunt is de temperatuur waarbij de olie, of althans een groot deel er van, vast wordt en niet meer verpompt kan worden. Om het “bevriezen” van de stookolie in de opslag en in het leidingsysteem te voorkomen moeten de leidingen en de opslagtank verwarmd worden. De tank wordt daartoe met een stoomspiraal op de bodem van de tank verwarmd. Het olieleidingsysteem wordt meestal samen met een stoomleiding in een isolatiemantel verpakt. Als er ten gevolge van langdurig dan wel onderbroken maalbedrijf geen stoom wordt gegenereerd, zal men de oliegestookte stoomketels bij gemalen opstoken met een lichtere brandstofsoort totdat er voldoende verwarmingsstoom is gegenereerd voor het opwarmen van de voorraadtank en het onderhavige leidingsysteem. Dit betekent dat voor dat de installatie wordt gestopt teruggeschakeld moet zijn op de lichtere brandstofsoort.

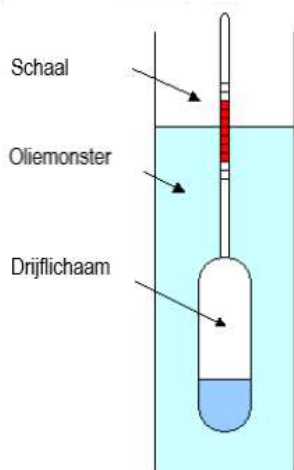
Soortelijk gewicht

Het soortelijk gewicht wordt in de tabel hier voor aangeduid met soortelijke massa. Eigenlijk moet er staan volumieke massa. Omdat er nagenoeg hetzelfde wordt bedoeld blijven we hier soortelijk gewicht gebruiken.

Het soortelijk gewicht wordt op twee manieren opgegeven;

- Soortelijk gewicht als de verhouding tussen het gewicht van 1 dm³ olie van 60 °F (15,5 °C) en het gewicht van 1 dm³ water van 60 °F, aangeduid met: s.g. 60 °F/60 °F.
- Soortelijk gewicht als de verhouding tussen het gewicht van 1 dm³ olie van 15 °C en het gewicht van 1 dm³ water van 4 °C, aangeduid met: s.g. 15 °C/ 4 °C.

Het soortelijk gewicht is zeer belangrijk voor de controle van oliehoeveelheden. Men meet namelijk



per volume-eenheid maar betaalt per gewicht. Het soortelijk gewicht wordt bepaald met een areometer of densimeter van Baumé zoals hiernaast is afgebeeld.

Bij de bepaling van het soortelijk gewicht meet men eerst de temperatuur, omdat de uitzettingscoëfficiënt van olie ongeveer 0,007 per °C bedraagt en het soortelijk gewicht bij een temperatuur verschil van 1,5 ° ongeveer 1 % toe of afneemt. Op de meter is aangegeven bij welke temperatuur deze is geijkt om de omrekening te kunnen maken.

In verband met de uitzetting is het raadzaam om een voorraad tank niet verder te vullen dan tot 95 % van zijn nominale inhoud.

Densimeter van Baumé

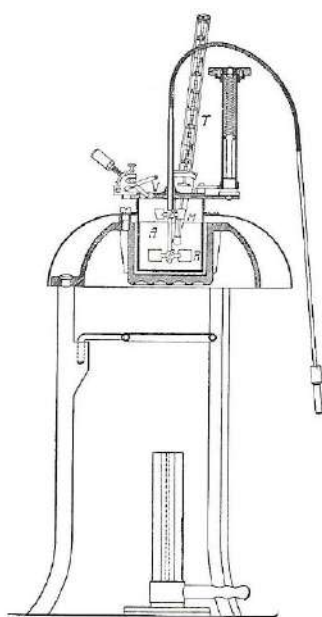
Brandpunt en vlampunt

Het ontvlammingspunt of kortweg vlampunt is de laagste temperatuur waarbij de ontwikkelde damp van een olie kan worden ontstoken. Bij deze temperatuur wordt net zoveel damp of gas ontwikkeld dat de vlam kan worden onderhouden. Bij de beproeving er van zal de damp even ploffen als zij in contact komt met een vlam, maar ze blijft niet branden. Hoe hoger het vlampunt ligt des te kleiner

is het brand- of ontploffingsgevaar hetgeen van groot belang is voor de opslag, het transport en het gebruik van de brandstof bij de bemalingsinstallatie.

Het brandpunt is de laagste temperatuur waarbij de gasontwikkeling zodanig is dat de olie zonder hulpmiddelen blijft branden. Het brandpunt ligt gewoonlijk 10 - 25 °C hoger dan het vlampunt. Het vlam- en brandpunt worden bepaald met het hieronder afgebeelde toestel van Pensky-Martens.

Het vat A, waarin zich een hoeveelheid van de te beproeven brandstof bevindt, wordt bij dit toestel omgeven door een luchtmantel die door een gasbrander wordt verwarmd. Behalve de thermometer



bevindt zich in de vloeistof een met de hand bewogen roerwerk dat gedurende de proef met een snelheid van 1 a 2 omwentelingen per minuut wordt gedraaid. Het vat is aan de bovenkant gesloten met een vlak deksel waarin zich openingen van een voorgeschreven vorm bevinden. Deze openingen worden met een vlakke draaischuif afgedekt. Waarnemingen worden gedaan bij iedere 5 °C temperatuurstijging. Het roerwerk wordt dan even stilgezet en de draaischuif geopend. Het mechanisme is zo ingericht dat bij het openen het proefvlammetje V automatisch op de juiste wijze in het vat wordt gebracht. Het moet daar juist 1 seconde verblijven en wordt dan snel teruggetrokken, waarbij de schuif weer gesloten wordt. Het bereiken van het ontvlammingspunt wordt merkbaar door een flauwe ontploffing in het toestel. De temperatuur waarbij de gasontwikkeling zo sterk is dat na ontsteking de vlam blijft branden noemt men het brandpunt.

Toestel van Pensky- Martens

Verbrandigswarmte en de stookwaarde

Bij de behandeling van de vaste brandstof steenkool is reeds aangegeven hoe aan de hand van de chemische samenstelling van de brandstof zowel de bovenste als de onderste verbrandingswaarde of stookwaarde kan worden vastgesteld. Ook is in die paragraaf aangegeven hoe deze waarden proefondervindelijk met de zogenoemde "bom" van Berthelot-Mahler kunnen worden bepaald.

De stookwaarde van de stookolie varieert tussen de 9800 – 10000 kcal/kg. Meestal wordt gebruik gemaakt van de dunnere soorten zoals stookolie I of II, zoals in de hier voor aangegeven tabel is aangegeven waarvan omgerekend (1 cal = 4,1868 J) de stookwaarde respectievelijk 9910 en 9850 kcal/kg bedraagt.

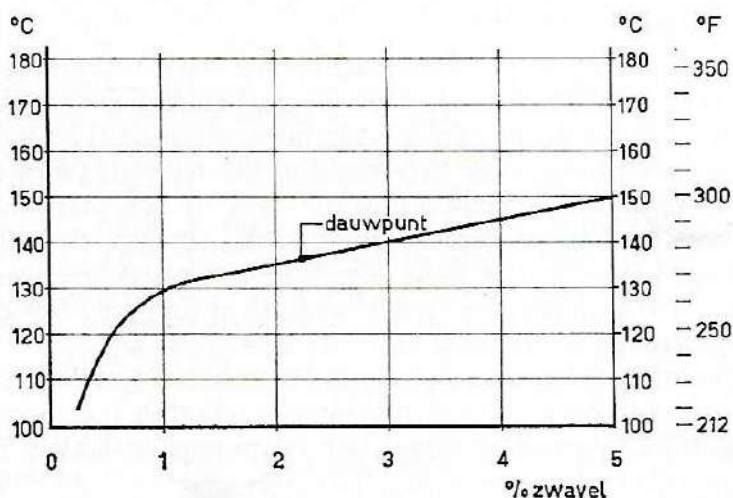
Verontreinigingen van olie

Tot de verontreinigingen van olie behoren water, zwavel, as en mechanische verontreinigingen.

Water is geen brandstof, en doordat het verdampt in de ketel en als zodanig via de schoorsteen ontwijkt, onttrekt het warmte aan het proces. Bij het bepalen van de stookwaarde hebben we gezien dat dit een klein verlies geeft. Bij zeer zware oliesoorten blijkt een kleine hoeveelheid water echter een rookvrije verbranding te bevorderen. Om die reden wordt bij sommige installaties in plaats van

druk-verstuiving stoomverstuiving toegepast. Door het verschil in soortelijk gewicht bezinkt het water in de opslag en kan op gezette tijden bij een bewust gecreëerd laag gelegen punt worden afgetapt. De olie moet dan wel dun vloeibaar zijn hetgeen wordt bereikt door de tankinhoud te verwarmen tot ongeveer 70 °C.

Stookolie bevat 2 – 4 % zwavel , die wel verbrandt, doch slechts een kwart van de warmte levert die eenzelfde gewicht aan olie ontwikkelt. De zwavel verbrandt tot SO₂ (zwaveldioxide), dat zich met water verbindt tot H₂SO₃ (zwavelig zuur) en vervolgens tot H₂SO₄ (zwavelzuur), die, evenals bij het verstoken van steenkool de oorzaak kunnen zijn van ernstige corrosieverschijnselen. Men moet dan ook zorgen dat de eindtemperatuur van de rookgassen in de installatie steeds boven het dauwpunt van de rookgassen ligt. Dit is mogelijk door met een zo'n klein mogelijke luchtvermaat te stoken. Het zuurstofgehalte van de rookgassen is dan zo klein dat uit de SO₂ (zwaveldioxide) het nauwelijks met water in H₂SO₄ (zwavelzuur) is op te lossen, SO₃ (zwaveltrioxide) wordt gevormd en het dauwpunt van de rookgassen in plaats van bij 140 C bij ongeveer 60 C komt te liggen.



Dauwpunten in relatie tot zwavelgehalte

Ook voor het Vanadium, een katalysator bij de vorming van SO₃, is een kleine luchtvermaat gunstig zoals we zullen zien. Stookolie bevat in de regel slechts een kleine hoeveelheid as welke gedeeltelijk bestaat uit natriumsulfaat (Na₂SO₄) ook wel Glauberzout genoemd en Vanadium-pent oxide (V₂O₅). Deze stoffen vormen een slakafzetting op oppervlakken die een hoge temperatuur hebben, met als gevolg dat de doortocht van de gassen sterk achteruit gaat .

Onder mechanische verontreinigingen worden verstaan: roest- en hamerslagdeeltjes die loslaten van het (binnen)oppervlak van tanks en leidingen.

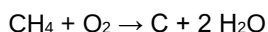
4.8.5 Gasvormige brandstoffen

De aardgaswinning in Nederland dateert uit de jaren zestig en is vanaf die tijd toegepast bij de stoomketels van industriële installaties en energiecentrales. Behoudens het ir D.F. Woudagemaal en het stoomgemaal Keizersveer waren er toen geen stoomgemalen meer in bedrijf. Anders dan

bij het museumgemaal De Vier Noorder Koggen waar een moderne aardgas gestookte hulpstoomketel staat opgesteld zal men geen gas gestookte stoomketels in gemalen aantreffen.

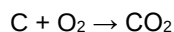
4.8.6 Verbranding

Verbranding is een snel verlopend proces waarbij de bestanddelen van een brandstof met zuurstof worden verbonden, warmte wordt ontwikkeld en de stof gaat gloeien. Deze warmte wordt in stoomketels gebruikt voor het genereren van stoom die vervolgens in de stoommachine wordt omgezet in mechanische arbeid. In de meeste gevallen zal verbranding gepaard gaan met het optreden van een vlam, veroorzaakt door de gloeiende gas- of dampmassa. Verbranding zal alleen plaatsvinden in de gasvormige toestand van de brandbare elementen van de brandstof door deze in reactie te brengen met zuurstof. Hiervoor moet een voldoende hoge temperatuur, de ontstekings-temperatuur of het vlampunt van het gas, zijn bereikt. Deze ontstekingstemperatuur loopt voor de verschillende stoffen sterk uiteen. Daalt door de een of andere oorzaak de temperatuur beneden de ontstekingstemperatuur dan dooft de vlam. Dit is bijvoorbeeld het geval als we een kaars uitblazen. Het lichtgevende vermogen van een vlam is te danken aan de vaste koolstof deeltjes die er in voorkomen en door de hitte van de vlam tot gloeien worden gebracht. Het gaslicht van de straatlantaarns uit het verleden dankt zijn helderheid aan het zogenoemde gloeikousje dat in de vlam was aangebracht. Zuivere waterstof brandt met een kleurloze vlam. Is bij het verbranden van een gas of damp de luchttoevoer gering dan zal het element met de grootste affiniteit tot zuurstof zich hiermee als eerste binden. Bij koolwaterstofverbindingen is dat de waterstof. Als voorbeeld de onvolkomen verbranding van de koolwaterstofverbinding methaan:



Er vindt dan een onvolkomen verbranding plaats waarbij de onverbrande koolstofdeeltjes gaan gloeien en licht uitzenden. Houdt men een koud voorwerp in de vlam bij deze verbranding dan zal zich hierop de onverbrande koolstof als roet afzetten, een verschijnsel wat we waarnemen bij de vlampijpen en rookgaskanalen in een stoomketel. Ook zullen de rookgassen die via de schoorsteen worden afgevoerd donker gekleurd zijn en de stoker waarschuwen voor een verkeerd afgestelde verbrandingsluchttoevoer.

Als er wel voldoende lucht aanwezig is voor de verbranding dan verbrandt ook de koolstof en wel als volgt :



Als gevolg van het ontbreken van vaste koolstof deeltjes wordt de vlam kleurloos.

De mate van roetvorming is dus een maat voor het al of niet op de juiste wijze stoken van een stoomketel. De stoker dient dan ook regelmatig naar buiten te gaan om de rookpluim op de schoorsteen te analyseren. Een grijs-witte rookpluim geeft aan dat er gestookt wordt met teveel lucht terwijl een donker gekleurde pluim aangeeft dat niet genoeg lucht voor een goede verbranding voorhanden is. Bij een goed aangelegd en onderhouden vuur zal er een licht flonkerende pluim op de schoorsteen staan.

De uiteindelijke verbranding van brandstoffen in de vuurgang of vuurhaard van een stoomketel vindt afhankelijk van de soort brandstof en de aggregatietoestand vast, vloeibaar of gasvormig, in de volgende stappen plaats.

Verbranding van steenkool (vaste brandstof)

Voordat er sprake is van verbranding moet in geval van een vaste brandstof deze eerst worden gedroogd en ontgast. Hiervoor moet warmte worden toegevoerd. Bij een voldoende hoge temperatuur zullen als eerste de brandbare gassen ontsteken en vervolgens de koolstof -hier cokes genoemd- verbranden. Ontsteking vindt plaats, als de aanvoer van warmte zoveel groter is dan de afvoer, dat de ontstekings temperatuur wordt bereikt.

De aanvoer van warmte vindt plaats door:

- Verbranding van de brandstof (de verbrandingswarmte)
- Voorverwarmde verbrandingslucht

De afvoer van warmte vindt plaats door:

- Uitstraling van het brandstofbed
- Verwarming van de brandstof en de verbrandingslucht tot de ontstekings temperatuur van de brandstof

Het verwarmen van de verbrandingslucht eist een substantieel deel van de door verbranding ontwikkelde warmte op en is de reden om deze voor te verwarmen door deze langs de warme ketel te leiden of met behulp van een zogenoemde lucht voorverwarmer; afgekort aangeduid met (LUVU).

De ontstekings temperatuur van steenkool ligt gemiddeld op 450 °C, voor cokes, dus ontgaste steenkool, is dat 650 °C. Dit betekent dat als men met een te grote luchtvermaat en niet voorverwarmde lucht stookt men in staat is het vuur uit te blazen.

De ontbranding van de ontwijkende gassen is afhankelijk van de samenstelling ervan. De belangrijkste daarvan zijn in de hierna volgende tabel weergegeven. Uit de tabel kan worden opgemaakt dat als de ontstekings temperatuur niet word gehaald van een bepaalde gassoort deze onverbrand kan ontwijken.

Gassoort	Ontstekings temperatuur °C	Ontstekings snelheid m/sec	Stookwaarde kcal/kg	Soortelijk gewicht kg/Nm ³
Methaan	700	0,25	12.000	0,70
Ethyleen	540	0,50	11.500	1,25
Acetyleen	430	1,10	2.700	1,15
Koolstofoxide	650	0,30	2.400	1,25
Waterstof	580	2,00	29.000	0,09
Zuurstof	-	-	-	1,43
Stikstof	-	-	-	1,25

De eigenlijke verbranding verloopt als volgt:

- Omzetting van de C-H-O-verbindingen in vluchtige C-H verbindingen
- Uiteenvallen van de C-H-verbindingen in vrije C en CH₄, C₂H₂, C₂H₄ verbindingen die vervolgens weer uiteenvallen in C en H₂
- Verbranding van de H₂ tot H₂O dat in het vuur weer ontleed wordt in H₂ en O waarmee de vrije C tot CO verbrandt waarbij opnieuw H₂O wordt gevormd
- Verbranding van CO tot CO₂ en van H₂ tot H₂O

Verbranding van stookolie (vloeibare brandstof)

Hier voor is aangegeven dat er alleen sprake kan zijn van verbranding als de brandstof in de gasfase verkeert en dat die fase uitgaande van vaste brandstoffen via de vloeistoffase wordt bereikt. Vloeibare brandstoffen staan dus ten opzichte van vaste brandstoffen een stap dichterbij de gasfase. Daar waar bij vaste brandstof zoals steenkolen het omringende vuur op de roosters in de stoomketel de kolen op ontstekings temperatuur brengen, gebeurt dit bij vloeibare brandstoffen voor het overgrote deel door middel van voorwarmers buiten de ketel.

Voor het verkrijgen van een goede verbranding moeten de olie en de lucht in de juiste gewichtsverhouding en de vereiste toestand in de vuurgang of -haard van de ketel worden gebracht. Voor een goede verbranding is het noodzakelijk:

- dat de olie ontdaan is van vaste en vloeibare verontreinigingen
- dat de olie verwarmd is tot een geschikte temperatuur zodat er een zekere dun-vloeibaarheid ontstaat, nodig voor de verstuiving, waardoor een groot oppervlak gevormd wordt voor het verwarmen en vervolgens vergassen van de brandstof
- dat de stookolietemperatuur constant blijft omdat anders niet alleen de verbranding ongunstig wordt beïnvloed maar ook de capaciteit van de ketel daardoor verandert.
- dat de olie met een zekere snelheid en richting de brander verlaat zodat zij zwevend in de lucht verbrandt, voordat zij de relatief koudere wanden van de vuurgang, vuurhaard of vlampijpen raakt waardoor de verder verbranding belemmerd wordt.
- dat de verbrandingslucht met een zodanige snelheid en bewegingsrichting wordt ingevoerd, dat zij ten opzichte van de oliedruppels een zekere snelheid heeft en daardoor de op elke oliedruppel gevormde gasmantel snel afstroopt en zich daarmee vermengt. Daartoe moet de lucht in de lengte richting van de brander een geringe snelheid en een draaiende beweging hebben, dus een schroeflijn met een kleine spoed.
- dat de lucht verwarmd is tot 150 a 250 °C om een snelle ontsteking te bevorderen.

De juiste olietemperatuur van de stookolie kan men als deze niet bekend is proefondervindelijk bepalen. Deze ligt afhankelijk van de soort stookolie tussen de 100 en 140°C en niet hoger dan 10°C beneden de ontstekings temperatuur van de brandstof. Is het vlampunt niet bekend dan kan men de temperatuur zolang opvoeren tot de olie in de brander vergast, hetgeen zichtbaar is aan een onregelmatige vlam. Vervolgens laat men de temperatuur geleidelijk zover dalen tot men een regelmatige en heldere vlam heeft verkregen.

Er vindt bij verbranding van olie onder atmosferische druk een soortgelijk proces plaats als in een kraakinstallatie bij de raffinage van olie. De koolstofatomen die bij het kraken uit de koolwaterstof verbindingen vrijkomen, verschijnen in de vlam als gloeiende deeltjes.

De waterstof in de brandstof verbrandt snel en volledig, doch de koolstof ontvlamt alleen in een omgeving met vrij hoge temperatuur en verbrandt vrij langzaam, zodat zij niet altijd volledig verbrandt hetgeen zichtbaar is aan een donker gekleurde rookpluim op de schoorsteen. Er ontstaat dan roet, die zich op het VO of in de vuurgang of de vuurhaard blijft liggen.

Verbranding van aardgas (gasvormige brandstof)

Gasvormige brandstof behoeft alleen met de juiste hoeveelheid lucht vermengd te worden om goed en snel te kunnen ontsteken en verbranden. Het is ten opzichte van steenkolen en stookolie een uitermate schone brandstof hetgeen zich uit in een aanzienlijk langere levensduur van de ketel. Echter bij polder en boezem gemalen zijn nooit gas gestookte stoomketels toegepast zodat deze brandstofsoort in deze leidraad verder buiten beschouwing blijft.

4.8.7 Benodigde hoeveelheid verbrandingslucht

Scheikundige begrippen

Verbranding is een scheikundig proces. Voor een goed begrip van verbrandingsverschijnselen is daarom enige kennis van de scheikunde noodzakelijk en kan een korte samenvatting hiervan nuttig zijn.

In de natuurkunde wordt bestudeerd, hoe de eigenschappen van een stof -alles wat ruimte inneemt- veranderen bij de drie aggregatie toestanden vast, vloeibaar en gasvormig. De samenstelling van de stof blijft hetzelfde en kan na een toestandsverandering weer teruggebracht worden naar de begintoestand. De scheikunde houdt zich bezig met verschijnselen waarbij de originele eigenschappen van een stof verloren gaan en nieuwe stoffen ontstaan met andere eigenschappen, zoals bij de verbinding met zuurstof (verbranding, oxidatie) of bij het onttrekken van zuurstof (reductie). Bij het tot stand komen van een scheikundige verbinding komt meestal warmte vrij, aangeduid met exotherme reactie, maar soms wordt ook warmte opgenomen of moet warmte worden toegevoerd. Dit laatste noemen we een endotherme reactie.

De stoffen, die wij gebruiken, zijn samengesteld uit een grote hoeveelheid zeer kleine deeltjes. De kleinste deeltjes van een stof, waarin de eigenschappen van de stof nog aanwezig zijn noemen we moleculen. De moleculen bestaan op hun beurt uit nog weer kleinere deeltjes, die we elementen noemen, en meestal niet meer de eigenschappen van de oorspronkelijke stof hebben. Elementen zijn stoffen die niet in andere stoffen kunnen worden gesplitst.

Waterstof en zuurstof bijvoorbeeld blijken niet meer te kunnen worden gesplitst in andere stoffen, zij behoren daarom tot de elementen.

Bij brandstoffen en de samenstelling van de rookgassen zijn de volgende elementen van belang.

Element	Latijnse naam	Symbool
Koolstof	Carbonium	C
Waterstof	Hydrogenium	H
Zuurstof	Oxygenium	O
Stikstof	Nitrogenium	N
Zwavel	Sulfer	S

Ten einde de samenstelling van stoffen en de scheikundige omzetting in sterk verkorte vorm te kunnen weergeven heeft men de elementen aangeduid met de eerste en zo nodig met de tweede letter van hun Latijnse of Griekse benaming.

De kleinste deeltjes van elementen noemt men atomen. Atomen kunnen zich met andere atomen verbinden tot moleculen. Hierbij doen zich de volgende twee mogelijkheden voor:

- Een aantal atomen van hetzelfde element verbindt zich tot moleculen. De moleculen van de hiervoor aangegeven gasvormige elementen waterstof (H) en zuurstof (O) bestaan elk uit twee atomen. Men geeft dit aan met een subscript cijfer aan de voet van het symbool, dus voor waterstof H_2 en zuurstof O_2 .
- Een aantal atomen van verschillende elementen verbindt zich tot een (scheikundige) verbinding. Zo vormen twee atomen waterstof en één atoom zuurstof één molecuul water aangeduid met H_2O en een atoom koolstof met twee atomen zuurstof één molecuul koolstofdioxide aangeduid door CO_2

Om het aantal moleculen van een stof aan te geven plaatst men een getal voor het lettersymbool. Zo stelt $2 CO_2$ twee moleculen koolstofdioxide voor.

De atomen van de onderscheiden elementen verschillen in gewicht. Men heeft het gewicht van waterstof als eenheid genomen en het gewicht van de atomen van de andere elementen daarmee vergeleken. Onder het atoomgewicht van een element verstaat men dus het getal dat aangeeft hoeveel zwaarder dit element is dan één atoom waterstof. Het atoomgewicht van zuurstof is 16, dus 16 keer zwaarder dan waterstof.

Het molecuulgewicht van een stof geeft aan hoeveel zwaarder deze is dan het atoomgewicht van het element waterstof.

Eén molecule zuurstof (O_2) bevat twee atomen met elk een gewicht van 16. De molecule zuurstof is dus 32 keer zwaarder dan het atoom waterstof (H).

In onderstaande tabel vindt men de voornaamste gegevens van de elementen waaruit ketelbrandstoffen zijn samengesteld en die bij de verbranding hiervan aan de orde komen.

Element	Koolstof	Waterstof	Zuurstof	Stikstof	Zwavel
Symbool	C	H	O	N	S
Latijnse naam	Carbonium	Hydrogenium	Oxygenium	Nitrogenium	Sulfer
Atoomgewicht	12	1	16	14	32
Molecuulformule	C	H_2	O_2	N	S
Molecuulgewicht	12	2	32	28	32

Benaming en elementgegevens ketelbrandstoffen

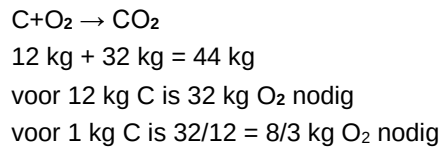
Naam	Zuurstof	Stikstof	Koolstof-Monoxide	Koolstof-Dioxide	Zwavel-oxide
Symbool	O	N	CO	CO_2	SO_2
Mol. gewicht	$2 \times 16 = 32$	$2 \times 14 = 28$	$12 + 16 = 28$	$12 + 2 \times 16 = 44$	$32 + 2 \times 16 = 64$

Molecuul gewicht

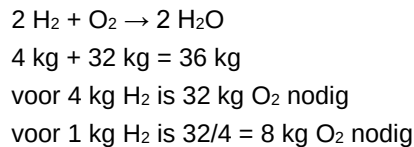
Berekening hoeveelheid verbrandingslucht

Als de scheikundige samenstelling van een willekeurige brandstof bekend is kan men berekenen hoeveel lucht men voor de verbranding nodig heeft omdat men weet in welke verhouding zij zich met de zuurstof in de toegevoerde verbrandingslucht verbindt.

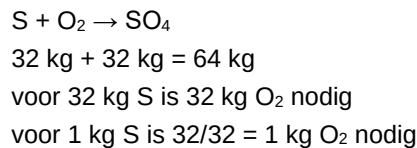
Voor koolstof (C):



Voor waterstof (H):



Voor zwavel (S):



Verbinding van waterstof met de zuurstof die in de brandstof aanwezig is geschiedt reeds voor de verbranding en wel zo langzaam dat geen warmte ontwikkeling is waar te nemen. Omdat voor de verbinding van 1 kg waterstof 8 kg zuurstof nodig is zal er bij de verbranding in de ketel slechts de volgende hoeveelheid waterstof nodig zijn:

$$\left(\text{H} - \frac{0}{8} \right) [\text{kg}]$$

Voor de verbranding van 1 kg brandstof met C % koolstof, H % waterstof, O % zuurstof en S % zwavel is de volgende hoeveelheid zuurstof nodig:

$$\left(\frac{8}{3} \cdot \text{C} + 8 \cdot \left(\text{H} - \frac{0}{8} \right) + 1 \cdot \text{S} \right) [\text{kg}]$$

Lucht bestaat voor ongeveer 23,5 % van haar gewicht of 21 % van haar volume uit zuurstof. Voor het verbranden van 1 kg brandstof is theoretisch de volgende hoeveel lucht nodig:

$$G_{\text{Ith.}} = \frac{100}{23,5} \cdot \left(\frac{8}{3} \cdot \text{C} + 8 \cdot \left(\text{H} - \frac{0}{8} \right) + 1 \cdot \text{S} \right) [\text{kg}]$$

Het soortelijk gewicht, we noemen dit tegenwoordig volumieke massa, kan men stellen op 1,3 kg/Nm³.

Gassen in het algemeen en dus ook lucht veranderen van volume als de druk en of de temperatuur wijzigt. Daarom zijn er afspraken gemaakt over het definiëren van het volume van een bepaalde gewichts- hoeveelheid. Nm³ betekent normaal kubieke meter en wil zeggen dat het gewicht hiervan is gemeten bij een druk van 760 mm kwik en 0 °C. In het huidige Internationale Stelsel van Eenheden staat de "N" voor Newton de grootheid voor kracht. Daarnaast worden in verschillende industrieën en de chemie nog een aantal andere aanduidingen en definities gebruikt hetgeen uiterst verwarrend is. De aanbevolen en correcte, maar door haar complexiteit nauwelijks gehanteerde, schrijfwijze is m³/h 273,15 K, 1,01325 bar.

Door de theoretische gewichtshoeveelheid voor de verbranding van een bepaalde brandstof te delen door het soortelijke gewicht verkrijgt men de theoretische luchthoeveelheid uitgedrukt in normaal kubieke meters per kg brandstof.

$$V_{\text{th.}} = \frac{1}{1,3} \cdot \frac{100}{23,5} \cdot \left(\frac{8}{3} \cdot C + 8 \cdot \left(H - \frac{O}{8} \right) + 1 \cdot S \right) \left[\text{Nm}^3 \text{lucht} / \text{kg brandstof} \right]$$

Voor de volledige verbranding van een brandstof in een stoomketel is meer lucht nodig dan met de hiervoor gegeven formule wordt berekend. De theoretische luchthoeveelheid moet daarom vermenigvuldigd worden met een bepaalde factor. We noemen dit de luchtfactor of luchtvermaat die wordt aangegeven met de letter n en de verhouding aangeeft tussen het theoretische luchtverbruik en het praktische luchtverbruik. De praktisch toe te voeren hoeveelheid lucht kan op de volgende manier worden berekend.

$$V_{\text{pr.}} = n \cdot \frac{1}{1,3} \cdot \frac{100}{23,5} \cdot \left(\frac{8}{3} \cdot C + 8 \cdot \left(H - \frac{O}{8} \right) + 1 \cdot S \right) \left[\text{Nm}^3 \text{lucht} / \text{kg brandstof} \right]$$

Voor normaal handmatig stoken hand wordt een luchtfactor n = 2 aangehouden. Meer ervaren stokers hebben minder lucht nodig voor het handmatig verstoken van de brandstof. Zij kunnen toe met een luchtfactor van slechts n = 1,6 hetgeen de luchtfactor van het normaal mechanisch stoken benadert. Minder lucht gebruik betekent een hoger rendement van de ketelinstallatie.

Dat met het goed opleiden van stokers winst valt te behalen is evident. Het investeren in een mechanische opwerpinstallatie voor de brandstof bij stoominstallaties van gemalen is in het verleden een aantal keren aan de orde geweest echter voor zover bekend nooit toegepast.

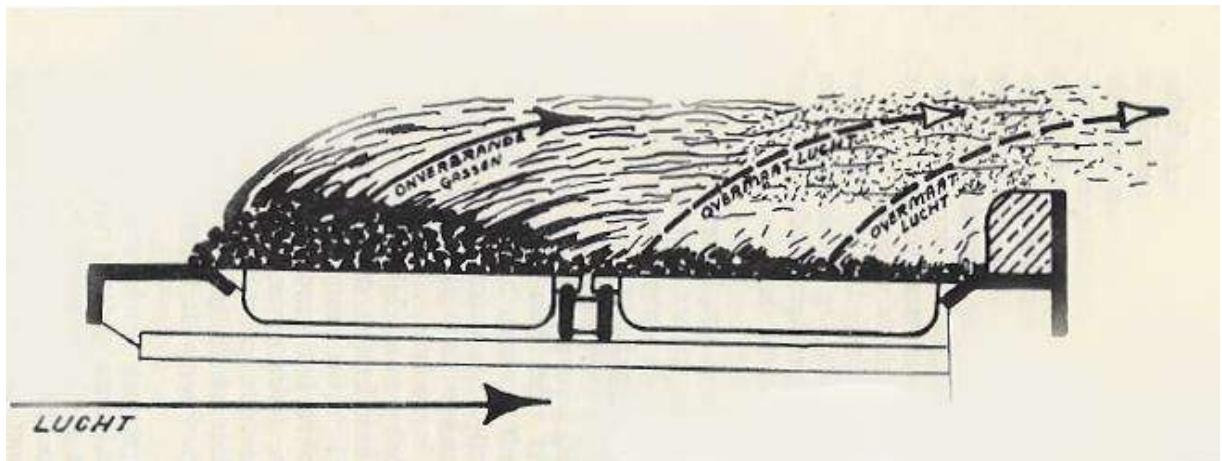
4.8.8 Stoken met steenkool

De taak van de stoker is in het kort gezegd de volgende. Hij of zij moet trachten met zo weinig mogelijk brandstof zoveel mogelijk stoom te produceren. In de regel kan een stoker met 1 kg steenkolen van een redelijke kwaliteit tussen de 8 a 10 kg stoom produceren. De stookwaarde van steenkool bedraagt 7400 – 8600 kcal/kg. De juiste behandeling van het vuur door de stoker is van grote invloed hierop, vandaar hieronder een aantal praktische tips voor het gebruik van de juiste

gereedschappen en het inrichting en onderhouden van een vuur zoals dat in vakjargon wordt genoemd.

Stookmethodes

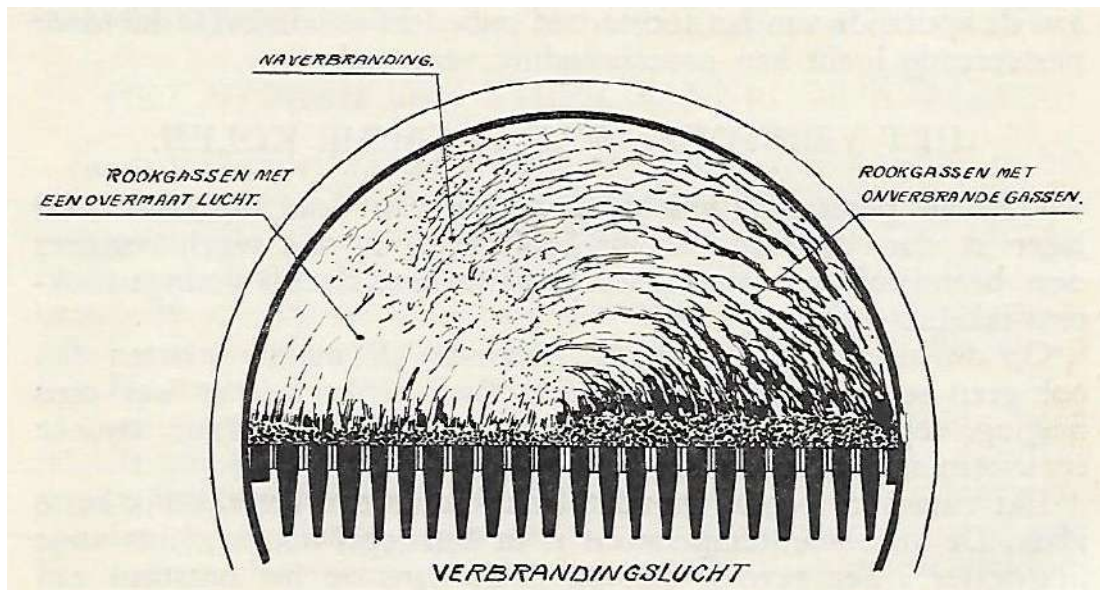
Bij het verstoken van steen kool worden twee stookmethodes onder scheiden te weten: het "kopstoken" en het "stoken met strepen". Bij het zogenoemde kopstoken is het vuur aan de voorzijde dikker dan aan de achterzijde van het rooster. Door het achterste gedeelte zal van wege de geringere luchtweerstand dus een grotere hoeveelheid lucht passeren en het vuur zal daar ter plaatse fel branden. Ook is hier lucht beschikbaar voor het na-verbranden van de gassen die in de dikke laag aan de voorkant zijn ontstaan.



Kopstoken

De verse brandstof wordt bij deze methode hoofdzakelijk aan de voor kant opgeworpen en als deze voldoende is doorgebrand met de asriek voorzichtig naar achteren geduwd waar zij verder uit brandt. Een variant op deze manier is om weliswaar aan de voorkant een kop te onderhouden maar om de verse brandstof bij het opwerpen gelijk matig over het rooster op te verdelen.

Bij het stoken met strepen, bij voorkeur toegepast bij installaties met onderwind, wordt het vuur in breedterichting verdeeld in twee stroken, welke beurtelings van verse steenkolen worden voorzien.

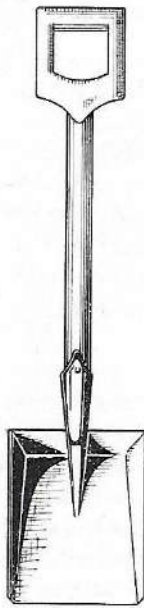


Stoken met strepen

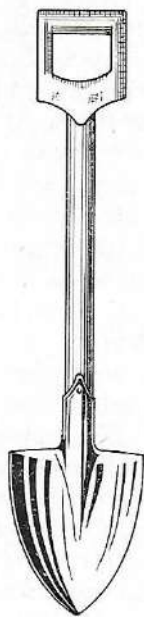
De verbrandingsgassen van de dunne doorgebrande strook en de nog niet gebruikte zuurstof neigen zich nu dwars op de lengterichting van de vuurgang naar de nog niet doorgebrande strook te begeven waar het voor de naverbranding van de hierin ontstane gassen zorgt.

Vuurbehandeling en stookgereedschap

Aangenomen wordt dat er met een kop gestookt wordt en dat er juist met verse brandstof een nieuwe kop gevormd is. Voor het opwerpen van de brandstof bedient de stoker zich van een stookschop. Deze heeft een rechthoekig stalen blad met aan de achter- en zijkanten een opstaande rand, waaraan een houten steel met handgreep bevestigd is. Het blad, anders dan die van de tremmschop, is rechthoekig om de steenkool gelijkmatig te kunnen spreiden. De tremmer is meer gebaat bij een schop met een punt om makkelijk onder de steenkoollaag te kunnen stoten. Is de

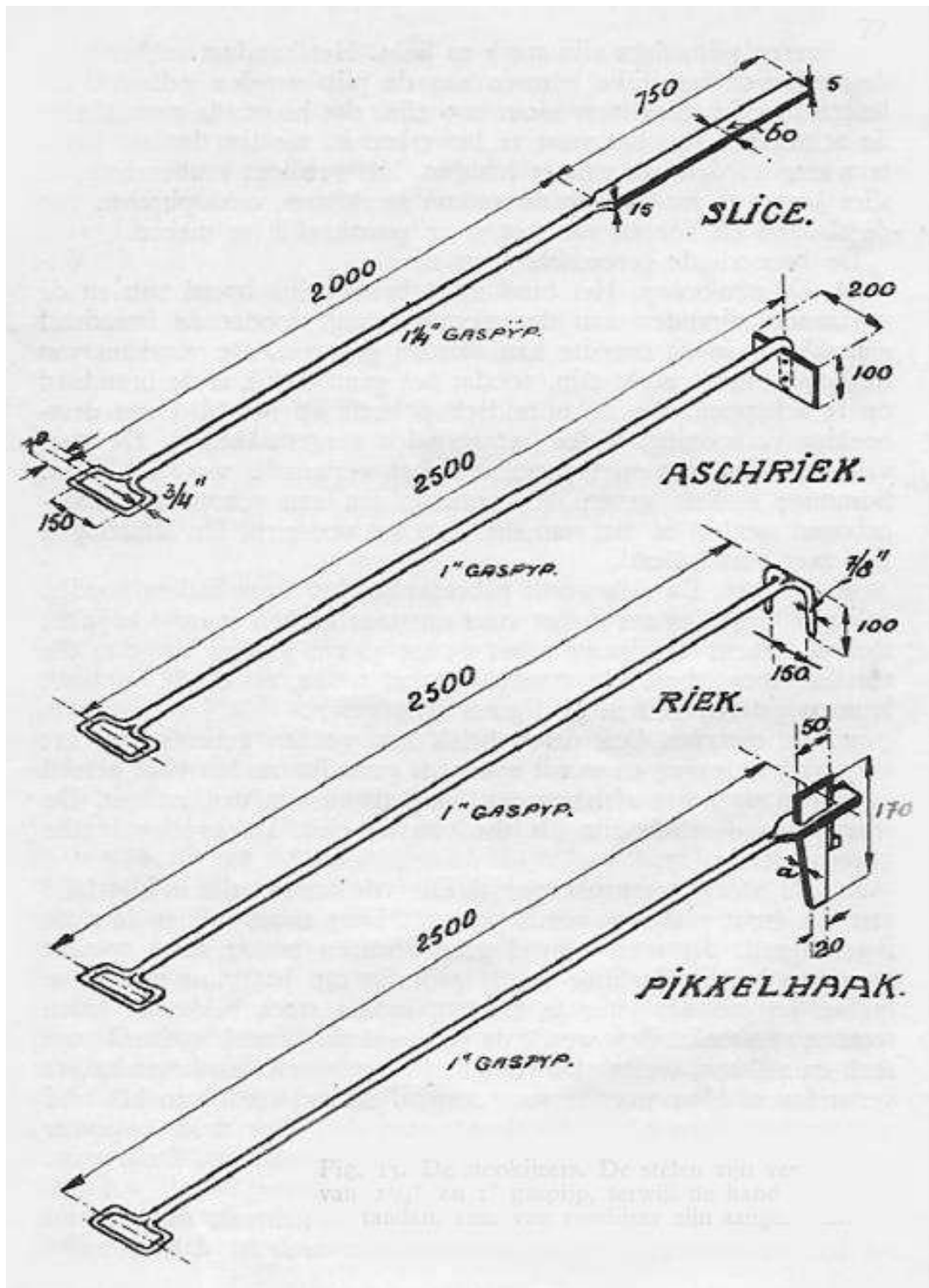


Stookschop



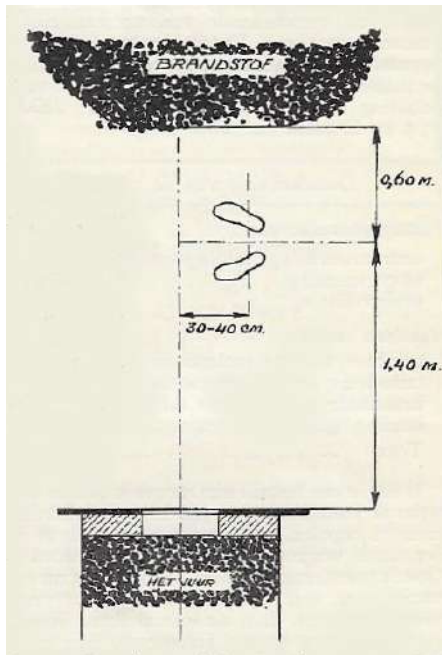
Tremmschop

brandstof ontgast, dan wordt de overblijvende cokes over het rooster verdeeld. De stoker gebruikt hiervoor de asriek of bij aaneen bakkende kool de riek of klauw die met zijn scherpe punten meer houvast geeft in de aaneen gebakken korst. Men noemt deze bewerking het doorzetten of gelijken van het vuur. De riek bestaat uit een stalen buis met aan het ene einde hiervan een haaks hierop geplaatst blad of klauw en aan de andere zijde een handvat. Circa 5 minuten na het doorzetten van de cokes wordt de slakken laag die zich aan het rooster heeft vastgezet met behulp van een slijs los gestoken en gebroken om het toestromen van de verbrandingslucht te bevorderen en het vuur fel brandend te houden. Deze bewerking noemt men het slijzen. Een slijs is een aan een stalen buis bevestigde grote platte beitel. De slijs, asriek, en klauw zijn in de afbeelding van de stookgereedschappen op de volgende bladzijde in detail weergegeven.



Stookgereedschappen

Is de cokeslaag na ongeveer 20 minuten voldoende weggebrand dan begint het opgooien opnieuw. De werkzaamheden van opgooien tot het opnieuw opgooien duidt men aan met stookronde. Zet men de kop niet door of stookt men een vuur van gelijke dikte dan moet de verse steenkool met de stookschop gelijktijdig met het opwerpen worden gespreid.



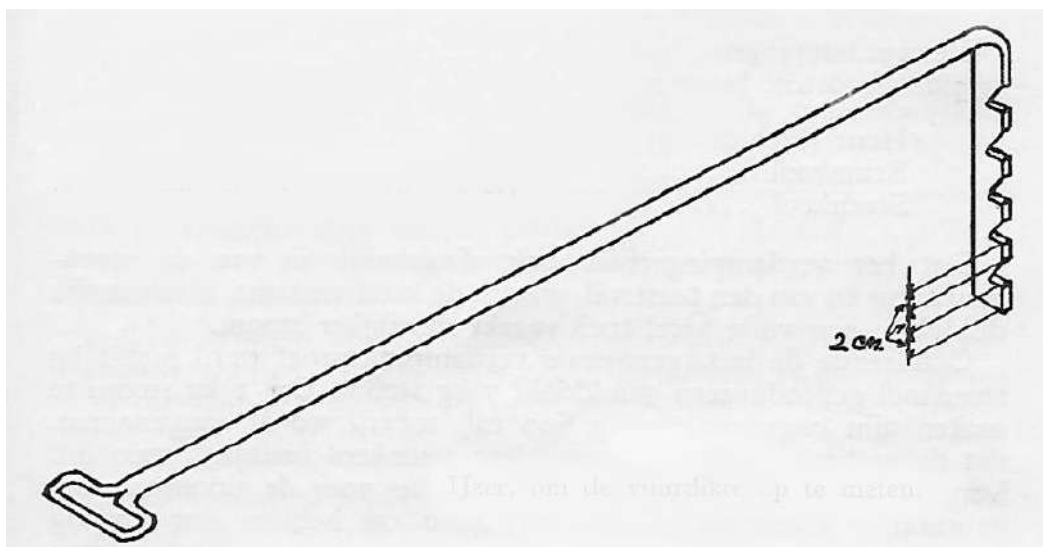
Hierbij wordt een beroep gedaan op de vaardigheden van de stoker zeker als daar bij bedacht wordt dat de afmetingen van de vuurdeur beperkt zijn en het ook nog snel moet gebeuren.

Om de brandstof op de juiste en minst vermoeiende manier op het vuur te kunnen werpen, moet de stoker zich zo voor de ketel opstellen dat hij het vuur, indien de vuurdeur is geopend, gemakkelijk kan overzien en de brandstof op de schop kan nemen zonder van plaats te veranderen. Hij moet zich zo opstellen dat hij de schop gemakkelijk in een rechte lijn van de kolenhoop naar het vuur kan brengen. In verband hiermee moet de brandstof op de juiste plaats voor de ketel worden opgeslagen. Een en ander wordt met de hiernaast afgebeelde figuur duidelijk gemaakt. Voor de ketel moet daarom maar ook om te kunnen werken met het relatief lange stookgereedschap, een ruimte van 2,50 – 300 m beschikbaar zijn.

Opstelplaats stoker

De dikte van de brandstof laag en de daardoor veroorzaakte luchtweerstand, houdt verband met de beschikbare trek dat wil zeggen de hoogte van de schoorsteen en het temperatuurverschil hierover. Bij natuurlijke trek is het drukverschil over het rooster ongeveer 6 mm waterkolom in welk geval men een gemiddelde laagdikte aanhoudt van 200 mm. Bij geforceerde trek is het drukverschil ongeveer 12 mm en wordt een brandstoflaagdikte onderhouden van 350 mm.

De dikte van de brandstoflaag kan worden gemeten met de hieronder afgebeelde vuurdiktemeter. De constructie ervan is min of meer vergelijkbaar met die van de hiervoor afgebeelde stookgereedschappen. De meter plaatst men tussen de kolen van het brandstof bed op het rooster en leest het aantal zichtbare inkepingen af. Aan de hand van de maatvoering zoals hieronder is aangegeven kan men dan de dikte van het vuur berekenen. Bij het ontbreken van een dergelijke meter kan men zich behelpen door op de asriek om de 2 cm krijtstrepen te plaatsen.



Vuurdikte meter

Men moet er voor zorgen dat de brandstoflaag nergens te dun wordt. Gebeurt dit dan ontstaat een gat in het vuur. Daar ter plaatse wordt de weerstand minder en zal er veel relatief koude lucht worden doorgelaten, waardoor de overige brandstof minder lucht toegevoerd krijgt en het vuur minder fel gaat branden. Bij natuurlijke trek zal een gat in het vuur zich kenbaar maken door een donkere plek in de normaal hel verlichte aspit onder het rooster. Is er eenmaal een gat ontstaan dan moet men de laag cokes opnieuw gelijk leggen en een dunne laag verse brandstof over het hele rooster opgooien om het vuur weer op de vereiste dikte te brengen. Om gaten in het vuur en het daardoor weglekken van lucht te voorkomen moet de stoker speciale aandacht besteden aan de hoeken direct achter het vuurdeurraam naast het stookgat, aan de zijkanten van het vuur en aan het einde van het vuur tegen de vuurbrug.

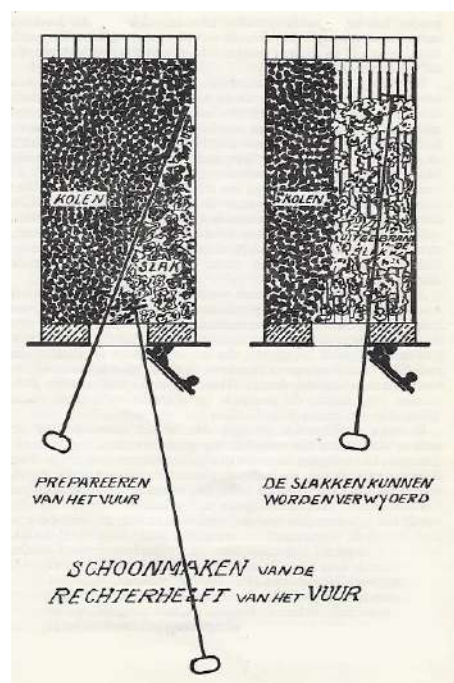
Indien de samenstelling van de slak zo is, dat deze smelt bij de temperatuur die in de vuurhaard heerst, dan spreekt men van een lopende slak. De dik vloeibare slak loopt in de luchtspleten tussen de roosterbaren en verstopt de roosters. Hierdoor wordt de toevoer van verbrandingslucht belemmerd en zal het vuur minder fel branden. Tevens worden de roosterbaren niet meer afgekoeld waardoor deze te heet worden en doorzakken en vervormen. De slaklaag is nu zo dun dat men er met de slijs niet meer onder kan komen. In dat geval gebuikt men nu een haakmes, pikkelhaak of pook. Dit is een stalen buis met aan het ene eind een handvat en aan de andere kant haaks hierop een stalen mes dat met enige ruimte tussen de spleten van het rooster past. De stoker legt de pook op het rooster, met het mes naar boven en drukt dit in de luchtspleten waarna de pook in de lengterichting van de vuurgang wordt heen en weer bewogen. Bij natuurlijke trek gebruikt men het haakmes ook als men geen lopende slak heeft om het vuur open te maken en daardoor feller te laten branden.

Van tijd tot tijd moet de aangroeiende slak verwijderd worden. Men noemt dit het schoonmaken van het vuur. Deze bewerking geschiedt om de 4 tot 12 uur naar gelang het gehalte niet brandbare stoffen in de steenkool. Voor het schoonmaken van de vuren worden in de praktijk drie methodes

gehanteerd. Bij de eerste methode wordt het cokesvuur zijwaarts omgeslagen terwijl bij de tweede methode het cokesvuur niet opzij maar naar achteren wordt geduwd. Bij de derde methode wordt de slak selectief verwijderd zonder de cokes te verplaatsen.

Methode I

Bij deze methode wordt een half uur voordat men een vuur schoon wil maken er geen brandstof meer opgegooid. De brandstoflaag moet dunner worden wat men afbranden van het vuur noemt. Vervolgens wordt met de slijs de brandende cokes naar bijvoorbeeld de linkerzijde van het rooster geschoven. Deze bewerking noemt men het overslaan van het vuur. De nu blootliggende slaklaag wordt door de verbrandingslucht koud geblazen, hetgeen blijkt uit de donkere kleur die de slaklaag



dan heeft gekregen. Met de slijs wordt de slaklaag los en stuk gestoken en door het stookgat met de riek naar buiten getrokken waar deze met water wordt geblust en afgekoeld. Met de slijs schuift de stoker de brandende cokes van de linkerhelft naar het schoon gemaakte gedeelte van het rooster en schept hierover een paar scheppen steenkool om het te ver wegbranden te voorkomen. Nadat nu ook de linkerhelft van het rooster op dezelfde wijze is bewerkt en schoongemaakt, wordt de brandende cokes gelijkmatig over het gehele rooster verdeeld en gooit men er een dunne laag steenkool overheen. Vervolgens trekt de stoker met behulp van de asriek ook de as uit de aspirit. Gedurende het schoonmaken en opwerken van het schoongemaakte vuur moeten de andere vuren, voor zover die er zijn, meer stoom produceren. In verband hiermee moeten deze vuren van te voren dikker worden aangelegd en gedurende de schoonmaak sessie met de slijs worden bewerkt.

Werkwijze schoonmaken vuur methode I

Methode II

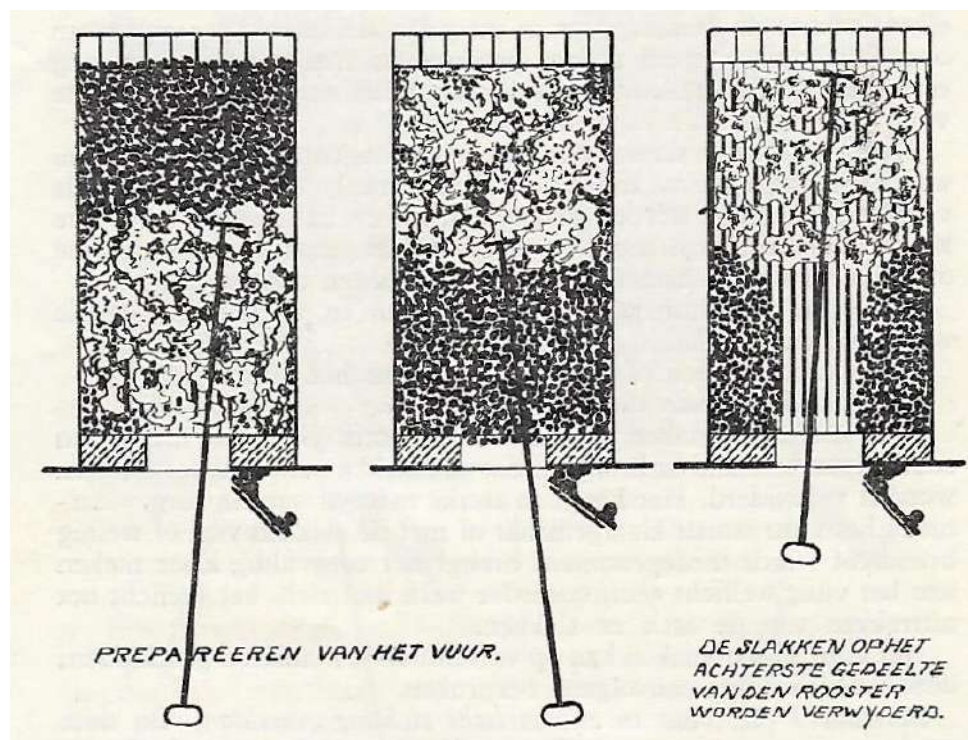
Ook bij deze wijze worden de schoonmaak werkzaamheden in tweeën verdeeld. Met de asriek wordt de cokes over de slak laag naar de achterzijde van het rooster geduwd tot tegen en ten dele op de vuurbrug. Direct daarna wordt met de slijs de slak opengebroke waarna men ze laat uitbranden en er met de riek uithaalt. Hierna wordt de cokes naar voren gehaald dan wel gelijkmatig over het rooster verspreid en verse kolen opgegooid. Men neemt dan aan dat het vuur schoon is. Wordt brandstof verstoekt, welke een groot bakkend vermogen heeft, dan is dit inderdaad ook het geval als de stoker nadien kans ziet om slakken die zich tot de vuurbrug uitstrekken stuk te stoten en met de riek tijdens bedrijf uit de stookinrichting te halen. Geeft de brandstof een losliggende slakkenlaag dan wordt ook het achterste gedeelte op de volgende wijze van de slakken ontdaan. De cokes wordt met de asriek naar de zijbeuken aan de voorkant van het schone rooster getrokken. Er ontstaat dan tussen de cokes een geul via welke de slakken, na eerst met de slijs te zijn stuk

gestoten, met de riek uit de vuurgang worden gehaald en voor de ketel op de stookvloer of direct in de as wagen worden gestort.

Nadat de slak verwijderd is wordt de overgebleven cokes gelijkmatig over het rooster verdeeld. Meestal is er weinig brandstof overgebleven omdat het bij het schoonmaken niet mogelijk is verse kolen op te gooien. De stoker zal dus met de kleine hoeveelheid vuur geleidelijk de gewenste laagdikte weer opbouwen. Bij deze bewerkelijke methode is de stroomproductie nog meer afhankelijk van de overige vuren in de ketel dan wel de vuren van ander ketels.

Methode III

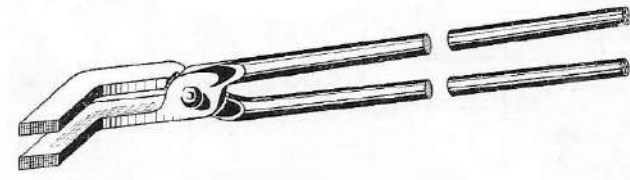
Sommige stokers geven er de voorkeur aan de slakken te verwijderen zonder eerst de cokes te verplaatsen. Men steekt de slijs onder de slak en licht deze zover op dat ze geheel of gedeeltelijk boven de cokes komt te liggen. Met de riek verwijderd men dan de gloeiende slak. Deze methode is zonder meer af te keuren omdat het niet mogelijk is om de kleine slakken op deze wijze te verwijderen en het vuur dus vuil blijft. Ook wordt bij deze methode veel bruikbare brandstof met de slak afgevoerd.



Werkwijze schoonmaken vuur methode II

Behalve de reeks hiervoor genoemde stookgereedschappen gebruikt men bij het stookbedrijf een roosterbarentang. Met deze tang kan tijdens het stookbedrijf een verschoven rooster baar weer op zijn plaats worden teruggebracht of als de rooster baar stuk is een nieuwe worden aangebracht. De roosterbarentang is een soort smeedtang met haaks omgebogen platte bekken en lange benen om ook de achterste baren van het rooster in de vuurgang van de ketel te kunnen bereiken. Voor het herplaatsen van een rooster baar tempert men het vuur in de ketel en maakt men met de asriek de

plaats van het rooster schoon. Het tijdens bedrijf vervangen of herschikken van roosterbaren is bijzonder lastig en verloopt niet altijd even succesvol. In dat geval zal men noodgedwongen de ketel



uit bedrijf moeten nemen en laten afkoelen om de noodzakelijk reparaties uit te kunnen voeren

Roosterbarentang

Warmte-economie ketelbedrijf

Niet alle bij de verbranding van een ketelbrandstof vrijkomende warmte kan nuttig voor het krachtbedrijf worden aangewend. Afhankelijk van de soort stoomketel en hoe deze is uitgerust zal er meer of minder warmte verloren gaan. De warmteverliezen van een stoomketel kan men grofweg indelen in de volgende vier groepen:

1. Warmte die via de schoorsteen verloren gaat (schoorsteenverlies)
2. Warmte die niet ontwikkeld wordt ten gevolge van het onvolledig verbranden van de brandstof componenten
3. Warmte die door uitstraling aan de omgeving van de ketel wordt afgegeven
4. Warmte die verloren gaat door:
 - Brandstof, die dóór het rooster valt en in de aspit terecht komt
 - De verwijdering van gloeiende as en slakken uit de ketel
 - Het roet, ontstaan bij de ontleding van de uit de brandstof gevormde koolwaterstoffen
 - De vliegcookes of stuifcookes, ontstaan door de ontgassing van brandstofdeeltjes, welke door de rookgassen vanuit het vuur worden meegenomen.

Het roet en de vliegcookes kunnen de stoomketel inwendig doen vervuilen en kunnen overlast geven aan de omgeving.

Bijna steeds blijkt, dat het schoorsteenverlies het grootste van de hiervoor genoemde warmteverliezen bij een stoomketel is. Een optimalisatie en goede beheersing van het stookbedrijf door de stoker zal dus leiden tot minder verliezen.

Voor de door de schoorsteen afgevoerde hoeveelheid warmte Q , uitgedrukt in kcal/ kg verstookte brandstof, geldt:

$$Q = G \cdot c (t_s - t_1) \text{ [kcal/kg]}$$

In deze formule is G het gewicht van de samengestelde rookgassen, c de gemiddelde soortelijke warmte van deze rookgassen tussen t_1 en t_s , waarbij t_s de temperatuur van de rookgassen naar de schoorsteen en t_1 de temperatuur van de verbrandingslucht in het ketelhuis is.

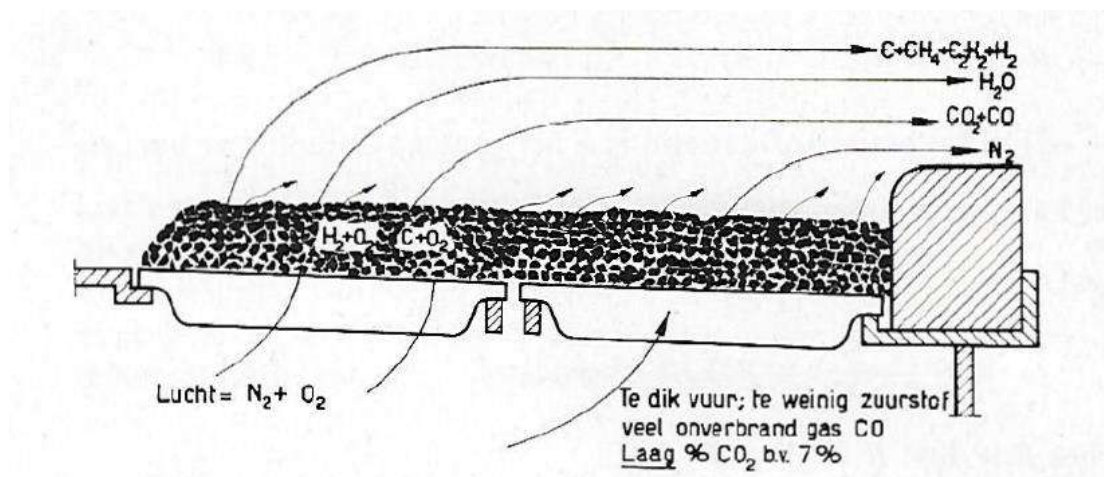
Het gewicht aan rookgassen kan men verminderen door de luchtfactor n te beperken. Dit bereikt men door:

- De luchtaanvoer en de brandstofaanvoer steeds op elkaar af te stemmen, dus door veel lucht aan te voeren waar en wanneer de brandstof veel lucht nodig heeft. De luchtaanvoer te

beperken waar de brandstof in een later stadium, als cokes, minder lucht nodig heeft. Omdat bij het stoken uit de hand de luchttoevoer niet altijd in overstemming is met de behoefte zal men dan de brandstofaanvoer zo regelmatig mogelijk moeten houden. Dit kan men bereiken door met kleine pauzes kleine hoeveelheden steenkool op te gooien.

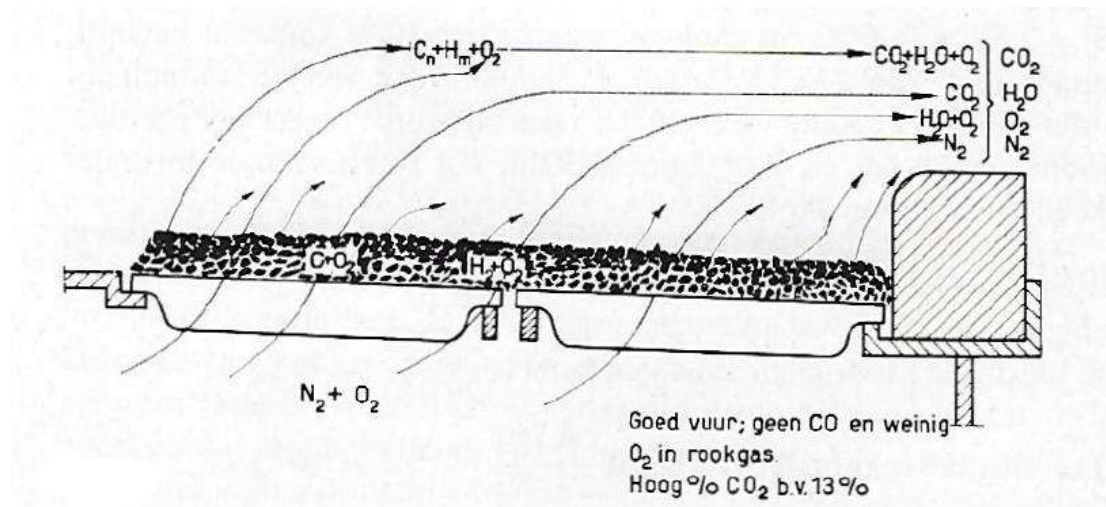
- De vuurdeur slechts voor korte tijd te openen.
- De trek te verminderen door de schoorsteenschuif gedeeltelijk te sluiten, zodra de verse kolen ontgast zijn, en hem weer verder te openen na het opgooien van verse steenkool.
- Te voorkomen dat er gaten in het brandstofbed ontstaan.

De afbeeldingen op de volgende bladzijde laten zien welke gassen er ontstaan of doorstromen bij het stoken met een dik vuur, met een vuur van juiste dikte, en met een te dun bijna uitgebrand vuur. In het eerste geval werpt men veel brandstof in één keer op. Er is veel lucht nodig, terwijl er juist minder door de dikke brandstoflaag heen dringt. Daardoor gaan er gassen onverbrand of onvolledig verbrand de schoorsteen uit.



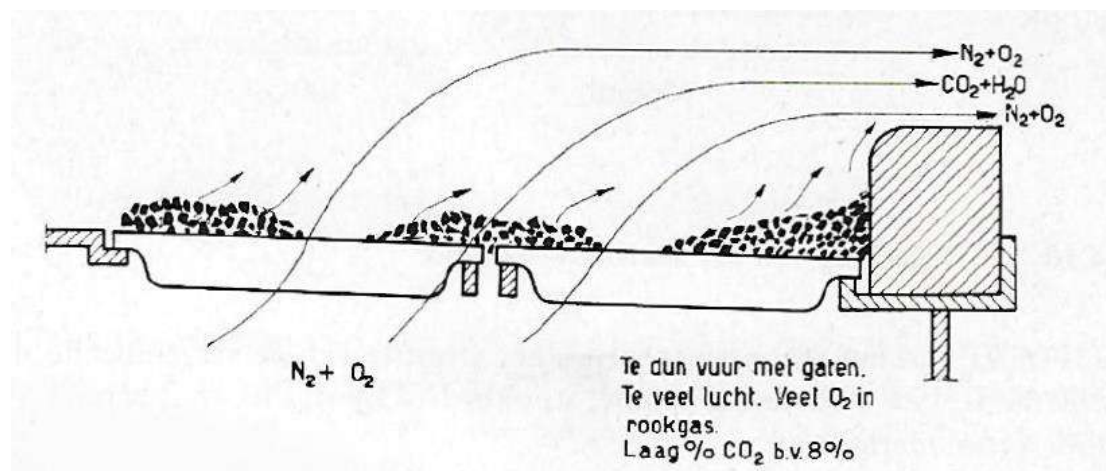
Voorbeeld van te dik aangelegd vuur

De figuur hieronder toont een goed aangelegd en onderhouden vuur. Waarbij de rookgassen bestaan uit stikstof, waterdamp, kooldioxide en zuurstof, omdat men met een zekere luchtvermaat moet werken.



Voorbeeld van goed onderhouden vuur

Laat men het vuur te ver uitbranden zoals bij de afbeelding hieronder is aangegeven dan ontstaan er gaten in het brandstof bed waar veel lucht door stroomt en het gehalte kooldioxide daalt.



Voorbeeld van te dun aangelegd vuur met gaten

De schoorsteentemperatuur kan men laten dalen door een ketelontwerp met een groot verwarmd oppervlak toe te passen, echter bij een reeds bestaande installatie kan een stoker op geen enkele manier invloed uitoefenen op deze temperatuur.

Men mag, afhankelijk van het zwavelgehalte van de brandstof, bij steenkool de rookgastemperatuur niet onder de 120 C laten dalen in verband met de vorming van zwavelzuur ten gevolge van de zwavel die in de steenkool zit. Bij stoomketels met een LUVU of een ECO zal men daarom bij het opstarten de rookgassen met behulp van kleppen om deze toestellen heen moeten leiden.

Verder mag de rookgastemperatuur bij installaties met natuurlijke trek niet te laag zijn omdat dit de trek nadelig beïnvloedt waardoor de ketelcapaciteit daalt. Bij de behandeling van de schoorsteen in deze leidraad wordt dit nader uiteengezet.

4.8.9 Stoken met stookolie

Ook bij het verstoken van vloeibare brandstof zal de stoker trachten met zo weinig mogelijk brandstof zoveel mogelijk stoom te produceren. In de regel kan een stoker met 1 kg stookolie van redelijke kwaliteit tussen de 10 a 13 kg stoom produceren. Dit ten gevolge van het feit dat de stookolie een hogere verbrandingswaarde heeft dan steenkool. De stookwaarde van stookolie bedraagt 9800 – 10000 kcal/kg en is daarmee tussen de 15 – 30 keer groter dan die van steenkool. Stookolie is ten opzichte van steenkool een moderne brandstof die in relatief moderne ketels en met hulpmiddelen wordt verstookt. De juiste bediening van het vuur door de stoker is, anders dan bij het verstoken van steenkool, beperkt tot het instellen en onderhouden van een rookloze verbranding door middel van het regelen van de brandstof- en lucht- hoeveelheid.

Het uiteindelijke verstoken van olie geschiedt geheel mechanisch. De toestellen en de werktuigen die daarbij nodig zijn worden in deze leidraad besproken bij de stookinrichting.

Vergelijkt men het stoken van olie met dat van steenkool dan ziet men dat de brandstof voortdurend in zeer fijn verdeelde toestand in de vuurhaard wordt gevoerd, zodat de luchtvermaat n klein kan zijn en daardoor het schoorsteen verlies geringer.

Een ander verschil is dat voor het verstoken van olie altijd van een ventilator gebruik gemaakt wordt om de vlam een draaiende, min of meer kurkentrekkervormige beweging te geven. Hierdoor neemt de verblijftijd in de verbrandingsruimte toe en wordt er meer warmte afgegeven en raakt de hete vlam de metalen van de vuurgang niet.

Het transport van de brandstof geschiedt mechanisch, en de regeling van de stoomproductie kan op relatief eenvoudige wijze automatisch geregeld worden. Als men tevens in beschouwing neemt dat er geen steenkool aangevoerd en koolas en sintels afgevoerd hoeven worden is het duidelijk dat er aanzienlijk op personeel kan worden bezuinigd.

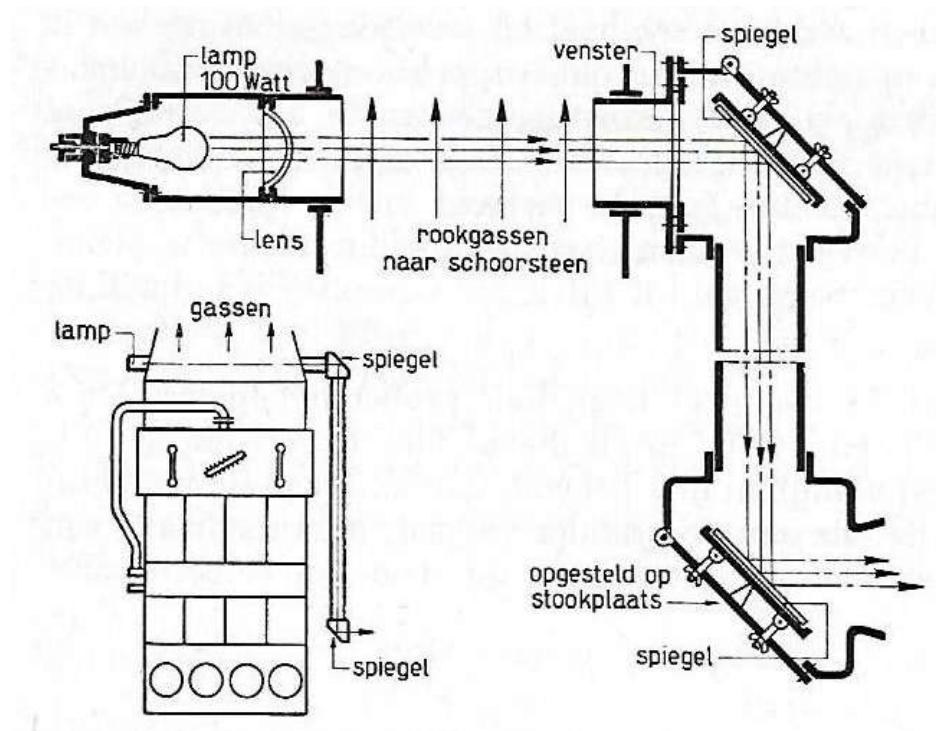
Omdat de stookwaarde van olie groter is maar ook omdat het volume van 1 m³ een groter gewicht aan olie dan steenkool kan bevatten (950 kg tegen 800 kg) is er minder opslagruimte nodig.

Het feit dat olie brandgevaar oplevert, betekent een nadeel. Meestal wordt de installatie met een lichter makkelijk te ontsteken brandstof zoals dieselolie of huisbrandolie opgestart. Zodra er voldoende stoom voor verwarming beschikbaar is wordt overgeschakeld op een zwaardere en goedkopere brandstof.

De (lichte) brandstof wordt bij het opstarten ontstoken met een fakkel bestaande uit aan een stevig ijzerdraad vastgebonden en in petroleum gedrenkte lappen katoen of een gasvlam. Vóór het aansteken van de oliebranders moet de stoker zich ervan vergewissen dat er geen brandbare gassen in de vuurhaard aanwezig zijn door de vuurgang of -haard enige tijd met lucht door te spoelen. Ernstige ontploffingen zijn meermalen ontstaan door nalatigheid op dit punt.

De controle op de goede verbranding vindt plaats door regelmatige waarneming via het kijkglasje naast het luchtregister. De vlam moet lichtgeel kleuren. Is de vlam helwit dan wordt er met een te grote luchtvermaat gestookt, een rood gekleurde vlam wijst op te weinig lucht of op een nog koude

vuurhaard zoals zich dat voordoet bij het opstarten. Overdag kan de stoker de correcte verbranding afleiden uit de kleur van de pluim op de schoorsteen. Op de schoorsteen moet een lichtgrijze enigszins doorzichtige rookpluim te zien zijn. Zwarte rook duidt op onverbrande koolstof en te weinig lucht of een nog koude installatie, een witte pluim geeft aan dat er met een te grote luchtvermaat wordt gestookt.



Rookverklikker

Sommige ketelinstallaties zijn uitgerust met een rookverklikker. Hiermee kan men vanaf de stookplaats de kleur van de rookgassen controleren. De werking van het apparaat wordt gegeven in de hierbij afgebeelde figuur.

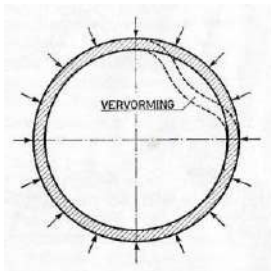
Omdat de pluim op de schoorsteen dan wel de rookverklikker het gemiddelde van alle branders in een ketel weergeeft dient men om de juiste verbranding per brander vast te stellen deze om en om uit te schakelen en na de controle van de kleur van de rookgassen weer in te schakelen.

Bij druk- en stoomverstuiving groeit na verloop van tijd onverbrande kool op de brander kop aan. Deze kool belemmert een goede verstuiving waardoor de ketel gaat roken. Daarom moeten de branders om de vier uur dan wel zoveel eerder als nodig uit de houder genomen en schoongemaakt worden. Voor deze handeling moeten er een aantal reserve branders aanwezig zijn. De schoon te maken branders worden daartoe eerst in een bak petroleum gehangen om af te koelen en vervolgens uit elkaar genomen en met een staalborstel schoongemaakt. Verstopte gaatjes in de brandplaatjes worden met een naald doorgestoken.

4.9 Stookinrichting (vuurgang, vuurhaard en roosters)

4.9.1 Vuurgangen

De vuurgang is een cilindrische buis die aan uitwendige druk is onderworpen. Terwijl de stoomdruk de afwijking van de cilindervorm van de romp tegenwerkt wordt de vervorming van de vuurgang juist groter, ten gevolge van de radiaal gerichte krachten op de buitenzijde. De einden van een vuurgang zijn aan het voor- achterfront dan wel de vlamkast met elkaar verbonden en kunnen tot

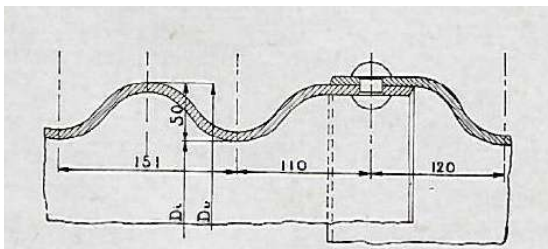


op enige afstand van die verbinding niet vervormen. Hieruit volgt dat onder overigens gelijke omstandigheden een lange vuurgang eerder bezwijkt dan een korte. Behalve de spanningen, veroorzaakt door de stoomdruk, treden er in de vuurgang nog andere spanningen op, die ontstaan door de temperatuurverschillen in het materiaal. De warmte die de hete gassen aan de vuurgang afgeven wordt door de wand heen aan het water overgedragen.

Vervorming vuurgang

De rookgaszijde heeft een hogere temperatuur dan de waterzijde. Het temperatuurverschil tussen de twee vlakken is recht evenredig met de dikte van de wand en de hoeveelheid warmte die per vierkante meter wordt overgedragen. Bij een wanddikte van 16 mm is dit temperatuurverschil op willekeurige plaats circa 20° C. De hete vuur- of rookgaszijde van de wand tracht uit te zetten maar wordt hierin belemmerd door de relatief koude waterzijde. Het gevolg is, dat aan de warme zijde een drukspanning ontstaat en aan de koude zijde een trekspanning. Temperatuurverschillen tussen de verschillende delen van de vuurgang ontstaan door een andere oorzaak. De bovenzijde van de vuurgang krijgt namelijk doordat het water niet evenwijdig aan de verhitte wand stroomt een hogere temperatuur dan de zijkanten. Als gevolg van de nabijheid van de relatief koude ketelromp en de gebrekkige circulatie aan de onderkant van de vuurgang is de temperatuur van het vuurgangmateriaal daar lager dan aan de zijkanten.

Vuurgangen worden over het algemeen gegolfd uitgevoerd. Dit heeft het grote voordeel dat ze door de golvingen elastisch zijn in lengterichting, zodat bij temperatuurverschillen tussen de vuurgang en de romp geen grote materiaalspanningen in de vuurgang en de fronten kunnen optreden. In radiale richting zijn de gegolfde vuurgangen sterker dan de gladde. Voorin elke vuurgang vindt de verbranding plaats van de brandstof, de rookgassen hebben een hoge temperatuur waardoor het materiaal thermisch zwaar wordt belast. De hoge temperatuur bij de verbranding van de brandstof zorgt namelijk voor afname van de sterkte van het toegepaste vuurgangmateriaal. Andere voordelen

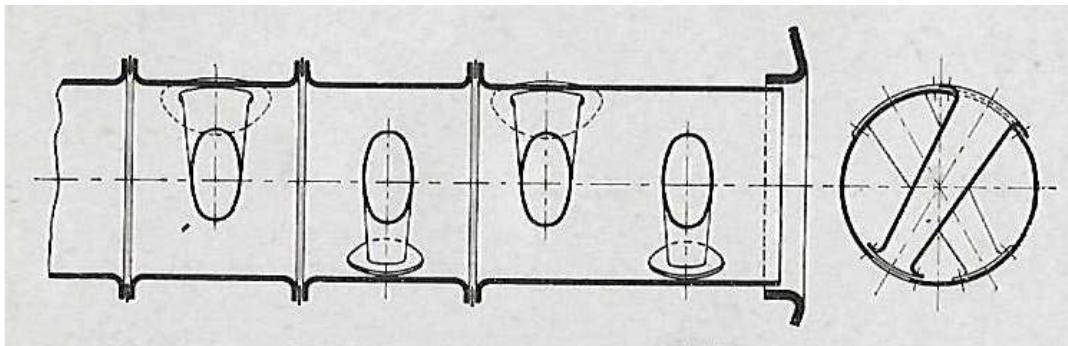


van gegolfde vuurgangen zijn dat door de golvingen het verwarmd en daarmee ook het verwarmend oppervlak groter is (15 - 20%) dan van een gladde buis. Ook zorgen de golvingen voor wervelingen in de rookgassen stroom en daarmee voor een betere warmte overdracht.

Gegolfde vuurgang

Vóór de ontwikkeling van de gegolfde vuurgang werden stoomketels vaak uitgevoerd met gladde vuurgangen welke de hiervoor genoemde voordelen misten. Typisch voor dit soort vuurgangen waren de zogenoemde Galloway buizen die hierin werden aangebracht. Deze conische uitgevoerde buizen worden in de vuurgang achter het rooster met de wijde opening naar boven en de nauwe opening naar beneden gericht opgesteld. De benaming Galloway verwijst naar de ketelfabrikant W&J Galloway uit Manchester.

De op elkaar volgende buizen werden om en om geplaatst, dat wil zeggen evenveel hellend naar links als naar rechts.



Gladde vuurgang met Galloway-buizen en Adamsonringen

Bij vlakke vuurgangen wordt vaak, zoals op de bovenstaande tekening is te zien, als verstijving een ring tussen de vuurgangdelen geklonken. Deze zogenoemde Adamson-ringen zijn vooral op hun plaats ter hoogte van het rooster waar geen Galloway-buizen kunnen worden aangebracht. De vuurgang delen worden daartoe voorzien van een felsrand die samen met de ringen de nodige stijfheid geven aan het geheel.

De voordelen van de inrichting van de vuurgang met Galloway-buizen zijn:

- Door het grote drukverschil tussen de buiten- en de binnenkant van de vuurgang bestaat er kans dat deze in radiale richting samengedrukt wordt. Dit verschijnsel zal eerder optreden naarmate de temperatuur van de vuurgang hoger is, omdat boven de 250 a 350° C de vloeigrens van het materiaal lager komt te liggen. Deze temperatuur zal bereikt kunnen worden wanneer de vuurgang aan de waterzijde bedekt is met een laagje ketelsteen, dat de warmtedoorgang belemmert. De buizen verstijven de vuurgang in radiale richting en voorkomen dat deze wordt samengedrukt.
- De om en om geplaatste buizen zorgen voor een turbulente stroming van de rookgassen wat de warmte overdracht ten goede komt.
- Het water in de buizen wordt verwarmd en stijgt samen met eventueel gevormde dampbellen op en wordt gevolgd door het relatief kouder water. Hierdoor wordt de circulatie in de ketel bevorderd.
- De buizen vergroten het verwarmd oppervlak waardoor de ketelinstallatie kleiner kan worden.

De onderkant van een vuurgang bevindt zich, zoals hier voor is aangegeven, dicht bij de romp, die tengevolge van de gebrekkige circulatie een vrij lage temperatuur heeft en daardoor minder uitzet

dan de veel warmere bovenkant zodat deze naar boven toe doorbuigt. Het is daarom wenselijk een vuurgang dun en enigszins elastisch te maken.

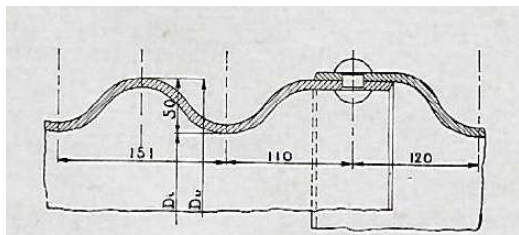
Voor de berekening van de wanddikte van Fox en Morison vuurgangen geldt de volgende formule:

$$s = \frac{p \cdot D}{1200} + 2 \text{ [mm]}$$

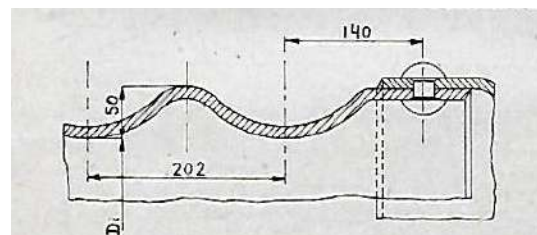
Hier is s de wanddikte van de vuurgang in mm, p de keteldruk in kg/cm² en D de gemiddelde diameter van de vuurgang. Voor een ketel met een druk van 12 kg/cm² en een gemiddelde vuurgangdiameter van 950 mm betekent dit een wanddikte van 11,5 mm.

Bij een te grote wanddikte wordt de flexibiliteit van de constructie teniet gedaan; dit is de reden dat voor een veilige bouw van stoomketels de maximale wanddikte op $\frac{13}{16}$ " of 20,6 mm wordt gesteld. Gegolfde vuurgangen zijn sterker dan gladde en kunnen daarom met een dunnere wand worden uitgevoerd.

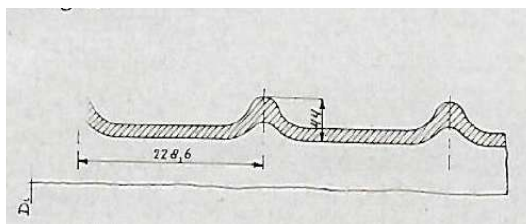
In de loop der tijd is door verschillende, voornamelijk Engelse, ketelfabrikanten een aantal gegolfde vuurgang types ontwikkeld. Zo kennen we de hierna afgebeelde vuurgangen van Fox, Morison, Purves, en Deighton. Die van Fox en Morison worden het meest toegepast; de eerste is in langsrichting zeer elastisch, die van Morison is door de flauwere golving gemakkelijker schoon te maken.



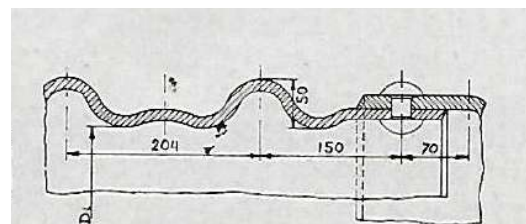
Fox-vuurgang



Morison-vuurgang



Purves-vuurgang



Deighton-vuurgang

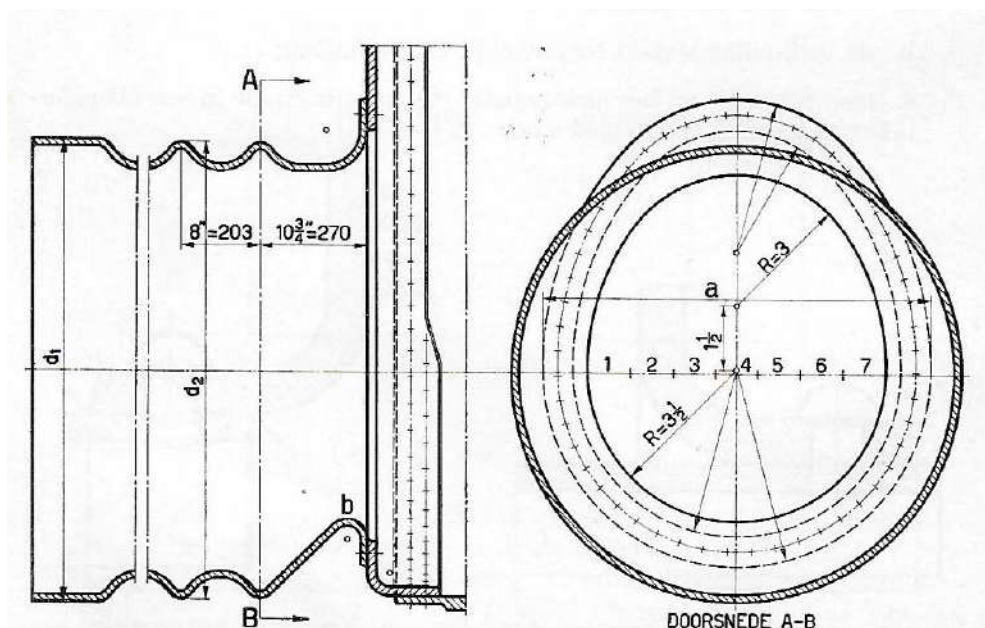
De verbinding van de vuurgang bij geklonken ketels komt tot stand door de felsranden die aan het voorfront naar buiten en bij het achterfront naar binnen zijn gebogen. Op deze wijze kan het vuurraam waarop de roosters liggen eenvoudig worden aangebracht; echter de klinknaad ter plaatse kan men maar aan één zijde koken (zie 3.1.14). Verder heeft deze constructiewijze als gevolg dat er een nauwe opening ontstaat waarin zich vuil verzamelt dat daar aantasting van het ketelmateriaal veroorzaakt. Aan deze plek moet daarom bij ketelinspecties extra aandacht worden besteed. Behalve bij de Purves vuurgang bedraagt het verschil tussen in- en uitwendige diameter 100 mm. Door het aanbrengen van de golven wordt het V.O. met 15 - 20% vergroot ten opzichte

van een gladde vuurgang. De Purves-vuurgang is stijf tegen de uitwendige druk maar in lengterichting weinig elastisch. Die van Deighton verenigt de eigenschappen van Fox en Morison.

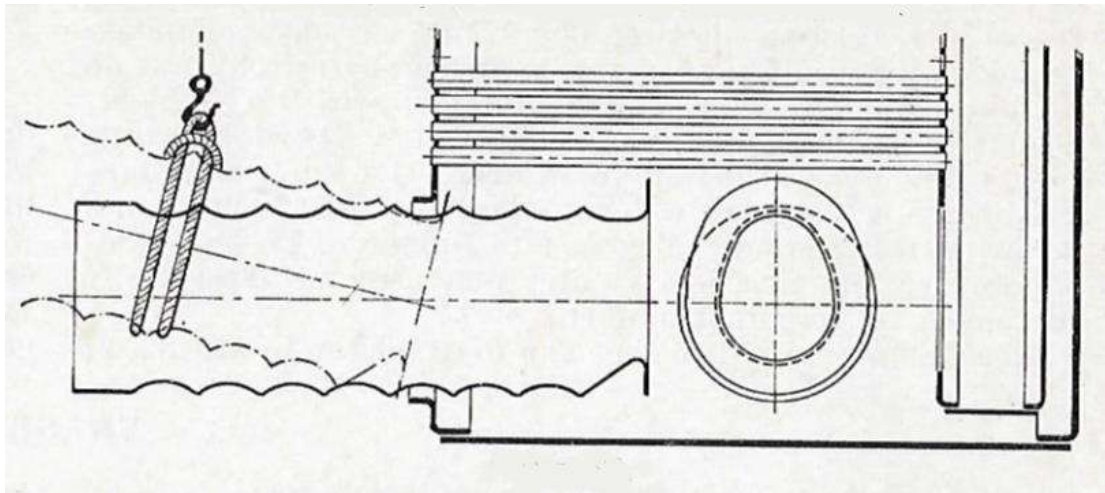


Detail bevestiging vuurgang aan voorfront links en achterfront rechts

De verbinding van de vuurgang bij geklonken vuurgangvlampijpketels, zoals de Schotse ketel, komt bij het stookfront op dezelfde wijze tot stand als hier voor aangegeven en toegepast bij de Cornwall en Lancashire ketels. Bij de vlamkast van dit type ketel past men zoals is te zien in onderstaande tekening een afwijkende constructie toe.



Aan het eind van de vuurgang is een rondgaande flens geperst die tegen de waterzijde van de pijpplaat in de vlamkast kan worden geklonken. Deze flens ligt ten opzichte van de vuurgang uit het midden en heeft ongeveer de samengestelde vorm van een halve cirkel en een halve ellips. Voor de naar de vlamkast trekkende rookgassen is er zo voldoende doortocht, terwijl de breedte van de flens a kleiner is dan de middellijn van de opening d1 bij het stookfront.



Aanbrengen vuurgang

Op de hier boven getekende wijze kan de vuurgang bij nieuwbouw, maar eventueel ook later een nieuwe vuurgang, worden ingebracht. Aan de bovenzijde is de klinknaad vuurzijdig enigszins onttrokken aan sterke verhitting en waterzijdig wordt de naad vrij goed gekoeld door de opwaartse stroming van het water

4.9.2 Fabricage vuurgang

Vuurgangen worden gewoonlijk uit verschillende delen samengesteld waarvan de lengte tot 6 meter bedraagt. De golven worden met profielwalsen in een aanvankelijk gladde buis aangebracht. De flenzen en de delen waarmee de vuurgang aan bijvoorbeeld de vlamkast wordt bevestigd worden gesmeed. De buis waaruit de vuurgang is vervaardigd is naadloos en wordt (vóór het elektrische lastijdperk) verkregen door platen met enige overlap in cilindrische vorm te walsen en vervolgens aaneen te wellen. Ter plaatse van de overlap worden daartoe de platen aan de einden over een kleine lengte met watergasbranders, niet te verwarren met acetyleen, verhit en door smeden of persen gehecht. Daarna worden de platieinden over de volle lengte van de (lap)naad met watergasbranders verhit en door rollen onder grote druk of hameren aaneen gesmeed. Vervolgens worden de golven in de buis gewalst en het geheel uitgegloeid. Voor de aldus met watergas gelaste buis mag een sterktepercentage van 90 % worden aangenomen. Een andere methode is om de buis uit een staalblok te maken. Hiertoe wordt de kern uit een rond gesmeed blok staal geperst en tot de gewenste wanddikte uitgesmeed dan wel gewalst.

Door de introductie van elektrisch lassen en verbeterde controle technieken wordt tegenwoordig de uit plaatstaal opgebouwde vuurgang elektrisch gelast dan wel wordt deze uit fabrieksmatig vervaardigde naadloze buis gemaakt,

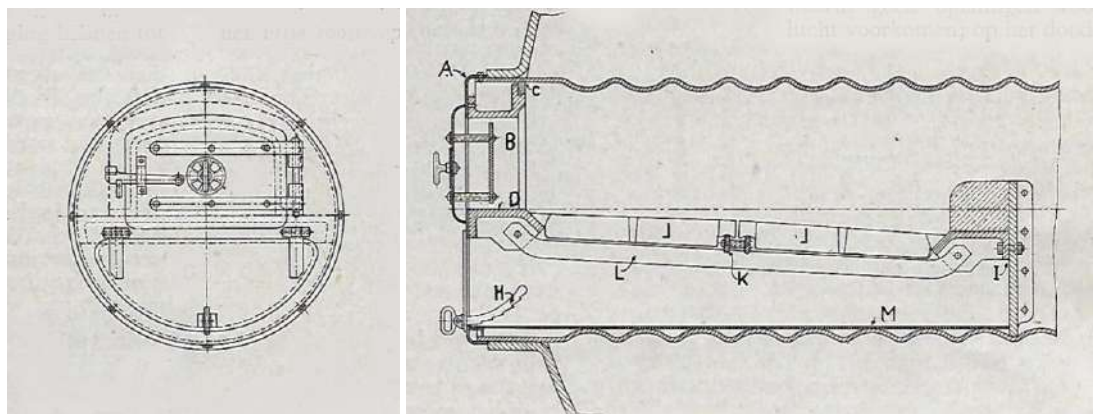
4.9.3 Vuurhaarden

Naar de plaats van de vuurhaard in de ketel onderscheidt men een voorvuurhaard, een binnen vuurhaard en een onder vuurhaard. Stoomketels met voor-vuurhaarden die, zoals de literatuur aangeeft, geschikt zijn voor minderwaardige brandstoffen zijn voor zover bekend bij stoomketelinstallaties van gemalen niet toegepast.

De binnen vuurhaard zoals bij de Cornwall, Lancashire en Schotse ketel en de onder vuurhaard bij de B&W sectieketel daarentegen wel.

Binnenvuurhaard

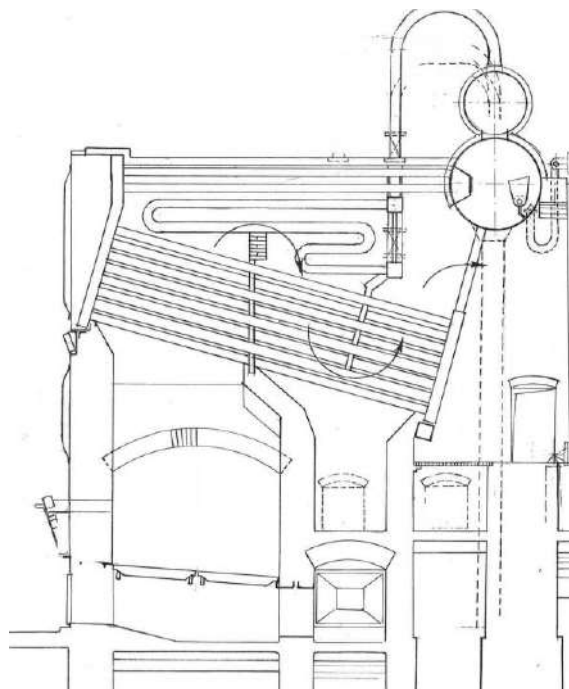
De binnenvuurhaard is geheel omgeven door een groot deel van het VO zodat de warmteafgifte door straling groot is. (20- 25% van de totale hoeveelheid). Daardoor is de temperatuur in de vuurhaard betrekkelijk laag en is de vuurhaard niet geschikt voor brandstoffen met een lage stookwaarde en brandstoffen die de neiging hebben te roeten. De warmteafgifte aan de omgeving is gering en de vuurhaard neemt, omdat zij in de ketel is ingebouwd, geen afzonderlijke ruimte in. Een nadeel is dat het roosteroppervlak afhankelijk is van de afmeting van de ketel, te weten de diameter van de vuurgang en de lengte van ongeveer 1,90 meter nodig voor het nog makkelijk met de hand opwerpen van de steenkool.



Binnenvuurhaard met vlak rooster

Ondervuurhaard

De eigenschappen van de onder vuurhaard liggen tussen die van de voor vuurhaard en die van de binnen vuurhaard in. Dit type vuurhaard wordt meestal voor waterpijpketels toegepast. Door het VO meer of minder om het rooster heen te bouwen kan men de warmteoverdracht door straling groter of kleiner houden en op deze wijze bereiken dat de temperatuur in de vuurhaard binnen bepaalde grenzen blijft.

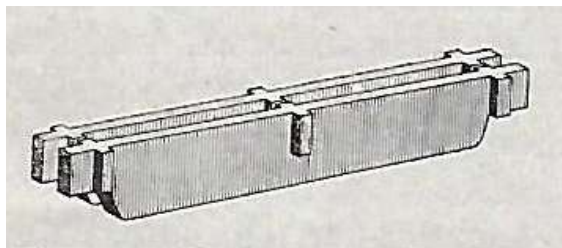


Ondervuurhaard waterpijpketel

Door de afstand van het verwarmde oppervlak tot het rooster oppervlak voldoende groot te nemen kan men er voor zorgen dat volkomen verbranding plaats vindt vóór de afkoelende werking van de rookgassen door de aanraking met het VO zich doet gelden.

4.9.4 Kolen-stookinrichting

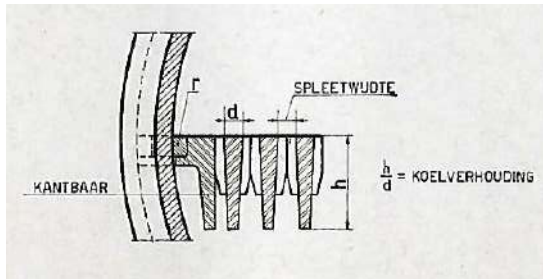
Vaste brandstof wordt bij stoomketelinstallaties van gemalen in de vuurhaard verstookt op roosters. Het eenvoudigste type rooster is het gewone vlakke rooster zoals in de figuur hiernaast is afgebeeld. Het bestaat uit meerdere secties van een aantal naast elkaar gelegen gietijzeren staven, zogeheten



Roosterbaren

roosterbaren, die door nokken op een onderlinge afstand gehouden worden, zodat spleten ontstaan, waardoor de voor de verbranding benodigde lucht wordt toegevoerd. Het gezamenlijke oppervlak van deze spleten noemt men het vrije roosteroppervlak (R.O.)

De naast en achter elkaar geplaatste secties zijn opgebouwd uit twee of drie roosterbaren met een lengte van niet meer dan 500 – 1000 mm om kromtrekken bij het gieten, het transport en gedurende



het bedrijf te voorkomen. De dikte is zo gering als voor het gieten noodzakelijk is en bedraagt 10 – 15 mm. De doorsnede is taps, zodanig dat de spleten naar beneden toe wijder worden en niet door de koolas verstopt kunnen raken. De hoogte van de staven is veelal $\frac{1}{10}$ van de lengte van de baar.

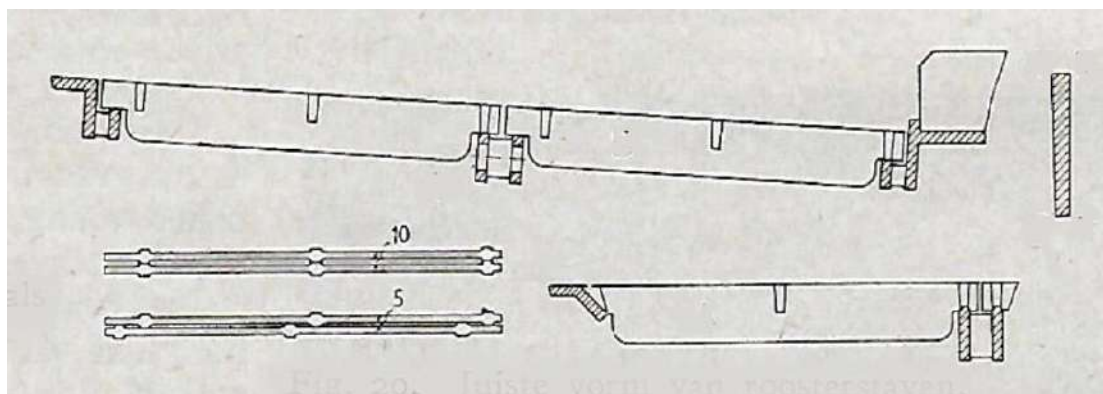
Oplegging roosterbaren

Geen enkele roosterstaaf zou tegen de hitte van het vuur bestand zijn indien hij niet werd gekoeld door de voor de verbranding benodigde lucht. De lucht wordt daarbij verwarmd wat een goede verbranding bevordert. Voldoende afkoeling van de roosterstaven verkrijgt men als de verhouding tussen het gekoeld oppervlak en het verwarmd oppervlak groter is dan 12. Als we hierbij de versmalling van de onderkant van de staven buiten beschouwing laten betekent dit:

$$\frac{2lh}{ld} > 12 \quad \text{of} \quad \frac{2h}{d} > 12$$

Bij een klein vrij R.O. is de luchtsnelheid hoog en zullen de staven goed gekoeld worden, echter dit gaat ten koste van de trek. De luchtsnelheid tussen de staven bedraagt bij een goede koelverhouding tussen de 2 – 4 m/sec. Wanneer bij een fel brandend vuur de lucht toevoer plotseling door het sluiten van de demper wordt afgesneden of wanneer plaatselijk het rooster door een dun vloeibare slak verstopt is, dan wel de gloeiende kolenlaag wordt afgedekt met een dikke laag brandstof, waardoor tevens de uitstraling van het vuur minder wordt, kan verbranding van de roosterstaven het gevolg zijn.

De totale lengte van het rooster is in verband met de bediening maximaal 1,90 m. de spleetwijdte voor bakkende steenkool is ongeveer 7-10 mm, voor niet bakkende soorten ongeveer 5-7 mm en voor zogenaamde fijnkolen slechts 2-3 mm.

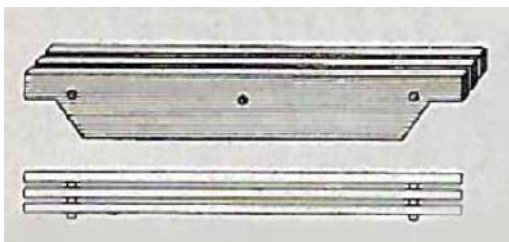


Oplegging en details roosterbaren

Door de staven, zoals in de bovenstaande figuur is aangegeven, om en om te rangschikken kan men met een en dezelfde soort staaf twee verschillende spleetafstanden bereiken. Soms worden de voorste rooster- secties in een vuurgang van een ketel met een nauwe en de achterste met een dubbel zo brede spleetwijdte uitgevoerd. De stoker kan dan met de stukgrootte van de op te scheppen steenkool spelen door ze voor of achter op het rooster te verstoken.

Met het oog op uitzetting door verhitting, de zogenoemde groei, zijn de staven aan een zijde schuivend opgelegd. De roosterstaven die moeten aansluiten op de vuurgang volgen de vorm van de gegolfde vuurgang.

Het materiaal voor de roosterstaven is meestal gegoten ijzer, dat arm aan fosfor en zwavel moet zijn en vaak direct na het gieten aan de bovenkant met water wordt afgeschrikt om het materiaal harder te maken. Hierdoor is het beter bestand tegen slijtage door het stookgereedschap, de hoge temperatuur en aantasting door de slak. De onderkant is door deze behandelwijze minder bros waardoor de kans op breuk kleiner is. Ook worden wel speciale bijmengselen aan het materiaal toegevoegd of wordt een laag aluminium op de staaf aangebracht die bij oxidatie een vuurvaste huid vormt, en de levensduur van de staaf verhoogt. Dit laatste noemen we caloriseren. Staven van staal dat speciaal met een trapeziumvormige doorsnede gewalst is, hebben het voordeel dat ze dunner gemaakt kunnen worden dan staven van gegoten ijzer. Ze hebben verder het voordeel dat



bij nauwe spleten toch een groot vrij R.O. verkregen kan worden. Stalen roosters worden vaak uit 4 of 5 staven opgebouwd waardoor ze vaster liggen en minder gemakkelijk kromtrekken. Een groot nadeel is dat zij minder goed bestand zijn tegen het vuur dan roosters met gegoten staven

Stalen roosterbaren

Omdat op vlakke roosters de verse brandstof ontstoken wordt door de reeds aanwezige gloeiende laag kunnen er ook moeilijk brandende zeer as- en vochtrijke kolen op verstoofd worden. Afhankelijk van de kolen soort is bij natuurlijke trek een zogenoemde roosterbelasting te bereiken van 80 – 120 kg kolen per m² R.O. per uur.

4.9.5 Olie-stookinrichting

Door de roosters uit een kolen gestookte ketel te verwijderen en in het stookfront een brander te plaatsen maakt men deze geschikt voor het verstoken van een vloeibare brandstof (stookolie of zware-olie). Uiteraard is er een aantal hierna nader aan te duiden randvoorzieningen nodig om het verstoken van olie mogelijk te maken. Wat beide soorten brandstof gemeen hebben is dat de uiteindelijke verbranding in dezelfde soort vuurhaard plaats vindt.

Het verstoken van olie geschiedt in tegenstelling tot de op roosters verstoofde steenkool nagenoeg geheel gemechaniseerd en vindt veelal ook geautomatiseerd plaats. De verbrandingssnelheid van de stookolie is vele malen groter dan die van steenkolen zodat olie in zelfs betrekkelijk kleine vuurhaarden volledig kan verbranden waardoor de voor een bepaalde stoomproductie vereiste vuurhaard- ruimte kleiner kan zijn.

Vergelijkt men het stoken van olie met het stoken van steenkool op een rooster dan ziet men:

- De brandstof wordt voortdurend en in fijn verdeelde toestand in de vuurhaard gevoerd, zodat de lucht- overmaat klein kan zijn en daarmee tevens het schoorsteenverlies.
- De capaciteit van ketels die uit de hand met kolen gestookt zouden kunnen worden, wordt door het gebruik van olie circa 20 % groter.
- Het transport van de brandstof geschiedt mechanisch, en de regeling van de stoom productie kan op eenvoudige wijze geautomatiseerd plaatsvinden. Hierdoor kan aanzienlijk op personeel bespaard worden.
- Bij de introductie begin 20^e eeuw speelden de brandstofkosten nog een rol. Steenkool was toen duurder dan de toentertijd geproduceerde stookolie. Heden ten dage spelen niet meer de kosten maar de verkrijgbaarheid van een voor de stoominstallatie geschikte steenkoolsoort een belangrijke rol.

Steenkool versus stookolie

Hier onder is een aantal opmerkelijke verschillen weergegeven tussen kolen- en olie gestookte stoomketels. Bij nieuw geconstrueerde ketels is hiermee door de fabrikant reeds rekening gehouden. Bij omgebouwde ketels moet met een aantal van de genoemde aspecten alsnog terdege rekening worden gehouden.

- De verbrandingssnelheid van olie is groter dan die van steenkool, zodat de warmteontwikkeling plaats heeft in het begin van de weg die de rookgassen afleggen. Bij een vuurgangketel is dat in de vuurgang direct achter het stookfront.
- De hoeveelheid rookgassen is per gegeven warmteproductie bij olie kleiner dan bij kolen en is een tweede reden waardoor de temperatuur aan het begin van de rookgasstroom hoger en aan het einde daarvan lager is dan bij kolen. Bij de toepassing van een oververhitter die is geplaatst in de convectie zone, dus meer naar achteren in de gasstroom, zal dit leiden tot een lagere temperatuur van de oververhitte stoom. Het zwavelgehalte van zware olie is gewoonlijk aanmerkelijk hoger dan dat van steenkool. Zwavel verhoogt het dauwpunt. De massa aan waterdamp in de rookgassen is per kg verstookte brandstof bij olie twee maal zo groot als bij kolen.
- Uit de drie hiervoor genoemde verschillen volgt dat er bij olie meer kans is op condensatie en in de lage temperatuur zones meer kans is op de vorming van het corrosieve zwavelzuur waardoor de ketel- materialen, de rookgaskanalen en de schoorsteen worden aangetast.
- De hoeveelheid as van zware olie is slechts $\frac{1}{100}$ van die bij het verstoken van steenkolen. De as van steenkolen veroorzaakt bovendien een aanzienlijk sterkere vervuiling vooral op de oververhitterpijpen.
- Metaaldelen die via de rookgassen een hoge temperatuur aannemen, zoals de ondersteuning van de oververhitter, kunnen ernstige corrosie gaan vertonen als gevolg van deze asafzettingen.

4.9.6 Stookinstallatie onderdelen

Bij het verstoken van vloeibare brandstof wordt deze samen met de verbrandingslucht in fijn verdeelde toestand in de vuurhaard gebracht. Voor de uiteindelijke verbranding kan beginnen moet zij net zo als bij vaste brandstoffen verdampen, ontleden en in de gasvorm zijn overgegaan. Voor

de opslag het transport en het creëren van de juiste condities voor de verbranding van de brandstof is een aantal toestellen en apparaten nodig; zij vallen onder de verzamelnaam stookinrichting en worden in het volgende schema weergegeven. In dit schema zijn de volgende onderdelen opgenomen:

1. Opslagtank voor zware olie.

In deze grote meestal stalen opslag tank wordt de zware olie voorraad opgeslagen. Deze dik vloeibare olie, met een viscositeit tussen de 245 – 1500 cSt (centi Stokes) bij een omgevingstemperatuur van 15° C, moet voordat ze verpompt kan worden tot ongeveer 50° C worden opgewarmd. Hiertoe is op de tankbodem een stoomspiraal aangebracht. Er moet dus eerst stoom geproduceerd worden voordat de tankinhoud kan worden verwarmd en verpompt. De tank heeft een naar het midden toe aflopende bodem waar zich het condensaat verzamelt. Dit condensaat ook wel slob genoemd moet regelmatig worden afgetapt met de daarvoor aangebrachte voorziening. De tank is meestal in een vloeistofdichte tankkuil buiten het gemaal opgesteld zodat bij eventuele lekkage geen vloeistof in de bodem kan weglekken .

2. Opslagtank voor lichte olie

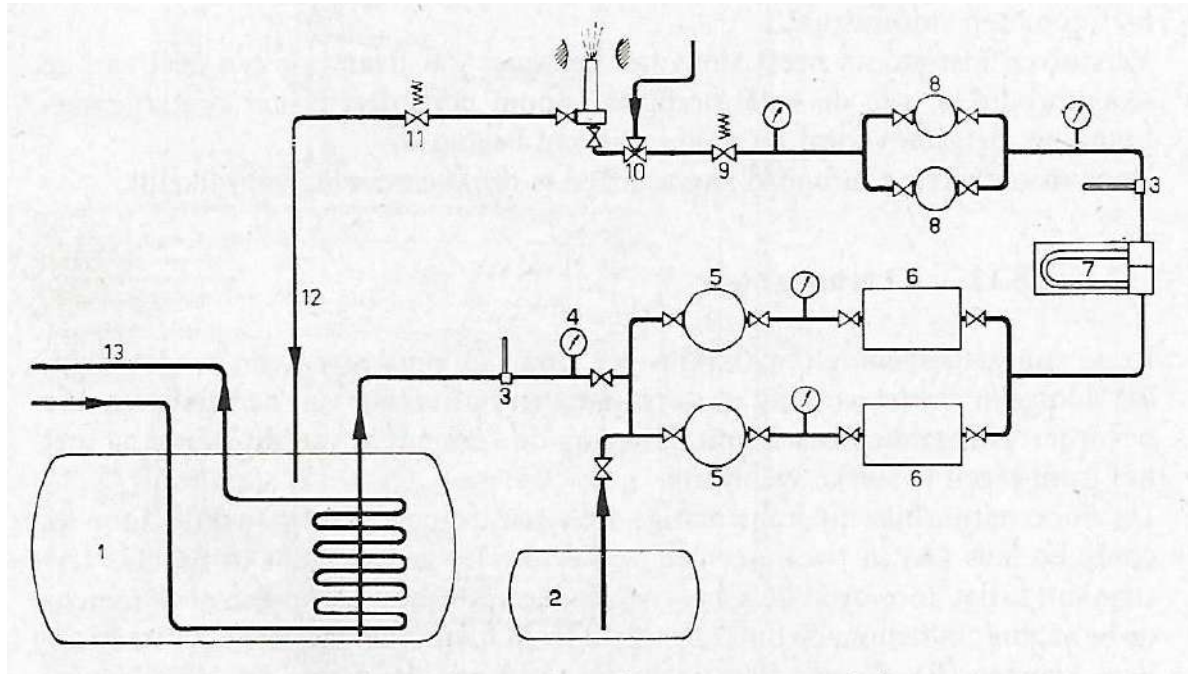
In deze opslagtank wordt meestal dieselolie of huisbrandolie opgeslagen voor het opstarten van de stoomketel. De viscositeit van deze brandstof ligt in de orde grootte van 1,3 – 2,4 cSt en is uitstekend verpompbaar en te verstuiven bij kamertemperatuur. De voorraad olie die in deze tank wordt opgeslagen is aanzienlijk kleiner dan die van de zware-olie. Ook deze tank is voorzien van een aftapvoorziening om het condenswater af te voeren en staat in een vloeistofdichte tankkuil opgesteld.

3. Thermometer

De thermometer dient om de temperatuur van de verwarmde olie te kunnen meten om de verpompbaarheid vast te kunnen stellen.

4. Manometer

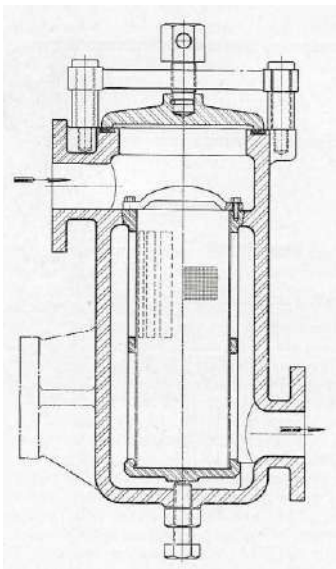
Met de manometer wordt de zuigdruk afgelezen. Als de olie onvoldoende is opgewarmd zal deze een lage waarde aangeven.



Schema stookinrichting voor zware-olie

5. Zuigfilters

In het zuigfilter wordt de stookolie van de grove vaste verontreinigingen, zoals roestschilvers, zand, en eventuele pakkingresten ontdaan. Het filter dient om beschadiging van de erachter geplaatste pomp te voorkomen. De filters zijn in duplo uitgevoerd zodat bij vervuiling van een filter overgeschakeld kan worden naar een schoon filter en het vervuilde filter kan worden schoongemaakt. De vervuiling van het filter kan worden afgeleid uit een groot zuigdrukverschil dat wordt aangegeven door de voor- en achter de filters geplaatste manometers. Het filter bestaat uit een huis met twee

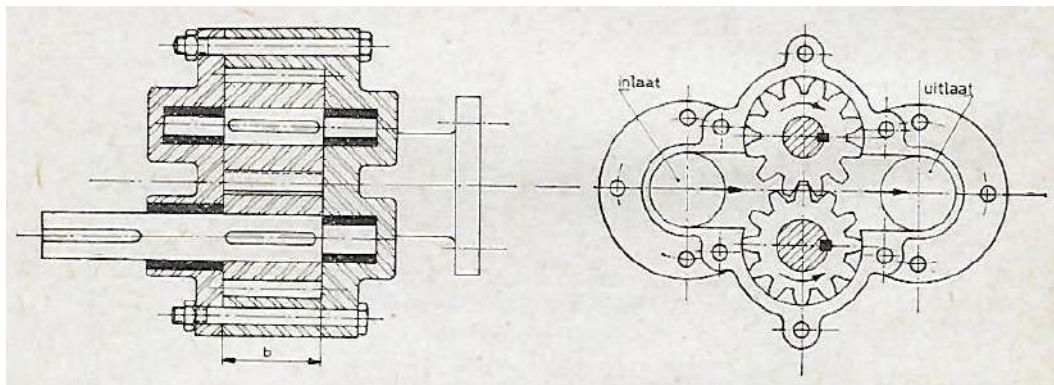


pijpaansluitingen waarin zich een gegoten ijzeren trommel, voorzien van rechthoekige gaten bevindt. De trommel is inwendig voorzien van een gaaskorf met grove mazen voor een zuigfilter en van fijne mazen voor een persfilter. Door de richting waarin de olie stroomt, is de druk in de zeeftrommel groter dan daarbuiten, zodat het gaas tegen de korf wordt gedrukt. Het vuil verzamelt zich in de gemakkelijk uitneembare korf.

Zuigfilter

6. Stookpomp

De stookpomp bestaat uit een zogenoemde verdringer pomp waarmee een hoge persdruk kan worden bereikt. Vroeger gebruikte men hiervoor door stoom aangedreven plunjerpompen, tegenwoordig past men elektrisch aangedreven tandrad- of wormpompen toe. De druk in het systeem bedraagt, afhankelijk van het type brander, tussen de 4 – 20 bar. Tussen de pers- en de zuigafsluiter van deze verdringerpompen is altijd een veerbelaste ontlastklep aanwezig om te voorkomen dat er, door welke oorzaak dan ook, een te grote druk in het persgedeelte ontstaat. Een te hoge druk ontstaat vaak bij het opstarten als bijvoorbeeld het systeem nog gevuld is met achtergebleven koude stookolieresten. Deze ontlastklep is niet in het prinsipschema voor de oliestookinrichting aangegeven.



Tandwielpompe

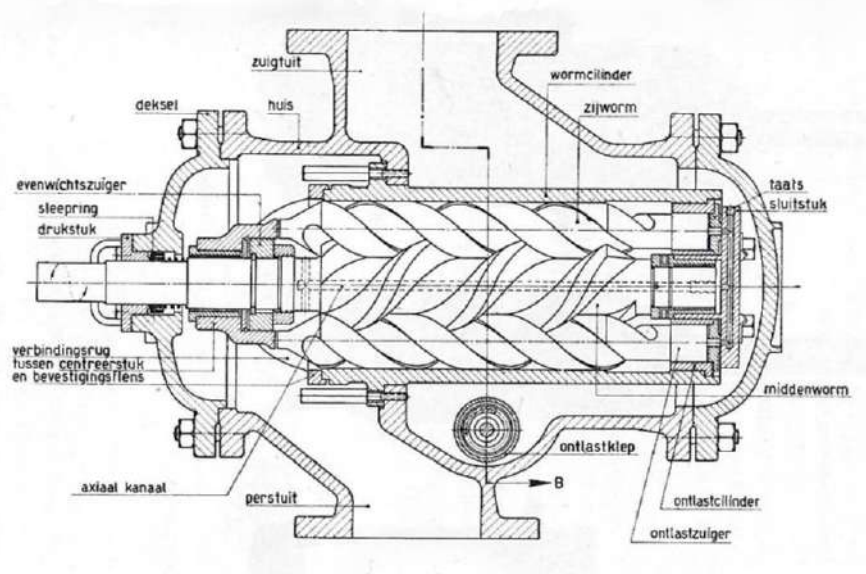
6.1 Tandwielpompe

Tandwielpompen worden bij bemalingsinstallaties voor het verpompen van verschillende soorten olie gebruikt. Men past ze toe als smeeroliepomp maar ook zoals hier voor is aangegeven als trempomp en als stookpomp. Als smeeroliepomp wordt deze meestal direct aan de machine gekoppeld. Bij toepassing als trempomp of stookpomp wordt gebruik gemaakt van een elektromotor als aandrijving.. In de onderstaande figuur wordt de constructie van een dergelijke pomp weergegeven. De toppen van de tanden van de beide tandwielen passen nauwkeuring in de half cilindrische delen van het pomphuis. De eindvlakken van de tandwielen sluiten eveneens nauwkeurig aan op de deksels van de pomp. Loodrecht op de asrichting en in het midden van de tandwielen heeft het pomphuis aan de ene zijde een zuigtuit en aan de andere zijde een perstuit. In het getekende voorbeeld draait het tandwiel met de aandrijf-as linksom. Op zijn beurt geeft dit tandwiel het andere een rechtsom draaiende beweging. Als de ruimte bij de inlaat gevuld is met bijvoorbeeld stookolie dan zal bij een draaiende pomp deze via de tandkuilen van de tandwielen worden meegenomen naar de perszijde. Terugvloeien wordt voorkomen door de in elkaar grijpende tanden. De aldus uit de tandkuilen verdrongen brandstof zal via de perstuit worden afgevoerd. Omdat er geen volledige afdichting over de toppen en de zijvlakken van de tanden is te verkrijgen, zal er steeds een kleine hoeveelheid olie tegen de draairichting in terugstromen. Deze lekverliezen zijn groter naarmate het drukverschil toeneemt. Ook de nauwkeurigheid waarmee de pomp is afgewerkt speelt een rol bij de lekverliezen. Tandwielpompen kunnen zelf aanzuigen tot over een hoogte van 6 - 7 mwk

waardoor vooral bij zware olie een storingsgevoelige voetklep in de zuigleiding in de meeste gevallen achterwege gelaten kan worden.

6.2 Worpomp

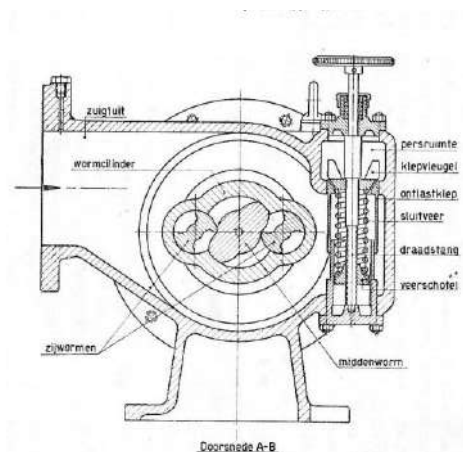
Hieronder is een wormpomp weergegeven van het fabricaat IMO uit Zweden. Deze pomp heeft drie wormen waarvan de middelste worm de andere twee aandrijft. Hiervoor is het nodig dat de wormen een grote spoed bezitten wat de reden is dat men dubbelgangige wormen moet toepassen. De wormtanden van de middelste worm grijpen in die van de beide zijwormen en omgekeerd. Indien de zuigruimte geheel met olie is gevuld zullen aan de rechterzijde de wormkuilen van de wormen zich met olie vullen tot de plaats waar de wormtand van de tegenwerkende worm de wormkuil afsluit. Draait men vervolgens de middelste worm dan drukken de wormtanden van de tegenwerkende wormen de olie in de wormkuilen naar links, de perszijde van de pomp, waar deze wordt afgevoerd via de perstuit.



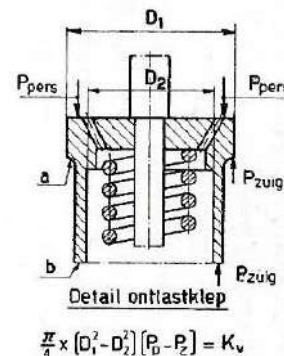
Worpomp

Als gevolg van de drukopbouw ondervinden alle wormen een naar rechts gerichte axiaalkracht. Voor het opheffen van de resultante van deze krachten die op de midden worm werken is deze voorzien van een evenwichtszuiger. Deze evenwichtszuiger met dezelfde diameter als de buitendiameter van de wormtanden, past nauwkeurig in een cilinder die men heeft ondergebracht in een centreer bus die de midden worm aan de perszijde ondersteunt en centreert. De achterzijde van de evenwichtszuiger staat door een leiding in verbinding met de zuigruimte waardoor de axiaal- krachten worden opgeheven. Ook de zij wormen, in dit geval aan de rechterzijde, zijn voorzien van ontlastzuigers die zijn ondergebracht in het sluitstuk van

de wormcilinder. Tijdens bedrijf kan de persdruk die nodig is voor de ontlasting zich voortplanten via het kanaaltje in de midden worm. Gevuld met vloeistof is deze pomp ook zelf aanzuigend.



Ontlastklep bij wormpomp



Detail ontlastklep

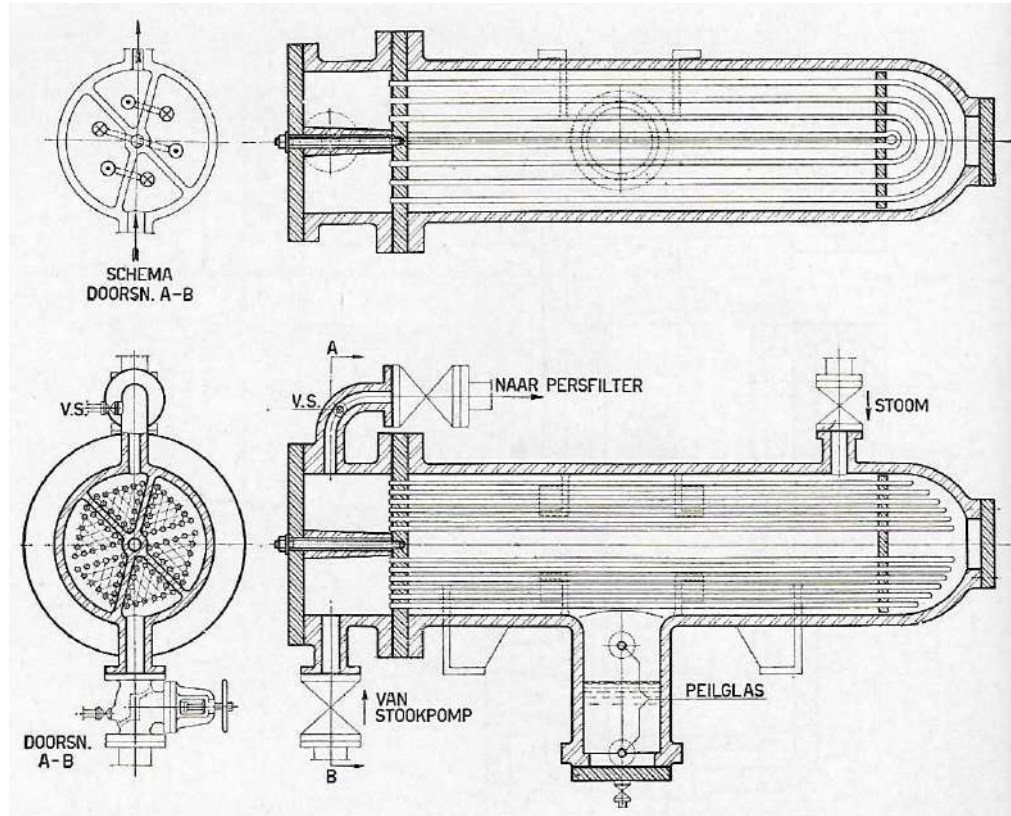
6.3 Ontlastklep

Teneinde een te hoge druk in de pomp en het daaraan gekoppelde leidingsysteem te voorkomen is een ontlastklep tussen de pers- en de zuigruimte van de pomp aangebracht. In de bovenstaande figuur is de doorsnede hiervan getekent. De persdruk staat zowel op als in de klep, zodat de cilinder met de diameter D_1 , als gevolg van de oliedruk in evenwicht is. De persdruk oefent dus op het oppervlak, begrenst door de diameters D_1 en D_2 een omlaag gerichte kracht uit. Deze kracht wordt in evenwicht gehouden door enerzijds de spanning van de spiraalveer en anderzijds door de zuigdruk die op het klepoppervlak bij a wordt uitgeoefend. Stijgt nu de persdruk boven de ingestelde persdruk dan wint de omlaag gerichte kracht het van de omhoog gerichte krachten waardoor de klep opent. Door het samendrukken van de spiraalvormige drukveer stijgt hiervan de spanning en stelt zich een nieuwe evenwichtssituatie in waarbij continu een hoeveelheid vloeistof wordt teruggevoerd. Daalt de persdruk weer tot een normale waarde dan vindt het omgekeerde plaats. Met behulp van het handwiel bovenop de klep kan men de drukveer meer of minder spannen en zodoende de druk instellen.

De afdichting van de pomp bestaat uit een mechanical seal oftewel een meedraaiende slepring die met behulp van een slappe veer tegen een stilstaand sluitvlak aangedrukt wordt. Een dergelijke afdichting voorkomt het inslijten van de as hals ter plaatse van de pakkingkamer. Het bijzondere van deze pomp is dat zij ook als motor gebruikt kan worden en bij het stoppen terugloopt tot de persdruk voldoende is gedaald. Dit type pomp is geschikt voor een hoog toerental en wordt meestal rechtstreeks door een elektromotor aangedreven.

7. Olievoorwarmer

In de voorwarmer wordt de stookolie op de ontstekingstemperatuur van de brandstof gebracht. Deze temperatuur bedraagt voor zware-olie die bij stoomketels wordt toegepast ongeveer 145° . De olie is dan dun vloeibaar en laat zich gemakkelijk verstuiwen.



Olievoorwarmer

De stoomvoorwarmers voor stookolie worden uitgevoerd met pijpen die recht, spiraalvormig gewonden, of U-vormig gebogen zijn. Hierbij stroomt de olie een aantal malen door bundels van relatief kleine pijpen die omringd zijn door stoom. In het schema in de hier boven getekende voorwarmer is de loop van de te verwarmen olie aangegeven. De olie doorloopt telkens 1/3 van het totale aantal pijpen. Om de verlangde temperatuurverhoging van de olie te bereiken is het nodig dat de verwarmingsstoom condenseert. Bovendien is het stoomverbruik dan laag. De vorming van condensaat kan gecontroleerd worden met het peilglas op de aangegoten pot onderaan de voorwarmer. Het condensaat wordt afgevoerd met behulp van een zelfwerkende condenspot. De temperatuur van de stoom wordt geregeld door de stoomtoevoer handmatig dan wel mechanisch meer of minder te knijpen. Als de olie toe- en afvoerafsluiters gesloten zijn, kunnen de verwarmingspijpen met stoom worden doorgeblazen c.q. gereinigd. Op de aanvoerafsluiter is daartoe een aftapkraan onder de klepzitting, en op de afvoerbocht een aansluiting voor stoom aangebracht.

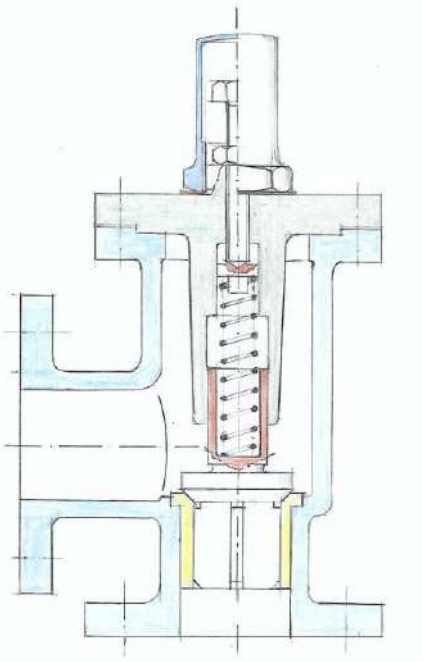
8. Persfilters

In het persfilter worden de fijne vaste verontreinigingen uit de olie verwijderd. Dit gebeurt in een gelijksoortig filter als het zuigfilter met dien verstande dat de korf voorzien is van fijnmazig gaas.

De stookolie is als gevolg van het opwarmen dun vloeibaar en passeert daardoor het filter gemakkelijk. Het filteren van de stookolie is met name belangrijk bij branders met drukverstuiving omdat een gedeeltelijk verstopte brander een slechte verbranding en daardoor een (ernstige) vervuiling van de ketel tot gevolg heeft. Het filter moet schoongemaakt worden zodra er een te groot drukverschil is ontstaan tussen de aan- en de afvoerszijde hiervan.

9. Ontlastklep

De ontlastklep in dit deel van de leiding dient voor de afvoer van de stookolie als er geen afname is omdat het stookbedrijf wordt onderbroken of stopgezet, bijvoorbeeld omdat het ketelwaterpeil te laag is. De olie wordt dan teruggevoerd naar de voorraadtank via een retourleiding.



Ontlastklep (haakse uitvoering)

10. Beveiliging

Als het waterpeil in de ketel onder het laagst toegestane niveau dreigt te geraken wordt deze beveiliging geactiveerd. De beveiliging bestaat uit een mechanisch bediende klep die de olietoevoer naar de desbetreffende stoomketel afsluit.

11. Regelklep

Bij elke ketel bevindt zich een aftakking op de persleiding, voorzien van een afsluiter voor elke brander, een manometer en een thermometer. De persleiding loopt langs de ketel. Via een zogenoemde tegendrukafsluiter of regelklep loopt de olie terug naar de voorraadtank of, hier niet getekend, de aanzuig van de stookpomp. Met behulp van deze klep kan voor het opstoken de olie worden rondgepompt en opgewarmd.

12. Retourleiding

Met de retourleiding wordt de stookolie teruggevoerd naar de voorraadtank voor zware-olie. Deze leiding wordt gebruikt bij het rondpompen en de afvoer van het teveel aan olie in het systeem bij deellast van de stoomketel.

13. Verwarmingsstoom

In de zware-olie opslagtank is een stoom verwarmingsspiraal aangebracht. De spiraal ligt zo dicht mogelijk in de buurt van de zuigmond van de pomp zodat niet noodzakelijkerwijs de gehele olievoorraad opgewarmd hoeft te worden om deze te verpompen.

Bij het opstoken van de stoomketels, dus als er nog geen (verwarmingsstoom) aanwezig is, wordt de dun vloeibare stook- of dieselolie gebruikt. Zodra er voldoende stoom is gegenereerd worden de tankverwarming en de stookolievoorwarmer bijgezet. Wanneer de zware-olie in de voorraadtank warm genoeg is wordt geleidelijk overgeschakeld van de lichte- op de zware-olie. Bij het stoppen van het bemalingsbedrijf wordt in omgekeerde volgorde gehandeld zodat de leidingen altijd gevuld zijn met onder alle omstandigheden goed verpompbare lichte- olie. Mocht om de een of andere reden, bijvoorbeeld een storing, het bemalingsbedrijf voortijdig afgebroken worden dan moet met behulp van de regelklep en de retourleiding het systeem gespoeld worden met de lichte-olie. In dat geval stelt men handmatig de regelklep in op een lagere druk.

4.9.7 Luchtregister

Er bestaat een aantal luchtregisters om het verstoken van vloeibare brandstoffen mogelijk te maken. De registers zijn afgestemd op het type brander en de soort trek waar men gebruik van maakt. De registers hebben zonder uitzondering tot doel de lucht met de ingespoten brandstof zodanig te vermengen dat een optimale verbranding kan plaatsvinden. In dit hoofdstuk van deze leidraad zal slechts één register worden besproken.

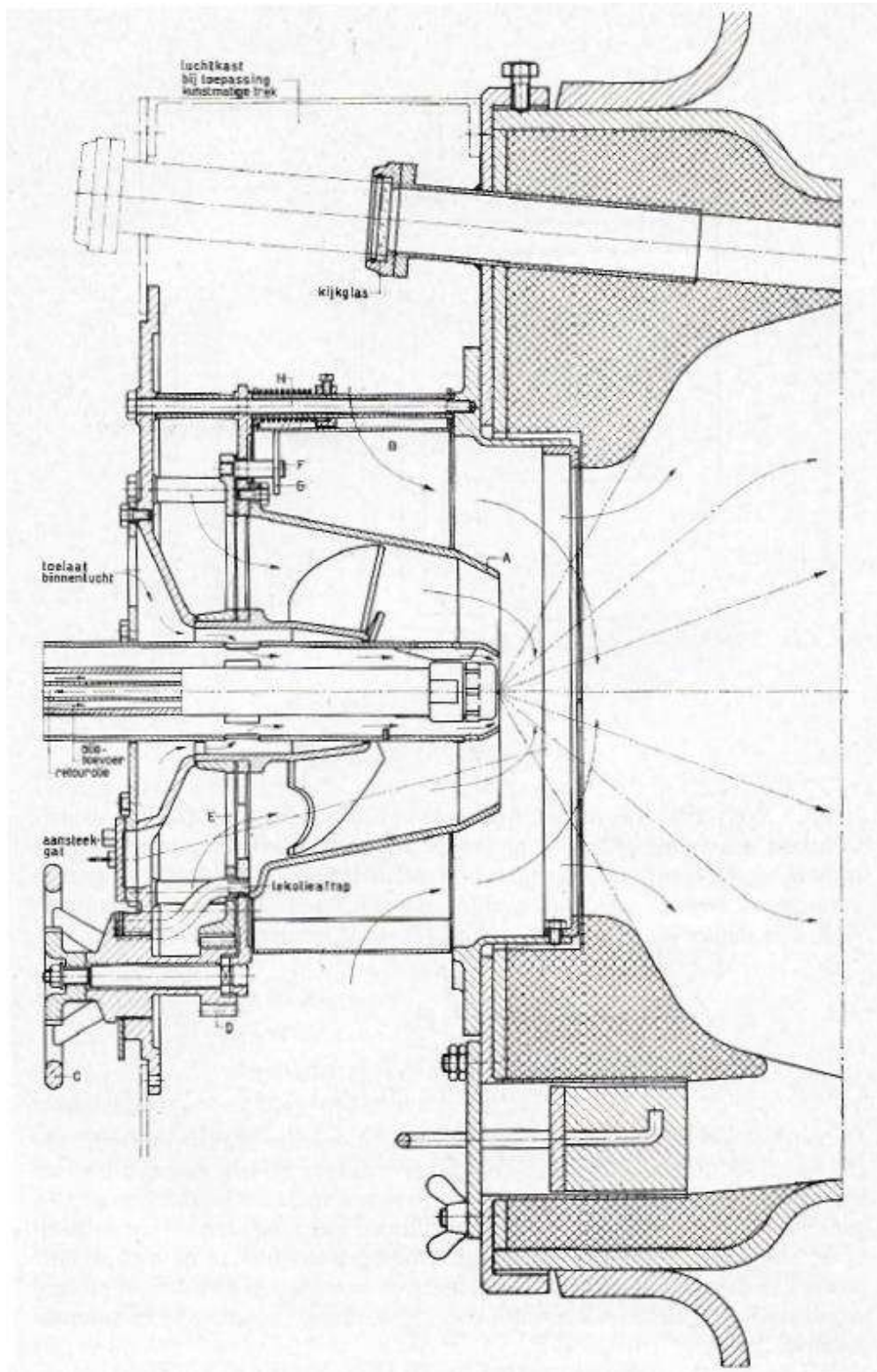
In de vuurgang opening van de gegolfde vuurgang of het front van een onder vuurhaard is een ring van vuurvaste steen aangebracht die door zijn warmtestraling de vergassing en de ontsteking van de verstoven olie bevordert. Bovendien beschermt de ring het uit plaatstaal samengestelde front tegen te sterke verhitting. De door natuurlijke of kunstmatige trek toestromende lucht wordt door de conische buis A in twee stromen verdeeld. Het gedeelte lucht dat in de buis A binnenstroomt, krijgt door de in deze buis geplaatste vaste schroefvlakken een draaiende beweging. Buitenom de buis A wordt lucht toegelaten met behulp van verstelbare kleppen B die aan deze lucht eveneens een draaiende beweging geven doch in tegengestelde richting. Op deze wijze ontstaan in de ruimte bij de branderkop hevige wervelingen en wordt een goede vermenging van de verstoven olie en de verbrandingslucht bewerkstelligd. Direct voor de branderkop zouden de wegschietende oliedruppels een onderdruk kunnen veroorzaken. Om daar, door een tekort aan verbrandingslucht, cokes-vorming te voorkomen, voert men een kleine hoeveelheid zogenoemde binnen- lucht langs de brander toe.

Van de buitenste luchtstroom kan men de hoeveelheid regelen met de verstelbare kleppen. Door middel van het handwiel C onderaan het register en het daarmee verbonden rondsel D kan men de

plaat E verdraaien. De in deze plaat bevestigde pennen grijpen in de scharen van de kleppen. De kleppen zijn om de bouten draaibaar zodat deze in een meer of minder geopende stand kunnen worden gezet.

De brander wordt ontstoken met een in petroleum gedrenkte fakkel die via een speciaal luikje en uitsparing in één van de verstelbare luchtkleppen wordt ingebracht.

.



Luchtregister bij oliestookinrichting

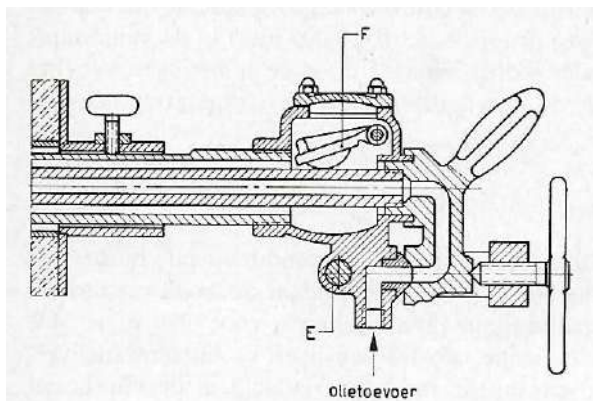
Tegenwoordig maakt men ook wel gebruik van een gasbrander om de brandstof aan te steken. Dwars door de ring van vuurvaste stenen is een buis met een kijkglas aangebracht. Met behulp hiervan kan men de kleur van de vlam waarnemen en controle uitoefenen op de verbranding. In geval van geforceerde trek wordt om het register een luchtkast gebouwd. Onder in het register is een lekolieliding aangebracht die de eventueel gelekte olie tot buiten het register in een bakje met scherp zand afvoert. Bij een eventuele brand in een register stopt men de brandstoftoevoer en sluit men met de verstelbare kleppen de luchttoevoer af waarna de brand vanwege zuurstoftekort vanzelf dooft.

4.9.8 Oliebranders

Voor een goede verbranding moet de stookolie fijn verdeeld en met enige snelheid in de vuurhaard gebracht worden. De fijne verdeling dient om een zo'n groot mogelijk contactoppervlak voor de verbrandingslucht te krijgen terwijl de snelheid nodig is om de op elke druppel olie gevormde gasmantel eraf te stropen en met de lucht te vermengen. Bij een aantal soorten branders wordt de olie onder hoge druk ingevoerd. Zij komt gewoonlijk door tangential geplaatste kanaaltjes met vrij grote snelheid in een cilindrische ruimte (de rotatiekamer), waarin de olie snel ronddraait en zich van de omtrek via een spiraalvormige baan naar het midden beweegt, waar zich de uitstroomopening bevindt. Bij het doorlopen van deze spiraal wordt de omtreksnelheid groter naarmate de straal van de baan kleiner wordt. In de instroming is de omtreksnelheid ongeveer vijf tot tien maal zo groot als aan de omtrek van de rotatiekamer, zodat het arbeidsvermogen van beweging vijftientig tot honderd maal zo groot wordt. Bij het verlaten van de uitstroomopening breekt de oliefilm in deeltjes die twee snelheden hebben; te weten een axiale, dus in lengterichting van de brander, en een tangentiële, dus in een vlak loodrecht op die lengte-richting. Het gevolg is dat de oliedruppels zich ongeveer bewegen volgens de beschrijvende lijn van een kegelmantel. Moet de hoeveelheid olie die in de vuurhaard verbrandt, aangepast worden dan kan men dit tussen bepaalde grenzen bewerkstelligen door de druk in de toevoerleiding te wijzigen. Ook kan men de temperatuur van de stookolie, dus de viscositeit, aanpassen.

Drukverstuiving

In de figuur hieronder is een brander van Todd voor drukverstuiving getekend. De brander wordt geplaatst in een huis dat op een pijpstuk is geschroefd en daarmee aan het luchtregister bevestigd wordt. Aan de onderzijde van het huis zien we de aansluiting voor de stookolie. Het vooreinde van



de brander klemt men met een drukbout tegen een conisch sluitvlak aan het huis. De drukbout bevindt zich in een beugel die om het scharnierpunt E kan draaien. Als men na het sluiten van de olietoevoer de drukbout losdraait en de brander aan het handvat uit het huis genomen heeft, sluit de klep F automatisch de ontstane opening af zodat geen vlammen of hete rookgassen naar buiten kunnen slaan.

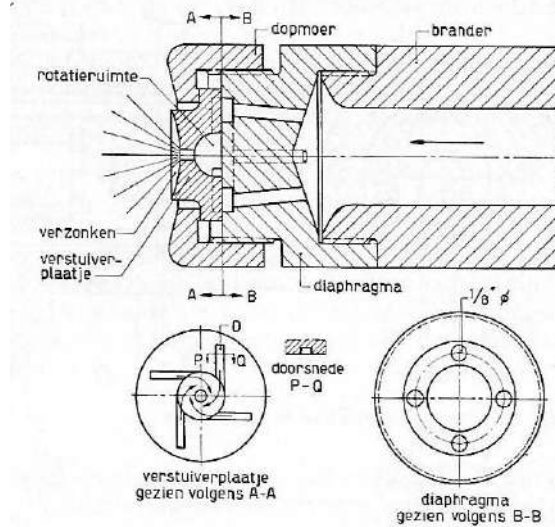
Todd-brander

Op de kop van de brander is een diafragma geschroefd, voorzien van vier 3 mm gaatjes die in een rondgaande groef uitkomen. In het eronder getekende verstuiwerplaatje zijn vier groeven gefreesd die tangentieel gericht zijn op de rotatie ruimte, zodat de onder een druk van 10 – 14 kg/cm² aangevoerde olie in deze ruimte snel ronddraait en als een holle kegelvormige film van fijne druppels (0,01 – 0,05) uit de opening treedt. De verstuiwerplaatjes zijn voorzien van merktekens bestaande uit een letter W voorafgegaan en gevolgd door twee cijfers. De eerste twee cijfers, bijvoorbeeld 53, dienen als aanduiding van de middellijn van de opening in het verstuiwerplaatje. Zo staat 53 voor

0,059" wat overeenkomt met 0,16 mm en 46 voor 0,081" wat gelijk is aan 0,2 mm. Hoe lager het nummer hoe groter de diameter van het gaatje in het verstuijverplaatje van de brander. De letter W duidt op een verzonken uittrede van de brandstof. De cijfers na de W geven aan, welk deel van de doortocht van de ronde opening in het plaatje de groeven D aan de intreezijde ervan hebben. Van een plaatje 53 W 40 is de middellijn van de opening 0,059" of 0,16 mm en van de vier groeven;

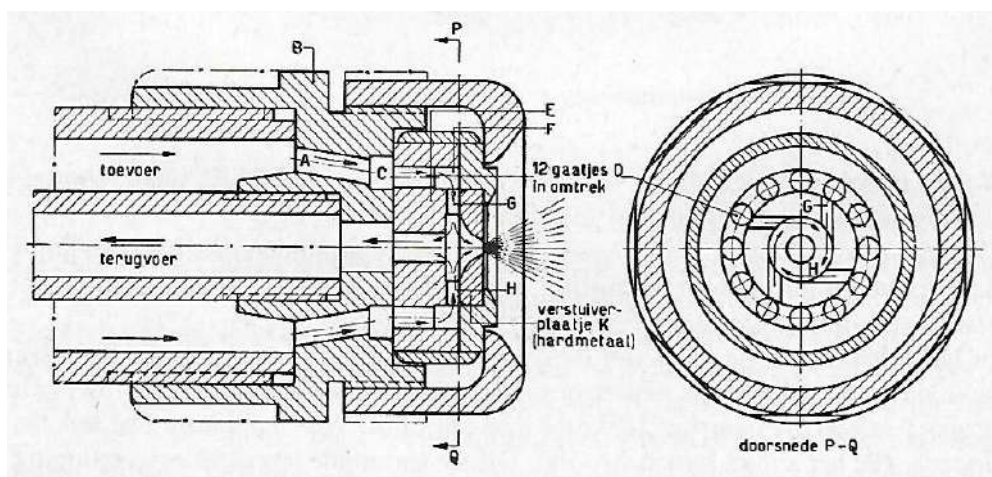
$$0,40 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0,16^2 [\text{mm}^2]$$

Dit plaatje heeft als de olie onder een druk van 14 kg/cm² en met een viscositeit van 4 Engler aangevoerd wordt een capaciteit van 150 kg olie per uur.



Branderkop met verstuijverplaatjes

Voor het aanpassen van de brandstof toevoer aan de stoombehoefte moet men bij de meeste systemen de branders eruit nemen en van andere verstuijverplaatjes voorzien. Men behelpt zich soms eenvoudigheid halve, door van de ketel een of meer branders uit te zetten. Het gevolg hiervan is dat de ketels ongelijkmatig verwarmd worden. Daarom is het beter om alle branders in bedrijf te houden maar dan met een verminderde capaciteit. In de figuur hierna is een zogenoemde Bargerboer brander getekend waarvan de capaciteit binnen betrekkelijk wijde grenzen (automatisch) geregeld kan worden zonder het verwisselen van verstuijverplaatjes.



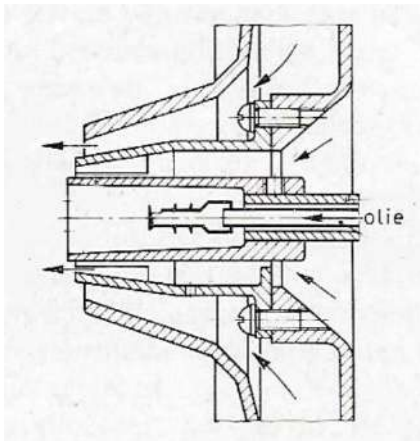
Bargerboer brander

In de toevoerleiding onderhoudt men een constante druk van 20 kg/cm² terwijl de druk in de gemeenschappelijke terugvoerleiding met een regelafsluiter geregeld kan worden tussen 4 en 7 kg/cm². Op het branderlichaam is een dop geschroefd waarin de olie-aanvoerpijp met schroefdraad is vastgezet.

De olie treedt binnen met een druk van 20 kg/cm² en stroomt door iets schuin geboorde gaatjes in de ringvormige groef E. Van deze groef gaan vier tangentieel aangebrachte sleufjes naar de centrale rotatie- ruimte. De olie stroomt voor een regelbaar deel naar de vuurhaard het overige deel vloeit af via een centraal aangebracht gaatje naar de terugvoerleiding. Omdat er een constante hoeveelheid olie wordt aangevoerd gaat er minder olie door de opening naar de vuurhaard, als men meer olie via de regelafsluiter naar de terugvoerleiding laat vloeien.

Rotatieverstuiving

De figuur hierna laat een principe opstelling van een cup- of rotatieverstuiver zien zoals vaak toegepast bij Schotse ketels voor landgebruik en stookolie. Een voorbeeld hiervan is het ir.



D.F.Woudagemaal te Lemmer. De fijne verdeling van de brandstof bij dit type brander vindt plaats door deze met grote snelheid weg te slingeren. De brander bestaat uit een snel ronddraaiende kegelvormige ronde buis of beker: vandaar de naam cupverstuiver. In de buis is een pijpje aangebracht voor de toevoer van de olie. De oliestroom wordt in de snel draaiende cup tot een over de binnenwand verspreide dunne film vervormd en aan de rand fijn verdeeld in de vuurhaard geslingerd. Een deel van de verbrandingslucht, de primaire lucht, wordt door een aparte ventilator aangevoerd en langs de cup geblazen en met de fijn verdeelde oliedruppels vermengd.

Cup- of rotatieverstuiving

Bij de cupverstuiver in onderstaande foto (links) wordt de cup met behulp van de primaire lucht en met de aan de cup gekoppelde retarder een draaiende beweging gegeven.



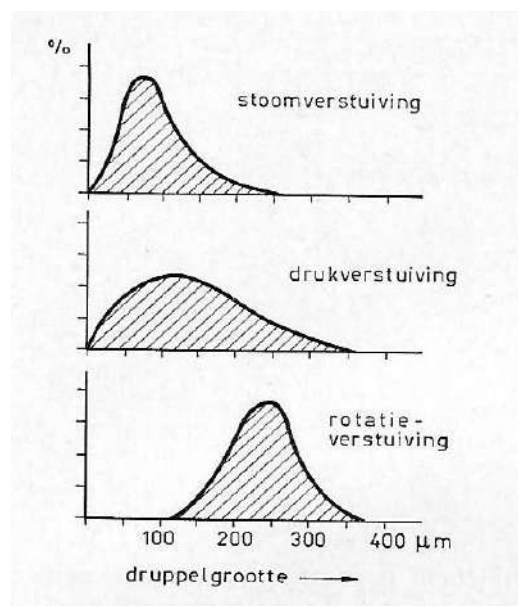
Cupverstuiver ir. D.F. Woudagemaal

De verbranding vindt daardoor in een kurkentrekker vormige baan plaats. Hierdoor wordt de door de hete verbrandingsgassen afgelegde weg lang, wat gunstig is voor de warmteoverdracht en de uitbrandtijd van de brandstof. Ook zullen hierdoor, met name de brandende zware koolwaterstofverbindingen minder makkelijk met de koude vlakken van de vuurgang in aanraking komen, daardoor doven en zich als roet afzetten. Een bijzonder voordeel van deze branders is dat ze het best werken met olie van een betrekkelijk hoge viscositeit, aangezien dun vloeibare olie over de gladde beker wand slipt en slecht verdeeld wordt. De secundaire lucht wordt via het register en regelbare jaloezie-kleppen in het front van de ketel toegevoerd.

In het voorbeeld is de regelklep voor de retourdruk van de stookolie gekoppeld aan de elektrisch bediende jaloezie-kleppen zodat steeds een juiste verhouding tussen de toegevoerde hoeveelheid brandstof en secundaire verbrandingslucht bestaat.

Stoomverstuiving

Men tracht de corrosie die aan het eind van de rookgasstroom bij het stoken van olie kan optreden, te voorkomen door met minimale luchtvermaat te stoken. Het is van groot belang dat de olie zo fijn



mogelijk wordt verstoven. Een methode om een zeer fijne verdeling van de brandstof te krijgen is deze met behulp van oververhitte stoom te verstoven. Bij stoomverstuiving, voorzover bekend niet toegepast bij stoominstallaties voor gemalen, gebruikt men een klein deel (0,1%) van de ketelcapaciteit om de stookolie in zeer fijn vernevelde toestand in de vuurhaard te brengen. De verbranding van de olie komt met behulp van de stoom volledig tot stand zodat er minder onverbrande brandstofdeeltjes de ketel verlaten en deze rookgas- zijdig langer schoon blijft. Bij vergelijkende proeven genomen met de verschillende typen oliebranders, blijkt de druppelgrootte verdeling het gunstigst te zijn bij stoomverstuiving.

Druppelgrootte verschillende verstuivingssystemen

4.10 Schoorsteen en ketelbemetseling

4.10.1 Schoorsteen

De naam schoorsteen is een samenvoeging van schoor, een schuin gestelde steun en steen het materiaal waar het bouwwerk uit is samengesteld. Een schoorsteen dient om aan de lucht en de verbrandingsgassen de vereiste snelheid te geven en om bij het stromen daarvan door de brandstoflaag, de brander, de vlampijp en tenslotte door de rookkanalen, de weerstand hierin te overwinnen of anders gezegd: de schoorsteen moet voor de nodige trek zorgen. Bovendien dient de schoorsteen om de gassen en het eventueel daarin aanwezige stof zo hoog mogelijk af te voeren zodat zij niet hinderlijk zijn voor de omgeving.

4.10.2 Natuurlijke trek

De trek ontstaat door het verschil in soortelijk gewicht tussen de rookgassen in de schoorsteen en de buitenlucht c.q. de verbrandingslucht daar omheen. Deze rookgassen bestaan, evenals lucht, voor 79% uit stikstof en verder uit zuurstof en kooldioxide. Daar alleen CO₂ zwaarder is dan zuurstof, die gediend heeft tot het vormen daarvan, kan men het soortelijk gewicht van de rookgassen (gerekend bij 0° C en 760 mm kwikkolom) gelijk stellen aan dat van lucht.

Het soortelijk gewicht neemt bij temperatuurverhoging af en is omgekeerd evenredig aan de volume vermeerdering. Van een gas met een soortelijk gewicht = γ_0 bij 0° C en γ_t bij t° C is het gewicht steeds:

$$V_0 \gamma_0 = V_t \left(1 + \frac{t}{273}\right) \gamma_t \text{ [kg]}$$

Dus

$$\gamma_t = \gamma_0 \frac{1}{1 + \frac{t}{273}} = \gamma_0 \frac{273}{273 + t} = \gamma_0 \frac{273}{T} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Stellen wij:

Temperatuur van de buitenlucht = t_1° C

Temperatuur van de rookgassen in de schoorsteen = t_s° C

Hoogte van de schoorsteen = H m

Drukverschil aan de voet van de schoorsteen = D kg/m²

Soortelijk gewicht van lucht en rookgassen bij 0° C = 1,3 kg/m³

Een kolom lucht van 1 m² in doorsnede en H m hoog, oefent buiten de schoorsteen een druk uit van:

$$H \frac{273}{273 + t_1} \gamma_0 \text{ [kg/m}^2\text{]}$$

Een kolom rookgas van 1m² in doorsnede en H m hoog, oefent in de schoorsteen een druk uit van:

$$H \frac{273}{273 + t_s} \gamma_0 \text{ [kg/m}^2\text{]}$$

Als T_1 en T_2 de absolute temperaturen zijn dan is het drukverschil:

$$D = \left(H \frac{273}{273 + t_1} - H \frac{273}{273 + t_s} \right) \gamma_0 \text{ [kg/ m}^2\text{]}$$

Of

$$D = H \cdot 273 \cdot 1,3 \left(\frac{1}{273 + t_1} - \frac{1}{273 + t_s} \right) \text{ [kg/ m}^2\text{]}$$

Uitgewerkt geeft dit:

$$D = H \left(\frac{355}{T_1} - \frac{355}{T_s} \right) = \text{[kg/ m}^2\text{]}$$

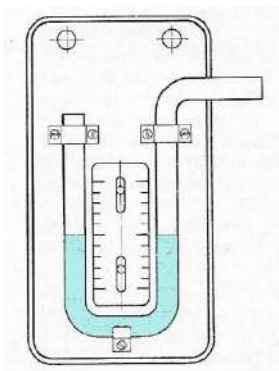
$$D = 355 H \frac{T_s - T_1}{T_s T_1} \text{ [kg/ m}^2\text{]}$$

De aldus berekende trek noemt men de statische of theoretische trek. Deze trek blijkt dus evenredig te zijn aan de hoogte van de schoorsteen en aan het verschil in temperatuur tussen de rookgassen en de omringende (buiten)verbrandingslucht.

Is de buitentemperatuur bijvoorbeeld 20° C en die van de rookgassen 300° C dan levert de schoorsteen per meter hoogte een drukverschil van:

$$D = 355 \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{593} \right) = 1,205 - 0,615 = 0,6 \text{ [kg/ m}^2\text{]}$$

De druk van 1 kg/m² komt overeen met een kolom water van 1 mm. Deze geringe drukverschillen meet men met een zogenoemde trekmeter. Deze bestaat uit een U-vormig buisje gevuld met water, dat met het ene been is aangesloten op de schoorsteen en met het andere been in verbinding staat



met een ruimte in het ketelhuis. De (onder)druk wordt weergegeven in millimeters waterkolom en geschreven als mmwk.

Het statische of theoretische drukverschil (h_{theor}) heeft alleen die waarde als de gaskolom geen snelheid bezit. Zodra de gaskolom beweegt moet een gedeelte van het drukverschil aan de gasen een snelheid meegeven, dus een snelheids- of dynamische druk (h_{dyn}) geven terwijl een ander gedeelte dient om de weerstand langs de schoorsteenwand en tussen de gasdeeltjes onderling te overwinnen (h_{wrijv}). Effectief is dus aan de voet van de schoorsteen slechts beschikbaar (h_{besch}):

$$h_{\text{besch}} = h_{\text{theor}} - (h_{\text{dyn}} + h_{\text{wrijv}}) \text{ [mm w. k.]}$$

Trekmeter

In onderstaand overzicht zijn voor de verschillende ketelinstallatie-onderdelen de globale drukverlagingen weergegeven.

In het brandstofbed	6 – 8 mm w.k.
In de rookkanalen bij vuurgangketels	4 mm w.k.
In de vlamkast en de rookkast bij een Schotse ketel	2 mm w.k.
In geveegde vlampijpen	3 mm w.k.
In niet geveegde vlampijpen	6 mm w.k.
In bundels waterpijpen	6 mm w.k.
In de schoorsteen	2 mm w.k.
In een afzonderlijke ketelvoedingswatervoorwarmer (economiser)	6 mm w.k.
Voor het versnellen van de verbrandingslucht	1 mm w.k.

Voor een Schotse ketel met vervuilde vlampijpen is dus $8 + 6 + 2 + 2 + 1 = 19$ mm w.k. aan trek nodig. Als men de pijpen raagt is dat 16 mm waaruit blijkt dat aan vervuiling in de pijpen een belangrijk deel (15%) van de trek wordt opgeofferd.

In het algemeen is een grote rookgassnelheid zeer gewenst, omdat zij de warmteoverdracht sterk verhoogt. Bij het toenemen van de luchtsnelheid nemen echter de wrijvingsverliezen kwadratisch toe. Deze extra weerstand wordt beïnvloed door het rookgasvolume, de afmetingen en tevens de vorm(en) van de rookkanalen en zal uiteindelijk overwonnen moeten worden door de trek van de schoorsteen.

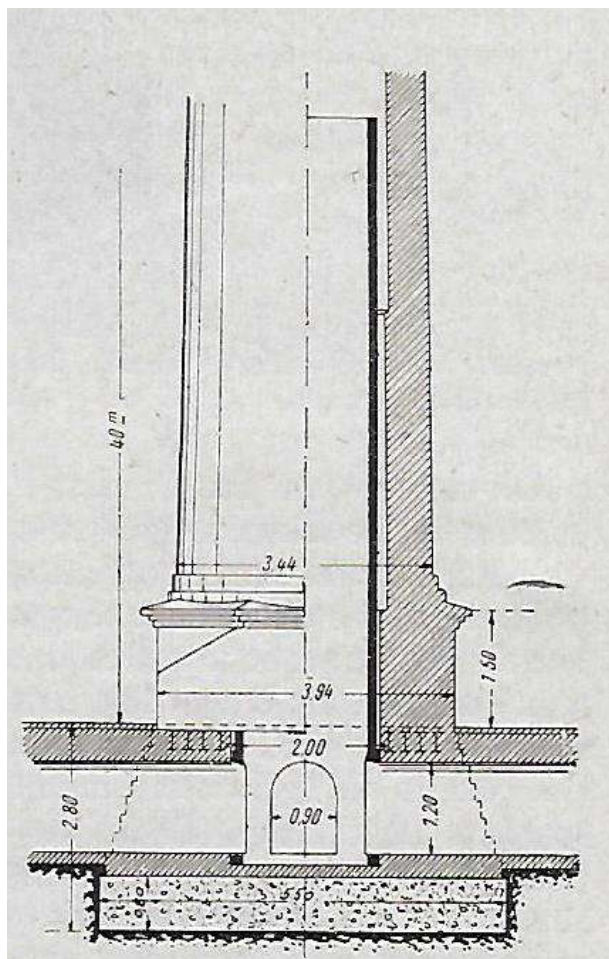
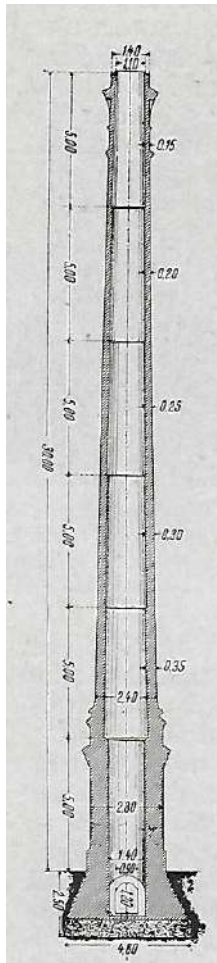
Bij de berekening van die kanalen treden verschillende onbekenden op, onder andere het eerdergenoemde rookgasvolume en de temperatuur, die beide veranderlijk zijn. Een vaste formule voor het berekenen van de benodigde rookkanaal-afmeting(en) is zodoende niet beschikbaar. Men behelpt zich in de regel door te zorgen dat de doortocht van de rookgaskanalen in een bepaalde verhouding staat tot het rooster oppervlak (R.O.) van de ketel. Daarbij moet men letten op de afkoeling van de rookgassen, die het volume bij de schoorsteen belangrijk kleiner maakt dan bij het verlaten van bijvoorbeeld de vuurgang. Enige door ketelfabrikanten gehanteerde richtwaarden hiervoor zijn:

Doortocht naast en onder de ketel	0,25 – 0,40 R.O.
Doortocht in de schoorsteen en boven de vuurbrug	0,16 – 0,18 R.O.
Doortocht vlampijpen	0,15 – 0,20 R.O.

Natuurlijke trek hangt af van de schoorsteenhoogte en de gemiddelde temperatuur van de rookgaskolom daarin. Zowel constructief als procesmatig gelden een aantal beperkingen en is de hoogte gelimiteerd. Voor voldoende trek moet de gemiddelde schoorsteen- temperatuur hoog zijn, waardoor het schoorsteen verlies groot wordt. Middelen voor brandstofbesparing zoals voedingswater voorwarmers (economisers) en luchtverhitters (Luvo's), kan men daarom bij natuurlijke trek veelal niet toepassen, omdat zij de schoorsteen- temperatuur zodanig verlagen dat de trek te gering wordt; bovendien vergroten zij de weerstand aanzienlijk.

4.10.3 Schoorsteenconstructie

Schoorstenen worden van baksteen, plaatstaal of beton gemaakt. Voorzover bekend zijn de laatste twee materialen niet bij ketelinstallaties van gemalen toegepast en zullen daarom in deze leidraad buiten beschouwing blijven.



Constructie van de schoorsteen

Een stenen schoorsteen bestaat uit een meestal onderheide fundatie, een voetstuk ,de schacht en de kop. Het voetstuk wordt verzwakt door de opening(en), van de aansluiting van de rookkanalen. Verder bevindt zich in de voet een stalen toegangsdeur voor de verwijdering van vliegias en roet. Dezelfde deur dient voor inwendige inspectie van de schoorsteen en het aanleggen van een houtvuur voor het opwarmen van de koude schoorsteen bij het in bedrijf stellen van de stoomketel. De rookgas temperatuur kan bij het binnentreden van de schoorsteen 300 °C bedragen. De onderkant van de schacht wordt met het oog op warmtespanningen en aantasting door zure rookgasproducten voorzien van een vrijstaande binnenpijp ,schutwand genaamd. Deze schutwand kan zijn opgemetseld uit vuurvaste steen of zoals in de figuur hier voor is aangegeven uit een stalen

pijp. De schutwand kan relatief eenvoudig vervangen worden en voorkomt dat de schacht wordt aangetast en de hele schoorsteen vernieuwd moet worden. De schutwand wordt veelal tot over een derde tot een kwart van de hoogte van de schoorsteen aangebracht en heeft een ruime meestal van buitenaf geventileerde spouw ten opzichte van de schacht. De spouw is opgevuld met isolatiemateriaal of aan de bovenkant afgedekt zodat deze zich niet kan opvullen met roet of vliegias. De ruimte tussen de voering en de schacht bedraagt enkele centimeters waarmee wordt voorkomen dat bij grote wind-belasting deze elkaar raken.

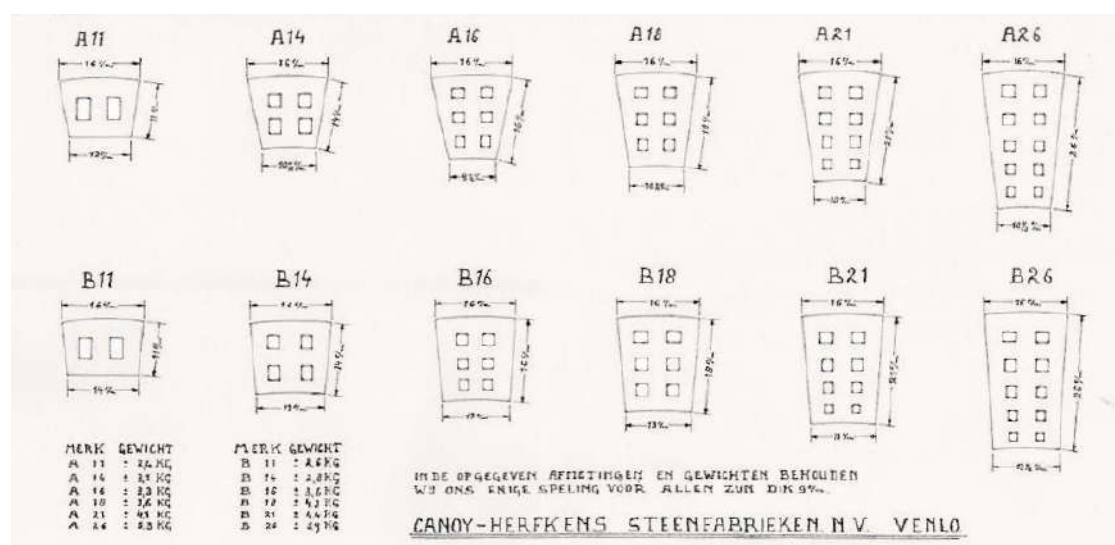
Bij sommige schoorstenen wordt de kop van de schoorsteen onder het hoogste punt verdikt uitgevoerd met het doel de langs strijkende lucht van de uitstroom-opening af te leiden en trekvermindering te verhinderen. Bovenop het metselwerk van de schoorsteenkop wordt meestal een ringvormige gietijzeren afdekplaat geplaatst om inregenen en daardoor vorstbeschadiging te voorkomen.

Omdat de schoorsteen door zijn hoogte gemakkelijk door de bliksem kan worden getroffen moet hij zelfs al tijdens de bouw worden voorzien van een bliksemafleider. Tijdens de bouw worden tevens klimijzers aangebracht om de schoorsteen te kunnen bestijgen en eventueel herstellingen uit te kunnen voeren.

Een gemetselde schoorsteen heeft een wanddikte, welke van boven naar beneden groter wordt. Aan de top is de dikte minstens 15 cm, ongeveer elke 5 meter wordt de wanddikte 5 cm groter.

De schoorsteen loopt taps toe (aanloop of bevalling). Als richtlijn houdt men deze aanloop tussen de 1:40 tot 1:60, dit betekent dat de diameter gemiddeld 4 cm per meter hoogte afneemt.

Schoorstenen worden meestal van binnenuit opgebouwd met goed passende radiale vormstenen. Deze stenen zijn als gaatstenen uitgevoerd waarbij, zoals in de figuur hieronder is aangegeven, de afmetingen naar de top van de schoorsteen toe steeds kleiner worden. Met name aan de voet, dus daar waar de schoorsteenwand dikker wordt, wordt deze opgebouwd uit meerdere concentrische ringen radiaalstenen.

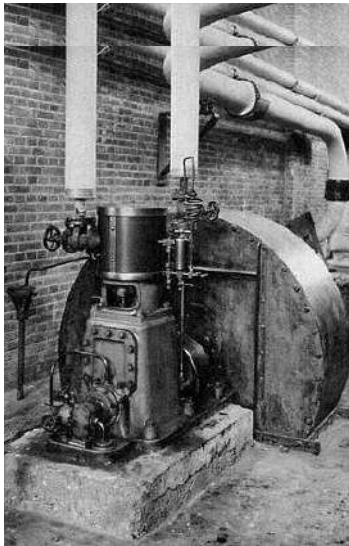


Steenformaten en gewicht

De gaten in de stenen dienen voor isolatie, door de daarin stilstaande lucht, zodat de schoorsteen niet teveel afkoelt en de trek nadelig beïnvloed wordt. De gaten worden bij het metselen gedeeltelijk met specie gevuld zodat een goede verbinding tussen de onderlinge lagen ontstaat.

4.10.4 Kunstmatige trek

Kunstmatige trek wordt toegepast als de som van de weerstanden te groot is voor natuurlijke trek. Dit kan het geval zijn als men roosters met nauwe spleten toepast om fijne steenkool te verstoken, of als er economisers of luchtverhitters worden toegepast. Als voorbeeld: een met een economiser en luchtverhitter uitgeruste waterpijpketel heeft in orde grootte 50 mm w.k. aan trek nodig om te kunnen functioneren. Als daarbij de rookgassen tot 150 °C afkoelen dan zou men in dit



hypothetische geval bij natuurlijke trek een schoorsteen nodig hebben van circa 200 m. Dit is niet realistisch waarom men in zulke gevallen overgaat tot geheel of gedeeltelijke kunstmatige trek. De energie die nodig is voor het creëren van het gewenste drukverschil wordt bij kunstmatige trek niet uit de hete rookgassen gehaald maar uit de stoom of elektriciteit die de naar het aandrijfwerktuig wordt gevoerd. Voor relatief kleine installaties past men dan zogenoemde onderwind toe, dat wil zeggen onder het rooster toegevoerde lucht. Er is dan maar één ventilator nodig die slechts met koude of voorverwarmde lucht in aanraking komt en dus eenvoudig van constructie kan zijn. De schoorsteen hoogte kan dan beperkt blijven tot de in verband met hinder voor de omgeving vereiste hoogte.

Blaasmachine (ventilator)

De capaciteit van de ventilator kan worden geregeld door:

- Kleppen in de leiding voor of na de ventilator (smoorregeling)
- Veranderen van het aantal omwentelingen van het aandrijfwerktuig (kleine stoommachine of elektromotor)
- Verstellen van de leidschoepen die de inlaatopening vergroten of verkleinen
- Verstellen van de schoepen van de waaier

Op de foto hier voor is één van de voormalige twee zogenoemde blaasmachines afgebeeld van het ir. D.F. Woudagemaal. De centrifugaalwaaier ventilatoren van deze machines die elk voor de onderwind van drie stoomketels zorgden werden door een snellopende stoommachine aangedreven. De capaciteit van de ventilator werd geregeld door de stoomtoevoer naar de machine meer of minder te knijpen. In het stookfront van de desbetreffende ketel zat bij elke vuurgang in de toevoerleiding een regelklep waarmee de hoeveelheid onderwind per vuur werd geregeld.

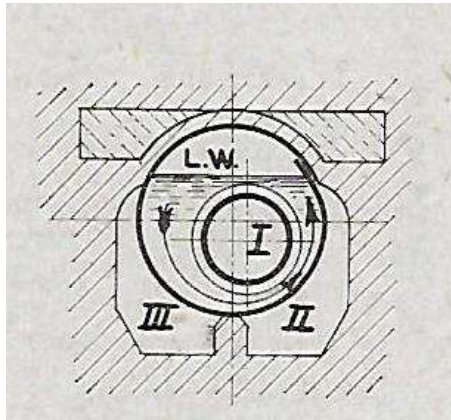
Welke trekmethode wordt toegepast is afhankelijk van het toegepaste keteltype en het fabricaat. Naast de toepassing van onderwind zijn er ook systemen waarbij zowel de zuig als de trek met behulp van ventilatoren in serie wordt geregeld of waarbij er in de schoorsteen parallel aan de

natuurlijke trek een ventilator wordt geplaatst. Hiervan is niet bekend of zij ooit bij gemaal-installaties zijn toegepast.

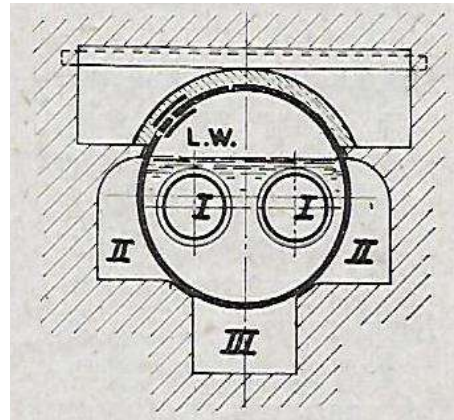
4.10.5 Stoomketel bemetseling

Het doel van de bemetseling van stoomketels is ten eerste om uitstraling van de warmte tegen te gaan en in de tweede plaats om het warmte opnemend oppervlak van de ketelwand te vergroten door de rookgassen door kanalen te voeren welke in het metselwerk worden gevormd. Een ketel welke niet wordt ingemetseld bekleedt men met een isolerende laag, welke voor het verbod op de toepassing van asbest, vaak bestond uit een tegen hoge temperaturen bestand composiet van magnesia (magnesium oxide (MgO)) en het bindmiddel asbest. Eerst wordt op de te isoleren delen kiezelgoer of diatomeeënaarde aangebracht, waarna het magnesia wordt opgestreken. Eenvoudiger aan te brengen zijn steenwolmatrassen, uit diatomeeënaarde of magnesia vervaardigde blokken en schalen. Wordt de isolatie als weke massa, vergelijkbaar met cementmortel, aangebracht, dan wordt deze gewoonlijk beschermd door plaatstalen bekleding. De bekleding van ketelfronten wordt zonder plaatafdekking uitgevoerd maar tegen beschadiging beschermd met jutedoek (gebandageerd). Een en ander kan worden vergeleken met het aanleggen van een gipsverband bij botbreuk.

Bij Cornwall- en Lancashire-ketels gaan de rookgassen van het rooster af door de vuurgangen naar de achterkant van de ketel waar ze in een nis van metselwerk, ook wel hel genoemd, uitkomen. Bij de Cornwalketel gaan de rookgassen (zie onderstaande figuur) door kanaal II naar de voorzijde van de ketel en duiken daar onder de romp door naar kanaal III vanwaar ze aan de achterzijde naar de schoorsteen gaan. De nismovormige ruimte, evenals een gedeelte van kanaal II is voorzien van een laag vuurvast metselwerk van halfsteens dikte, omdat de temperatuur daar tot 500° a 600° C bedraagt. De bodem is niet bekleed met een vuurvaste laag omdat het uit de rookgassen neervallende roet voldoende bescherming biedt tegen de hoge temperatuur. De bovenkant van de rookkanalen moet minstens 100 mm onder de laagst toegestane waterlijn liggen. Dit is om te voorkomen dat de romp oververhit raakt omdat boven de waterlijn het plaatmateriaal slechts door stoom gekoeld wordt. De horizontale lijn, die gaat door het hoogste punt van de stoomketel, dat met de rookgassen in aanraking is noemt men de vuurlijn. De vuurlijn wordt, meestal in de buurt van het peilglas, met een roodkoperen plaatje aan de voorkant van de ketel aangegeven. Het ketelwater moet steeds boven het door deze lijn aangegeven niveau blijven. Het voordeel van de rookgassenloop zoals hierboven beschreven, is dat men bij een Cornwalketel van een goede circulatie verzekerd is. Dezelfde loop van de rookgassen wordt door sommige fabrikanten ook bij de Lancashire stoomketel toegepast.

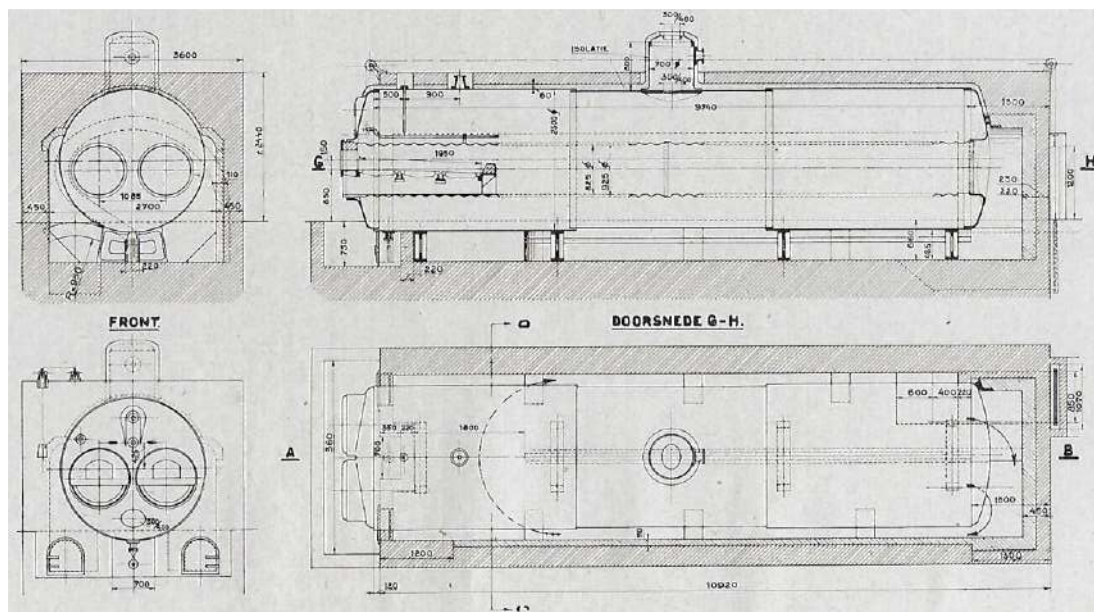


Circulatie bij Cornwall stoomketel



Circulatie bij Lancashire stoomketel

Bij sommige ketels worden de gassen vanaf de achterkant van de ketel langs beide zijden naar voren gevoerd, om dan door een gemeenschappelijk kanaal onder de ketel naar de schoorsteen te gaan. Het bezwaar van deze uitvoering is, dat de sterk afgekoelde gassen langs de onderkant van de ketel stromen waar zich ook het koude water bevindt, zodat de circulatie hierdoor niet bevorderd zal worden en het water bij het opstoken te lang koud blijft. Een andere mogelijkheid is de gassen vanaf de achterkant door een gezamenlijk kanaal onder de ketel door naar voren te voeren en ze daarna via twee zijkanalen naar de schoorsteen te leiden. Het bezwaar van deze uitvoering is dat de ketel- bodem, waarop zich gemakkelijk slib afzet, sterk verwarmd wordt waardoor het materiaal, speciaal op de plaats van de rondgaande klinknaad, een te hoge temperatuur krijgt. Slib is namelijk een slechte warmtegeleider. Ook de stoelen waarop de ketel rust worden door de langsstromende rookgassen sterk verwarmd.



Bemetseling Lancashire ketel

De ketel moet naar de achterzijde kunnen uitzetten omdat deze aan de voorzijde waar de voedings- en spueleidingen zijn bevestigd is vastgezet. Voor afdichting tegen het metselwerk werden daarom dikke gevlochten asbestkoorden aan gebracht. De koorden aan de achterzijde zijn 50 – 70 mm dik en die voor de zijanten circa 25 mm.

Met name bij de bemetseling van oude stoomketels werd in het verleden veelvuldig asbest gebruikt. Bij het geheel of gedeeltelijk ontmantelen van oude stoomketels voor uitgebreide inspecties zoals bijvoorbeeld het trekken van klinknagels, kan men daarom asbest tegenkomen. In deze leidraad worden dan ook de plaatsen waar asbest kan voorkomen, en in welke hoedanigheid, specifiek benoemd. Deze componenten mogen slechts door hierin gespecialiseerde en gecertificeerde bedrijven verwijderd worden. Omdat asbest niet meer mag worden toegepast is er in de loop der tijd een aantal vervangende materialen ontwikkeld met dezelfde en soms nog betere eigenschappen. Hierdoor hoeft het restaureren van oude stoominstallaties, ondanks de eventuele aanwezigheid van asbest geen probleem te zijn.

Om warmte-uitstraling van het metselwerk tegen te gaan worden de gemetselde wanden als spouwmuren, dus met isolatie door stilstaande lucht, uitgevoerd. Om de lucht in rust te houden worden deze spouwen vaak met stoffen opgevuld welke de warmte slecht geleiden. Men neemt hiervoor stoffen die niet inklinken zoals bijvoorbeeld magnesia platen. De bovenkant van de ketel wordt tussen de muren eerst bedekt met een 5 tot 10 cm dikke leemlaag waarop zand of koolas gestort wordt. Hierop wordt een laag klinkers (hard gebakken baksteen) gelegd. Ook wordt tussen de laag koolas weleens een boog gemetseld zodat er tussen de ketel en de boog een luchtlaag blijft welke weer dient om de warmte-uitstraling te verminderen. In plaats van een as- en zandvulling tussen de opstaande ketelmuren worden ook weleens togen aangebracht tussen stalen I-profielen. Deze profielen worden boven de ketel dwars op zijn lengterichting in de opstaande zijmuren gelegd. De luchtlaag tussen de ketelramp en togen werkt isolerend. Men moet hierbij zorgen dat kalkmortel en as niet direct met de ketelwand in aanraking komen omdat dit in combinatie met druiptwater tot roestvorming leidt.

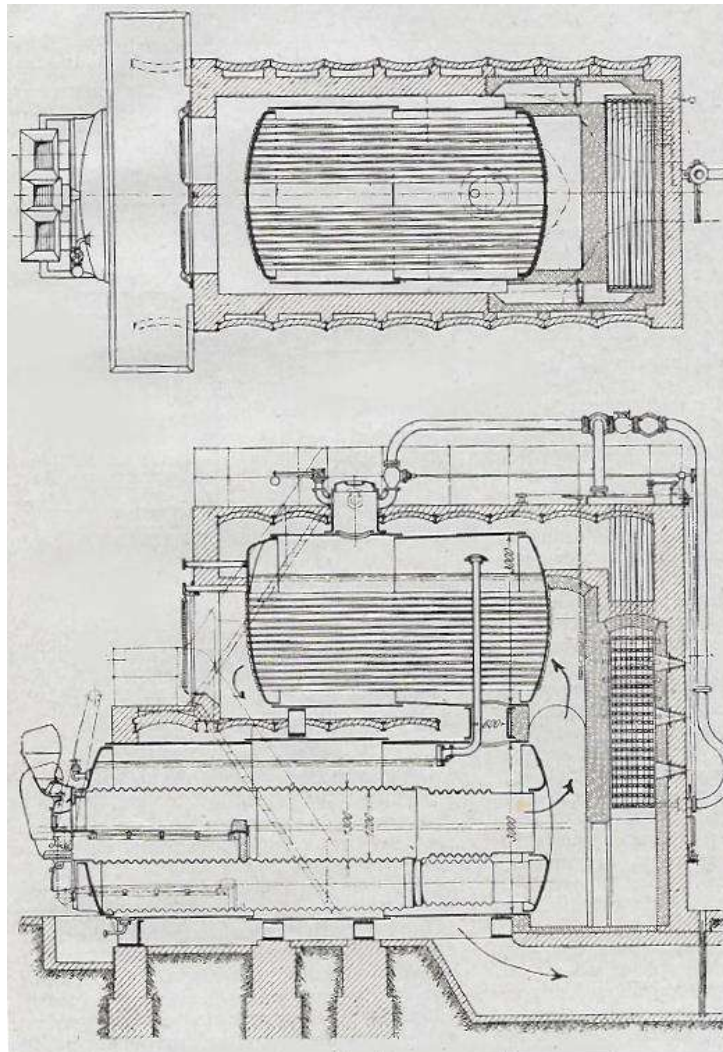
Door de grote temperatuurverschillen waaraan het metselwerk onderhevig is, zullen gemakkelijk scheuren hierin ontstaan waardoor relatief koude lucht door de rookkanalen naar binnen gezogen wordt. Het scheuren van het metselwerk kan beperkt worden door sterke verankeringen, zowel in de lengterichting als de in de breedte, naast het gebogen uitvoeren van de constructies. Het metselwerk mag geen belasting opnemen door het gewicht van de ketel.

Op de vloer van de rookkanalen worden soms zogenoemde beren (gemetselde verhogingen) aangebracht om de rookgassen dooreen te wervelen, waardoor bereikt wordt dat de warme gassen in de kern van de gasstroom in aanraking komen met de ketelwand. Een nadeel is dat tussen de beren, vooral aan de schaduwzijde ervan, zich gemakkelijk roet en as afzet.

De verticale wanden van de ketelbemetseling worden meestal aan de buitenzijde gesteund door stalen U-profielen. Om het metselwerk te kunnen inspecteren aan de binnenkant en om de rookkanalen te kunnen reinigen worden op een aantal plaatsen gietijzeren deuren of deksels aangebracht. Behalve de hiervoor besproken bemetseling werd ook wel een isolatie toegepast waarbij geen stenen gebruikt worden. Het isolerend vermogen is hierbij beter, terwijl de kans op scheuren ook minder is, en verliezen door het aanzuigen van koude lucht afnemen.

Bekend zijn de systemen van Viko (Stork) en die van Zuidnim (Jaffa). Bij de Viko-isolatie worden op de bemetseling 55 mm dikke isolatieplaten geklemd tussen de U-balken van de bemetseling-verankering en Zores-staal. Bij het isolatie systeem van Zuidnim bestaat de bekleding uit gegoten ijzeren platen welke aan de buitenzijde van isolatiemateriaal en aan de binnenkant zo nodig van vuurvaste bekleding voorzien zijn.

Wanneer de ketel aan de achterzijde uitgerust is met een oververhitter welke achter de romp is geplaatst moeten de rookkanalen van kleppen worden voorzien. Deze worden met het oog op geringe vormverandering ten gevolge van temperatuurverschillen van gietijzer gemaakt. Ook kleppen van plaatstaal met opgelaste ruggen waartussen isolatiemateriaal is aangebracht voldoen, vanwege het geringe temperatuurverschil, goed. De kleppen kunnen voorzien zijn van een doorlopende as of van aangegoten of aangelaste tappen die in ruime potten draaibaar moeten zijn in verband met vervuiling door roet af asresten.



Bemetseling Piedboeuf ketel

In het rookkanaal achter de ketel bevindt zich een regelschuif of demper, welk met een over wieltjes lopende staaldraad vanaf de standplaats van de stoker bedienbaar is. De draad is belast door een contragewicht voor gemakkelijke beweging van de schuif.

De ketel wordt ondersteund door gegoten ijzeren of gelaste stalen stoelen, welke geplaatst moeten worden dicht bij de rondgaande klinknaden omdat hier de ketelwand het stijfst is. Bovendien is het wenselijk de stoelen te plaatsen onder de cilindrische delen met de grootste diameter, daar bij plaatsing onder de rompdelen met de kleinste diameter door het gewicht van het water de klinknagels op trek belast worden.

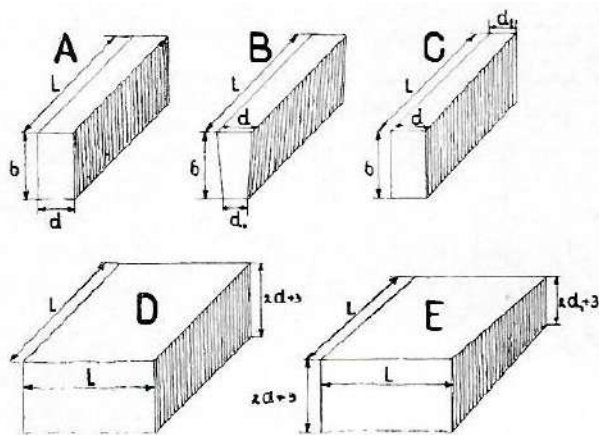
Daar de uitlijning van de fundatie kan afwijken als gevolg van verzakking of kromtrekken van de ketel is het aanbevelenswaardig, indien mogelijk, slechts twee stoelen onder de ketel te plaatsen en wel zodanig dat in de overhangende en tussenliggende delen van de ketelromp dezelfde buigmomenten optreden. Men hanteert hiervoor vanuit het midden gerekend een afstand van 0,59 keer de lengte. De vlaktedruk tussen de stoelen en de fundatie mag de 5 kg /cm² niet overschrijden. Bij lange ketels plaatst men de stoelen soms op rollen, uitgezonderd de eerste twee gerekend vanaf het front, die vastgezet worden. De stalen rollen hebben dan een diameter van 60 mm en kunnen over een in de fundatie vastgezette stalen of gegoten ijzeren plaat bewegen.

Vuurvaste steen

De binnenbekleding van een stoomketel bestaat daar waar de temperatuur de 500 °C te boven gaat uit vuurvaste steen. Bij ketelbemetseling behoren deze uitsluitend tot de zogenoemde chamotte groep, dat wil zeggen dat ze zijn gemaakt van vuurvaste klei, chamotte, en een mengsels of verbindingen van aluminiumoxide (Al₂O₃) en siliciumdioxide (SiO₂). De keuze van de grondstoffen bepaalt de scheikundige samenstelling alsook de natuurlijke hoedanigheden. Ook de wijze van bewerking is van invloed op de uiteindelijke eigenschappen van de steen. De fabrikant heeft dus de mogelijkheid de steen aan diverse bedrijfseisen aan te passen. Een steen met een grote weerstand tegen temperatuurwisselingen moet min of meer poreus zijn terwijl een grote weerstand tegen aantasting door gesmolten slakken juist een dichte steen vraagt. Het percentage aluminiumoxide is, zoals uit het onderstaande overzicht is af te leiden, bepalend voor de hoogte van de temperatuur waaraan de steen kan worden blootgesteld en de weerstand tegen aantasting door steenkoolslakken.

Soort	Smeltpunt		Al ₂ O ₃ gehalte	Gebruiksdoel
	SK	°C		
SG I	29	1650	25 - 30	Vuurgangketels, behalve de vuurbrug. Alle wanden zonder bijzondere aantasting van slakken voor temperaturen niet hoger dan 1000° C
SG III	33	1730	35 - 38	Wanden van vuurhaarden, die niet aan de hoogste temperaturen worden blootgesteld.
Y	33/34	1740	37 - 40	Zijwanden van vuurhaarden in de heetste zones , gepaard gaande met aantasting door slakken en vuurbrug.
X	34/35	1760	40 - 43	Ontstekingsgewelven. Zijwanden van vuurhaarden in de heetste zones. Oliestook inrichtingen

In het verleden was het gebruikelijk de smeltpunt-temperatuur in Segerkegel (SK) uit te drukken; vernoemd naar de Duitse chemicus Hermann Seger (1839-1893). Hij ontwierp slanke kegels van keramisch materiaal die bij een bepaalde temperatuur en tijdsduur ombuigen. De kegels werden, van buitenaf zichtbaar, naast de gedroogde stenen in de steenoven geplaatst. Als tijdens het stookproces de bovenste punt van de kegel knakte wist men dat de gewenste temperatuur was bereikt. De aanduidingen op de kegels stonden voor een bepaalde temperatuur uitgedrukt in graden



Celsius. De vuurvaste stenen werden meestal in gangbare formaten gebakken zodat ze ook in verband met de normale baksteen konden worden verwerkt. De maten van de bijbehorende wiggen (voor het maken van gewelven) correspondeerden met die van de rechte stenen. Ook werden wel speciale vormstenen voor afwijkende vormen van gewelven van alle voorkomende stralen gemaakt in een zodanige kwaliteit als voor de bestemming en condities vereist zijn

Steenformaten voor ketelbemetseling

Men noemt de stenen in de bovenstaande afbeelding: A = normaalsteen, B=kopwig voor halfsteens gewelf, D=vierdubbele normaalsteen, en E=vierdubbele wig. Vierdubbel is vakjargon, bedoeld wordt het viervoud van de breedte van de normaal steen of wig en niet vier keer de dubbele breedte van de steen.

De gebruiker heeft er belang bij zich aan de gangbare maten te houden zodat met name bij noodreparaties de stenen snel geleverd kunnen worden. Ook zijn de kosten geringer. De stenen die vaak vervangen moeten worden zoals bijvoorbeeld bij de vuurbrug, houdt men meestal op voorraad. Vuurvaste stenen zijn ten opzichte van normale baksteen glad, vormvast en nauwkeurig aan de maat. De stenen worden min of meer verlijmd waarbij voor de stoot- en langsvoeg een ruimte wordt aangehouden van slechts 3 mm. De metselspecie waarmee de stenen worden verwerkt moet dezelfde samenstelling -en daardoor dezelfde uitzetting/krimp coëfficiënt- als de stenen hebben. Indien men de specie niet samen met de stenen betreft van dezelfde leverancier loopt men de kans schade te berokkenen aan het metselwerk door scheurvorming.

4.10.6 Roetblazers

Zodra de stoomketel in bedrijf is, zal als gevolg van onvolkomen verbranding zowel in de ketel als daarbuiten roet neerslaan. Ook wordt vlieg-as gevormd uit de niet brandbare delen van de brandstof dat zich tegen de onderkant van de waterpijpen bij waterpijpketels en in de dode hoeken van de rookkanalen van de ketelinstallaties afzet. Beide stoffen zijn slechte warmtegeleiders en

verminderen de overdracht van warmte uit de rookgassen naar het ketelwater. Ook kunnen roet en vlieggas de vlampijpen of de rookkanalen verstopen. Bij eenvoudige installaties is het niet lonend



hiervoor speciale voorzieningen te maken, die deze reiniging tijdens het bedrijf mogelijk maken. In zulke gevallen wordt na het uit bedrijf nemen van de ketel het roet en de vlieggas handmatig verwijderd. De ketelinstallaties zijn daartoe uitgerust met deuren dan wel handgaten. De vlampijpen bij een vlampijpketel worden geraagd met een ronde staalborstel waaraan een vaak uit meerdere delen bestaande lange steel wordt geschroefd.

Pijpenrager

De borstel of pijpenrager wordt in een heen- en weergaande en tevens draaiende beweging door de pijp gestoken. De roet- en asresten moeten aan de achterzijde van de pijpenbundels handmatig worden verwijderd.

Om tijdens bedrijf de vlampijpen van een ketel te kunnen reinigen worden deze van roetblazers voorzien. Deze bestaan meestal uit, voor de vlampijpen geplaatste, nozzles of straalpijpjes, waarmee stoom van keteldruk of perslucht, met hoge snelheid in de vlampijpen wordt geblazen. De roet- en vliegassdeeltjes worden dan van de pijpwand losgerukt, met de rookgasstroom meegenomen en via de schoorsteen afgevoerd.

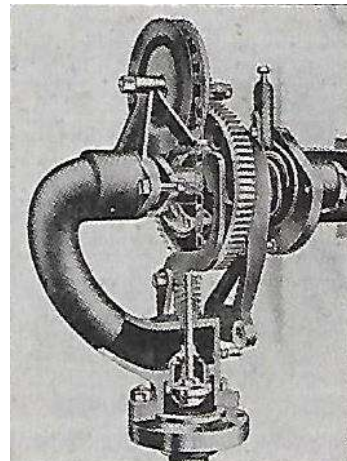
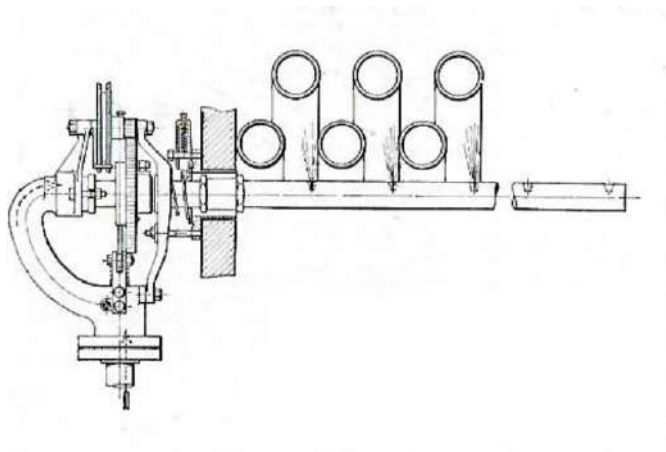
De foto's hieronder tonen de voor onderhoud deels losgenomen roetblaasinrichting van een van de vier Schotse ketels van het ir D.F. Woudagemaal in Lemmer. De vlampijpenbundels zijn hier verdeeld in drie secties die door het openen van de afsluiters op de ketel na elkaar met stoom worden schoon geblazen.



Roetblaasinrichting Schotse-ketel

Bij waterpijpketels is de situatie anders omdat de rookgassen en dus het roet en de vlieggas aan de buitenzijde van de pijpen wordt afgezet en wel aan de onderkant hiervan.

Delen hiervan zetten zich af in de vorm van vogelnesten en worden daarom met de Engelse benaming birdsnestings aangeduid. Ook deze worden door middel van een krachtige stoomstraal verwijderd waarbij het roet en de meer of minder vloeibare as van de pijpwand wordt losgerukt, en met de rookgasstroom meegenomen en via de schoorsteen afgevoerd. Een veel toegepaste roetblazer is die van Diamond welke op de onderstaande figuren is afgebeeld.



Roetblazer voor waterpijpketel

Deze blazer bestaat uit een draaibare, horizontale aan het einde gesloten en van meerdere straalpijpjes voorziene blaaspijp die door middel van een ketting, nestenschijf en tandrad-overbrenging vanaf de ketelhuisvloer bedienbare is. De stoomtoevoer vindt plaats door een via een nok bediende klep. Na het openen van de hoofdstoomafsluiter in de toevoerleiding wordt de pijp drie keer heen- en teruggedraaid. Een blaasperiode duurt ongeveer 45 seconden. Gezorgd moet worden dat de toevoerleiding ontwaterd is en er met zo droog mogelijke stoom wordt geblazen.

Afhankelijk van de afmeting van de ketel en de rangschikking van de waterpijpen zijn er 3-5 blaaspijpen aangebracht. Iedere blaaspijp bestrijkt een door de lengte van de nok bepaald deel van de pijpen. Veelal is dat een cirkelboog van iets minder dan 180 °.

Aangezien de stoompijpen van de roetblazers in een vochtige ruimte met hoge temperatuur liggen, waarbij de rookgassen veel kooldioxide (CO₂) bevat, zullen gewone staalsoorten snel roesten. Dit is de reden dat deze pijpen van een speciale gelegeerde staalsoort worden gemaakt.

4.11 Appendages

4.11.1 Algemeen

Een stoomketel moet voorzien zijn van de volgende voorgeschreven appendages:

- Tenminste twee veiligheden die dienen om het optreden van een te hoge druk te voorkomen;
- Eén hoofdstoomafsluiter en een aantal hulpstoomafsluiters om de leidingen te kunnen afsluiten, die de stoomruimte van de ketel verbinden met de werktuigen en met de eventuele andere ketels;
- Twee waterpeiltoestellen om de hoogte van het waterpeil in de ketel van buitenaf zichtbaar te maken;
- Een manometer waarmee men kan vaststellen, hoeveel de druk in de ketel hoger is dan de atmosferische druk en of men bij het stoken de toevoer van de brandstof moet doen toe- of afnemen;
- Twee voedingswater afsluiterklepkasten waarmee wordt voorkomen dat bij een breuk in de voedingswaterleiding de ketel wordt leeggeblazen. De afsluiters dienen ook om het voedingswater naar wens te verdelen over de verschillende ketels;
- De nodige spuiafsluiters om de ketel te kunnen ledigen en om de in de ketel bij het ontharden gevormde zouten en slib af te kunnen voeren.

4.11.2 Materialen voor appendages

Voor de huizen en de potten van appendages gebruikt men brons, gietijzer, gietstaal, en smeedstaal. Het zogenoemde binnenwerk van deze onderdelen, zoals zittingen, kleppen en klepstangen worden van niet roestende materialen vervaardigd, zoals brons, monelmetaal, nibrometaal en roestvaststaal. Voor de sluitvlakken van kleppen maakt men bij hoge stoomdrukken gebruik van harde metalen zoals stieliet.

Het gebruik van brons (koper met tin), messing (koper met zink) en (rood)koper mag bij stoominstallaties niet worden toegepast wanneer de bedrijfstemperatuur van de appendage hoger is dan 214 °C.

Voor het vervaardigen van appendages is van belang:

Gietbaarheid

De gietbaarheid bepaalt in grote mate de uiteindelijke kwaliteit van het product. Het product moet glad en vrij zijn van gietgallen en slechts weinig krimpspanningen in zich hebben. Ook moet het materiaal tijdens het stollen homogeen van samenstelling blijven.

Hardheid

De hardheid is van belang bij het bewerken van het product en de slijtage tijdens gebruik. De hardheid van legeringen is meestal groter dan die van de afzonderlijke metalen waaruit de legering is samengesteld. Men ziet dat bij koper en tin, koper en nikkel en bij ijzer en koolstof.;

Treksterkte

De treksterkte neemt door legeren meestal toe. Brons, een legering van koper en tin, is qua treksterkte groter dan die van koper of tin afzonderlijk.

Weerstand tegen aantasting

Hiermee wordt bedoeld de weerstand tegen aantasting door water, dat al dan niet zouten of zuren bevat. Deze weerstand wordt door legeren van bepaalde metalen meestal groter.

Koper

Koper vaak aangeduid met roodkoper heeft een treksterkte tussen de 20 tot 25 kg/mm² en een rek van 50 %. Het is zeer zacht waardoor het zich gemakkelijk laat bewerken, maar weinig elastisch. Het is goed bestand tegen water, maar wordt aangetast door zuren. Koper is in gesmolten toestand dik vloeibaar in welke toestand veel gassen zijn opgelost die bij het stollen weer vrijkomen en gietgallen veroorzaken. Om deze redenen is koper niet geschikt voor gietwerk. Desalniettemin werden stoomleidingen van niet al te grote diameter en voedingswaterleidingen voor lage druk van roodkoper gemaakt.

Brons

Brons is een legering van ca 90% koper en 10% tin met een treksterkte van ca 30 kg/mm² en een rek van ongeveer 20%. Brons is goed gietbaar en gemakkelijk bewerkbaar en tevens uitstekend bestand tegen corrosie. De hardheid, ongeveer 90 graden Brinell, neemt toe met het tingehalte. Door de toevoeging van fosfortin wordt brons dun vloeibaar. Ook belet deze toevoeging de vorming van ongewenste oxiden tijdens het gieten. Tot een temperatuur van 214 °C was en is brons nog steeds een veel toegepast materiaal bij stoominstallaties.

Monelmetaal

Monelmetaal is een in de natuur gevonden nikkel-koperlegering die ook geschikt is voor temperaturen hoger dan 214 °C, namelijk tot ca. 400 °C. Het bevat 67% nikkel, ca 29% koper en enige procenten andere stoffen. Het is met haar treksterkte van ca. 65 kg/mm² en een rek van 30% een bijzonder sterk materiaal. Voor sluitvlakken in appendages is de grote hardheid, ongeveer 60° Brinell, van dit materiaal van belang. Bovendien is dit materiaal goed bestand tegen intering. Monelmetaal is goed gietbaar en met moderne verspaningsgereedschappen goed bewerkbaar.

Nibrometaal

Nibrometaal is in tegenstelling tot monelmetaal een kunstmatige nikkel-koperlegering. De eigenschappen vertonen grote overeenkomst met die van monelmetaal. Deze legering wordt in verschillende samenstellingen gemaakt en is daardoor in verschillende hardheden, van 150 – 320° Brinell, verkrijgbaar.

Stelliet

Voor zittingen van kleppen voor hoge druk en hoge temperatuur past men tegenwoordig een opgelaste rand hardmetaal toe. Een voorbeeld hiervan is stelliet, dat bestaat uit 60% kobalt, 30% chroom en 10% wolfram. Dit materiaal is na het oplassen alleen met zeer harde slijpstenen te bewerken. Ondanks de grote hardheid, ca. 500° Brinell, is het materiaal vrij taai.

Gietijzer

Gietijzer bevat ca. 3,5% koolstof, heeft een giettemperatuur van 1250 °C en is dun vloeibaar. Het laat zich gemakkelijk gieten maar krimpt wel na het stollen. Het heeft in gelegeerde samenstellingen een grote trekvastheid, 20 – 30 kg/mm², maar heeft praktisch geen rek en is zodoende slecht bestand tegen schokken. Hierbij moet men denken aan waterslag in stoomleidingen en aan de schokken in de voeding waterleiding veroorzaakt door de plunjer- of zuiger- ketelvoedingwaterpompen. Gietijzer gaat roesten op bewerkte vlakken en verandert in aanraking met water ook op niet bewerkte vlakken zodanig van structuur dat het zelfs op grote diepte haar sterkte geheel verliest. Door toevoeging van legeringsbestanddelen kan men gietijzer bereiden dat een grote treksterkte heeft (40 – 50 kg/mm²) en een grote rek (5 – 10 %). Gietijzer is vanwege de hiervoor genoemde matige eigenschappen in de volgende gevallen verboden om te worden toegepast.

- In alle gevallen:
 - Voor ketels waarvoor een vergunning nodig is.
 - Voor huizen van kranen en voor delen van pijpleidingen, die men niet tot de korte verbindingstukken rekent.
 - Voor vaten, die als een deel van de stoomleiding zijn te beschouwen, zoals stoomfilters.
- Indien de werkdruk hoger is dan 3 kg/cm² overdruk:
 - Voor tuiten, bochtstukken en andere buisvormige verbindingstukken aan de ketel.
 - Voor huizen van afsluiters en kleppen, die de waterruimte van de ketel afsluiten.
- Indien de werkdruk hoger is dan 3 kg/cm² en tevens de som van de doorlaat in mm en zesmaal de werkdruk in kg/cm² groter is dan 150:
 - Voor huizen van kleppen en afsluiters op de stoomruimte.
 - Voor korte bocht- en verbindingstukken, met dien verstande dat dit verbod niet geldt voor onderdelen waardoor water wordt gevoerd met een temperatuur lager dan 100°C

Gietstaal

Het voor appendages gebruikte gietstaal heeft een grotere treksterkte (40 - 60 kg/cm²) en in tegenstelling tot gietijzer, een grotere rek (ca. 14 – 20 %). Daarom is het ook geschikt voor huizen van appendages die bestemd zijn voor een hogere druk. Dit staal bevat 0,15 – 0,25% koolstof, tenminste 0,5% mangaan en 0,2% silicium, maar mag maximaal 0,05 fosfor en 0,06 zwavel bevatten. Voor toepassing bij temperaturen boven de 350°C wordt het gelegeerd met 0,5 – 1% molybdeen, om het kruipen dat gewoon gietstaal bij die temperatuur begint te vertonen tegen te gaan.

Smeedstaal

Smeedstaal, al dan niet gelegeerd om corrosie en kruipen te voorkomen, wordt veel gebruikt voor appendages met kleine afmetingen, die bestemd zijn voor zeer hoge drukken. Het staal wordt dan in de vereiste vorm gebracht door persen of smeden en daarna uitwendig afgewerkt door boren, draaien, kotten of frezen. Ook worden appendages uit meerdere losse onderdelen opgebouwd die vervolgens door middel van lassen worden samengesteld.

4.11.3 Veiligheidstoestellen

Het eenvoudigste veiligheidstoestel is een gietijzeren of stalen pot voorzien van een bronzen zitting waarop een klep met een smalle platte rand rust, direct of indirect aangedrukt door een gewicht.

Het is moeilijk te zeggen welke voorschriften in het kader van de wetgeving voor stoominstallaties het belangrijkst zijn, maar zeker is dat de meeste moeilijkheden zich voordoen bij de keuze van de veiligheids- toestellen. Veel gestelde vragen zijn: hoeveel kleppen moet een toestel hebben en welke diameter, moeten de kleppen hebben en moeten deze veer- of gewichtsbelast zijn. In deze paragraaf zal een zo duidelijk mogelijke uiteenzetting worden gegeven met betrekking tot dit onderwerp.

Veiligheidstoestellen, in het algemeen spraakgebruik meestal als veiligheidskleppen aangeduid, dienen om stoom uit de ketel af te voeren voor de volgende gevallen:

- Als de druk tijdens het bedrijf, bijvoorbeeld als er pomp plotseling stil valt, stijgt boven de toegestane werkdruk.
- Als men bij ernstige vervormingen of lekkage aan de ketel de druk snel wenst te verlagen, om ongevallen te voorkomen.
- Als men in korte tijd de ketel toegankelijk wil maken voor inspectie en reiniging.

Behalve de veiligheidsklep op de stoomruimte plaatst men ook een veiligheidsklep op de afvoerszijde van de oververhitter. Deze opent bij een lagere druk dan de veiligheidsklep op de ketel zodat de ontwijkende stoom eerst de oververhitter passeert. Zo wordt voorkomen dat de oververhitter tijdens het afblazen niet wordt gekoeld en een te hoge temperatuur aanneemt.

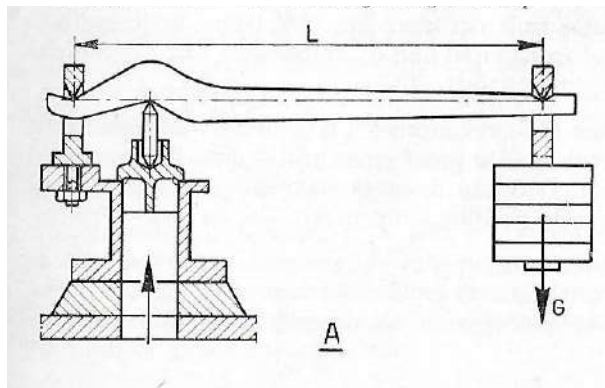
In de eenvoudigste vorm bestaat een veiligheid uit een opening die voorzien is van een klepzitting, die wordt afgesloten door een uitwendig aangebrachte klep. Op die klep moet een dusdanige kracht werken, dat hij tot het bereiken van de werkdruk gesloten blijft. Deze kracht wordt uitgeoefend door een gewicht dat direct op de klep (directe gewichtsbelasting) dan wel via een hefboom (indirecte gewichtsbelasting) werkt. Ook kan de sluitkracht door een gespannen schroefveer op de klepstang werken (directe veerbelasting).

Gewichtsbelasting van veiligheden is verplicht gesteld voor vaste toestellen dat wil zeggen ketels en vaten die onbeweeglijk zijn opgesteld op vaste standplaatsen, zoals bij poldergemalen.

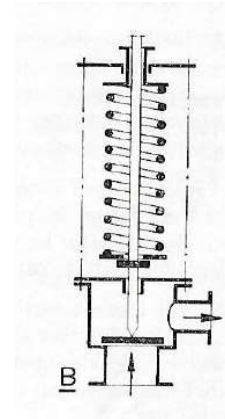
Uitzonderingen hierop zijn:

- Kleppen waarvan de middellijn kleiner dan 25 mm is; deze moeten voorzien zijn van een veerbelasting.
- Als de kracht tegen de onderzijde van de klep minder dan 25 kg of meer dan 500 kg is, mag veerbelasting worden toegepast.

Bij vaartuigen zal men geen door gewichten belaste veiligheden aantreffen omdat bij eventueel slagzij de op de klep uitgeoefende kracht vermindert, de projectie van de hefboom L wordt korter waardoor de veiligheid voortijdig afblaast.



Gewichtbelaste veiligheid



Veerbelaste veiligheid

Algemene bepalingen

Een stoomketel met een verwarmd oppervlak, groter dan 1 m² moet zijn voorzien van tenminste twee veiligheden om er ten alle tijden zeker van te zijn dat voldoende stoom wordt afgevoerd. De middellijn van de klepopening mag niet kleiner zijn dan 25 mm.

De klepopening en de toe- en afvoerleidingen van de veiligheidstoestellen moeten zo ruim zijn bemeten, dat ook bij maximale stoomontwikkeling van de stoomketel en bij gesloten stoomafsluiters de druk niet meer dan 15% boven de toegestane werkdruk kan stijgen.

Bij stoomketels met een verwarmd oppervlak, groter dan 1 m², die uit de hand (dus met steenkolen of hout) worden gestookt en met natuurlijke trek werken, worden de klepopeningen voldoende geacht als de middellijn van elke klep niet kleiner is dan:

$$d = 25 + 6,25 \frac{F}{p + 1} \text{ [mm]} \quad \text{indien } \frac{F}{p + 1} \text{ niet groter is dan } 4$$

$$d = 25 \sqrt{\frac{F}{p + 1}} \text{ [mm]} \quad \text{indien } \frac{F}{p + 1} \text{ groter is dan } 4$$

Hierin is F het verwarmd oppervlak in m² en p de toegestane werkdruk uitgedrukt in kg/cm².

Voorbeeld 1

Bepaal de klepdiameter van de veiligheid van een Lancashire ketel met een V.O. van 100 m² en een werkdruk van 10 kg/cm².

Eerst moet nagegaan worden welke formule van toepassing is.

$$\frac{F}{p + 1} = \frac{100}{10 + 1} = 9,09$$

Het resultaat is groter dan 4 zodat de klepdiameter als volg berekend wordt:

$$d = 25 \sqrt{\frac{F}{p+1}} = 25 \sqrt{\frac{100}{10+1}} = 75 \text{ [mm]}$$

Deze stoomketel moet dus van een veiligheid met twee kleppen worden voorzien, elk met een diameter van tenminste 75 mm.

Voorbeeld 2

Bepaal de klepdiameter van de veiligheid van een niet nader te noemen type ketel met een V.O. van 40 m² en een werkdruk van 10 kg/cm².

Eerst moet nagegaan worden welk formule van toepassing is.

$$\frac{F}{p+1} = \frac{40}{10+1} = 3,6$$

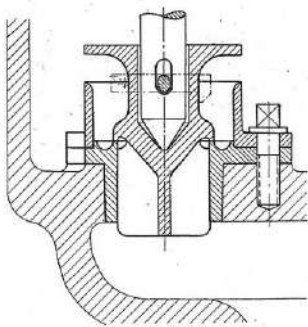
Het resultaat is kleiner dan 4 zodat de klepdiameter als volgt berekend wordt:

$$d = 25 + 6,25 \frac{F}{p+1} = 25 + 6,25 \frac{40}{10+1} = 47,72 \text{ [mm]}$$

Deze stoomketel moet dus van een veiligheid met twee kleppen worden voorzien, elk met een diameter van 50 mm.

Klepconstructie

De klep van de direct belaste veiligheid op de volgende bladzijde zal bij het overschrijden van de toegestane druk de stoom stootsgewijs aflaten omdat bij een geringe drukdaling de klep door het gewicht weer op de zitting wordt gedrukt. Dit heeft niet alleen een hoogst onaangenaam geluid tot gevolg maar veroorzaakt bovendien schokgolven in de ketelconstructie en het daarmee verbonden leidingwerk. Daarom wordt de klep voorzien van een schotel en is de zitting verdiept aangebracht.



De ontwijkende stoom zal de klep meenemen en tegen de borst van het er boven geplaatste deksel drukken en dus vol openen; er zal dan de maximale hoeveelheid stoom ontwijken. De klep sluit niet voordat de keteldruk voldoende ver onder de toegestane keteldruk is gedaald. Het verschil tussen afblaasdruk en sluitdruk bedraagt bij kleppen groter dan 32 mm 4 à 5% en bij kleppen kleiner dan 32 mm 8 à 10%. Bij een aantal veiligheidstoestellen is dit verschil in te stellen met behulp van een ring om de zitting van de klep. Een en ander zoals in de hiernaast afgebeelde figuur is aangegeven.

Hooglichtende veiligheid

We noemen een dergelijke klep een hoog lichtende veiligheidsklep. Het hinderlijke met korte stoten stoom aflaten wordt hiermee voorkomen. Een tweede voordeel van een hoog lichtende veiligheidsklep is, omdat ze meer stoom per tijdseenheid kunnen afvoeren, ze kleiner kunnen zijn.

Afvoer

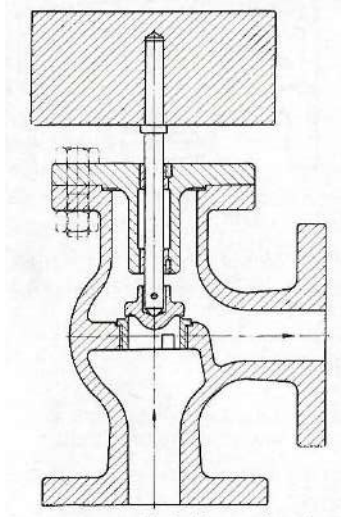
Hooglichtende veiligheden moet zijn voorzien van een doelmatige afvoerpijp, welke in de buitenlucht uitmondt. De afvoerpijp dient om te voorkomen, dat personen, die zich in de nabijheid van de veiligheid bevinden, door de grote hoeveelheid stoom welke bij het openen van de klep plotseling ontwijkt, brandwonden zouden oplopen. Een klein ketelhuis zou, indien het veiligheidstoestel niet was voorzien van een afvoerpijp, in korte tijd geheel vol met stoom staan. Het spreekt voor zich dat de afvoerpijp op een voor personen veilige plek dient uit te monden. Meestal wordt de pijp door het dak van het ketelhuis gevoerd. De afvoer moet voldoende ruim bemeten zijn zodat geen drukopbouw van betekenis optreedt

Gewichtbelaste veiligheden

Hiervoor is uiteengezet wanneer gewichtbelasting moet worden toegepast en wat de minimale klepdiameter van de desbetreffende veiligheid moet zijn. Hierna zal iets meer over deze toestellen worden gezegd, speciaal over de constructie van hefboomen en gewichten. De gewichten kunnen namelijk op twee manieren op de klepsteel van het toestel worden bevestigd.

Directe belasting

Van de direct belaste veiligheid geeft de figuur hiernaast een voorbeeld. Hier drukt het gewicht direct op de klep. Dit houdt in dat de druk niet te hoog mag zijn anders wordt het gewicht te zwaar. In het

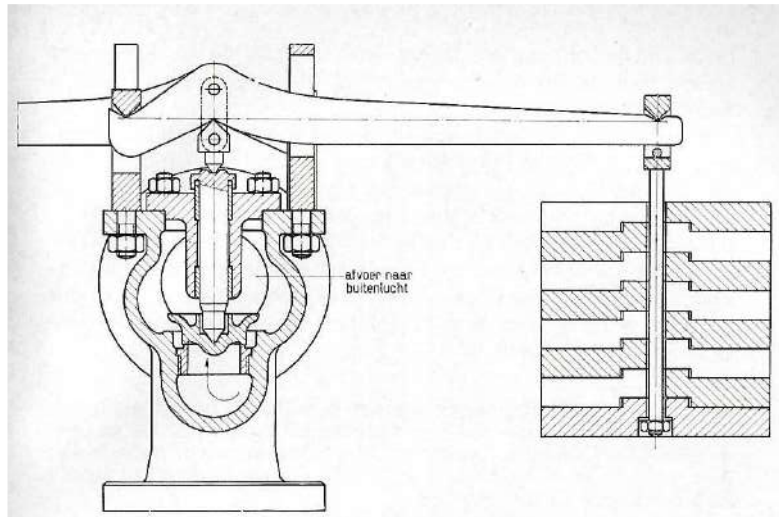


algemeen worden om die reden boven een werkdruk van 0,5 kg/cm² geen direct belaste kleppen toegepast. Op stoomketels van gemalen zal men dergelijke veiligheden dan ook niet aantreffen. Hierbij wordt aangetekend dat, hier niet getekend, de gewichten bestaan uit meerdere goed hanteerbare ronde op elkaar gestapelde gietijzeren schijven.

Direct en gewicht belaste veiligheid

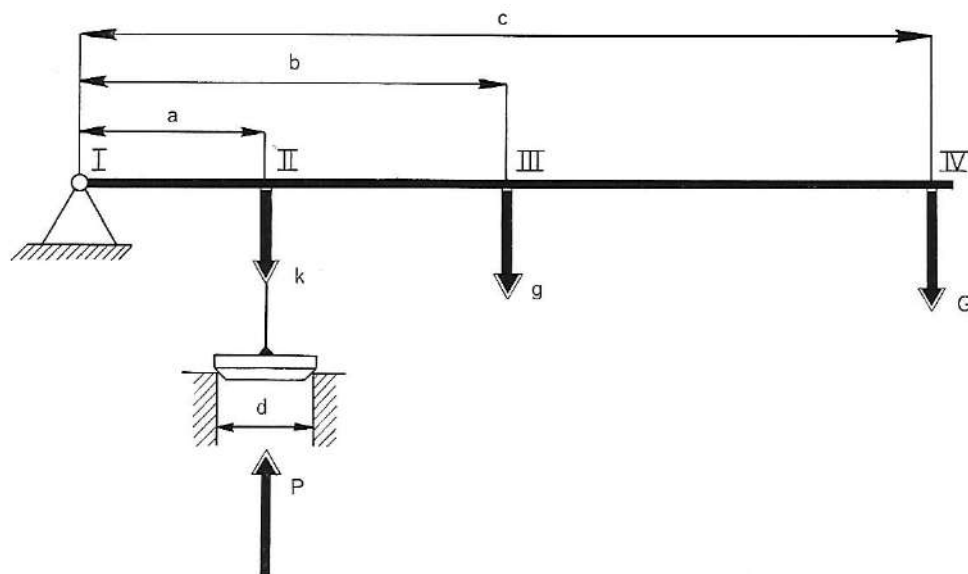
Indirecte belasting

Door gebruik te maken van een voldoende lange hefboom kan het gewicht beperkt worden en verkrijgt men eenvoudige en zeer betrouwbare veiligheidstoestellen die toepasbaar zijn op stoomketels met niet al te hoge druk



Indirect en gewicht belaste veiligheid

De lengten van de hefboomen zijn niet wettelijk vastgelegd en zijn een kwestie van fabricaat. Gezocht wordt naar een gunstige verhouding tussen de lengte van de hefboom en de gewichten. Het is nodig hiervoor de hefboom te tekenen en de optredende krachten aan te geven. Een en ander zoals hieronder schematisch is weergegeven.



Klephefboomlengtes, krachten en gewichten

Met behulp van de momentenstelling en aan de hand van de keteldruk, de klepdiameter van de veiligheid en de gegevens van de hefboom, is het gewicht G te bepalen dat aan de hefboom moet hangen.

$$P \cdot a = G \cdot c + g \cdot b + k \cdot a \text{ [kgm]}$$

Of anders geschreven en betrokken op het gewicht G:

$$G = \frac{P \cdot a - g \cdot b - k \cdot a}{c} [\text{kg}]$$

De kracht P op de klep met een keteldruk p is:

$$P = \frac{\pi}{4} (d + 0,2)^2 \cdot p [\text{kg}]$$

Zodat het gewicht G berekend kan worden met:

$$G = \frac{\frac{\pi}{4} (d + 0,2)^2 \cdot p \cdot a - g \cdot b - k \cdot a}{c} [\text{kg}]$$

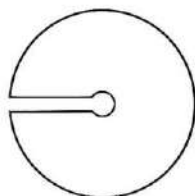
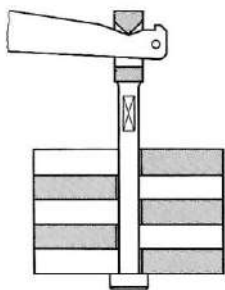
Voorbeeldberekening van het gewicht van een veiligheid.

Gegevens

Gewicht klep en klepsteel	1.1 kg	Klepdoorlaat	65 mm
Gewicht hefboomarm	0,8 kg	Werkdruk	10 kg/cm ²
Lengte krachtaarm c	850 mm		
Lengte lastarm a	85 mm		
Lengte kracht arm tot zwaarte punt b	400 mm		

$$G = \frac{\frac{\pi}{4} (6,5 + 0,2)^2 \cdot 10 \cdot 85 - 0,8 \cdot 400 - 1,1 \cdot 85}{850} = 34,7 [\text{kg}]$$

Een uit een stuk bestaand gewicht, waarmee de veiligheidsklep wordt belast, of elk van de schijven waaruit een gewicht is samengesteld moet massief zijn en mag niet meer wegen dan 25 kg. Dat de schijven massief moeten zijn is om te voorkomen dat deze bewust dan wel onbewust worden verzwaard, bijvoorbeeld met water, en pas bij een hogere druk afblazen. In het voorgaande



voorbeeld zullen voor de gewichtsbelasting minstens twee schijven worden gebruikt. De schijven moeten van dezelfde materiaalsoort zijn gemaakt en dezelfde diameter hebben, zodat ze alleen in dikte verschillen. Zij moeten stuksgewijs van de afhangsteun afneembaar zijn, maar dat mag niet mogelijk zijn door ze uitsluitend zijdelings te verschuiven

Schijfgewichten

De hefboom moet zodanig zijn ingericht, dat het gewicht aan de hefboom niet kan verschuiven. Een en ander op de wijze zoals in de hierboven afgebeelde figuur is aangegeven.

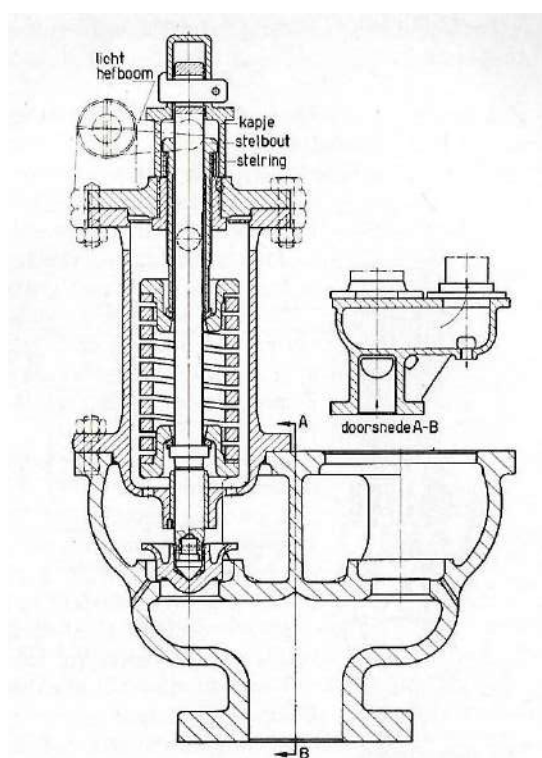
Veerbelaste veiligheden

Hiervoor is aangegeven dat vast opgestelde stoomketels van een gewichtbelaste veiligheid moeten zijn voorzien. Uitzonderingen hierop zijn veiligheden waarvan de diameter van de klep kleiner is dan 25 mm of als de druk tegen de onderzijde van de klep minder dan 25 of meer dan 500 kg is. In die gevallen mag een veerbelaste veiligheid worden toegepast.

Een voorbeeld van de direct en door een veer belaste veiligheid wordt met de hier onder afgebeelde figuur gegeven. Hier drukt de veer direct op de klep. Bij veer- belasting moet de constructie zodanig zijn dat als de veer breekt, de klep niet uit de geleiding mag worden gedrukt en er dientengevolge

een overmatig grote doortocht ontstaat. Dit wordt bereikt door de klep naar boven toe een aanslag te geven. De afstand tussen de bovenzijde van de klep en de aanslag moet dus kleiner zijn dan de lengte van de klepgeleiding. Voorts moet er een mogelijkheid zijn de klep te lichten.

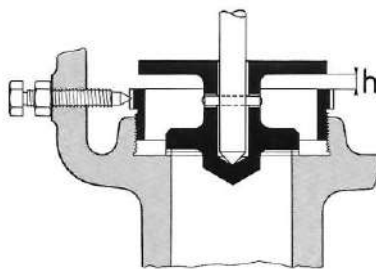
De juiste veerspanning en daarvan afgeleid de afblaas- druk moet kunnen worden ingesteld door een van schroefdraad voorziene stelbout, die op de bovenste veerschotel drukt. Nadat de klep met de juiste veerspanning is afgesteld wordt onder de boutkop een uit twee helften bestaande stelring, de zogenoemde gouvernementsring, geplaatst. Deze ring moet het verder spannen van de veer en dus het afblazen bij een hogere dan de toegestane druk voorkomen.



Veerbelaste veiligheid

De twee helften van de stelring worden verzegeld om te voorkomen dat niet geautoriseerde personen de afstelling veranderen. Het verzegelen gebeurde vroeger door de ambtenaar van het stoomwezen. Sinds 1999 vallen stoomketels onder de Richtlijn Drukapparatuur (Pressure Equipment Directive – afgekort PED), en is het stoomwezen als zodanig opgeheven. De bevoegdheden zijn ondergebracht bij onafhankelijke keuringsinstanties de zogenoemde Notified Body's (NoBo's).

Indien de hoeveelheid damp welke een veiligheidsklep kan afvoeren regelbaar is dan moet het instellen hiervan met een zodanige inrichting geschieden dat deze in de vereiste stand deugdelijk kan worden vastgezet. Daartoe bevindt zich, zoals in de figuur hier naast wordt aangegeven onder



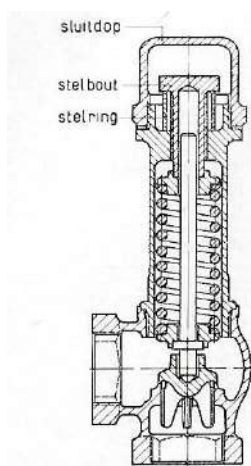
de klepschotel een stelring waarmee het afblaas traject kan worden beïnvloed. De afstand h is bepalend voor de sluitdruk. Hoe kleiner h is, des te later sluit de klep, maar hoe hoger de klep licht; er moet dus met de stelring een stand worden gezocht, waarbij de klep zo hoog mogelijk licht, en na voldoende afblazen zo snel mogelijk sluit. Maakt men h (te) groot, dan sluit de klep wel snel, maar licht hij maar weinig.

Detail stelring

Zou men de stelring helemaal naar beneden draaien dan blijft er van het hoger lichten niets over en wordt er onvoldoende stoom afgeblazen. Dit is de reden dat de stelring, overigens ook bij gewichtbelaste kleppen, vastgezet moet kunnen worden.

Veiligheidskleppen, welke zodanig zijn geplaatst, dat zij voor diegene die het stoom- of damptoestel moet bedienen niet gemakkelijk zijn te bereiken, moeten van een inrichting zijn voorzien die het mogelijk maakt vanaf een gemakkelijk bereikbare plaats de kleppen te lichten. Ook dit voorschrift geldt voor gewichtbelaste veiligheden.

Nabij veiligheidskleppen met veerbelasting moet een aansluiting aanwezig zijn, waarop een controle manometer aangesloten kan worden. Dit dient om bij het afstellen van de veiligheid de afblaas- en sluitdruk af te lezen. De aansluiting wordt op dezelfde wijze gerealiseerd als bij de manometer in de buurt van het stookfront van de ketel.



De figuur hiernaast geeft een eenvoudig geconstrueerde veiligheid weer met een klepdiameter kleiner dan 25 mm. Deze veerbelaste veiligheid is slechts toegestaan voor ketels met een zeer kleine capaciteit, dus een klein VO en of een lage druk. Deze veiligheid heeft geen hefinrichting waarmee de werking kan worden geactiveerd.

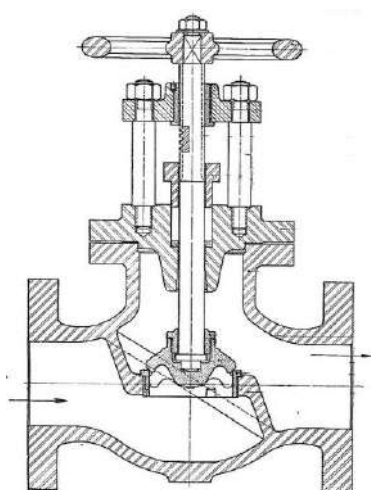
Kleine veerbelaste veiligheid

4.11.4 Hoofdstoom en hulpstoomafsluiters

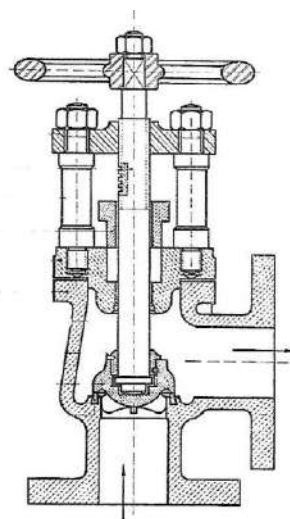
Ten behoeve van bediening, onderhoud en een veilig gebruik moet elke pijpleiding van een ketelinstallatie zo dicht mogelijk bij de ketel van een afsluiter zijn voorzien. Als afsluiters aan stoomketels mogen zowel klep- als schuifafsluiters en onder bepaalde en nader aangegeven voorwaarden ook kranen worden gebruikt. Voor de hoofd- en hulpstoomafsluiters worden meestal klepafsluiters toegepast.

Klepafsluiters

Wenst men dat de toe- en afvoer in elkaars verlengde liggen, dan gebruikt men rechte afsluiters zoals hieronder is afgebeeld. Op de ketel waar de toevoer en de afvoer meestal een rechte hoek met elkaar maken, plaatst men een haakse afsluiter. Een haakse afsluiter heeft het voordeel dat de stromingsweerstand en daarmee het drukverlies 40-50 % minder is.



Rechte stoomafsluiter

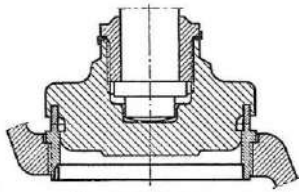


Haakse stoomafsluiter

De zitting wordt bij bronzen afsluiters dikwijls gevormd door de rand van de klepopening. In gietijzeren afsluiters bestaat de zitting veelal uit een cilindrische bus van brons en in gietstalen afsluiters gebruikt men een nikkel legering of hardmetaal bijvoorbeeld stelliet. Ook ringen van nikkel of nikkelbrons, met een rechthoekige doorsnede, geperst in een trapezium vormige groef, zoals uitgevoerd bij de hierboven afgebeelde haakse stoomafsluiter, komen vrij veel voor. Hoewel de uitzettingcoëfficiënten van nikkel en gietstaal nagenoeg even groot zijn, scheuren deze ringen toch na enige tijd als het huis door kruip wel in grootte toeneemt en de ring niet.

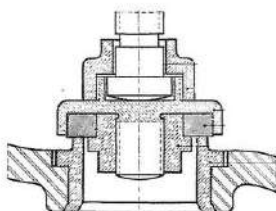
De kleppen van de afsluiters waren vroeger altijd van brons, hadden een kegelvormig sluitvlak en aan de onderzijde, zoals bij de hierboven afgebeelde rechte stoomafsluiter, vleugels voor geleiding. Deze vleugels vormden een grote stromingsweerstand en zijn daarom bij later ontwikkelde afsluiters eerst korter gemaakt en later zelfs geheel weggelaten. Een klep met een kegelvormig sluitvlak en zonder geleiding zou, indien hij zonder borst en een wartel beweeglijk aan de klepstang is bevestigd verkeerd in de klepopening kunnen worden gedrukt en daardoor niet goed sluiten. Van kleppen zonder vleugels zijn daarom de sluitvlakken niet kegelvormig maar vlak. Voor lage drukken

bestond de klep en het sluitvlak uit een stuk of werd het sluitvlak gevormd door een afzonderlijk ring. Deze ring maakt men van koper, opgevuld met pakking materiaal (vroeger asbest) dat werd opgesloten, zoals op de afbeelding hiernaast is te zien, door een moer. Zulke veerkrachtige ringen voldoen heel goed terwijl het vervangen van de dichtingsring minder tijd kost dan het opschuren van de klepzitting. Deze uitvoering wordt Jenkinsklep genoemd



Jenkinsklep (zachte zitting)

Voor hoge drukken gebruikt men soortgelijke ringen, maar dan van nikkel opgevuld met pakking materiaal. Dan wel kleppen van brons of staal met een rand van nikkel of hard nikkelbrons, die er in geperst is. Teneinde er zeker van te zijn dat de sluitvlakken van de klep precies op elkaar komen,



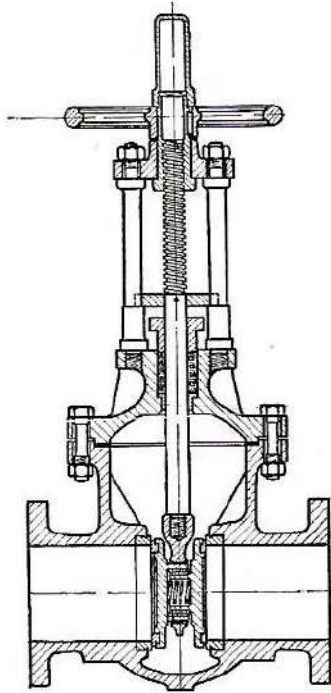
is de klep voorzien van een zogenoemde zoeker die in de klepopening past. Hij sluit bij dalende klep bovendien al met het cilindrische vlak de opening af als er tussen de eigenlijke sluitvlakken nog vrij veel ruimte is. Het beschadigen van die sluitvlakken door het "snijden" van de stoom wordt zo voorkomen.

Jenkinsklep (harde zitting)

De kleppen van de stoomafsluiters worden gelicht door de klepstang met het handwiel omhoog te draaien in de draadbus van het brugstuk. Dit brugstuk is met twee kolombouten bovenop het deksel geplaatst. De schroefdraad is zodoende onttrokken aan de schadelijke inwerking van de stoom. Een nadeel van deze zogenoemde buitendraad is dat de drukpunten van de klepstang in het brugstuk en de klep verder uit elkaar komen te liggen waardoor uitzetting en de daardoor ontwikkelde sluitkrachten een grotere rol gaan te spelen. Van een stalen afsluiter die in koude toestand wordt dichtgezet zal bij verwarming de bronzen klepstang meer uitzetten dan de kolombouten van de afsluiter. De klep zal als gevolg hiervan met grote kracht op de zitting worden gedrukt en moeilijker zijn te openen. De klepstang is voorzien van rechtse rechthoekige schroefdraad omdat deze minder wrijving veroorzaakt. Om de stoom afvoer te sluiten moet men het handwiel rechtsom draaien en visa versa. De bovenkant van de wartel waarmee de klep aan de stang is bevestigd is evenals de onderkant van het deksel onder de pakkingbus van een schuine kant voorzien. Door de afsluiter helemaal open te draaien kan de pakkingkamer worden afgesloten en eventueel onder druk opnieuw worden verpakt. Ook biedt het de mogelijkheid de pakkingkamer bij lekkage af te sluiten. Gebruikelijk is een afsluiter vanuit de uiterste geopende stand een kwartslag dicht te draaien. De klep kan dan niet verkleven aan het deksel en daardoor bij het dichtdraaien de schijn wekken dat de afsluiter al gesloten is.

Schuifafsluiters

In de figuur hieronder is een zogenoemde parallelschuifafsluiter getekend met spiraalveer belaste schuiven. Het probleem dat de afdichting klemt als gevolg van het verschil in uitzetting van de verschillende materialen is hier niet aanwezig. Verder is de stromingsweerstand, omdat de volle doortocht wordt vrijgemaakt, bij dit type afsluiter belangrijk minder dan bij een rechte of haakse



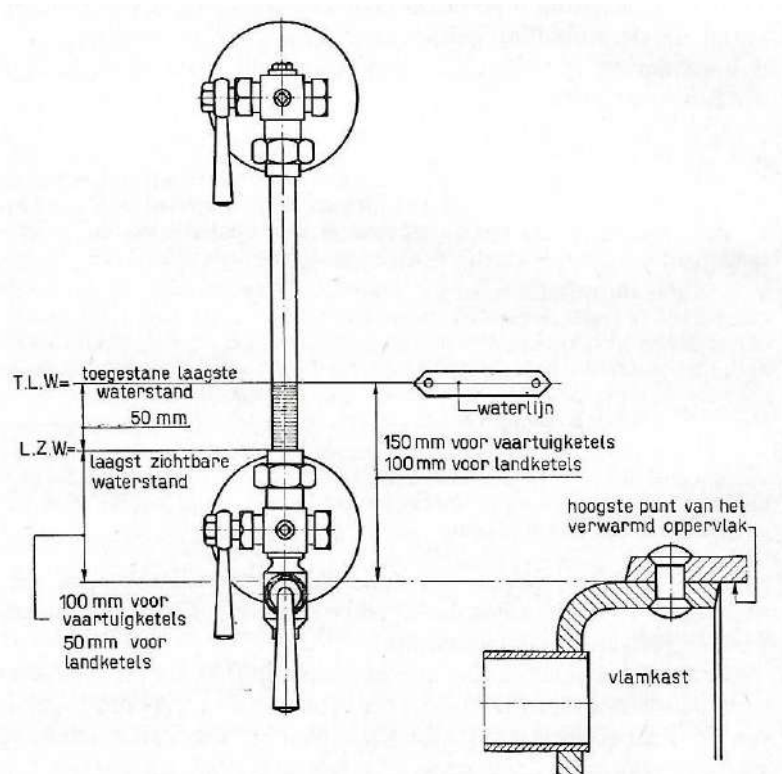
klepafsluiter. Voorts is een schuifafsluiter, in tegenstelling tot een klepafsluiter, gemakkelijk te openen en te sluiten. De afdichting geschiedt door twee schuifhelften, die door een drukveer (spiraalveer) uit elkaar gehouden worden. Door de stoomdruk wordt de ene schuifhelft op de zitting gedrukt, zodat de stoomdruk zelf voor de afdichting zorgt. De schuif en de zittingringen zijn veelal van het harde Nibro metaal gemaakt en zuiver glad bewerkt. De zittingen zijn hier in het huis gerold. De spindel is van roestvast chroomnikkelstaal gemaakt en wordt door de moer in het handwiel omhoog geschroefd. Sommige fabrikanten voorzien bij grote afsluiters de moer van kogellagers zodat er nog minder energie nodig is voor het openen en sluiten. Ook wordt vaak gebruik gemaakt van een omloopleiding. Met behulp van een afsluiter in deze relatief kleine leiding wordt de druk voor en achter de schuif vereffend, verdwijnt het drukverschil op de schuif en kan deze gemakkelijker worden geopend. Deze omloopleiding biedt tevens de mogelijkheid om de afvoerleiding en de daaraan gekoppelde installaties voor te warmen voordat ze daadwerkelijk in bedrijf worden gesteld.

Schuifafsluiter

4.11.5 Peilglazen en peiltoestellen

Vast opgestelde stoomketels met een VO groter dan 5 m² moeten zijn voorzien van twee peiltoestellen, waarvan er één een peilglas moet zijn. We zien hier dat het stoombesluit verschil maakt tussen een peilglas en een peiltoestel en wel om reden dat zij een peiltoestel minder betrouwbaar vindt. Beide geven het waterpeil in de stoomketel weer.

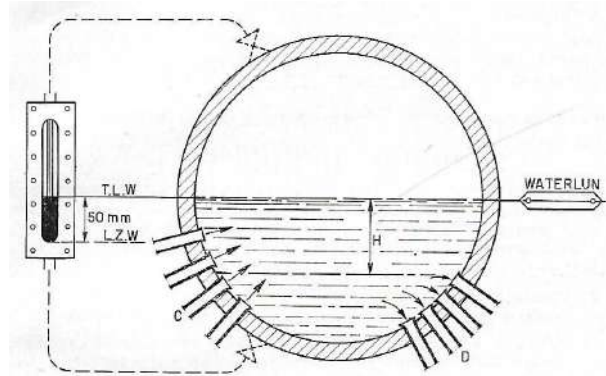
Er bestaat kans dat gedurende het bedrijf een peilglas springt, of dat het toestel niet de juiste stand van het ketelwater aanwijst. Om tijdens het inzetten van een nieuw glas, of tijdens het opsporen van de oorzaak voor een miswijzing, de waterstand toch te kunnen waarnemen zijn er twee peiltoestellen voorgeschreven. Bij gebruik van twee peilglazen kan men, als aan de juiste aanwijzing wordt getwijfeld, de stand en de beweeglijkheid met elkaar vergelijken.



Plaats peiltoestel op de keteldrum (Schotte ketel)

Peilglazen moeten zo geplaatst zijn, dat de laagst zichtbare waterstand (L.Z.W.) 50 mm beneden de laagst toegestane waterstand (L.T.W.) ligt. Nabij elk der peilglazen moet op de ketel een koperen strook, de zogenoemde waterlijn, zijn aangebracht. Deze waterlijn is gelijk aan de laagst toegestane waterstand (LTW) en ligt voor vuurgangketels 100 mm boven het hoogste punt van het verwarmde oppervlak. Bij vuurgangketels is dit de bovenkant van de vuurgang en bij Schotte ketels de bovenkant van de vlamkast.

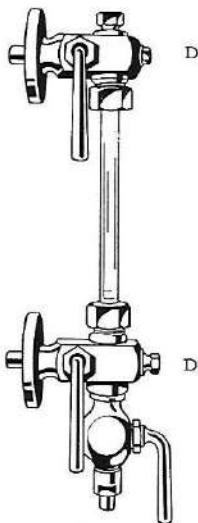
Bij waterpijpketels wordt het toegestane waterpeil vastgesteld op een hoogte H die zekerheid geeft van voldoende circulatie en dus koeling van de pijpen. Hiertoe zijn, zoals in de figuur op de volgende bladzijde is aangegeven, de plaats van de valpijpen bepalend.



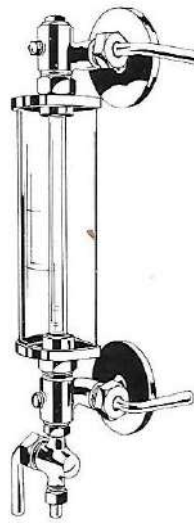
Plaats peiltoestel op de keteldrum (waterpijpketel)

Peilglazen

De werking van een peilglas berust op het beginsel van de communicerende vaten. Een peilglas bestaat in principe uit een boven- en een ondermontuur met daar tussen een cilindrische glazen buis , of bij hogere stoom drukken een in een houder geklemde vlakke glasstrip. Peilglazen zijn in diverse uitvoeringen in de handel. In de onderstaande figuren zijn de meest toegepaste uitvoeringen weergegeven.



Peilglas met cilindrisch glas



Cilindrisch peilglas met beschermglas



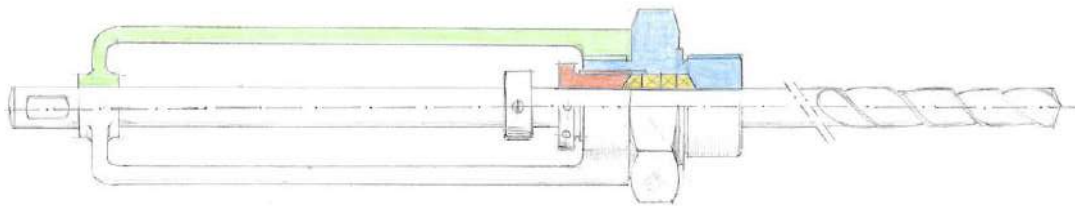
Peilglas met vlak glas

Het glas staat aan de onderzijde met de waterruimte en aan de bovenzijde in verbinding met de stoomruimte van de ketel. De meestal uit brons vervaardigde monturen zijn voorzien van kranen of afsluiters om het peilglas van de ketel af te kunnen sluiten voor onderhoud en controle op de goede werking.

Peilglazen met cilindrisch glas

In de figuur op de volgende bladzijde is een peilglastoestel getekend met kranen en een zelfsluitend watermontuur. Het onderste montuur bevat een waterkraan waarmee de waterruimte kan worden afgesloten

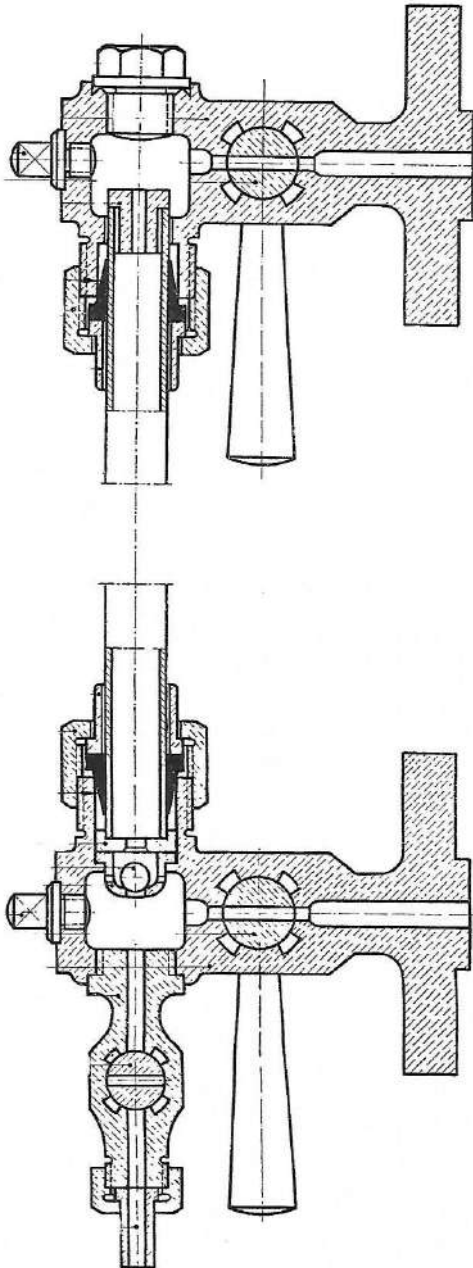
In het onder montuur is een waterkraan geschroefd, die dient om naar verkiezing de verbinding met de stoom- of de waterruimte door te blazen. Aan de doorblaaskraan is een pijpje bevestigd om de stoom of het water naar een veilige plek in de ketelruimte te leiden. Tijdens bedrijf staat de waterkraan open en de doorblaaskraan dicht. Van alle kranen staat dan het handel van de kraan naar beneden om te voorkomen dat de stand van de kraan door trilling veranderen kan. Een gewone tapse plug sluit, vooral na langdurig gebruik, niet goed af en gaat vast zitten. Om deze reden gebruikt men vaak de zogenoemde asbestkranen met een cilindrische plug. In het sluitvlak van het montuur zijn in de lengterichting van het gat zwaluwstaart vormige sleuven aangebracht die na het inzetten van de plug worden opgevuld met daarvoor geschikt pakkingmateriaal met een enigszins smerend vermogen. Het vroeger toegepaste asbestpluksel in combinatie met grafiet mag niet meer worden gebruikt. Door verontreinigingen in de ketel en ketelsteen kunnen de relatief kleine doortochten in de armaturen verstopt raken. Tegenover de stoom- en waterkraan zit daarom een opening die wordt afgesloten door een boutje. Door eerst de stoom- en waterkraan te sluiten en het boutje uit het montuur te nemen kan men met een zogenoemd boornaaldtoestel de verbindingen met de ketel, terwijl deze onder druk staat, doorsteken. In de figuur op de volgende bladzijde is een boornaaldtoestel getekend. Het doorsteken van de verbinding onder druk vereist enige vaardigheid en men dient daarbij voorzichtig te werk te gaan, waarbij moet worden voorkomen dat men blootgesteld wordt aan de hete stoom dan wel dat onderdelen afbreken. De doorblaas- kraan laat men hierbij open staan zodat het los geboorde vuil meteen wordt afgevoerd.



Boornaaldtoestel

De ronde glazen buis rust aan de onderzijde op de grondring die een opstaande rand heeft waar het glas in past. De waterdichte afdichting wordt verkregen met een kegelvormige rubberen ring, ("Woodite-ring") van een speciaal rubber dat bestand is tegen hoge temperaturen. Deze ring heeft een dun uitlopende doorsnede, waarvan het buigzame onderende door het water of de stoom met zoveel kracht tegen het glas wordt gedrukt dat er een goede afdichting ontstaat. De Woodite-ring wordt met een bronzen ring en wartel in het desbetreffende pakkingkamertje gedrukt. De bovenkant van de drukring in het ondermontuur is tevens de laagst zichtbare waterstand (LZW). Als men niet beschikt over Woodite ringen kan men de drukring omdraaien en de pakkingkamer vullen met afdichtingskoord om toch een goede afdichting te verkrijgen.

Bij het eventueel springen van het glas stroom er uit het bovenmontuur stoom en uit het ondermontuur heet water. Van het water dat nu onder atmosferische druk komt, verandert door de druk- vermindering een deel in stoom. Deze hoeveelheid stoom is zelfs vijfmaal zo groot als die uit



het boven montuur komt. De met veel gesis ontsnappende stoom, maar nog meer het rondspattende water, is zeer hinderlijk en gevaarlijk als men de kranen in het boven- en ondermontuur moet sluiten. Daarom voorziet men het ondermontuur meestal van een zelfwerkende afsluiting. Onder de grondring waar het glas op rust is daartoe een korfje aangebracht, waarin een kogeltje ligt. Tijdens bedrijf blijft de kogel liggen, echter als het glas breekt wordt het kogeltje met de waterstroom mee- gesleurd en tegen de opening in de grondring gedrukt en sluit zodoende het ondermontuur af. Het korfje is zo hoog in het montuur geplaatst dat het geen beletsel vormt bij het doorsteken van de kraan.

In het bovenmontuur kan het glas vrij uitzetten. Voor het vernieuwen van het glas is aan de bovenkant van het boven- montuur een opening met een schroefdop aangebracht. In het glas plaatst men soms een bronzen busje waarvan de opening overeenkomt met die van de stoomkraan zodat bij het breken van het glas de uitstromende hoeveelheid stoom wordt beperkt.

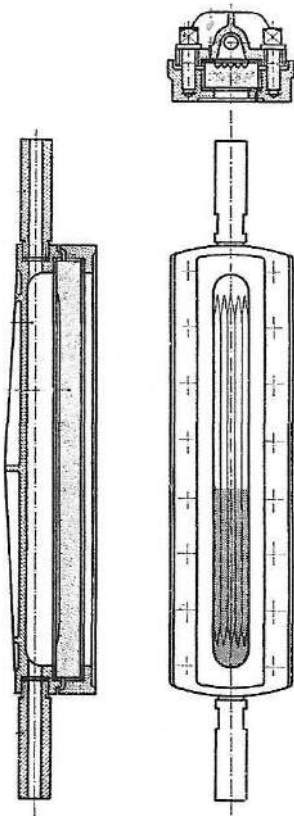
Het springen van het glas levert gevaar op voor het bedienend personeel van de ketel. Om wegvliegen van stukken glas te voorkomen plaatst men om cilindrische peilglazen een U-vormige bescherming van draadglas. De bescherming dient tevens voor het afschermen tegen koude lucht waardoor het glas kan springen.

Rond peilglas met boven- en ondermontuur

Achter het glas brengt men een lat, met daarop schuin rood – wit geverfde strepen, aan. Doordat lichtstralen anders breken in water dan in stoom worden de strepen gespiegeld weergegeven en het is waterpeil duidelijker zichtbaar.

Peilglazen met vlak glas

Het herhaaldelijk voor komen van het springen van cilindrische peilglazen heeft geleid tot de ontwikkeling van het zogenoemde Klinger-peilglas waarbij gebruik wordt gemaakt van een vlakke



glasstrook. Dit type peilglazen is zo samengesteld dat ze op dezelfde monturen als die voor cilindrische glazen gebruikt kunnen worden. Een kast voorzien van twee ingeschoefde pijpstukken komt op dezelfde wijze als een glazen buis in verbinding met de stoom- en de waterruimte en vult zich, afhankelijk van het peil, gedeeltelijk met water. Aan de voorzijde is de kast bedekt met een dikke strook glas. Deze strook rust op een rand pakking en wordt aangedrukt door een deksel met boutjes zodat deze stoom en waterdicht is afgesloten. In de hiernaast afgebeelde figuur is aangegeven hoe een en ander op elkaar aansluit. In het deksel is een brede sleuf gefreesd, waardoorheen het glas zichtbaar is. Het glas is aan de binnenzijde voorzien van scherpkantige groeven in de lengterichting. Waar zich de stoom achter de glasstrook bevindt, wordt het invallende licht weerkaatst, zodat het glas daar helder wit ziet. Waar zich achter de glasstrook water bevindt gaat het licht naar de met opzet zwart geschilderde achterwand van het kastje zodat het glas zich daar zwart vertoont. De afscheiding van wit en zwart geeft de waterstand zeer duidelijk aan. Men noemt deze toestellen "reflex"-peiltoestellen. Bij gebruik van deze toestellen zijn geen peilglasbeschermers nodig.

Vlak peilglas zonder monturen

Miswijzing van peilglazen

De vloeistofspiegels in twee communicerende vaten staan op gelijke hoogte als het soortelijk gewicht, de volumieke massa, in beide vaten gelijk is en als de druk boven de vloeistofspiegels even hoog is. Bij een peilglas dat met korte pijpen verbonden is met de stoom- en de waterruimte van de ketel, zal het water in de pijp naar het ondermontuur weinig in temperatuur verschillen met het ketelwater. Tijdens bedrijf heeft het water in de ketel een hogere temperatuur dan in het peilglas en bevat bovendien een hoeveelheid dampbellen, zodat het gemiddelde soortelijke gewicht lager is dan in het aanmerkelijk koudere glas, te weten het andere been van het communicerende vat. Het waterpeil in het glas kan hierdoor 4 – 5 cm lager staan dan in de ketel.

Bij het doorblazen van het peilglas maakt het koudere water in het glas plaats voor het warmere water uit de ketel en zal daardoor direct daarna een hoger peil aanwijzen. Het doorblazen van het watermontuur is dus een methode om bij benadering de miswijzing van het peilglas vast te stellen. Als de waterkraan verstopt is blijft het water in het glas stilstaan. Stilstand van water in het glas is altijd een aanwijzing voor verstopping, met als gevolg dat het water zover afkoelt dat de stoom daarboven condenseert. Het peilglas wijst nu te hoog aan, een uiterst gevaarlijke situatie die snel kan verergeren.

Als door onachtzaamheid de kraan of de afsluiter in het bovenmontuur te weinig open staat kan de druk in het peilglas lager zijn dan in de daarmee verbonden ketel. Ook dan zal het peilglas een te hoge waterstand weergeven. Het peil in het glas moet licht op en neer bewegen; zodra dit niet het geval is moet men het glas doorblazen en vaststellen of er geen miswijzing optreedt. Bij het doorblazen moet men voorzichtig te werk gaan en plotselinge druk- en temperatuurschommelingen vermijden omdat anders het glas breekt.

Peiltoestellen

Onder peiltoestellen worden verstaan: afstandpeiltoestellen en toestellen waarmee het actuele vloeistof- niveau van de stoomketel door middel van een wijzer wordt aangegeven. Peiltoestellen worden toegepast op die ketels, waarbij het vloeistofniveau vanaf de bedieningsplaats moeilijk of in het geheel niet waarneembaar is zoals bijvoorbeeld bij sectie ketels.

Igema afstandspeilglastoestel

Een veel toegepast type afstandpeilglastoestel voor ketels in een vaste opstelling is die van Igema waarvan hieronder een schematische weergave. Het toestel bestaat uit een U-vormige buis waarvan het linker been is verbonden met de water- en stoomruimte van de ketel. Het rechter been eindigt bovenaan in een pot die verbonden is met de stoomruimte. In deze pot condenseert voortdurend een hoeveelheid stoom, zodat het water daarin wordt bijgevuld tot eenzelfde hoogte onafhankelijk van het peil in de ketel. Aan de onderzijde is de buis gevuld met een zware roodkleurige vloeistof waarvan het soortelijk gewicht tweemaal zo groot is als dat van water. Deze aanwijsvloeistof vermengt zich zodoende niet met het water.

In het linker been, waarin ter hoogte van het onderste peilglas een klein vat is opgenomen, staat het waterpeil lager en staat de aanwijsvloeistof daardoor hoger dan in het rechterbeen. Naast het peilglas staat de Laagst Toegestane Waterstand aangegeven (LTW).

Bij het in werking stellen van het toestel giet men eerst iets te veel aanwijsvloeistof in het linkerbeen. Als de ketel in bedrijf is laat men het teveel aan aanwijsvloeistof via het aftap kraantje aan de onderkant weglopen. Dit doet men net zolang tot de LTW bij zowel het peilglas op de drum en op het afstandpeilglas aan elkaar gelijk zijn; dus h_1 is gelijk aan h_3 . Ter hoogte van het L.T.W. merkteken geldt volgens de wet der communicerende vaten:

$$(h_1 + h_2 + h_3) \cdot 1 = h_2 \cdot 1 + h_3 \cdot 2$$

$$(h_1 + h_3) \cdot 1 = h_3 \cdot 2$$

$$h_1 = h_3$$

Als nu bij voorbeeld het peil in de ketel zakt dan neemt de hoogte van de waterkolom in het linker been af. Dientengevolge zal de aanwijzsvloeistof in het vat stijgen en in het glas, onderaan het rechterbeen, dalen. Maakt men de doorsnede van het vat groot ten opzichte van de doorsnede van het glas, dan stijgt het niveau in het vat zo weinig dat we dit kunnen verwaarlozen.

Bij een daling van het waterpeil in de ketel van a cm daalt het peil van de rode aanwijzsvloeistof met x cm.

Dan geldt:

$$(h_2 - a) \cdot 1 + (h_3 + x) \cdot 2 = (h_1 + h_2 + h_3 + x) \cdot 1$$

$$h_2 - a + 1 + 2h_3 + 2x = h_1 + h_2 + h_3 + x$$

$$h_3 + x = h_1 + a$$

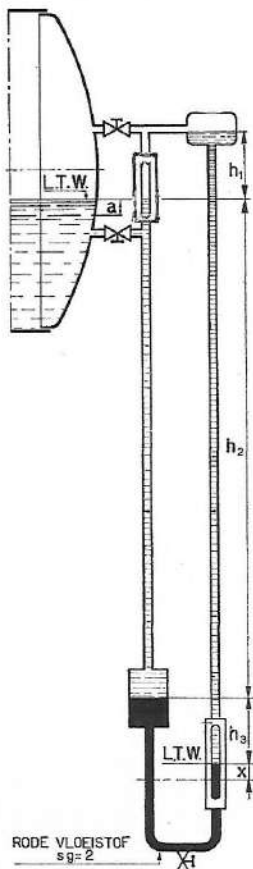
Eerder hebben we gevonden:

$$h_1 = h_3$$

Dus:

$$x = a$$

Met andere woorden de daling van de aanwijzsvloeistof in het onderste peilglas is gelijk aan de daling van het waterpeil in de keteldrum.



Igema peilglastoestel

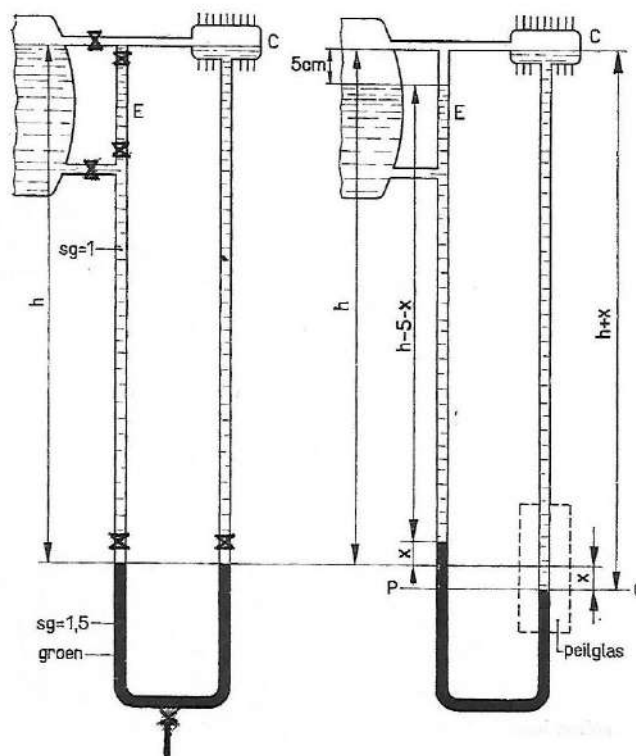
Het onderste peilglas is voorzien van een glasstrip aan de voor- en achterzijde. Achter het glas is een lamp geplaatst zodat de stand van de helrode vloeistof duidelijk zichtbaar is. Voor het afstellen van het afstandpeiltoestel dienen de instructies van de fabrikant nauwkeurig opgevolgd te worden verder dient het peil regelmatig te worden vergeleken met het peilglas op de keteldrum.

Reliance Eye-Hye afstandpeilglastoestel

Een variant op het peilglastoestel van Igema is het Eye High peilglastoestel zoals op de volgende bladzijde is afgebeeld.

Ook hier wordt gebruik gemaakt van een indicatievloeistof. In het onderste deel van dit toestel dat bestaat uit een U vormige buis, bevindt zich een groene vloeistof (Vizzene) met een soortelijk gewicht dat anderhalf keer groter is dan dat van water. De benen van de U-buis hebben overal

dezelfde doorsnede zodat het niveau van de groene vloeistof, in het ene been evenveel rijst als dat het in het andere been daalt. Naast de aansluiting op de romp voor het afstandpeilglas is hier bij E een gewoon peilglas geplaatst dat ter plaatse is af te lezen.



Afstandspeilglas

Om de werking van het toestel te verklaren, gaan we uit van de constante waterstand in het vat C. Op dit vat zijn koelribben aangebracht die er voor zorgen dat steeds voldoende stoom condenseert om dit gevuld te houden. Als de waterstand zoals in de afbeelding op de vorige bladzijde is aangegeven, in beide benen even hoog is dan staat ook de groene vloeistof in beide benen even hoog.

Daalt nu het water bijvoorbeeld 5 cm zoals in de rechter figuur is getekend dan stijgt de indicatievloeistof in het linkerbeen x cm en daalt deze in het rechterbeen over een gelijke afstand. Beide benen hebben immers een gelijke doorsnede. De hydrostatische druk in het vlak P-Q is dan gelijk en geldt de volgende vergelijking:

$$\begin{aligned}(h - 5 - x) \cdot 1 + 2x \cdot 1,5 &= (h + x) \cdot 1 \\ h - 5 - x + 3x &= h + x \\ x &= 5\end{aligned}$$

Met andere woorden: de daling van de aanwijsvloeistof in het linker been is precies gelijk aan die van het waterpeil in de stoomketel.

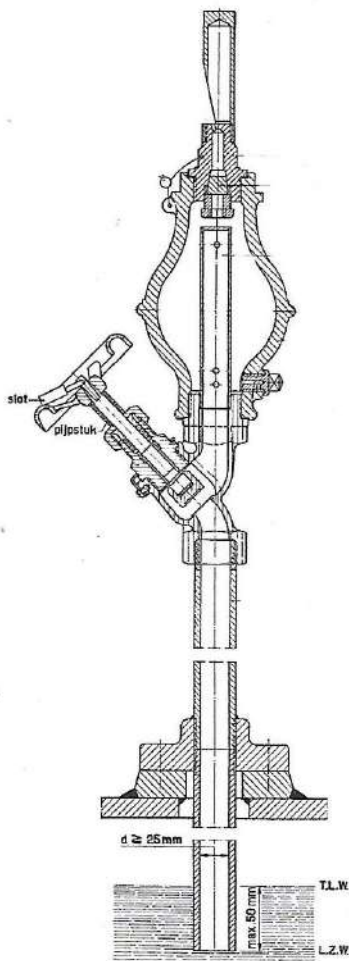
4.11.6 Niveau-beveiliging

Als het waterniveau in een stoomketel te laag is, raken, afhankelijk van het type stoomketel, de materialen van eerst de vlampijpen oververhit en bij het nog verder dalen van het waterniveau ook de materialen van de vuurgang oververhit en bezwijken deze. Het gevolg is een ketelexplosie met vaak ernstige gevolgen voor het bedienend personeel in de directe omgeving van de ketel en schade aan installaties en gebouwen.

Artikel 35 van de stoomwet en stoombesluit, die op de stoominstallaties van een aantal gemalen nog van toepassing is, schrijft voor, dat het toestel dat eventueel vloeistofgebrek in een ketel kenbaar moet maken zodanig moet zijn ingericht, dat het een geluidsignaal voortbrengt als het vloeistofpeil is gedaald tot een stand van ten hoogste 50 mm beneden het laagst toegestane vloeistofpeil.

Blackfluit

De meest gebruikelijke uitvoering van een alarmtoestel bedoeld in dit lid is de zogenoemde Black's fluit. Het toestel bestaat uit een metalen bol, met lucht gevuld en door een afsluiter verbonden met



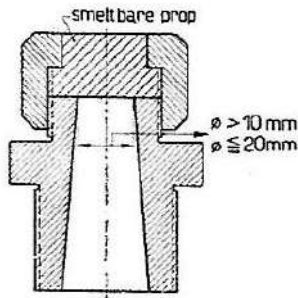
een pijp die volgens voorschrift tot 50 mm boven het laagst toegestane vloeistofpeil of vuurlijn reikt. Boven op de bol is een stoomfluit bevestigd. De verbinding tussen de bol en de fluit is onder normale omstandigheden afgesloten door een prop van gemakkelijk smeltbaar metaal. Tijdens bedrijf perst de stoomdruk ketelwater in de standpijp, zodat de lucht in de ballon wordt samen geperst en het hete ketelwater of de stoom de smeltprop niet kan bereiken en doen smelten. Wordt de waterstand in de stoomketel te laag dan valt het water uit de standpijp en komt er hete stoom in de bolvormige ruimte, waardoor de prop smelt en de fluit in werking treedt.

In de standpijp is net onder de bol een afsluiter aangebracht. Deze afsluiter moet worden gesloten bij spuien van de ketel. Uiteraard moet zodra de ketel weer gevuld is en weer in bedrijf wordt gesteld de afsluiter worden geopend omdat anders het alarm niet werkt. Om te voorkomen dat de afsluiter door onbevoegden wordt dichtgedraaid is deze voorzien van een hangslot. Verder is de bol voorzien van een geperforeerde binnenpijp die aan de bovenkant is gesloten om te voorkomen dat gesmolten materiaal op de zitting van de afsluiter valt. Ook is de lengte van de aansluitpijp van belang. Bij een te lange pijp smelt de prop te laat en bij een te korte pijp te vroeg.

Blackfluit

Smeltprop

Een variant op het hiervoor geschetste alarmsysteem is die van de smeltprop. De smeltprop waarvan hiernaast een afbeelding, wordt in het bovenste deel van de vuurgang of vuurkist aangebracht. Zodra het waterniveau onder de prop daalt smelt deze en wordt er stoom in de



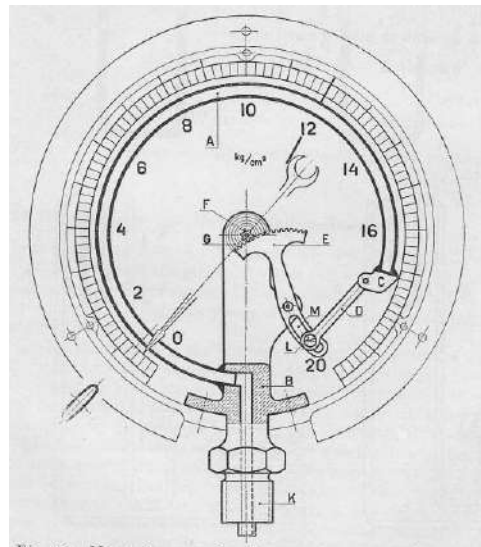
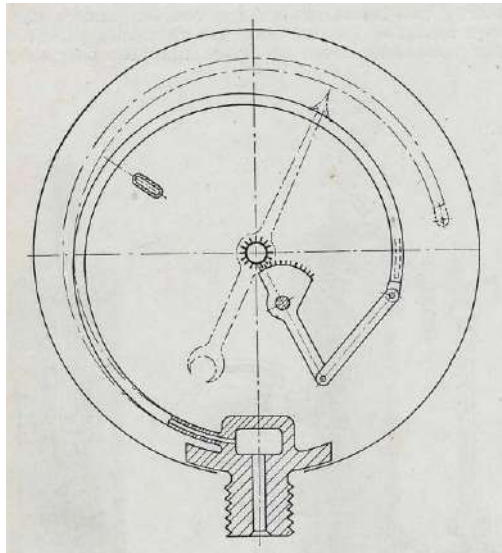
vuurgang of vuurkist geblazen. Het (kolen)vuur wordt gedoofd. Het is een weinig elegante maar wel een adequate manier om ketelexplosie te voorkomen. De proppen, ook wel loodnagels genoemd, zijn verzilverd om aantasting door het ketelwater te voorkomen. De proppen worden in een speciale houder in het plaatmateriaal van de vuurgang of -kist geschroefd. Dit gebeurt water- of vuurzijdig, waarbij in verband met mogelijk verbranden van de houder de waterzijdige variant de voorkeur verdient. In alle gevallen moet de ketel uit bedrijf worden genomen en afkoelen voor een nieuwe nagel geplaatst kan worden

Smeltprop

Het smeltpunt van de metaallegering van de prop moet iets hoger zijn dan die van de verzadigde stoomtemperatuur van de desbetreffende ketel. Dit betekent dat elke ketel zijn eigen smeltproppen heeft die niet zondermeer uitgewisseld kunnen worden. De proppen worden meestal uit tin, lood en bismut samengesteld, waarbij de smelttemperatuur, of ook wel het eutectische punt, van de hoeveelheid van elk metaal in de legering afhangt. Voor een stoomdruk van 4 kg/cm² is de temperatuur van de verzadigde stoom 142,9 °C. Kiest men uit een legering van 0,8 l bismut, 1,6 l lood en 1,2 l tin dan zal het smeltpunt bij 145,5 °C liggen. Voor andere samenstellingen gelden andere smeltpunten.

4.11.7 Manometer

Een manometer dient om druk weer te geven. Dat kan de druk van de stoom in de stoomketel zijn maar ook die van bijvoorbeeld het water dat naar de stoomketel wordt gevoerd. Het principe waarop de manometer werkt wordt aan de hand van de hierbij afgebeelde figuren uitgelegd.

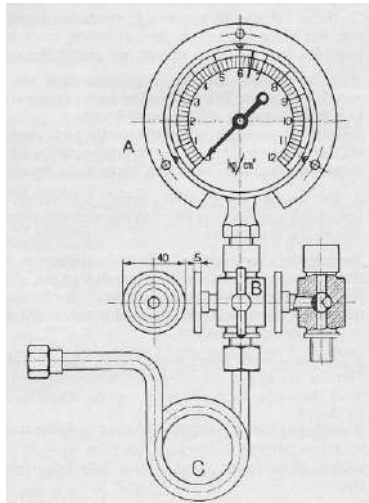


Manometer constructie

Het instrument bestaat uit een platte gebogen buis – de buis van bourdon- welke aan het ene einde gesloten is en aan het andere einde in een gegoten koperen kastje is gesoldeerd. Het koperen kastje vormt een geheel met de opstand voor de wijzer en de nippel waarmee de meter in de meterkraan wordt geschroefd. De buis is gemaakt van een veerkrachtig materiaal en enigszins spiraalvormig gebogen en wordt daarom ook wel buisveermanometer genoemd. Het inwendige van de buis staat in verbinding met de ruimte waar we de druk willen meten. De doorsnede van de platgedrukte buis zal door een toenemende inwendige druk steeds ronder worden. Daardoor zal de gebogen buis zich strekken wat met de gestippelde lijnen in de figuur is aangegeven. Neemt de druk weer af dan keert de buis terug in de vorm die bij die druk hoort. De beweging van het uiteinde van de buis is dus een maat voor de druk in de ruimte waarmee de meter verbonden is. Deze beweging wordt met een trekstangetje en een getand kwadrant overgebracht op een klein rondsel. Op het asje van het rondsel is de wijzer bevestigd, die zich kan bewegen over een wijzerplaat met een lineaire schaalverdeling. Op het asje van het rondsel- hier niet getekend - zit een fijne spiraalveer bevestigd die er voor zorgt dat de speling tussen de tanden van het rondsel en het kwadrant steeds naar een richting wordt geduwd zodat hierdoor geen miswijzing ontstaat. Aan het koperen kastje is de ronde meterkast bevestigd die het geheel omsluit en waarin de wijzerplaat is ondergebracht. Het geheel is afgeschermd met een ronde glazen plaat. De aansluiting van de manometer bestaat meestal uit $\frac{1}{2}$ G met rechte draad, aangeduid BSP (Britisch Standard Pipe). De afdichting met deze schroefdraad vindt plaats met koperen ringen. De tegenhanger van deze Engelse schroefdraad is de BSPT – de T staat voor "taper"- deze schroefdraad loopt taps toe en wordt gebruikt voor fitwerk. De afdichting bij dit soort schroefdaadverbindingen vindt plaats met hennep en een smeer- en conserveringsmiddel of tegenwoordig met teflon tape of -koord. De spoed van beide draadsoorten is bij een gegeven diameter hetzelfde maar deze kunnen desondanks niet door elkaar gebruikt worden. Daarenboven kan verwarring ontstaan met metrisch gesneden schroefdraad. De schroefdraad soort M 22 komt qua diameter en spoed nagenoeg overeen met $\frac{1}{2}$ " G.

Bepaling manometer op een stoomketel

Een stoomketel moet zijn voorzien van een manometer. Deze manometer moet op het hoogste gedeelte van de stoomruimte worden aangesloten en voorzien zijn van een manometerkraan met



controleflens. Op deze flens kon vroeger de ambtenaar van het stoomwezen, tegenwoordig de bevoegde medewerker van de geautoriseerde keuringsinstantie zijn ijkmanometer bevestigen tijdens ketelbeproevingen. Met de manometerkraan, een drieweg- kraan, kan de manometerleiding worden doorgeblazen, het 0-punt van de manometer worden gecontroleerd en de druk in de ketel in verbinding worden gebracht met de ijkmanometer. Ook kan men met de manometerkraan tijdens het opstoken de lucht uit de ketel laten ontwijken. De manometer mag niet aan de hoge temperatuur van de stoom worden blootgesteld en is daarom aangesloten via een waterhoudende buis of syphon buis. In deze buis condenseert de stoom uit de ketel. De buis moet zodanig zijn geplaatst dat het condensaat niet terug kan stromen de ketel in.

Manometeropstelling

In de manometer wordt de druk dan uitgeoefend door betrekkelijk koud water, zodat de buigzaamheid van de buis niet wordt beïnvloed.

De manometer wijst overdruk aan. Staat de manometer in verbinding met de buitenlucht dan staat de wijzer ook wel naald genoemd op 0. Wijst de meter bijvoorbeeld 13 kg/cm² aan dan is bij een barometer stand van 760 mm kwik = 1.033 kg/cm² de absolute druk 14 kg/cm². Moderne manometers hebben een wijzerplaat die de druk aanwijzen in bar. De eenheid bar komt qua orde grootte overeen met de tot 1980 gebruikte eenheid atmosfeer. Ook de tot 1978 gebruikte eenheid kg/cm² komt, zoals in de hierna volgende tabel wordt aangegeven, nagenoeg overeen met die van de bar.

1 kg/cm ²	=	98,0665 kPa	=	0,980665 bar
1 m H ₂ O (meter waterkolom)	=	9,80665 kPa	=	0,0980665 bar
1 mm Hg (millimeter kwikkolom)	=	133.322 Pa	=	1,333322 mbar
1 lbf/ In ² (pounds per square inch)	=	6,89476 kPa	=	0,0689476 bar
1 at (technische atmosfeer)	=	98,0665 kPa	=	0,980665 bar
1 atm (normale atmosfeer)	=	101,325 kPa	=	1,01325 bar

Vergelijkingstabel verschillende drukeenheden

De manometer moet voorzien zijn van een schaal in kg/cm², tegenwoordig in bar, en minstens de eerste beproevingsdruk kunnen aanwijzen. De toegestane werkdruk moet duidelijk door een merk: rode streep, op de schaalverdeling van de wijzerplaat worden aangegeven. De manometer moet geijkt zijn waarvan bij keuring de ijkcertificaten moeten kunnen worden overlegd. De manometer

moet zodanig zijn geplaatst dat de stoker de wijzerstand gemakkelijk kan waarnemen. Hierbij hoort ook dat deze behoorlijk moet zijn verlicht.

Definities

Men verstaat onder:

- De **werkdruk**: de hoogste absolute druk in kg/cm^2 die in het hoogste punt in een stoomtoestel tegen de wand kan ontstaan, verminderd met 1 kg/cm^2 .
- De **persdruk**: de absolute druk in kg/cm^2 , die in een stoomtoestel bij de beproeving tegen de wand kan ontstaan, verminderd met 1 kg/cm^2 .

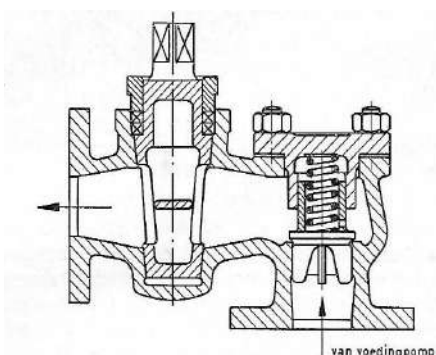
4.11.8 Voedingswater-afsluiterklepkasten en -kraanklepkasten

Stoomketels in vaste opstelling met een VO groter dan 25 m^2 moeten met minstens twee voeding toestellen zijn verbonden. Deze toestellen, anders dan bij vaartuigketels, hoeven niet afzonderlijk op de ketel te zijn aangesloten al bestaat tegen een dubbele aansluiting geen enkel bezwaar. Aan het einde van elke voedingsleiding moet een terugslagklep worden geplaatst die van de ketel moet kunnen worden afgesloten. Terugslagklep en afsluitorgaan zijn gewoonlijk in een en dezelfde behuizing ondergebracht. De terugslagklep dient om te voorkomen dat het ketelwater bij een breuk van de voedingswaterleiding uit de ketel stroomt. De klep moet nagezien kunnen worden, terwijl de ketel onder druk staat. Daarom moet de kraan of afsluiter tussen de ketel en de klep geplaatst worden en wel zodanig dat de keteldruk, als een afsluiter is toegepast, onder de klep staat.

De met de vloeistofruimte verbonden afsluitorganen mogen bij een werkdruk groter dan 3 kg/cm^2 niet van gietijzer zijn gemaakt. Men ziet vaak gietstaal, smeedstaal en beneden de temperatuur van 214°C of een werkdruk van 20 kg/cm^2 brons toegepast.

Kraanklepkasten

Kranen zijn niet toegestaan als de werkdruk hoger is dan 3 kg/cm^2 en als de doorlaat in mm en zesmaal de werkdruk groter is dan 150. Kranen kunnen zo vast zitten, dat de kracht, nodig om de plug te draaien, alleen door hamerslagen tegen de sleutel geleverd kan worden. Door de hierdoor optredende schokken kan breuk ontstaan en dus gevaar ontstaan. Bij een werkdruk van 14 kg/cm^2 en een doorlaat van $2\frac{1}{2}"$ of 165 mm zou men volgens de volgende berekening nog net een kraan mogen toepassen.



$$(6 \times 14) + 65 = 149$$

Kraanklepkast

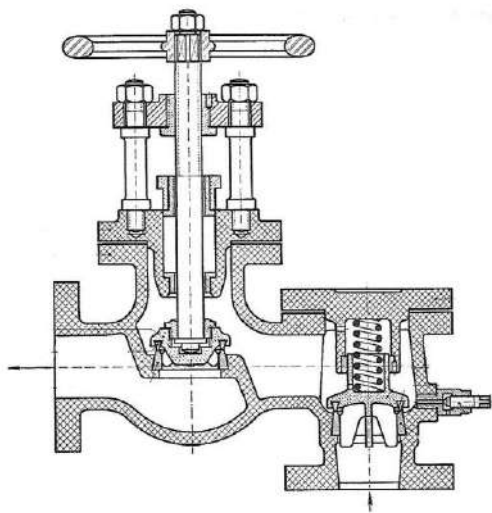
Een kraanplug moet met pakking worden afgesloten als de doorlaat groter is dan 20 mm. De plug moet bij het breken van de bouten die met behulp van de pakkingdrukker de pakking aandrukken opgesloten blijven, als de middellijn van de doorlaat groter is dan 32 mm.

Het kraanhuis is daartoe voorzien van een deksel die voorkomt dat de plug uit het huis wordt gedrukt. In het deksel bevindt zich de pakkingkamer met het drukstuk. Verder moet de steel van de kraanplug van een groef zijn voorzien, die de loop van de kanalen in de plug aangeeft zodat duidelijk is of de kraan geopend of gesloten is.

Afsluiterklepkasten

De bezwaren die er tegen het gebruik van kranen bestaan zijn oorzaak dat men in plaats van een kraan een afsluiter toepast. Dan gebruikt men voor aansluiting van de voedingswaterleiding de op de volgende bladzijde getekende appendage. Hiervan is het huis van gietstaal en het binnenwerk van brons of een ander roestvast materiaal. In dit geval zijn de zittingen van het tamelijk harde nibrometaal evenals de sluitranden van de beide kleppen. De zittingen zijn in het huis bevestigd door uitrollen; de klepranden zijn in de kleppen geperst.

In de afsluiter moet de keteldruk onder de klep staan. De klepstang is met enige speling aan de klep verbonden door middel van een kraag op de klepstang en een wartel. De speling is nodig om enige uitlijnfouten te kunnen opvangen. De bovenkant van de klepwartel en de onderkant van het deksel zijn zo afgewerkt, dat de klep in haar hoogste stand tegen de grondring van de pakkingkamer rust en deze afsluit. Theoretisch is het dan mogelijk om de pakkingbus die als waterdichte doorgang dient, onder stoom opnieuw te verpakken. De klepstang is buiten het huis van schroefdraad en een vierkant gedeelte voorzien waarop het handwiel is geplaatst. Als men de terugslagklep wil nazien en daartoe de afsluiter dicht draait kan het gebeuren dat deze als gevolg van een vuiltje lekt.



Afsluiterklepkast

Door een proefkraantje naast de terugslag klep kan men voordat men het klephuis opent vaststellen of het gedeelte tussen de afsluiter en de klep drukloos is en men veilig kan werken. Hetzelfde effect wordt overigens bereikt door het deksel boven de klep voorzichtig te lossen door de moeren iets los te draaien en na te gaan of er water ontsnapt.

4.11.9 Spui-inrichtingen

Ketels moeten van een of meer spui-inrichtingen zijn voorzien. Het doel van de spui-inrichting is een mogelijkheid te hebben een ketel te ledigen voor inspectie of onderhoud en om het tijdens het bedrijf ontstane bezinksel af te voeren of het gehalte aan opgeloste stoffen te beheersen. wat betreft het aantal toe te passen spui-organen bestaat geen vaste regel, dit is afhankelijk van de constructie dan wel het keteltype. Een gewone tankketel zal doorgaans met één spui-inrichting zijn uitgerust terwijl een waterpijpketel op meerdere plaatsen moet kunnen worden gespuid. Elke pijpleiding aan een ketel, zo ook die van de spui-inrichting, moet zo dicht mogelijk bij de ketel van

een afsluiter voorzien zijn. In plaats van afsluiters mogen kranen gebruikt worden echter met dezelfde restrictie en redenen zoals die genoemd zijn bij de voedingswaterkraanklepkast.

We onderscheiden de volgende afsluitorganen:

- Spuikranen (plugconstructie)
- Spuiafsluiters (schuifconstructie)
- Spuiafsluiters (klepconstructie)
- Continu-spuiafsluiter (penconstructie)

Een spui-inrichting moet, voor de afvoer van het spuiwater, van een zodanige pijpleiding zijn voorzien dat geen gevaarlijke situatie kan ontstaan bijvoorbeeld door opspattend heet water. Als er een gemeenschappelijke afvoer is voor twee of meer ketels dan moet er na elke afsluiter of kraan een terugslag klep worden geplaatst. De terugslagklep moet voorkomen dat er heet spuiwater naar bijvoorbeeld een ketel die in onderhoud is wordt afgevoerd en onderhoudsmedewerkers treft.

Bij klepafsluiters met sluitvlakken, die haaks op de hartlijn van de klepstang staan kunnen tijdens het dichtdraaien harde stukjes ketelsteen tussen de klep en de zitting klem raken. Een lekkende spuiafsluiter en een gevaarlijk lage waterstand in de ketel kunnen hiervan de gevolgen zijn. Als de sluitvlakken over elkaar schuiven, zoals bij een schuifafsluiter, wordt het achtergebleven vuil eraf geschoven en heeft men een grotere zekerheid van een goede afdichting.

Spuikranen en schuifafsluiters worden veiligheidshalve zo uitgevoerd dat de bedieningssleutel er alleen afgenomen kan worden als de kraan of de afsluiter gesloten is. Daartoe is deze zogenoemde soksleutel voorzien van een nok die bij gesloten stand kan passeren door een uitsparing in een bij de pakkingbus geplaatste ring. Ziet men die sleutel naast de afsluiter op het ketelschot hangen dan weet men dat de afsluiter dicht is.

Ketels moeten van een of meer spui-richtingen zijn voorzien. Het doel van de spui-inrichting is een mogelijkheid te hebben een ketel te ledigen voor inspectie of onderhoud en om het tijdens het bedrijf ontstane bezinskel af te voeren of het gehalte aan opgeloste stoffen te beheersen. Omtrent het aantal toe te passen spui-organen bestaat geen vaste regel en is afhankelijk van de constructie danwel het keteltype. Een gewone tankketel zal doorgaans met één spui-inrichting zijn uitgerust terwijl een waterpijpketel op meerdere plaatsen moet kunnen worden gespuid. Elke pijpleiding aan een ketel zo ook die van de spui-inrichting moet zo dicht mogelijk bij de ketel van een afsluiter voorzien zijn. In plaats van afsluiters mogen kranen gebruikt worden echter met dezelfde restrictie en redenen zoals die genoemd zijn de voedingswaterkraanklepkast.

We onderscheiden de volgende afsluitorganen:

- Spuikranen (plugconstructie)
- Spuiafsluiters (schuifconstructie)
- Spuiafsluiters (klepconstructie)
- Continu-spuiafsluiter (penconstructie)

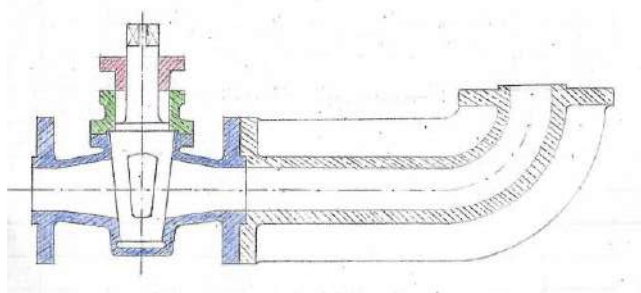
Een spui-inrichting moet, voor de afvoer van het spuiwater, van een zodanig pijpleiding zijn voorzien dat geen gevaarlijke situatie kan ontstaan bijvoorbeeld door opspattend heet water. Als er een gemeenschappelijke afvoer is voor twee of meer ketels dan moet er na elke afsluiter of kraan een terugslag klep worden geplaatst. De terugslagklep moet voorkomen dat er heet spuiwater naar bijvoorbeeld een ketel die in onderhoud is wordt afgevoerd en onderhoudsmedewerkers treft.

Bij klepafsluiters met sluitvlakken, die haaks op de hartlijn van de klepstang geplaatst zijn staan kunnen tijdens het dichtdraaien harde stukjes ketelsteen tussen de klep en de zitting klem raken. Een lekkende spuiafsluiter en een gevaarlijk lage waterstand in de ketel kunnen hiervan de gevolgen zijn. Als de sluitvlakken over elkaar schuiven, zoals bij een schuifafsluiter, wordt het achtergebleven vuil er af geschoven en heeft men een groter zekerheid van een goede afdichting.

Spuikranen en schuifafsluiters worden veiligheidshalve zo uitgevoerd dat de bedieningssleutel er alleen afgenomen kan worden als de kraan of afsluiter gesloten is. Daartoe is deze zogenoemde soksleutel voorzien van een nok en die bij gesloten stand kan passeren door een uitsparing in een bij de pakkingbus geplaatste ring. Ziet men die sleutel naast de afsluiter op het ketelschot hangen dan weet men dat de afsluiter dicht is.

Kranen

Spuikranen zijn veelvuldig toegepast op eenvoudige tankketels zoals de Cornwall en de Lancashire. Ze hebben echter belangrijke nadelen zoals moeilijk draaibaar zijn, vooral bij grotere afmetingen en

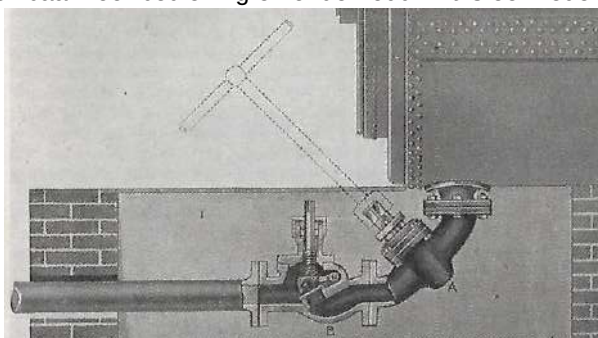


als ze niet vaak worden gebruikt. Er treedt snel beschadiging van de sluitvlakken op, waardoor lekkage ontstaat met een continu waterverlies. Soms wordt om die reden een extra afsluiter geplaatst in de afvoer van de spuileiding, hetgeen de installatie duur en gecompliceerd maakt.

Spuikraan met ketelaansluiting

Evenals bij kraanklepkasten moet bij spui kranen de kraanplug met pakking worden afgesloten. Ook hier moet het kraanhuis voorzien zijn van een deksel die voorkomt dat de plug uit het huis wordt gedrukt. Verder moet de kraan, hier niet getekend, zijn uitgerust met een bedienings- sleutel die er alleen uitgenomen kan worden als de kraan gesloten is.

De aansluiting van de spui-inrichting zit noodzakelijkerwijs op het laagste punt van een ketel en is daardoor in de meeste gevallen moeilijk bereikbaar voor bediening en onderhoud. Dit is een reden dat men de spui aansluiting met behulp van een kort pijpstuk en een bocht, buiten de contour van de romp brengt. In de bovenstaande figuur wordt een voorbeeld gegeven van een dergelijke aansluiting. Soms wordt gebruik gemaakt van speciaal op de situatie afgestemde aansluitingen en afsluitmiddelen zoals in de afbeelding hiernaast is aangegeven.

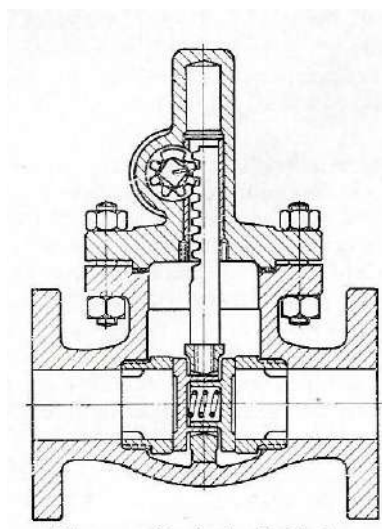


Spuikraanaansluiting

Bij deze geklonken tankketel is de kraan in een bochtstuk verwerkt en is tevens een terugslagklep, die kan worden gekneveld, in de spueleiding geplaatst. Hiermee wordt voorkomen dat er van een andere ketel (heet) spuiwater kan worden aangevoerd terwijl eventuele lekkage van de plugkraan kan worden opgeheven door de klep met behulp van de erboven geplaatste draadstang te knevelen.

Schuifafsluiters

In plaats van spuikransen gebruikt men vooral bij ketels met hogere drukken schuifafsluiters. In de figuur hieronder is aangegeven hoe een dergelijke schuif is samengesteld. In het huis zijn twee zittingen geschroefd. Twee schuiven die door een slappe veer uit elkaar gedrukt worden kunnen met behulp van een tandheugel op en neer worden bewogen. In de getekende situatie wordt de van de ketel afgekeerde schuif door de keteldruk tegen de zitting gedrukt. Met een sleutel, passend op het vierkante einde van de tandsector wordt de tandheugel geleid in de bus omhoog of omlaag bewogen. Het aantal tanden van de tandsector is zo gekozen dat de schuif in zijn hoogste stand de opening in de zitting volledig vrij maakt, maar zodanig dat deze niet voorbij de zitting kan komen. In de hoogste stand stuit de tandheugel in de kop van de geleiding. In de laagste stand stuit het oog waarin de twee schuifdelen zijn opgehangen tegen een nok in de onderzijde van het huis. Vuil dat na het spuien op de zitting achterblijft wordt bij het sluiten eraf geschoven.



Spui-schuifafsluiter

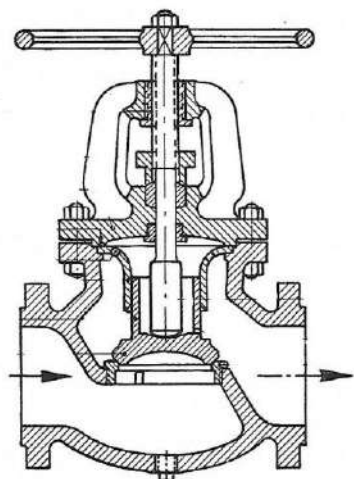
Omdat de zittingen evenwijdig aan elkaar zijn geplaatst en de schuiven door een lichte veer van elkaar worden gedrukt kan het krimpen of uitzetten van het huis geen klemmen van de schuif veroorzaken.

Klepafsluiters

In de figuur hier onder is een zogenoemde Edward- klepafsluiter getekend die veel wordt toegepast bij waterpijpketels voor het spuien.

De keteldruk staat onder de losse klep die met een schuine kant op de zitting afdicht. Eerder is aangegeven dat bij de klep van dit type spuiafsluiter bij het dichtdraaien vuil bekneeld kan raken en lekkage optreedt. Afhankelijk van de zorg die wordt besteed aan de ketelwater- behandeling zal vervuiling en daardoor lekkage in zekere mate optreden en acceptabel zijn. Op oude tankketels zal men daarom dit type afsluiter niet gauw aantreffen. De klep van deze afsluiter is aan de bovenzijde voorzien van een zuigertje dat voor de geleiding zorgt. De bus waarin het zuigertje zich beweegt, zit vastgeklemd onder de centreerrand van het deksel en is voorzien van een opening om de vrije beweging van de klep te waarborgen. De verdikking op de klepstang sluit in de hoogste stand de spleet naar de pakkingbus goed af. De draadbus voor de klepstang is bevestigd in een met het

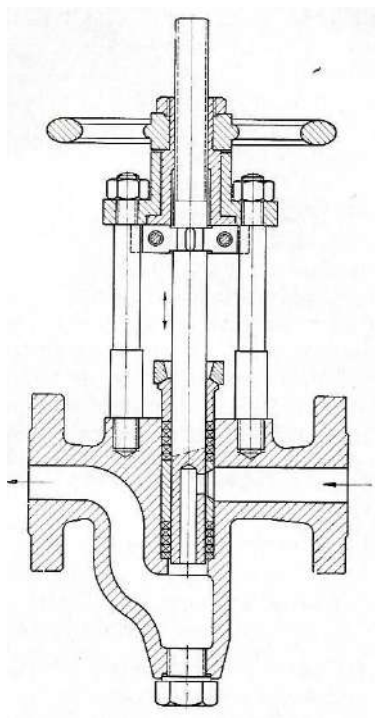
deksel tot één stuk gegoten brugstuk De draadstang is zodoende zuiver in één lijn met het gat in het deksel en met de klepzitting



Spui-klepafsluiter

Continu-spuiafsluiters

De continu-spuiafsluiter wordt gebruikt om te hoge concentraties zouten in het met chemicaliën behandelde ketelwater af te voeren en is niet bedoeld en van wege zijn capaciteit ook niet geschikt



om de ketel te ledigen. Naast de continu-spuiafsluiter moet de ketel daarom ook zijn uitgerust met een van de hiervoor besproken spuiafsluiters of kraan. De afsluiter, waarvan met de figuur hiernaast een voorbeeld wordt gegeven, bestaat uit een gedeeltelijk uitgeboorde spindelstang die met een handwiel op en neer kan worden bewogen. Bij deze beweging van de spindel wordt met een hierin overdwars aangebrachte boring de doortocht van de afsluiter geheel of gedeeltelijk vrijgemaakt en ketel- water afgevoerd. De spindel wordt afgedicht met een lange stopbus waar tussen de pakkingringen een hoge lantaarnring is geplaatst. Als de spindel geleiding in zijn bovenste stand staat is de doortocht maximaal geopend. Door met het handwiel de spindel naar beneden te draaien wordt de doortocht steeds kleiner om uiteindelijk geheel afgesloten te worden. De verstelinrichting biedt de mogelijkheid de continu af te voeren hoeveelheid ketelwater binnen bepaalde grenzen te regelen en daarmee te beperken tot het noodzakelijke minimum. De af te voeren hoeveelheid volgt steeds uit de resultaten van de ketelwateranalyses.

Continue spuiafsluiter

Het voordeel van dit type spuiafsluiter is dat de snijdende werking van het water en eventuele stoom geen invloed heeft op de goede afdichting van de afsluiter. Ook eventuele vaste verontreinigingen worden evenals bij een schuifafsluiter van het dichtingsvlak geschoven.

Dit type continu-spui-afsluiter is echter ongeschikt voor de toepassing bij ketels met een minimale ketelwaterbehandeling vanwege de relatief kleine doortocht van de spindelboring en de kans op grove vaste verontreinigingen.

4.12 Materiaal voor stoomketels

4.12.1 Bereiding van ruwijzer uit ertsen

Voor de vervaardiging van een groot aantal onderdelen van stoomketels gebruikt men staal. Hieronder verstaat men tegenwoordig een legering van ijzer met kleine hoeveelheden van de elementen koolstof, mangaan, silicium, zwavel, fosfor en stikstof. Deze elementen worden met het ijzererts aangevoerd dan wel zijn nodig bij de bereiding van ijzer. Koolstof, mangaan en silicium hebben een gunstige, zwavel, fosfor en stikstof hebben daarentegen een ongunstige invloed op de mechanische eigenschappen van het staal. Van de drie laatst genoemde elementen, wenst men daarom het gehalte zo laag mogelijk te houden, dit geldt vooral voor fosfor.

4.12.2 IJzerertsen

IJzer komt alleen in scheikundig gebonden toestand in de natuur voor. De binding is voornamelijk met zuurstof en voorts met koolstof en water. Het gebonden ijzer is vermengd met andere stoffen zoals kwarts, silicaten, fosfaten en kalkspaat die samen het zogenoemde ganggesteente vormen. Dit mengsel van ijzerverbindingen en ganggesteente heet ijzererts en kan 30 -70 gewichtsprocenten ijzer bevatten.

De voornaamste ijzerertssoorten die voor de bereiding van ijzer in aanmerking komen zijn:

Magneetijzersteen ($\text{Fe}_3 \text{O}_4$)

Magneetijzersteen is een verbinding van ijzer met zuurstof en derhalve een oxide. Het levert ijzer van een goede kwaliteit en heeft een ijzergehalte van 60 – 68 %. De kleur van deze erts is zwart en de naam is ontleend aan de magnetische eigenschappen ervan. Deze erts is moeilijk te reduceren, dat wil zeggen van de zuurstof te ontdoen.

Roodijzersteen ($\text{Fe}_2 \text{O}_3$)

Roodijzersteen is ook een oxide met een ijzergehalte van 60 – 68 % van goede kwaliteit. In tegenstelling tot het magneetijzersteen is deze ijzererts vrij zacht. De kleur is donkerrood. Het hiermee verwante maar ijzer- arme roodkrijt wordt als verfstof gebruikt.

Spaatijzersteen (Fe CO_3)

Spaatijzersteen, ook wel ijzercarbonaat genoemd vanwege de koolstof in het erts, is een gemakkelijk smeltbaar erts met een ijzergehalte tot 48 %. De geelwitte of geelbruine kleur van het erts wordt bij blootstelling aan lucht donker of verweert. Het erts bevat ook mangaan dat op de sterkte van het hieruit bereide staal een positieve invloed heeft.

Bruinijzersteen ($2\text{Fe O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)

Bruinijzersteen heeft een sterk uiteenlopend ijzergehalte van 28 – 35 %. Ook het voorkomen verschilt veel. Men vindt deze donkerbruin gekleurde erts als korrels, vermengd met klei en stenen. Het is verwant aan het in Nederland gevonden ijzeroer dat gedolven werd langs de rivieren en beken in de Achterhoek en daar in de talrijke ijzergieterijen op grote schaal werd gebruikt.. Dit erts bevat veel fosfor.

De waarde van het ijzererts wordt bepaald door het gehalte aan ijzer en de aard van de verontreinigingen, waarbij vooral het gehalte aan fosfor van belang is. Het is namelijk niet mogelijk de fosfor bij de bereiding van het ruwijzer te verwijderen. Ook bij de bereiding van staal is het moeilijk deze, voor de kwaliteit schadelijke stof, te verwijderen.

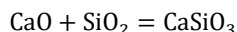
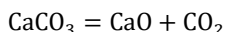
Uit de hier voor genoemde ertsen wordt in een hoogoven het zogenoemde ruwijzer bereid. Men spreekt van ruwijzer omdat dit materiaal niet geschikt is voor rechtstreeks gebruik maar als grondstof dient voor de vervaardiging van staal en gietijzer.

4.12.3 De hoogoven

De hoogoven heeft de vorm van twee afgeknotte kegels die met de grondvlakken tegen elkaar zijn geplaatst. Het bovenste deel, de schacht wordt naar onder toe wijder, zodat de lading gemakkelijk zakt en verstopping wordt voorkomen. Het daarop volgende deel, de rust, wordt naar onder toe nauwer zodat de lading juist blijft hangen. Met deze afnemende doorsnede wordt tevens de volume vermindering van de lading gecompenseerd. Onder de rust bevindt zich de haard. In deze ruimte wordt het gesmolten ijzer en de zogenoemde slak verzameld. Aan de bovenzijde van de oven is een sluis aangebracht, zodanig dat deze kan worden gevuld terwijl de afvoer van het hoogovengas doorgaat.

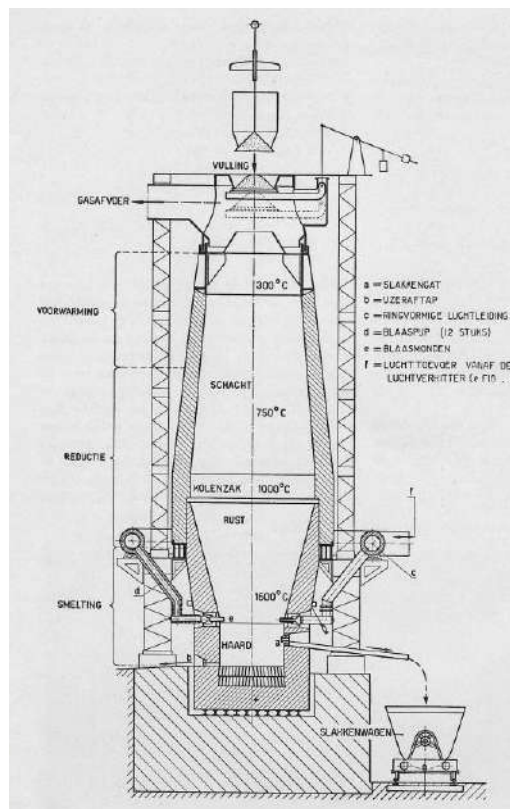
In de hoogoven stort men beurtelings hoeveelheden cokes, toeslag en erts. De cokes moet uit grote stukken bestaan en zeer hard zijn om verbrijzelen door het gewicht van de lading en het verstoppen van de gasdoortocht te voorkomen. Bovendien moet de cokes een laag zwavelgehalte hebben. De toeslag dient om de ganggesteenten, as en sintels van de cokes te verslakken. De gesteenten, die de ertsen bevatten, hebben veel hogere smelttemperaturen dan ijzer. Kalk heeft bijvoorbeeld een smelttemperatuur van 1500 °C, kwarts wordt vloeibaar bij een temperatuur van 1650 °C terwijl keileem pas bij 1800 °C plastisch wordt. Het smelten hiervan vindt dan ook pas plaats in de onderste zone van de oven.

Men gebruikt een zure toeslag als het ganggesteente basisch is en omgekeerd. Als er sprake is van een zure vulling, bestaand uit hoofdzakelijk zand, dan voegt men kalksteen (Calciumcarbonaat, CaCO_3) toe. Bij een basische vulling, bestaand uit hoofdzakelijk Calciumoxide ofwel ongebluste kalk, voegt men kwarts (Siliciumoxide, SiO_2) toe als vulling. De reacties hiervan die zoals hiervoor is aangegeven bij hoge temperaturen plaatsvinden en die we verderop ook bij de staalbereiding nog tegenkomen, verlopen als volgt:



Het eindproduct is calciumsilicaat of hoogovenslak dat in vloeibare toestand wordt afgetapt en onder andere verwerkt wordt als isolatiemateriaal. In gegranuleerde (met water gebluste) vorm is het een belangrijk toeslagmateriaal bij de cementbereiding, terwijl het Thomas slakkenmeel voor bemesting bruikbaar is.

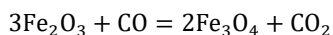
Het winnen van het ijzer uit het erts berust op het vermogen van koolstof (C) en koolmonoxide (CO) om bij hoge temperaturen de zuurstof aan de ijzer- zuurstofverbindingen te onttrekken. We noemen dit reductie, in tegenstelling tot oxidatie waarbij de zuurstof wordt gebonden. Echter het ijzer neemt zelf daarbij onvermijdelijk koolstof op met andere in de erts voorkomende bestanddelen zoals, mangaan, fosfor, silicium, zwavel en dergelijke. Juist door opneming van koolstof daalt het smeltpunt van ijzer zover dat het in de onderste laag naar beneden druppelt. De slak beschermt het gedurende het vallen en onderin de haard tegen oxidatie (verbranding) door de ingeblazen verbrandingslucht. Aangezien de gevormde kooldioxide (CO₂) bij het opstijgen in de oven telkens wordt omgezet in koolmonoxide (CO), zal het ontwijkende hoogovengas naast stikstof en de kooldioxide nog een groot deel, tot 30 %, van het brandbare CO bevatten. Het gas heeft een stookwaarde van 1000 kcal/Nm³ en wordt gebruikt voor het stoken van de bij de hoogoven behorende luchtverhitters.



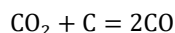
Doorsnede hoogoven

In de figuur van de doorsnede van de hoogoven zijn de verschillende zones en bij benadering de verschillende procestemperaturen aangegeven. Hierna worden achtereenvolgens van boven naar beneden in de hoogoven de verschillende veranderingen weergegeven.

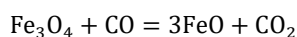
In de mond van de oven worden de erts en de brandstof door de hier langs-strijkende gassen, waaronder koolmonoxide (CO), voorverwarmd. Bij verder dalen vindt de eerste omzetting aldus plaats:



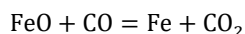
Hier wordt dus magneetijzer (Fe_3O_4) gevormd. De gevormde kooldioxide (CO_2) neemt uit de cokes koolstof (C) op en gaat volgens onderstaande reactie over in koolmonoxide.



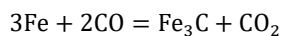
Verder in de reductie zone vindt met het onder in de oven gevormde koolmonoxide weer een omzetting plaats van het gevormde magneetijzer. Dit vindt plaats volgens de volgende reactie.



Boven in de schacht van de oven vindt de volgende reactie plaats en ontstaat zuiver ijzer en kooldioxide.



Dit zuivere ijzer neemt echter koolstof op hetgeen als volgt gebeurt:



Het uiteindelijke smelten heeft pas plaats in de onderste laag van de oven bij een temperatuur van 1800 °C.

Voor het tijdperk van de hoogovens maakte men voor het produceren van ijzer gebruik van zogenaamde laagovens. Hierin vond, door verhitting van het ijzererts met houtskool, dezelfde reactie plaats, maar was het ontstane ijzer niet zo heet, dat het vloeibaar werd; het lag als een gesinterde massa in de slak en moest door verhitten en hameren verder worden bewerkt en gezuiverd.

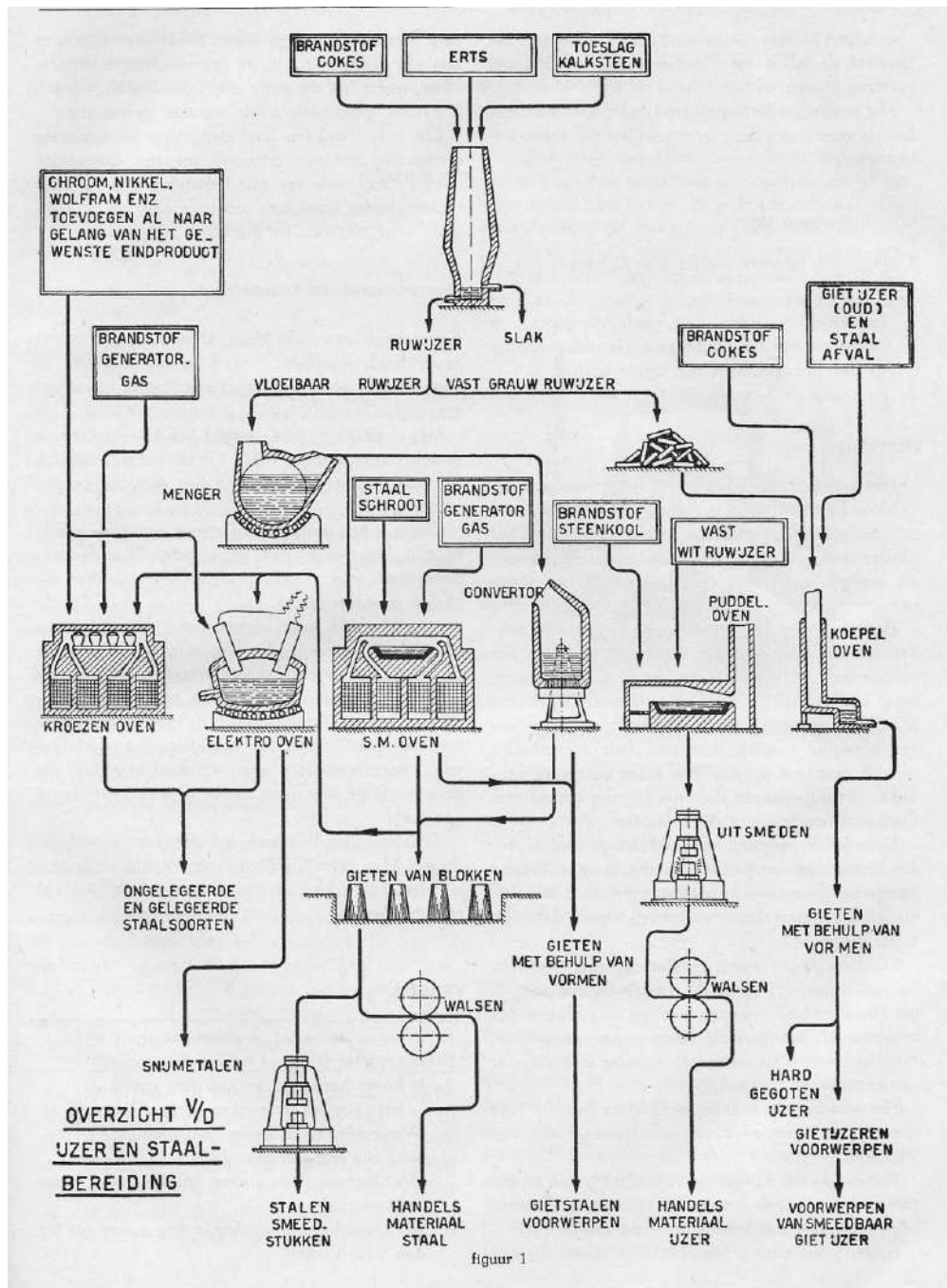
4.12.4 Het ruwe ijzer

Het door een hoogoven geproduceerde ruwijzer is zelfs met de beste zorg wisselend van samenstelling. Het bevat tot ongeveer 5 procent koolstof en bovendien kleinere hoeveelheden van de reeds eerder genoemde stoffen mangaan, silicium, zwavel, fosfor en stikstof en is daarom niet direct bruikbaar. Het moet eerst, afhankelijk van de samenstelling en de beoogde toepassing, bewerkt worden.

Element	Invloed
Koolstof (C)	Beïnvloedt het smeltpunt, de sterkte en hardbaarheid.
Silicium (Si)	Bevordert de koolstof afscheiding in grafiet-vorm en maakt ijzer grauw op de breuk. Verhoogt de weerstand tegen scheikundige invloeden.

Mangaan (Mn)	Bevordert de opname van koolstof, vergroot de treksterkte en zorgt er voor dat de taaiheid behouden blijft. De concentraties mangaan variëren tussen de 0,4 – 14 % al naar gelang de toepassing.
Fosfor (P)	Maakt ijzer dun vloeibaar, vermindert de sterkte en maakt het ijzer broos in koude toestand. De hoogst toelaatbare concentratie is 0,02 %
Zwavel (S)	Maakt het ijzer dik vloeibaar, breekbaar en broos in warme (roodgloeiend) toestand zodat het bij 0,1% niet meer smeedbaar is.

Het ruwe ijzer dat niet direct gebruikt wordt giet men uit in een zandbed of voert men af naar een gietmachine waar er U-vormige staven, zogenoemde gietelingen, van ongeveer 50 kg van worden gemaakt. Deze gietelingen worden zowel in de ijzergieterij als voor de staalbereiding gebruikt. Moet het vloeibare ruwe ijzer direct tot staal verwerkt worden dan tapt men het ruwe ijzer af in zogenoemde pan-wagens en voert deze af naar een mengvat. In het mengvat wordt het ruwe ijzer van de verschillende hoogovens verzameld voordat het naar de staalbereiding wordt afgevoerd. Van het gietijzer en het staal, al of niet gelegeerd om de kwaliteit te verbeteren, worden vervolgens allerlei gereede producten dan wel halffabricaten gemaakt.

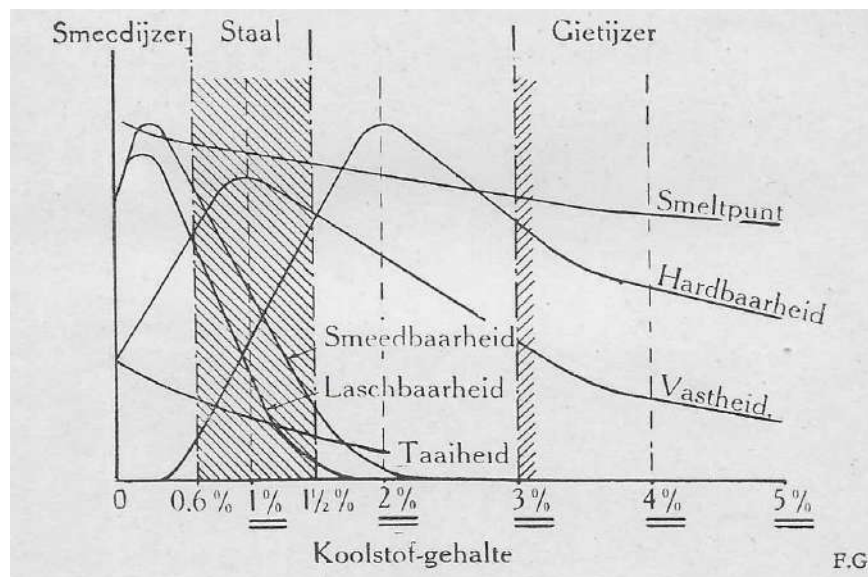


Overzicht van de ijzer- en staalbereiding

4.12.5 Bereiding van gietijzer en staal uit ruwijzer

De vroeger gebruikelijke benamingen als ruwijzer, gegoten ijzer, welijzer, smeedijzer, smeltijzer, smeedstaal, vloeij-ijzer en vloeistaal zijn aanleiding tot onduidelijkheid en verwarring. Ook is een aantal benamingen in onbruik geraakt vanwege achterhaalde technieken: denk hierbij bijvoorbeeld aan puddelijzer en welijzer.

Het product uit de gieterij noemen we afhankelijk van het koolstofgehalte gietijzer of gietstaal. Het materiaal dat is vervaardigd volgens het Bessemer-, Thomas-, Siemens-Martin-proces etc. noemen we onafhankelijk van het koolstof gehalte staal. Lang hebben we onder staal verstaan hardbaar ijzer dat ten- minste 0,35% koolstof bevatte. In de grafiek hieronder zijn de hoofdeigenschappen zoals smeedbaarheid, hardbaarheid en gietbaarheid in relatie tot het koolstofgehalte weergegeven.



Hoofdeigenschappen ijzer en staal

4.12.6 Gietijzerbereiding

Het ruwijzer uit de hoogovens waarin zich een zekere hoeveelheid silicium bevindt en dat een grauwe kleur heeft wordt in hoofdzaak in het gieterijbedrijf verwerkt. Hiertoe tapt men het ruwe ijzer af en geleidt dit naar een giethal waarvan de vloer is voorzien van kanalen, elk voorzien van een groot aantal kamvormige zijtakken. De lengte van deze U-vormige goten is 60 -150 cm. Na afkoeling worden deze ruwijzer-kammen gebroken en vervoerd naar een opslagplaats van de gieterij waar vervolgens na smelting in bijvoorbeeld een koepeloven en bijmenging van oud gietijzer en staalafval, er gietproducten van worden gemaakt. We noemen deze gegoten staven ruwijzer gietelingen of piekijzer. Deze gietelingen wegen ongeveer 50 kg.

Een ander systeem voor het maken van de gietelingen is het zogeheten carrousel-gieten. Hierbij wordt de gietpan met ruwijzer geledigd in een aantal gietvormen, welke ringvormig en draaibaar bevestigd zijn onder de gietgoot van de pan. Na ongeveer driekwart van de totale omwenteling wordt de gietvorm automatisch gekanteld en valt de gevormde gieteling er uit. De vorm wordt weer in de oude positie gedraaid en opnieuw gevuld.

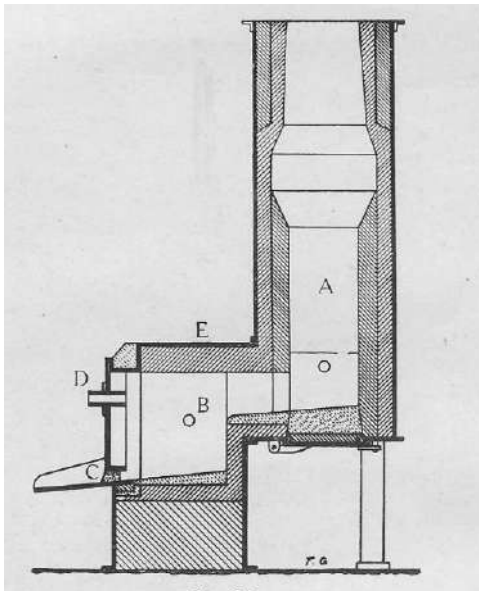
Een ander systeem is dat het ruwe ijzer in bakken wordt gegoten die op een met kettingen uitgeruste en horizontaal geplaatste transportband zijn gemonteerd. Aan het begin van de band worden de vormen gevuld, onderweg koelen zij af en aan het eind van de band, bij het omkeren van de looprichting vallen de gietelingen uit de vorm.

Koepeloven

Tot ver in de twintigste eeuw gebruikte men in gieterijen koepelovens voor de bereiding van een aantal gietijzersoorten. De koepeloven volgens het systeem Ireland, is meestal voorzien van een voorhaard volgens het systeem Krigar. Deze oven bestaat uit een plaatstalen schacht die van binnen is bekleed met vuurvaste steen of chamotte. De verbranding en het smelten vindt hoofdzakelijk plaats in de haard terwijl de schacht daarboven dient om de gietelingen, cokes en de eventuele toeslag en oud gietijzer voor te warmen. Het vloeibare ijzer en de slak stromen in de eveneens beklede voorhaard. De aftap voor het vloeibare gietijzer bevindt zich op het laagste punt aan de voorzijde van de voorhaard en wordt afgesloten met een kleiprop. De op het gietijzer drijvende slakken worden iets boven de helft van de voorhaard door het zogenoemde slakkengat afgevoerd. De oven is voorzien van een aparte luchtkast van waaruit de verbrandingslucht met overdruk (0,60 – 0,80 mwk) door een aantal openingen in de haard wordt geblazen.

De lucht wordt aangevoerd door blaaswerktuigen en kan naar behoefte geregeld worden. De uit kalksteen bestaande toeslag dient om de koolas en de onzuiverheden uit het ijzer om te zetten in een vloeibare slak. Tevens zal deze de slak die op het gietijzer drijft beschermen tegen verbranden. Men dient het verloop in de gietoven als een louteringsproces te beschouwen zodat bij het aftappen in een gietpan een zuiver product wordt verkregen. Verder kan men op de eigenschappen invloed uitoefenen door toevoeging van bepaalde ijzersoorten en metalen.

Bijvoorbeeld fosfor zal het ijzer dun vloeibaar maken, en hoe ingewikkelder een gietstuk is des te dunner vloeibaar moet het ijzer zijn om de gehele gietvorm te vullen. Fosfor maakt het ijzer broos zodat men niet voor een willekeurig gehalte kan kiezen. Het toevoegen van bijvoorbeeld afval-smeltijzer zal het koolstofgehalte verminderen en de taaiheid doen toenemen.



Ongeschikt om te gieten, dat wil zeggen om deugdelijk werk te leveren, is wanneer het basismateriaal, de gietelingen of het piekijzer een koolstofgehalte heeft lager dan 2,5 %. Het smeltpunt wordt dan te hoog voor de gebruikelijke gietoven. Het mag tevens niet minder dan 1% silicium bevatten anders heeft onvoldoende afscheiding van grafiet plaats. Als regel mag het niet meer dan 1 a 1,5 % mangaan bevatten anders wordt de krimp bij het gieten te groot. Bij meer dan 2,5 % fosfor wordt het gietwerk te broos. Zwavel dat ijzer dik vloeibaar en tevens broos maakt moet altijd vermeden worden maar meer dan 2 % mag zeker niet voorkomen.

Koepeloven

Eigenschappen gietijzer

Het gewone gietijzer kon in het midden van de vorige eeuw geleverd worden met een treksterkte tussen de 8 - 20 kg/mm² en een druksterkte van 70 kg/mm². Het is in vergelijking tot staal vrij broos en de reden dat in de oude stoomwet hiervoor beperkende voorschriften zijn aangegeven. Bij stoominstallaties is het gebruik slechts toegestaan tot een druk van 20 kg/cm² en een temperatuur van 250 °C. Het bevat ongeveer 3,5 % koolstof (C), 1,5 - 2,5 % silicium (Si), 0,5 % Mangaan (Mn) en wat fosfor (P). Gietijzer is dun vloeibaar en daardoor goed te gieten in de meest complexe vormen. In koude toestand is het goed mechanisch te bewerken. In warme toestand is gietijzer niet te vervormen.

Bij hoge temperaturen, waaraan het bijvoorbeeld in een verbrandingsmotor wordt blootgesteld is het onderhevig aan een blijvende uitzetting. Als gevolg van dit zogenoemde groeien treden materiaalspanningen op die tot scheuren leiden. Hetzelfde doet zich ook voor bij stoomafsluiters als men ze aan de hoge temperaturen van oververhitte stoom blootstelt. Men verklaart de groei van het gietijzer door de oxidatie ervan en doordat de daarin gebonden koolstof zich voor een deel gaat afscheiden als grafiet. Bij temperaturen boven de 600 – 1000 °C wordt het brokkelig aan de buitenkant, de kern wordt zacht, zet uit en wordt poreus. Het gevormde grafiet wordt aangetast en er treedt oxidatie van het ijzer op.

Gietijzeren roosterijzers in vuurhaarden worden door de hoge temperaturen tijdens het verbranden van de brandstof spoedig met een oxidelaag bedekt. Deze laag valt er snel weer af waarna opnieuw weer een oxidehuid wordt gevormd enz. zodat de levensduur van de roosters in hoog tempo wordt verkort. Om gietijzer tegen hoge temperaturen bestand te maken moet men het silicium gehalte laaghouden. Er wordt dan minder grafiet gevormd. In plaats daarvan zou men Mangaan (Mn) aan het gietijzer kunnen toevoegen om de koolstof gebonden te houden, echter dan wordt het materiaal weer te hard. Daarom neemt men nikkel (Ni) dat wel grafietvorming geeft echter aanzienlijk minder dan silicium. Wordt tevens chroom (Cr) toegevoegd dan krijgt men het zogenoemde chroomgietijzer (2,7 % C, 1 – 1,5 % Ni en 1,5 – 13 % Cr) dat bestand is tegen oxidatie en hoge temperatuur. De toevoeging van nikkel en chroom maken de producten gemaakt uit dit soort gietijzer relatief duur en is de reden dat men het goedkopere maar minder duurzame hard gietijzer toepast.

Hard gietijzer

Als men na het gieten de werkstukken snel laat afkoelen heeft de koolstof geen gelegenheid zich in ruime mate af te zetten als grafiet en gaat het over in witijzer wat aanmerkelijk harder is. Het hierdoor ontstane product noemt men gehard gietijzer of Hartguss en wordt onder andere toegepast bij het gieten van roosterstaven voor stoomketels. Men verkrijgt een harde buitenkant door de vormen van ijzer te maken dat de warmte snel afvoert. Men kan dit proces versnellen door de vormen met stromend water te koelen.

Smeedbaar gietijzer

De naam is misleidend, want van werkelijk smeden is geen sprake. Dunne voorwerpen kunnen na verhitting door hameren of drukken slechts iets van vorm veranderd worden. Men verkrijgt het product door de voorwerpen na het gieten in gesloten kasten te gloeien met zuurstofhoudende ertsen, bijvoorbeeld ijzererts, dat dan door middel van de zuurstof de gebonden koolstof er aan onttrekt. Men verlaagt daardoor het koolstofgehalte van het ijzer. Door ruwijzer in kroezen om te

smelten onder toevoeging van afval- smeltijzer, staal bereid in de Thomas of Bessemerpeer dus met een laag koolstof gehalte, verkrijgt men bij voorbaat een gietproduct met een matig koolstofgehalte. De gegoten werkstukken, onderdelen van werktuigen en moersleutels, worden vervolgens op de hiervoor aangegeven wijze gegloeid. In sommige gevallen kan men op deze wijze het koolstofgehalte reduceren tot 0,3 – 0,8 %. Men spreekt daarom ook wel van smeedbaar gietstaal.

Perlitisch gietijzer

Perlitisch gietijzer wordt ook wel veredeld gietijzer genoemd. Het wordt verkregen door een bepaalde wijze van smelten en een juiste samenstelling, gevolgd door een bepaalde manier van afkoelen waardoor een homogene structuur van perliet en grafiet wordt verkregen. Voor de gemiddelde samenstelling geeft men op; ijzer met 3% koolstof (C), 2 % silicium (Si), 0,7 % (Mn) en 0,08 % fosfor (P). De treksterkte bedraagt ongeveer 30 kg/mm², het is daarmee ongeveer anderhalf keer sterker dan gietijzer. Dit metaal is goed bestand tegen stoten, slaan, wrijving (minder slijtage) en hoge temperatuur. Het gietijzer is fijn korrelig op de breuk en uitstekend geschikt voor zowel dunne als dikwandige gietstukken. Vanwege het relatief lage koolstofgehalte moet men daarom in de smeltoven staalschroot toevoegen en is een hoge smelttemperatuur nodig. Dit gietijzer kan dikwijls gietstaal vervangen. Men past het toe in wisselende samenstelling voor cilinderdeksels en de voeringen en zuigers van zuigerstoommachines en verbrandingsmotoren, alsmede voor kleppen en klepzittingen van machines en tandwielen.

Ni-Resist gietijzer

Het tegen zuren bestendige Ni-Resist gietijzer is naast het ijzer uit de volgende metalen samengesteld: ijzer met 2,8 – 3,1 % koolstof (C), 1,5 – 2 % silicium (Si), 0,7 – 1,2 % (Mn), 14 – 16 % Nikkel (Ni), 6 – 8 % koper (Cu) tot 6 % Chroom (Cr) en hoogstens 0,3 % fosfor (P). Het wordt gesmolten in kroezen of elektro-ovens en heeft een treksterkte van 20,5 – 30,5 kg/mm². Het materiaal is even goed mechanisch te bewerken als perlitisch gietijzer. Het wordt onder andere gebruikt voor cilindervoeringen in motoren en pompwaaiers bij gemalen.

Genitreerd gietijzer

Nitreren is een oppervlakte hardingsproces dat alleen kan worden toegepast bij met aluminium en chroom gelegeerde ijzer- en staalsoorten. Men gloeit het werkstuk gedurende twee dagen bij 500 °C in een ammoniakstroom. De ammoniak ontleeft in stikstof (N₂) en waterstof (H₂). De stikstof wordt door de oppervlaktelaag opgenomen onder de vorming van het harde aluminium- of chroomnitride. De aldus gevormde harde laag is 0,5 – 1 mm dik. Bijzonder geschikt voor het nitratie proces is gietijzer met de volgende samenstelling: ijzer met 2,75 % koolstof (C), 2,75 % silicium (Si), 0,75 % (Mn), 0,1% fosfor (P), 1,75 % aluminium (Al) en 1,75 % Chroom (Cr). Vergeleken met het gewone gietijzer bezit het genitreerde gietijzer een grotere treksterkte en elasticiteit terwijl het een zeer hard oppervlak heeft. Wil men plaatselijk een harde laag hebben dan moet men de zacht te houden vlakken van het werkstuk bedekken met een laag verf bestaande uit aluminiumpoeder en waterglas. Het genitreerde gietijzer wordt onder andere gebruikt voor cilindervoeringen en kleppen.

4.12.7 Staalbereiding

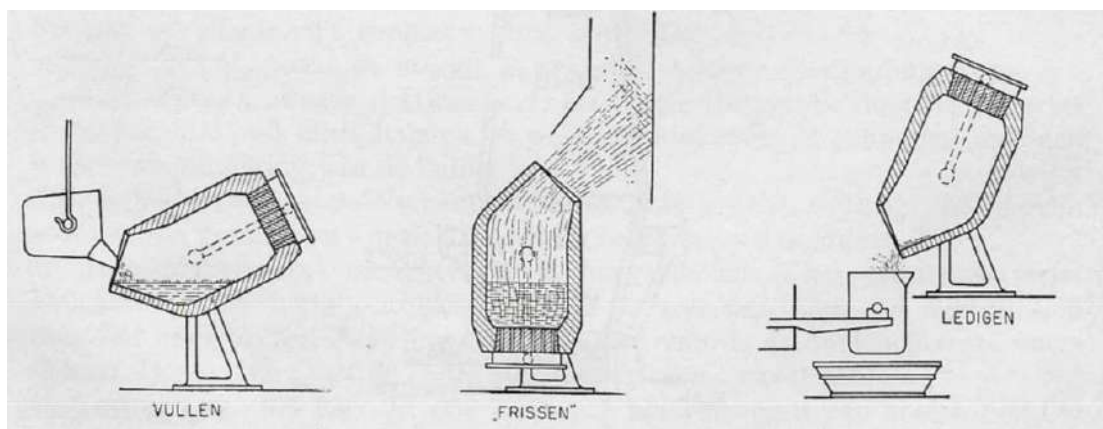
Door veredelen, verder raffineren en het toevoegen van nieuwe elementen, zijn we tegenwoordig in staat verschillende bijzondere staalsoorten te maken die nog beter zijn toegesneden op hun toepassing. Daarenboven heeft de steeds verder uitbreidende kennis van de bewerking en de bewerkingstechnieken van staal, en ook de vergrote toepassingsmogelijkheden doordat er betere gereedschappen beschikbaar zijn gekomen, enorm bijgedragen aan de verdere ontwikkeling van machines, apparaten en constructies.

Staalbereiding komt hierop neer dat het gehalte aan koolstof en andere stoffen in het ruwijzer meestal door verbranding zodanig geredigeerd wordt dat een product ontstaat dat aan een aantal te stellen eisen voldoet. Naar gelang de samenstelling van het ruwijzer en de aan het staal te stellen eisen kan men gebruik maken van de volgende hierna nader beschreven productieprocessen.

1. Het convertor-proces
 - Het Bessemerproces voor ruwijzer met weinig fosfor
 - Het Thomas-proces voor ruwijzer met veel fosfor
 - Het Oxystaalproces voor ruwijzer schroot en ijzererts
2. Het Siemens Martinproces
 - Het zure proces voor fosforarm ruwijzer en schroot
 - Het basische proces voor fosforrijk ruwijzer en schroot
3. Het elektro-oven proces
 - Het proces voor de bereiding van gelegerde staalsoorten

Het Bessemerproces

Het Bessemerproces (patent 1855) is genoemd naar de uitvinder Sir Henry Bessemer (1813-1898). Bij dit proces wordt fosforarm vloeibaar ruwijzer in een peervormige convertor gebracht. Converteren betekent omzetten. In dit geval wordt ruwijzer in ijzer met andere en betere eigenschappen omgezet.



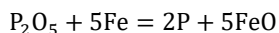
Staalbereiding in Bessemer converter

Na het vullen met vloeibaar ruwijzer uit de hoogoven wordt de converter rechtop gezet. Via gaten in de bodem wordt vervolgens lucht door het vloeibare ijzer geblazen waardoor koolstof tot koolmonoxide, silicium tot siliciumdioxide, zwavel tot zwaveldioxide en fosfor tot fosforpentoxide wordt verbrand. Koolmonoxide en zwaveldioxide zijn gasvormig en verdwijnen via de mond van de peer. Het siliciumdioxide komt in de gevormde slak terecht en wordt aan het eind van het proces afgeschonken. Het fosforpentoxide wordt bij dit proces niet verwijderd. Het Bessemer proces wordt dan ook alleen toegepast bij ruwijzer met veel silicium en weinig fosfor. Bij de verbranding van silicium komt zoveel warmte vrij, dat het ijzer in de peer vloeibaar blijft.

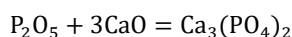
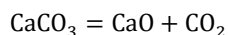
In een Bessemer converter kan geen kalksteen toegevoegd worden. De binnenbekleding van de converter bestaat uit het zure siliciumoxide (SiO_2), dat door de uit het kalksteen gevormde basische calciumoxide (CaO) zou worden aangetast. De binnenbekleding van de Thomasconverter bestaat uit het basische (gebrande) dolomiet (CaO.MgO)

Het Thomasproces

Het Thomasproces uit 1899 is genoemd naar de ontdekker van deze manier van staalbereiding Sidney Gilchrist Thomas. Het Thomasproces is een variant op het Bessemerproces en wordt toegepast wanneer het ruwijzer veel fosfor (P) bevat. Ook hier wordt van een peervormige converter gebruik gemaakt. De tijdens het doorblazen gevormde fosforpentoxide werkt oxiderend op het ijzer en wel op de volgende manier:



Om die reden wordt bij dit proces kalksteen toegevoegd en vindt de volgende omzetting plaats:



Het eindproduct van deze reactie komt in de slak terecht die in gemalen toestand een zeer goede kunstmeststof oplevert het zogenoemde thomasslakkenmeel.

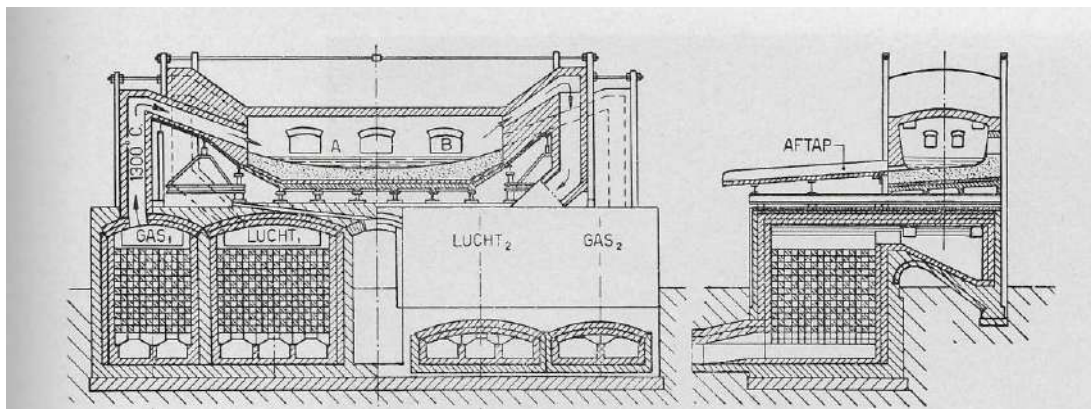
De binnenbekleding van de Thomasconverter bestaat uit het basische (gebrande)dolomiet (CaO.MgO) dat niet door de eveneens basische kalksteen wordt aangetast.

Het Siemens Martinproces

Het Siemens-Martin proces is genoemd naar de uitvinders Carl Wilhelm Siemens (1823-1883) en Pierre- Emile Martin (1824-1915). De oorspronkelijk door Siemens voor de glasindustrie ontworpen doosvormige oven of haard is door Martin gebruikt om staaafval en ruwijzer in vaste toestand te smelten. De oven bestaat in hoofdzaak uit een hoog gelegen haard waarin het materiaal wordt gesmolten en uit vier, lager, eronder of ernaast, gelegen kamers of regeneratoren waarin gas en verbrandingslucht wordt voorverwarmd. Voor het voorwarmen worden de ontwijkende hete gassen uit de oven gebruikt. De haard wordt van onderen door lucht gekoeld en is voorzien van een zure of basische bekleding al naar gelang er fosforarm of fosforrijk ruwijzer verwerkt moet worden.

Om de bekleding van de oven in stand te houden wordt afhankelijk van de soort bekleding op gezette tijden dolomiet (CaO.MgO) of kalksteen (CaCO_3) in de oven gebracht. De oven wordt via openingen aan de zijkant gevuld met staalafval en/of ruwijzer.

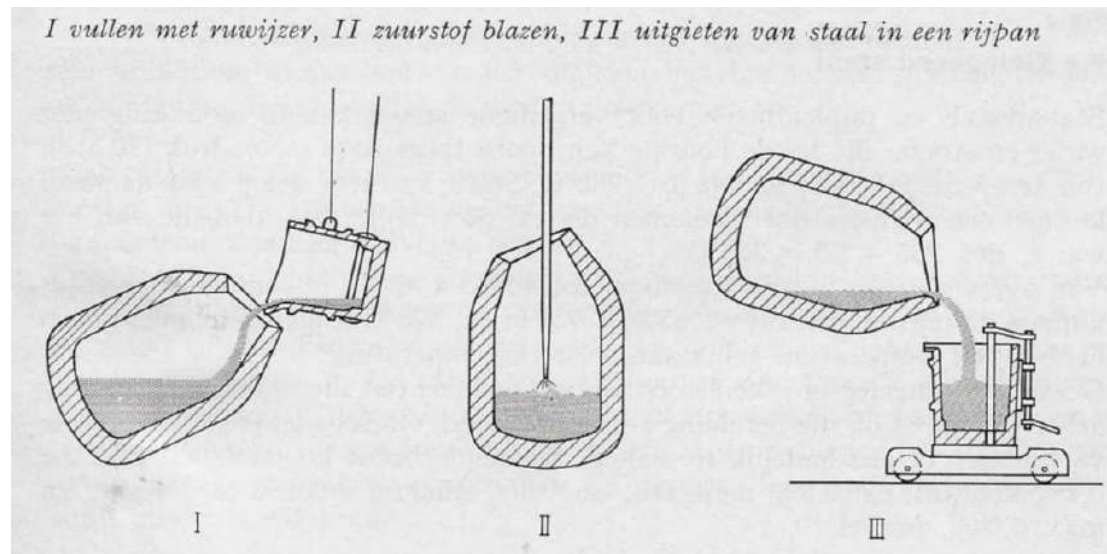
Bij het Siemens Martin proces wordt de oxidatie van de onzuiverheden in het ruwijzer bereikt door toevoeging van sterk geoxideerd ijzer, schroot genoemd. Dit schroot levert de zuurstof die nodig is voor het verbranden van de onzuiverheden in het ruwijzer maar levert daarbij tevens zuiver ijzer. In tegenstelling tot de hier voor beschreven processen wordt gebruik gemaakt van vaste materialen en moet de oven worden verhit om het ijzer te doen smelten alvorens het ontkolingsproces op gang komt.



Het SM staal heeft door het rustige verloop van het proces een homogene samenstelling en is daardoor van zeer goede kwaliteit. Het verdiende lange tijd de voorkeur voor het vervaardigen van machine-onderdelen en werd als ketelplaat voorgeschreven door het stoomwezen voor de vervaardiging van stoomketels. Ook giet men er grote gietstalen voorwerpen van.

Het Oxystaal-proces

Het staal bij het Oxystaal-proces wordt verkregen door zuivere zuurstof op vloeibaar ijzer te blazen. Bij dit proces wordt evenals bij het Bessemer- en Thomasproces gebruik gemaakt van een peervormige oven. De peer wordt gevuld met vloeibaar ruwijzer uit de hoogoven, schroot en ijzererts. De benodigde zuurstof voor dit proces wordt in de nabijheid van de hoogoven in een speciale fabriek geproduceerd. In Nederland is dit proces, dat het Siemens Martin proces grotendeels heeft verdrongen, in 1958 voor het eerst toegepast bij de toenmalige Kon. Hoogovens en Breedband in IJmuiden.



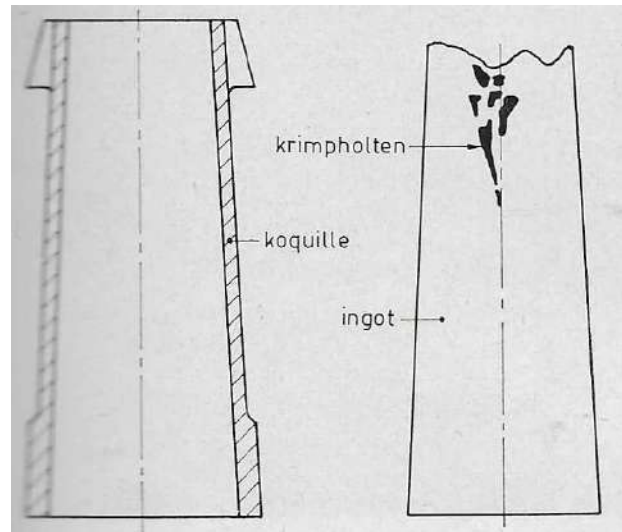
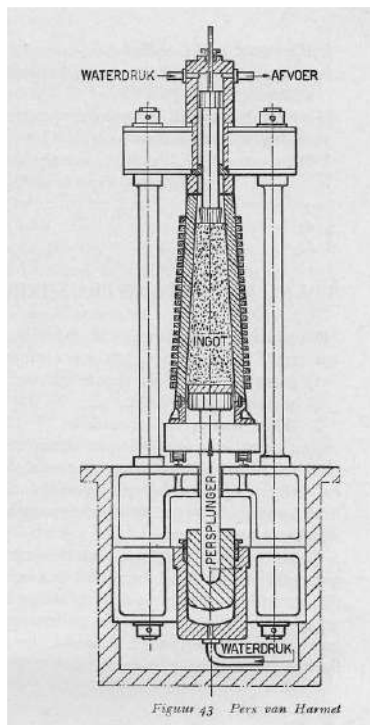
Elektro-oven proces

Elektrostaal is de naam voor staal dat vervaardigd is in een elektro-oven, ook wel Héroult-oven of vlamboogoven genaamd. Het proces werd in 1900 uitgevonden door Paul Héroult (1863-1914). Vanaf 1906 werd het op commerciële schaal toegepast in België en Duitsland. Vooral na 1914 nam de betekenis ervan toe. In Nederland werd elektrostaal sinds 1921 geproduceerd, en wel door Demka. Later was het Nedstaal dat het zogenoemde elektrostaal uit schroot vervaardigde.

Het belang van dit proces is dat als grondstof uitsluitend schroot kan worden gebruikt. Zodoende zijn elektrostaalfabrieken niet gebonden aan een hoogovenproces voor de productie van ruwijzer, maar kunnen ze als zelfstandige eenheden fungeren.

Ingots

Het staal verkregen volgens de hier voor beschreven methoden wordt in gietpannen afgetapt. Met deze pannen wordt het vloeibare staal naar een batterij coquilles (speciale kegelvormige gietvormen) getransporteerd waarin het materiaal wordt uitgegoten. De uiteindelijk gestolde ijzermassa noemen we een ingot. De coquilles zijn vierkant in doorsnede als de ingot (het gegoten stuk staal) bestemd is voor het walsen van stafmateriaal en rails; achtkant voor zware smeedstukken en rechthoekig voor plaatmateriaal. In de coquilles koelt het staal sterk af door de relatief koude omgevingslucht.



De ingots koelen het meest af aan de wanden van de coquilles waardoor krimpholtes ontstaan. Ook vindt er ontmenging plaats tijdens het stollen van het materiaal waardoor de onzuiverheden zich in de kern en in sterkere mate in de kop van de ingot verzamelen. Deze kop, soms een derde van de ingot, moet verwijderd en opnieuw gesmolten worden. Dit is de reden dat men in bepaalde gevallen met behulp van een bij de ingot passende pers de staal massa onder druk laat stollen. Omdat de kern, kop en voet van de ingot ook na het wegnemen van de verloren kop verschillen in samenstelling zal men dat terugvinden in de hiervan gewalste plaat. Men neemt voor de beoordeling van ketelplaat daarom een proefstaaf uit het midden van het kopeinde (hoog gehalte aan koolstof) en uit de rand van het voeteinde (laag gehalte aan koolstof). Bij een te grote (genormeerde) afwijking wordt de plaat afgekeurd. Als de ingots bestemd zijn voor walswerken dan plaatst men ze in zogenoemde doorwarmputten in afwachting van verdere bewerking.

4.12.8 Staal voor constructie- machine- en apparatenbouw

De stalen ingots kunnen gebruikt worden om er:

1. Grote smeedstukken van te vervaardigen zoals krukassen en scheepsankers
2. Platen van te walsen voor onder andere stoomvaten
3. Dikke staven van te maken door middel van walsen voor het uiteindelijk vervaardigen van profielstaal

De ingots worden al naar gelang de toepassing bewerkt door hameren, persen en walsen. Een wals-inrichting die wordt gebruikt voor het walsen van staal bestaat uit ten minste twee boven elkaar geplaatste gietijzeren of gietstalen walsrollen waarvan de draairichtingen tegengesteld zijn. Staan er verschillende walsrollen achter elkaar dan spreken we over een walsstraat. De rollen zijn in hoogte verstelbaar en worden via grote tandwieloverbrengingen aangedreven door elektromotoren

(vroeger stoommachines). De ingot wordt in dit stadium meestal als wals blok aangeduid en wordt in withete toestand uitgewalst tot de gewenste afmetingen. Tijdens het walsen worden de rollen gekoeld door water over de bovenste rol te laten stromen. Doordat dit water ook op het staal valt wordt de vorming van het zogenoemde hamerslag (walshuid) grotendeels voorkomen.

Bij het walsen ontstaat evenals bij smeedwerk een vezelachtige structuur in de lengterichting van het staal. Bij het walsen blijft de als gevolg van ontmenging opgetreden onzuivere kern van de ingot tussen de twee zuiverder lagen aanwezig.

4.12.9 Ketelmateriaal en vervaardiging van ketels

De keuze van het materiaal voor ketels is van groot belang. Ook bij de bediening en het onderhoud en reparaties van bestaande stoomtoestellen is het van belang te weten wat de overwegingen zijn geweest voor de toepassing van een bepaald materiaal en de beperkingen ervan te kennen. Gebruikte men vroeger toen de keteldruk niet hoger ging dan ca 15 kg/cm², gewone ongelegeerde staalsoorten bereid in de Siemens Martinoven, tegenwoordig met aanmerkelijk hogere keteldrukken en stoomtemperaturen past men staalsoorten toe, welke met andere metalen gelegeerd zijn.

De aanvankelijke drukstijging tot 20 a 25 kg/cm² die gedurende en na de Eerste Wereldoorlog toegepast werd om een hoger rendement van de stoomwerktuigen te bereiken, was oorzaak van veel onverklaarbare defecten aan stoomketels. De ketelbezitters beschuldigden de fabrikanten van slechte fabricage en constructie. De fabrikanten op hun beurt haalden verhaal bij de staalleveranciers en de walsers. In Amerika had men statistisch vastgesteld dat de meeste ketel defecten voorkwamen in streken waar voedingswater met een bepaalde chemische samenstelling werd gebruikt. De juiste conclusies hieromtrent ontbraken echter. Een meer wetenschappelijke behandeling van het vraagstuk bracht een aantal verschijnselen aan het licht die op de kwaliteit van het materiaal van invloed zijn. De belangrijkste hiervan zijn het zogenoemde verouderen en loogbrosheid ook wel caustieke brosheid genoemd.

Veroudering

Reeds in 1907 publiceerde Stromeyer een artikel, getiteld "The ageing of mild steel" oftewel het verouderen van zacht staal, waarin medegedeeld werd, dat uit buigproeven met ketelplaat was gebleken dat de eigenschappen met de tijd slechter werden. Nadere bestudering van dit verschijnsel toonde aan dat door vervorming de trekvastheid, dat wil zeggen de breukgrens en ook de vloeigrens, hogere waarden verkregen echter de taaiheid, bepaald aan de hand van de kerfslagwaarde, minder werd. De brosheid van het staal nam dus toe in de tijd.

De trekvastheid en de kerfslagwaarde worden vastgesteld met behulp van speciaal geprepareerde proefstaven en daarvoor ontworpen proefbanken. Deze inmiddels genormeerde beproevingen worden hierna nader uiteengezet.

Uit proeven bleek dat de zachte, ongelegeerde staalsoorten de verouderingsverschijnselen het sterkst vertoonden. Veroudering kan optreden door:

- het materiaal gedurende lange tijd onbelast te laten liggen
- het materiaal bij omgevingstemperatuur te vervormen en het daarna gedurende korte of lange tijd onbelast te laten liggen.

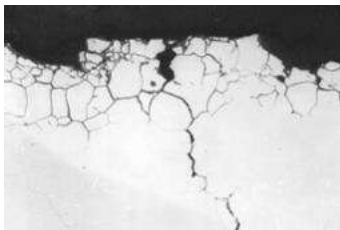
- het materiaal bij omgevingstemperatuur te vervormen en het daarna te verwarmen tot 200 a 300 °C. de veroudering treedt hierbij spoedig op.
- het materiaal te vervormen bij een temperatuur tussen 150 en 500 °C.

Blauwbroosheid

De onder punt 4 genoemde oorzaak leidt tot de zogenoemde blauwbroosheid en treedt onder andere op bij de fabricage van ketelfronten en het klinken onder hoge druk als het materiaal niet meer roodwarm is. Het plaatmateriaal maar ook de nagelkoppen vertonen dan haarscheurtjes en worden bros. Door uitgloeien kan het gevaar van blauwbroosheid vermeden worden. Blauwbroosheid wordt zo genoemd omdat het werkstuk na bewerking een donkerblauwe kleur vertoont.

Loogbroosheid of caustieke broosheid

Loogbroosheid is ook een vorm van veroudering van het materiaal en ontstaat als gevolg van de inwerking van stoffen met een basisch karakter of bepaalde zouten in het ketelvoedingswater.



Interkristallijne corrosie

Hierdoor ontstaan fijne scheurtjes tussen de kristallen van het materiaal, terwijl de kristallen waaruit het materiaal in hoofdzaak bestaat niet worden aangetast. Voorwaarde is dat het materiaal is belast tot boven de vloeigrens. Onbelast materiaal dat aan de inwerking van loog (sterke base) wordt blootgesteld, wordt niet bros. Voor het ontstaan van de scheurtjes is hoge temperatuur en druk, zoals in een stoomketels, zeer bevorderlijk.

4.12.10 Eisen aan ketelstaal

In gelijke tred met de hogere eisen die door de toename van keteldruk en temperatuur aan ketelmateriaal werden gesteld zijn nieuwe staalsoorten ontwikkeld en is men overgegaan tot het legeren ervan met nikkel (Ni), chroom (Cr), mangaan (Mg) en Molybdeen (Mo). Ook zien we bij pijpen en leidingen staallegeringen met koper (Cu) en aluminium (Al) en voor bevestigingsmateriaal vanadium (Va) toegepast.

Behalve de hogere vloeigrens en kruipgrens geeft toepassing van de gelegeerde staalsoorten bij plaatmateriaal het voordeel van kleinere wanddiktes, wat bij rompen kan betekenen dat ze nog geklonken kunnen worden en bij pijpen dat bij gelijke uitwendige diameter de doortocht voor water en stoom substantieel groter is. het grootste oppervlak van een cilinder zit immers aan de buiten omtrek.

Het hierna afgebeelde overzicht uit omstreeks 1935 van de staalfabrikant Krupp geeft een indruk van het scala aan staalsoorten en bijbehorende toepassingsmogelijkheden hiervan. Tegelijkertijd wordt hiermee aangegeven dat als er reparaties aan een stoomketel moeten worden uitgevoerd, zoals lassen of klinken, men er nauwelijks aan ontkomt, naast een gedegen inspectie en historisch onderzoek naar de aanvankelijk toegepaste materialen, ook een metallurgisch onderzoek uit te voeren.

Toepassing	Staalsoort	Aanduiding van Krupp	Gegarandeerde vloeigrens kg/mm ²					Kruipgrens kg/mm ²		
			20 °C	200 °C	250 °C	300 °C	350 °C	400 °C	500 °C	550 °C
Trommels en stoomhouders	Vloeistaal 3	A30	23	20	18	16	14	12	5	1,5
	Izett-staal 3	Izett 3								
	Vloeistaal 4	A40	24	21	19	17	15	12	5	1,5
	Izett-staal 4	Izett 4								
	Nikkelstaal	Nikkelstaal F	32	27,5	23,5	20,5	17,5	16	3,5	—
	Cr-Mo-staal	FK 663	45	36	33	30	27	20	9	2
	Cr-Ni-Mo-staal	P 644	45	40,5	38,5	36,5	32	22	11	2,5
	Cu-Ni-staal	—	40/45	—	—	—	—	—	—	—
Ketelpijpen	Vloeistaal 1/2	A 2/3 O of TA 20	20	17	15	13	10,5	12	5	1,5
	Izett-staal 1/2	Izett 1/2								
	Mo-staal	K 35	30	28	—	23	22	16	12	3
	Cu-Mo-staal	KU 33	28	28	25	23	22	16	12	3
Oververhitter-pijpen	Cr-Mo-staal	FK 335	32	27	26	24	22	16	15	7
	Cr-Si-Mo-staal	Ferotherm 6 (FF 6)	36	29	27	25	23	16	8	8
	Cr-Al-Mo-staal	Ferothermal 6 (FFP 6)	36	29	27	25	23	16	8	8
Oververhitter-kasten tot ca. 400° tot ca. 480°	Mo-staal	K 35	30	28	—	23	22	16	12	3
	Cu-Mo-staal	KU 33	28	28	25	23	22	16	12	3
	Cr-Mo-staal	FK 335	32	27	26	24	22	16	15	7
	Cr-Mo-staal	FK 335	32	27	26	24	22	16	15	7
	Cr-Ni-Mo-staal	P 644	45	40,5	38,5	36,5	32	22	11	2,5
Leidingen voor oververh. stoom	Mo-staal	K 35	30	28	—	23	22	16	12	3
	Cu-Mo-staal	KU 33	28	28	25	23	22	16	12	3
	Cr-Mo-staal	FK 335	32	27	26	24	22	16	15	7
Bouten voor oververhitte-stoomleidingen	Cr-Mo-Va-staal	FKM 54	95	75	68	60	50	30	8	2,5
	Cr-Ni-Mo-staal	EFK 2338	60	55	53	48	42	40	20	5

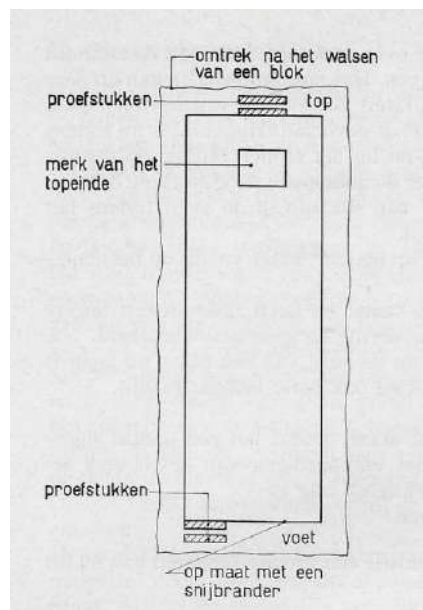
(Cr = chroom, Mo = molybdeen, Ni = nikkel, Cu = koper, Al = aluminium en Va = vanadium.)

Staalsoorten en toepassingsmogelijkheden

4.12.11 Het keuren van stoomketelmaterialen

Een stoom- of damptoestel dat in werking is gebracht, kan gevaar opleveren voor personen in de omgeving en ook schade aan eigendommen veroorzaken. De overheid heeft daarom het gebruik wettelijk geregeld en oefent toezicht uit op de vervaardiging en het gebruik van deze toestellen. De dienst die hiermee tot 1994 was belast heette het inmiddels geprivatiseerde Stoomwezen. Het stoomwezen als zodanig bestaat niet meer, echter de oude wet en regelgeving die is samengevat in de stoomwet en stoombesluit worden door de nieuwe toezichthoudende instanties bij installaties van voor 1994 nog steeds van toepassing verklaard. Materialen waarvan de oude nog bestaande stoomketels en andere stoomtoestellen in poldergemalen werden gemaakt moesten voldoen aan de eisen zoals gesteld door het stoomwezen. Bij het ontwerpen van een ketel diende de constructeur dus rekening te houden met de eigenschappen die de te toe te passen materialen moesten hebben. Deze eigenschappen zijn ook van belang bij het latere onderhoud en het gebruik van het stoomtoestel. Voor het vaststellen van die eigenschappen neemt men op een aantal plaatsen proefstukken en vervaardigt daaruit genormeerde proefstaven die vervolgens aan verschillende proeven worden onderworpen. Van ketel- platen neemt men proefstukken haaks op de walsrichting uit het midden van het kopeinde en uit de zijkant van het voeteinde of uit de afgesneden stukken die tot de bedoelde einden hebben behoord.

Voor het beoordelen van de las van de langsnaad van de romp, neemt men enige proefstaven van de speciaal hiervoor aangelaste plaatdelen. Proefstaven van gietijzer worden bij elke gieting afzonderlijk gegoten.



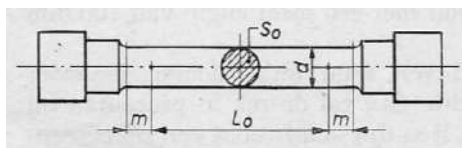
Plaats proefstukken ketelplaat

De voornaamste proeven zijn de:

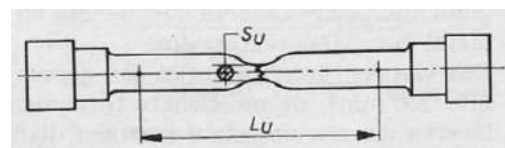
- **Trekproef.** Deze dient voor het bepalen van de treksterkte, de rek, de vloeigrens, de 0,2 % rekgrens en de insnoering.
- **Buigproef.** Deze dient voor staal voor het bepalen van de vervormbaarheid en bij gietijzer voor het vaststellen van de maximale doorbuiging en de buigsterkte.
- **Kerfslagproef.** Deze dient ter bepaling van de kerfslagwaarde, een maat voor de broosheid.

Trekproef

Bij de trekproef wordt een proefstaaf in een trektoestel onder de invloed van een toenemende kracht gelijkmatig gerekt waarbij de doorsnede over de gehele lengte in het begin weinig en daarna over een deel van de lengte sterk afneemt. Het rekken wordt voortgezet tot de staaf breekt. Het toestel geeft aan hoe groot de maximale kracht is geweest om de staaf te doen breken. De verlenging en de bijbehorende kracht worden tijdens de proef opgetekend. Uit de maximale belasting en de oorspronkelijke doorsnede van de proefstaaf wordt de treksterkte berekend. De treksterkte wordt uitgedrukt in kg/mm^2 met de aantekening dat ze bij kamertemperatuur is bepaald.



Trekproefstaaf van staal

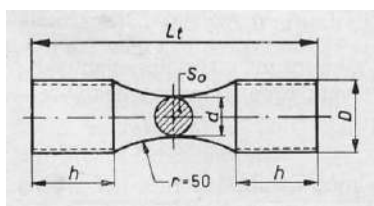


Trekproefstaaf na beproeving

Er is reeds eerder opgemerkt dat bij het stollen van het uitgegoten materiaal in de coquille ontmenging optreedt en de samenstelling van de ingot niet overal gelijk is. Met name het koolstof gehalte in de kop, ook al is deze gesneld, is hoger dan aan het voeteind. Dit heeft als gevolg dat het plaatmateriaal aan het bovineinde een grotere treksterkte vertoont dan aan het ondereinde. Bij de sterkteberekeningen van een ketel gaat men daarom uit van de zwakste schakel dus de laagste waarde.

Bij taaie materialen ziet men voor het breken een insnoering van de proefstaaf ontstaan. Na het breken worden de breukvlakken tegen elkaar gehouden en wordt de vergroting van de afstand tussen de twee meetpunten opgemeten. De vergroting van de meetlengte bij breuk, uitgedrukt in procenten van de oorspronkelijke meetlengte, is de rek. Hoe groter de rek des te taaier is het materiaal. Een grote rek gaat gepaard met een lage treksterkte.

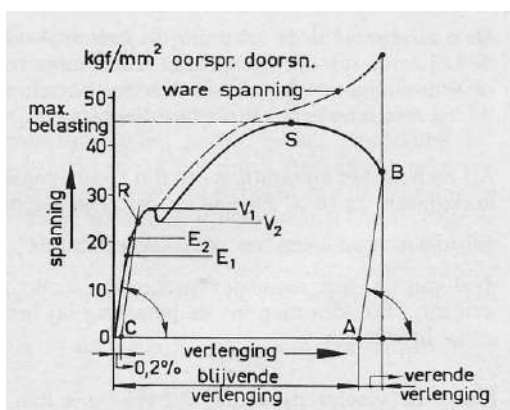
Voor het bepalen van de treksterkte van gietijzer gebruikt men een korte dikke proefstaaf die plaatselijk een kleinere doorsnede heeft zodat van te voren vast staat waar hij zal breken. De kans



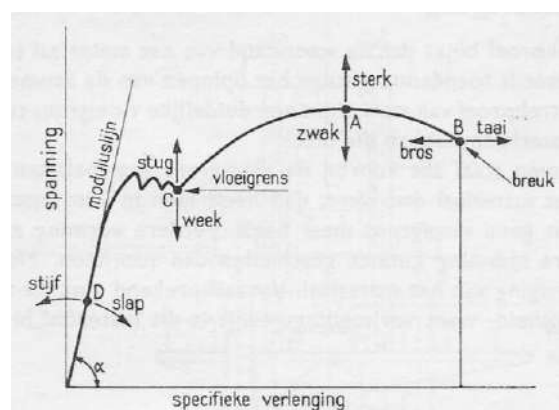
dat zich in die kleinste doorsnede een gietfout bevindt is daardoor zeer klein. Op deze manier bepaalt men de werkelijke materiaalsterkte en niet die van een toevallige zwakke plek. De rek van gietijzer is zo gering dat zij met een trekproef niet kan worden bepaald.

Trekproefstaaf van gietijzer

Een trekstaaf wordt meestal in een met vloeistofdruk werkend trektoestel aan een gelijkmatig toenemende belasting onderworpen tot hij breekt. De belastingtoename bedraagt circa 1kg/mm^2 . De kracht en de verlenging worden doorlopend gemeten en door het toestel in een diagram opgetekend.



Diagrammen van trekproeven



Hier boven is op twee manieren een dergelijk diagram voor staal weergegeven. Hiermee wordt aangegeven wat er met de proefstaaf in de verschillende stadia gebeurt en wat dit in eenvoudige bewoording betekent voor de kwaliteit van het materiaal . Aanvankelijk neemt de verlenging recht

evenredig toe met de belasting zodat er een nagenoeg rechte schuin oplopende lijn ontstaat. Er komt een moment dat de rek meer dan evenredig toeneemt, de lijn buigt dan af naar rechts. Dit punt E_1 waar de rek een kleine waarde bijvoorbeeld 0,01 % meer toeneemt dan de spanning wordt de *evenredigheidsgrens* genoemd. Deze spanning wordt uitgedrukt in kg/mm^2 van de oorspronkelijke doorsnede. Zolang de belasting betrekkelijk laag is, zal na het wegnemen daarvan de proefstaaf naar de oorspronkelijke lengte terugkeren. De rek is dan nog verend of elastisch.

Als men de belasting telkens wegneemt en tragsgewijs groter maakt zal op een gegeven moment de staaf niet meer terugkeren naar zijn aanvankelijke lengte bijvoorbeeld in punt E_2 . Van de totale rek die bestond bij de laatst uitgeoefende kracht verdwijnt dus een deel na het wegnemen van de belasting, de verende rek. terwijl het andere deel, de blijvende of plastische rek, aanwezig blijft. Punt E_2 noemen we de *elasticiteitsgrens* die evenals de evenredigheidsgrens wordt uitgedrukt in kg/mm^2 van de oorspronkelijke doorsnede. De evenredigheidsgrens valt dikwijls samen met, of ligt ook wel onder de elasticiteitsgrens.

Laat men na het passeren van de elasticiteitsgrens de belasting verder toenemen dan zal bij ongelegeerde staalsoorten op een gegeven moment de lengte van de staaf vrij sterk toenemen terwijl de belasting gelijk blijft of zelfs afneemt. Men noemt dit verschijnsel vloeien en het punt waar dat gebeurt de *vloei grens*. Ook de vloei grens wordt uitgedrukt kg/mm^2 van de oorspronkelijke doorsnede waarbij de belasting voor het eerst niet toeneemt. Dit punt wordt in de grafiek bij V_1 aangegeven.

Van ongelegeerde staalsoorten wordt de vloei grens bij 20 °C op 5/9 van de treksterkte bij die temperatuur gehouden, tenzij uit proeven een hogere waarde is gebleken. Staalsoorten met treksterkten boven de 60 kg/mm^2 hebben geen duidelijk waarneembare vloei grens. Voor die staalsoorten maar ook voor zacht staal is het gebruikelijk de 0,2 % rekgrens te bepalen. De 0,2% rekgrens is de spanning in kg/mm^2 oorspronkelijke doorsnede waarbij de blijvende rek 0,2 % bedraagt. Deze meer technische grens kiest men omdat deze makkelijker is te bepalen, dan wel bij benadering op de volgende manier grafisch uit het diagram is af te leiden.

Als men uit het breekpunt B een lijn evenwijdig aan OE_1 trekt dan snijdt deze lijn de basis in A, dan is OA op schaal de blijvende rek die aan de gebroken staaf gemeten is. Is deze bijvoorbeeld 24 % dan vertegenwoordigt 0,2 % rekgrens $0,2/24 = 1/120$ deel van het lijnstuk OA aangegeven bij punt C. Trekt men door dit punt een lijn evenwijdig aan OE_1 dan snijdt deze de grafiek in R en kan op de verticale as de belasting worden afgelezen. Zowel de vloei grens als 0,2 % rekgrens worden aangeduid met rekgrens.

Na het passeren van de vloei grens neemt de weerstand tegen vervorming minder sterk toe en buigt de trekkromme steeds meer naar rechts totdat een bijna horizontaal deel wordt beschreven. Het hoogste punt S vertegenwoordigt de maximale belasting aan de hand waarvan de treksterkte wordt berekend. Aanvankelijk wordt de staaf over de volle lengte dunner, echter bij de maximale belasting concentreert deze contractie zich op een punt en vindt insnoering plaats en rekt de staaf zelfs bij een verminderde belasting. Het diagram geeft dus niet de werkelijke spanning in het materiaal weer

omdat de belasting steeds gedeeld wordt door de originele doorsnede. Tenslotte breekt de staaf bij punt B. De werkelijke spanning in het materiaal, hier weergegeven door de stippellijn, is te berekenen door de spanning te delen door de bijbehorende kleinste doorsnede.

Invloed temperatuur

De treksterkte van ongelegeerd staal neemt bij een temperatuurverhoging van 20° tot ongeveer 200 eerst toe, Bij een verdere verhoging in temperatuur neemt zij af. Bij sterkteberekeningen brengt men daarom bij een metaal temperatuur tot 214 °C de minimumwaarde van de treksterkte bepaald bij 20 °C in rekening. Bij een metaal temperatuur t° boven de 214 °C moet de treksterkte met de uitkomst van onder- staande formule worden vermenigvuldigd.

$$1.2 \left\{ 1 - \left(\frac{t}{525} \right)^2 \right\}$$

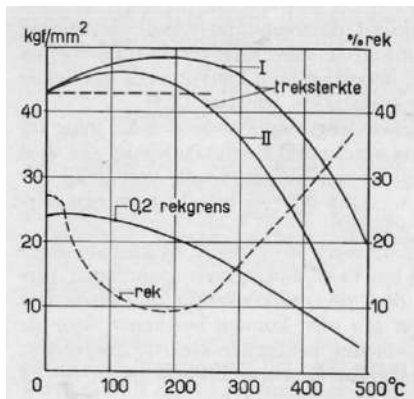
Dat wil zeggen dat bij 250, 300 en 350 °C moet met respectievelijk 93, 81, en 66% van de treksterkte bepaald bij 20 °C gerekend worden.

Bij de temperatuur, die een ketel of vat tijdens het bedrijf aanneemt is de rekgrens altijd lager dan tijdens de trekproef bij 20 °C. Deze rekgrens die als maatstaf voor de sterkte berekeningen geldt wordt gewoonlijk berekend aan de hand van de onderstaande formule. De metaaltemperatuur wordt geacht afhankelijk van de mate van verhitting 25 °C tot 75 °C hoger te zijn dan van het water of de stoom waarmee het in contact is. Is de rekgrens (S_v) bij 20 °C, dan is de rekgrens bij t° (S_{vt}) te berekenen met:

$$S_{vt} = S_v \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{t}{525} \right)^2 \right\}$$

Bij 200, 300, 400 °C is de rekgrens nog respectievelijk 85, 67, en 41% van die bij 20 °C.

In de hier na volgende grafiek is de invloed van de materiaal temperatuur op de treksterkte en de rek weergegeven van koolstofstaal. Bij I is het beproefde verloop weergegeven. Bij II stelt die het verloop voor op basis van de berekende grondslagen.



Invloed temperatuur op rek en treksterkte

Uit de beschrijving en het weergegeven verloop kan het volgende worden geconcludeerd.

- Dat de treksterkte eerst toe- en daarna afneemt
- Dat de rekgrens aanvankelijk langzaam, bij hoge temperaturen snel afneemt
- Dat de bij 20 °C bepaalde rekcijfers maar weinig zeggen over de belangrijke eigenschappen van staal bij bedrijfstemperatuur

Kruip

De besproken trekproef wordt bij een temperatuur van ca 20 °C genomen en duurt slechts een paar minuten. De toelaatbare spanning en de rek- of vloeigrens worden dus bepaald uit waarnemingen, die slechts op een zeer korte tijdsduur betrekking hebben. Als staal bij een temperatuur hoger dan 350 °C wordt belast, moet men echter rekening houden met de duur van de belasting. Bij een duurbelasting bestaat de mogelijkheid dat het staal, ook al wordt het belast onder de rekgrens, zal blijven rekken, waardoor ongewenste vervorming en zelfs breuk kan optreden. Dit voortgaande rekken onder constante belasting noemen we het kruipen van het materiaal. Met het oog op deze verschijnselen heeft men het begrip kruipgrens ingevoerd. Men kan hieronder verstaan de spanning waarbij de gemiddelde reksnelheid gedurende een zeker tijdsverloop een bepaald bedrag niet overschrijdt. Hiervoor wordt een reksnelheid van 0,0015 % van de gemiddelde meetlengte per uur gehanteerd die is waargenomen tussen het 25^e en 35^e uur van de beproeving.

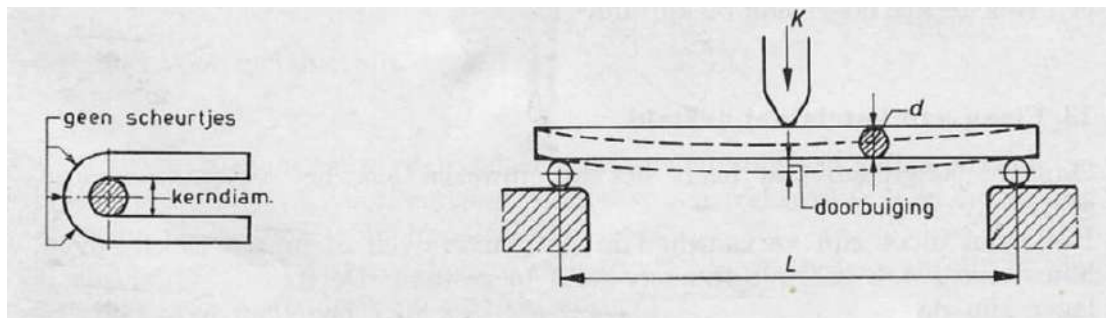
Indien verwacht kan worden dat het materiaal onder bedrijfsomstandigheden zal kruipen, berekent men de dikte van het plaatmateriaal met de laagste van de volgende waarden.

- De gemiddelde spanning die een verlenging van 1% veroorzaakt na 100.000 uur;
- 4/5 van de minimum spanning, die breuk veroorzaakt na 100.000 uur;
- 2/3 van de gemiddelde spanning, die breuk veroorzaakt na 100.000 uur.

Buigproef

Een buigproef dient om de vervormbaarheid van staal in koude toestand te leren kennen. Hiertoe wordt een glad bewerkte proefstaaf met een rechthoekige doorsnede genomen uit de dwarsrichting van de plaat, dus haaks op de draad van het staal. Deze buigt men koud om een ronde kern tot de einden evenwijdig aan elkaar staan. De middellijn van deze kern is recht evenredig met de dikte van de proefstaaf en kleiner naarmate de treksterkte van de staaf kleiner is. Zo is bijvoorbeeld voor een proefstaaf met een treksterkte tussen de 35 - 42 kg/mm² de diameter van de kern de helft van de proefstaaf dikte. Bij een treksterkte tussen de 41 - 50 kg/mm² is de kern even dik, terwijl bij een treksterkte tussen de 46 - 54 kg/mm² een kerndiameter van anderhalf keer de dikte van de proefstaaf wordt voorgeschreven.

Na afloop van de proef mogen er aan de buitenzijde van de proefstaaf met het blote oog geen scheurtjes te zien zijn.



Buigproef voor staal

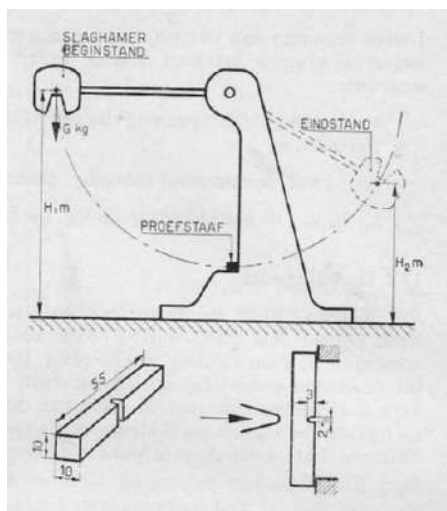
Buigproef voor gietijzer

Van gietijzer neemt men een in de einden ondersteunde ronde proefstaaf die door een in het midden aangrijpende kracht, wordt gebogen tot deze breekt. Daarbij worden de kracht en de doorbuiging gemeten. De grootste doorbuiging is een maat voor de taaierheid. Uit de kracht nodig voor het breken kan men de spanning berekenen die in de buitenste vezel heeft geheerst op het moment van breken. Deze spanning is voor het onderling kunnen vergelijken van de verschillende gietijzersoorten in relatie tot hun toepassing. Hierbij moet gedacht worden aan bijvoorbeeld de zuigerveren van de stoommachine.

Kerfslagproef

Met de kerfslagproef tracht men inzicht te krijgen in het gedrag van het materiaal onder schokkende belasting. Hierbij gebruikt men een vierkant proefstaafje met een doorsnede van 10 x 10 mm, in het midden voorzien van een kerf met een voorgeschreven afmeting. Het proefstaafje wordt bij de proef met de zogenoemde Charpy-hamer ondersteund in twee punten. Daarna wordt het stukgeslagen met deze slaghamer. De arbeid verricht voor het breken van de proefstaaf wordt uitgedrukt in kgm/cm² doorsnede ter plaatse van de kern. Dit noemt men de kerfslagwaarde. Men vindt deze waarde uit:

$$\text{Gewicht hamer} \times (H_1 - H_2) \text{ kg.m/cm}^2$$



Van ketelstaal is de kerfslagwaarde hoger naarmate de treksterkte lager is of anders uitgedrukt de rek groter is en het materiaal taaier of minder broos. Deze proef waaraan men thans meer waarde hecht dan aan de buigproef wordt vooral toegepast bij de beoordeling van laswerk en gelegeerde staalsoorten met een treksterkte groter dan 50 kg/mm².

Kerfslagproeftoestel

Ketelstaal eisen

Omtrent onder andere ketelplaat schreef het toenmalige stoomwezen in het midden van de vorige eeuw bepaalde eisen voor. Deze eisen zijn gebaseerd op voortschrijdend inzicht, ervaring en technologische ontwikkelingen met name met betrekking tot de staalbereiding en de fabricage

technieken van stoomtoestellen in de loop der tijd, zoals de overstap van geklonken naar gelaste ketels. In voorkomende gevallen, bijvoorbeeld bij een reparatie aan oude stoomketels, is het dan ook raadzaam om de geldende regelgeving uit de tijd van de fabricage van het stoomtoestel in acht te nemen.

Het staal moet zijn vervaardigd in de Siemens Martens-oven of in een elektro-oven. Ook het gebruik van het zogenoemde oxystaal is toegestaan. De treksterkte mag echter in alle gevallen niet lager zijn dan 35 kg/mm² en in het algemeen niet hoger dan 56 kg/mm². Het verschil tussen de hoogste en de laagste treksterkte mag bij eenzelfde plaat ten hoogste bedragen:

Vershil in treksterkte in kgf/mm ²	Bij een lengte van de plaat in m
5	≤ 5
6	5...10
7	≥ 10

Vershil hoogste en laagste treksterkte

De vereiste rek, bepaald met een genormeerde dp5 proefstaaf en de kerfslagwaarde zijn afhankelijk gesteld volgens de hierna volgende tabel.

Treksterkte in kgf/mm ²	35 — 42	41 — 50	46 — 54
Rek in % op dp ₅	32 — 28	28 — 24	24 — 21
Kerfslagwaarde in kgfm/cm ²	8 — 6,5	7 — 5	5,5 — 4,5

Treksterkte versus rek en kerfslagwaarde

Een aantal beproevingseisen, van het toenmalige stoomwezen uit de zestiger jaren van de vorige eeuw, voor genormaliseerde dat wil zeggen gegloeide soorten gewalst staal voor stoomtoestellen zijn aangegeven in de volgende tabel. Voor delen die moeten worden gelast en niet spanningsvrij kunnen worden gegloeid, zoals bijvoorbeeld bij reparaties geeft men de voorkeur aan staal met een treksterkte niet hoger dan 45 kg/mm². Gebruik van staal met een hogere treksterkte wordt toegestaan mits na het lassen het geheel spanningsvrij wordt gegloeid.

	Ongelegeerd staal		Laag gelegeerd staal
Treksterkte in kgf/mm ²	35 tot 42	41 tot 50	46 tot 54
Rek in % op dp ₅	32 tot 28	28 tot 24	24 tot 21
Rekgrens (minimaal) in kgf/mm ²	19	23	26 en $5/9 \times S_B$
Kerndiam. bij buigproef	0,5a	a	1,5a
Kerfslagwaarde in kgfm/cm ²	8 tot 6,5	6,5 tot 5	5,5 tot 4,5
% koolstof	~0,12	~0,18	0,18 tot 0,21
% mangaan	0,80	0,80	0,9
% silicium	0,40	0,40	0,15 tot 0,30
% fosfor max.	0,04	0,04	0,04
% zwavel max.	0,04	0,04	0,05
% molybdeen	—	—	0,4 tot 1,0
% chroom	—	—	1 tot 2,5
Geschikt voor metaaltemp.	375°C	375°C	500°C

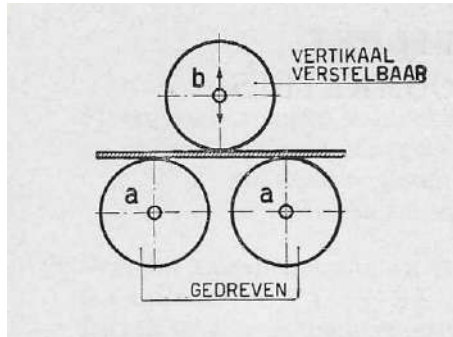
Beproevingseisen Stoomwezen genormaliseerd staal

4.12.12 Bewerkingen van ketelplaat

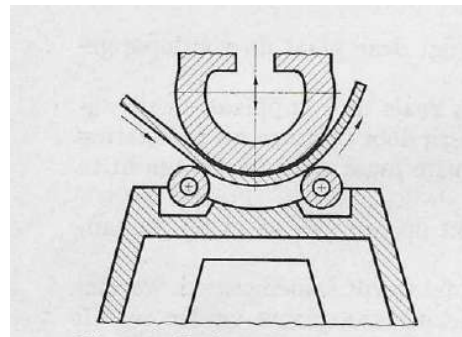
Rompen

Door middel van walsen ontstaat er uit het walsblok een plaat van enigszins onregelmatige rechthoekige vorm. Door middel van knippen, snijbranden, tegenwoordig plasma snijden, krijgt de plaat de voorlopige gewenste afmeting voor het betreffende ketel onderdeel. Platen die niet hoeven te worden geflenst, zoals de romp of de vlamkast van een Schotse ketel, brengt men op de juiste maat door middel van schaven. Daar waar klinknaden gekookt moeten worden om ze waterdicht te krijgen, wordt de plaatkant meteen onder de juiste hoek geschaafd. Plaatkanten die men wil lassen worden bewerkt op één van de later in dit hoofdstuk aangegeven wijzen.

De platen waaruit een romp wordt samengesteld worden koud gebogen. Hierbij maakt men gebruik van een wals die bestaat uit drie rollen. Van de drie rollen worden de onderste twee zo dicht mogelijk bij elkaar in vaste stoelen ondersteund en met behulp van tandwielen op de assen door een stoommachine of tegenwoordig een elektromotor aangedreven. De bovenste rol is in hoogte verstelbaar en oefent een zekere druk uit, die de plaat, terwijl ze wordt voortbewogen, gelijkmatig buigt.



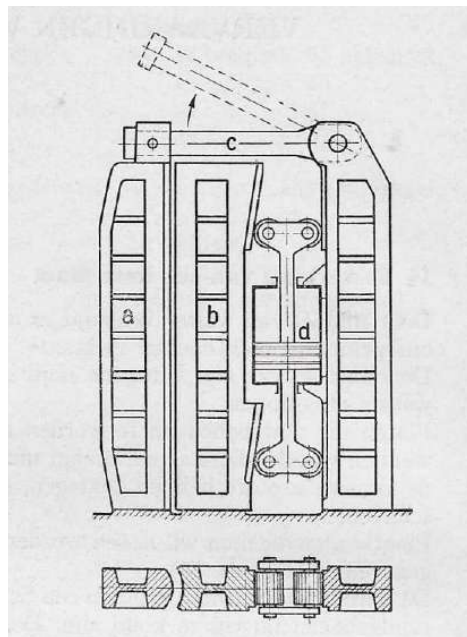
Schema platenbuigmachine



Schema buigmachine grote rompen

Afhankelijk van de gewenste kromming wordt de plaat een of meerdere keren doorgevoerd. De bovenrol kan worden gelicht waarna het uit een stuk bestaande wals deel zijdelings verwijderd kan worden. Het begin en het eind van de plaat krijgen op deze manier niet de juiste kromming en worden daarom met een pers, voordat met het walsen wordt begonnen, in de juiste vorm gebracht. De pers bestaat uit een door waterdruk bewogen stempel en een holle matrijs. Men gebruikt hier water in plaats van het hydraulische systeem omdat eventueel gemorste olie de plaat zou vervuilen. Olie belemmert de warmtedoorgang en kan bij de eenmaal in bedrijf zijnde ketel tot plaatselijke oververhitting en daardoor schade leiden. Ook bij de verspanende bewerkingen van de ketel is het gebruik van olie niet toegestaan.

Een andere manier van het vormen van de romp is die met behulp van de hieronder afgebeelde buigmachine. Deze buigmachine, die voornamelijk wordt ingezet bij de vervaardiging van



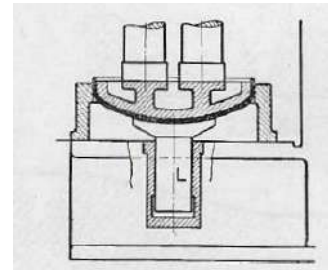
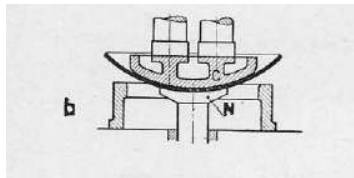
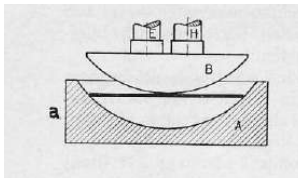
Buigmachine voor zware rompen

dikwandige ketelrompen, bestaat uit een vaste(a) en een losse balk(b) waarvan de naar elkaar toegekeerde zijden respectievelijk hol en bol zijn. De te vormen romp staat verticaal op in de grond geplaatste rollen. Door het toelaten van water onder hoge druk onder de zuiger (d) gaat deze omhoog. De losse balk (b) wordt dan door de aan de zuigerstang bevestigde rollen opzij gedrukt. Het gedeelte van de plaat dat zich tussen de balken bevindt wordt zodoende gebogen. De aanvankelijk vlakke plaat wordt na elke buigsessie een balkbreedte opgeschoven totdat de gewenste ronding is verkregen. Met een dergelijke pers kunnen ook de einden van de platen worden gebogen en de strippen voor de klinkverbinding in de juiste vorm gebracht. Anders dan bij walsen zal bij deze bewerkingmethode de romp facetten vertonen. Een uit één plaat gevormde rompring kan na het opklappen van het juk aan bovenzijde uit de buigmachine worden genomen.

Met een dergelijke pers kunnen ook de einden van de platen worden gebogen en de strippen voor de klinkverbinding in de juiste vorm worden gebracht. Anders dan bij walsen zal bij deze bewerkingsmethode de romp facetten vertonen. Een uit één plaat gevormde rompring kan na het opklappen van het juk(c) aan de bovenzijde uit de buigmachine worden genomen.

Fronten

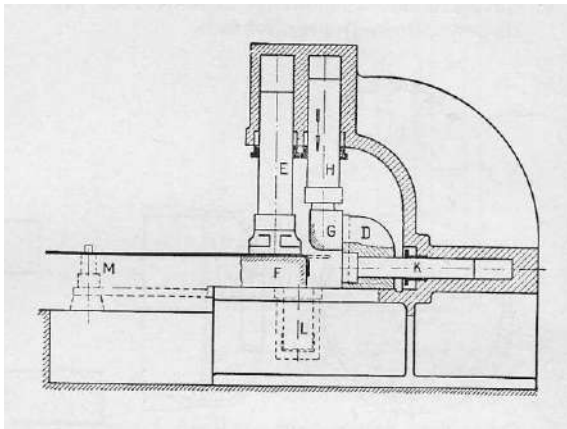
Bolle of halfbolle fronten van een stoomketel kunnen worden vervaardigd door middel van persen. Men gebruikt hiervoor hydraulisch bewogen stempels en een aantal verschillende matrijzen.



Persen ketelfronten

Een rond gesneden plaat waarvan de doorsnede iets groter is dan de ontwikkelde middellijn van het front wordt verhit tot circa 900 °C . Vervolgens wordt deze in een bolvormige matrijs gelegd en met het bijbehorende stempel in de juiste vorm gedrukt. Hierbij rekt het materiaal in het midden en neemt de dikte iets af. Na deze vervorming wordt de plaat opnieuw verhit en vervolgens tussen twee stempels geklemd en door een ringvormige matrijs gedrukt. Bij deze behandeling wordt de flens gevormd. Bij grote wanddikten geeft men de flens de gewenste buitendiameter door het front door steeds kleinere ringen te persen.

Vlakke fronten zoals toegepast bij Schotse ketels worden gemaakt met behulp van een zogenoemde flensmachine. Van te voren wordt een cirkelvormige plaat in zijn geheel of bij grote



afmetingen gedeeltelijk op gloeihitte gebracht en op het zogenoemde zadel van de pers gelegd. In het midden van de plaat is een gat geboord waarmee deze op de pers wordt gecentreerd. De plunjer boven het zadel houdt de plaat tijdens het flenzen in positie. De plaat wordt in een rondgaande beweging om de centerpen stukje bij beetje door de verticale cilinder gebogen en uiteindelijk door de horizontale cilinder haaks tegen het zadel gedrukt. Het plaatmateriaal wordt bij deze bewerking gestuikt.

Flensmachine

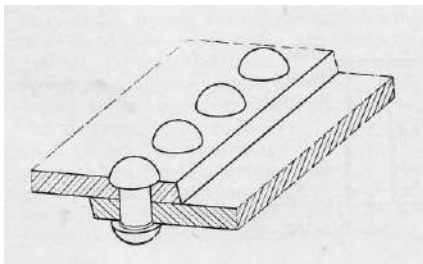
De te vormen plaat wordt telkens voor een deel verhit. Ten gevolge van plaatselijke afkoeling en door de vervorming ontstaan er spanningen in het materiaal, die na afloop van de bewerking worden opgeheven door de plaat zorgvuldig uit te gloeien. Dit uitgloeien wordt behandeld bij het onderdeel gelaste ketelconstructies.

4.12.13 Plaatverbindingen

De verbindingen van de platen van een stoomketel moeten in de eerste plaats sterk genoeg zijn om de optredende krachten op te kunnen nemen. Klinkverbindingen moeten bovendien stoom en waterdicht zijn, ook bij vormveranderingen die tijdens het opstoken of bedrijf van een ketel ontstaan. Een plaatverbinding, veelal naad genoemd, kan men tot stand brengen met klinknagels en sinds de tweede helft van de vorige eeuw door middel van lassen.

Klinknaadsoorten

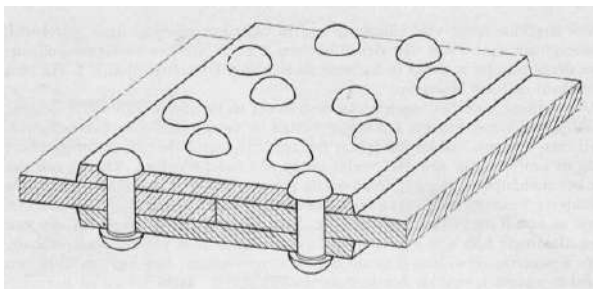
De klinknaden die bij een stoomketel voorkomen worden onderscheiden in lapnaden en stripnaden met de verbijzondering dat in de apparatenbouw bij stripnaden altijd aan beide zijden een strip wordt



aangebracht en we dan spreken van een dubbele stripnaad. Bij een lapnaad liggen de plaatenden een stukje over elkaar. De over elkaar liggende plaatdelen noemt men de lappen. In deze lappen worden de nagelgaten geboord en op de hierna beschreven wijze vervolgens de klinknagels aangebracht.

Lapnaad

Bij stripnaden worden de plaatenden stuik tegen elkaar aangebracht. Vervolgens wordt aan elke zijde een strip aangebracht. Bij de langsnaden van stoomketels worden altijd dubbele stripnaden toegepast. Dit is om te voorkomen dat bij belasting de verbinding zich strekt en de nagels, voornamelijk de nagelkoppen, op trek worden belast en breken. Door de plaat en de strippen worden in een bepaald patroon de nagelgaten geboord en op de hierna beschreven wijze de klinknagels aangebracht. Nadat de bewerkte platen en de bijbehorende strippen in de juiste vorm en positie zijn gebracht en men het geheel met bouten en ketelklemmen in een aantal iets te klein geboorde nagelgaten heeft vastgezet wordt de rest van de eerder afgetekende nagelgaten voorgeboord. Met hecht-bouten in de te klein voorgeboorde gaten worden de te maken verbindingen verder stevig op

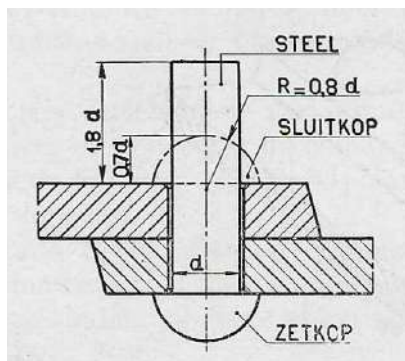


elkaar geklemd. Hierna worden één voor één de gaten geruimd of nageboord zodat zuiver cilindrische nagelgaten worden verkregen die recht tegenover elkaar liggen, waarna een verbinding tot stand wordt gebracht door telkens het uitstekende deel van een gloeiend ingebrachte klinknagel door middel van hameren of persen tot een kop om te vormen.

Dubbele strijnaad

4.12.14 Klinken

Een klinknagel is een kort rond staafje waar aan één zijde fabrieksmatig een kop is gesmeed. Deze kop heet de zetkop. De kop die bij het tot stand brengen van de klinkverbinding door hameren of persen wordt gevormd, noemen we de sluitkop. In principe wordt de klinknagel alleen op afschuiven



belast, echter na het klinken maar ook tijdens bedrijf zal de nagel als gevolg van het uitzetten en krimpen van het plaatmateriaal en de nagel zelf, ook op trek worden belast. Dit is nodig omdat de plaatdelen een drukdichte verbinding moeten vormen. De nagelkop wordt hierdoor continu in lengterichting op afschuiven belast. Het volume van beide koppen moet dan ook zodanig zijn dat ze deze kracht kunnen opnemen. Voor het maken van een bolle sluitkop is een volume nodig van ongeveer 1,8 keer de diameter van de nagelsteel.

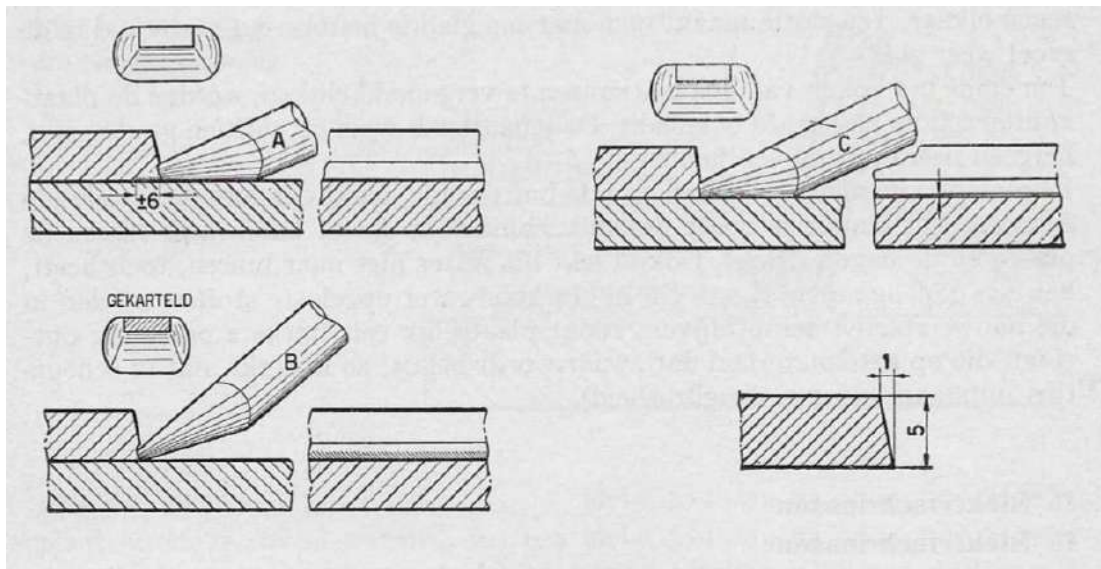
Maatvoering klinkverbinding

Bij het handmatig warmklinken worden de nagelstelen of schachten met behulp van een op een smidsvuur geplaatste nagelplaat of nagelbeugel witgloeïend gemaakt en met de nageltang in het gat gestoken. De kop van de nagel wordt tijdens het klinken met een handklinkdolly of met een dompdolly of tegenhouder tegengehouden. Vlug wordt dan met een zware hamer of voorhamer de kop gestuikt en vervolgens met de snapper en de voorhamer afgewerkt tot een snap- of zetkop. Deze kop moet, wil hij voldoen, aan de rand goed vol zijn, aansluiten op de plaat, een kleine braam hebben, en na het klinken, in het donker nog waarneembaar gloeien. Verkeerd is het de nagel zolang te klinken dat deze blauw en als gevolg daarvan hard en broos wordt. De zetkop kan dan geen of onvoldoende afschuifkracht opnemen en springt er af. Genoemd verschijnsel heet blauwbroosheid en treedt ook op bij andere bewerkingen zoals het maken van een vlak ketelfront.

Koken van naden

De klinknaden van een ketel blijken ook bij zorgvuldig bewerken van de platen en flenzen niet geheel water- en stoomdicht te zijn. De randen van platen en strippen worden daarom met een speciale beitels iets opgestuikt, zodat dit opgestuikte materiaal een grote druk uitoefent op het onderliggende plaatoppervlak en zodoende de spleet afdicht. Deze bewerking noemen we "koken", afgeleid van het Engelse werkwoord "to caulk" (= waterdicht maken). Bij het koken van plaatkanten drijft men met een gladde beitels, waarvan de onderkant iets is afgerond, een groef in de bovenplaat of strip. Hierdoor wordt het materiaal van de kookrand sterk tegen de onderliggende plaat gedrukt. Met een tweede iets dunnere beitels met een gekartelde snede verdiept men vervolgens de groeven. Tenslotte maakt men met een gladde beitels de groeven weer glad. Teneinde het koken te vergemakkelijken worden de plaatkanten schuin geschaafd of gehakt. De hoek moet ongeveer vijftien graden zijn, wat neerkomt op een helling van 1 : 5. Klinknaden worden zowel aan de buiten-

als de binnenzijde gekookt. Dit laatste is nodig om te voorkomen dat er ketelwater en de eventueel daarin opgeloste stoffen tussen de plaat en de nagels dringt zodat een sterkere oplossing ontstaat die het ketelmateriaal aantast. Er ontstaan dan minuscule kleine scheurtjes in het ketelmateriaal. Dit verschijnsel staat bekend onder de naam loogbroosheid en is moeilijk waarneembaar.



Koken van plaatkanten

4.12.15 Lassen

Lassen gebeurt uitsluitend door middel van het versmelten van een zogenoemde elektrode met behulp van een elektrische vlamboog. Deze techniek wordt toegepast vanaf de Tweede Wereldoorlog en mag slechts worden toegepast als er gebruik wordt gemaakt van hoogwaardige staalsoorten waarvan de samenstelling nauwkeurig bekend is. Verder is een uitgebreide voorbehandeling van de lasnaad nodig en moeten de constructies na het lassen in bijna alle gevallen spanningsvrij worden gegloeid. Het eindresultaat is, anders dan bij klinkverbindingen, een absoluut drukdichte constructie.

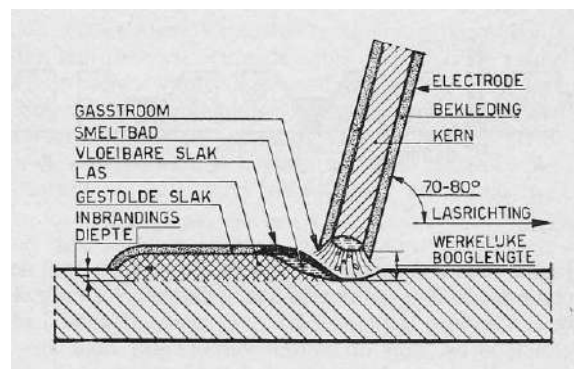
Bij het lassen uit de hand, met een vlamboog, worden zowel het werkstuk als de lasstaaf, die de lasser in de tang houdt, met een elektrische kabel verbonden met een lastransformator. Als de lasser de elektrode in contact brengt met het werkstuk wordt de stroomkring gesloten. Verbreekt hij vervolgens het contact door de elektrode enkele millimeters op te lichten dan ontstaat tussen de elektrode en het werkstuk een vlamboog waarin een temperatuur heerst van circa 6000 °C.

Voor booglassen met beklede elektrodes kan men alleen gelijk- en voor blanke lasdraad gelijk- en wisselstroom gebruiken. In verband met de veiligheid van de lassers wordt de netspanning met behulp van een transformator dan wel omvormer omgezet naar een spanning van 25-30 Volt bij gelijkstroom en 35-42 Volt bij wisselstroom. De stroomsterkte is in het algemeen vrij hoog en varieert tussen de 100 tot 500 Ampère. Zij moet hoger zijn naarmate de elektrode en de verbinding dikker zijn en er dus meer energie nodig is om het las- en moedermateriaal te versmelten. Door het trekken van een vlamboog tussen een lasstaaf en bijvoorbeeld de te lassen ketelplaat komt zoveel warmte vrij dat een klein deel van de plaat – het moedermateriaal- en het eind van de lasstaaf gaan smelten.

Ook een deel van de bekleding smelt en verdampt zelfs. Het gevormde gas stroomt uit de kelk en verhindert evenals de gevormde slak dat het gevormde smeltbad aan de omgevingslucht wordt blootgesteld.

Door aanraking met lucht vormen zich uit ijzer en zuurstof oxiden en uit koolstof en zuurstof het overbekende kooldioxide die samen met stikstof gasholtes in de las kunnen doen ontstaan. Bovendien ontstaan onder invloed van zuurstof uit ijzer en stikstof nitriden, die zeer hard zijn en de rek van het lasmateriaal verminderen.

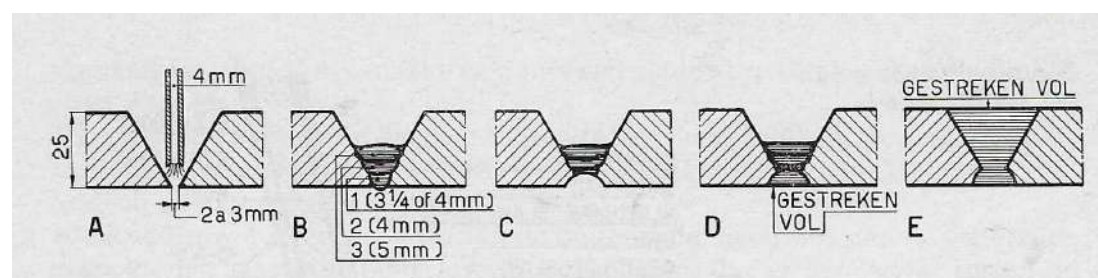
Om een lasnaad te maken moet de lasstaaf onder een hoek van $70 - 80^\circ$ met het werkstuk in de lasrichting worden bewogen. Door de schuine stand wordt het gesmolten materiaal naar één zijde



gestuurd en wordt onder de elektrode het moedermateriaal vloeibaar gemaakt zodat de gewenste inbranding wordt bereikt. Om een las van enige breedte te vormen kan men de elektrode haaks op de las heen en weer bewegen-zweien- of de las in verkante lagen aanbrengen. Nadat een laag (lasrups) is aangebracht moet de slak met een bikhamer en een staalborstel worden verwijderd. Eerst daarna kan een nieuwe lasrups worden gelegd.

Schema las met beklede elektrode

Voorzover mogelijk moet men een naad in horizontale stand en onder de hand lassen. De kans op lasfouten zoals gas- en slakinsluitingen is dan het kleinst. Bij moderne en complex samengestelde ketelinstallaties is dat niet mogelijk. Ook bij later uit te voeren reparaties wijkt men dan uit naar andere lasposities zoals het verticaal, zijdelings of zelfs boven het hoofd lassen. Bij het lassen uit die posities maakt men gebruik van aangepaste -traag vloeiende- elektrodes.

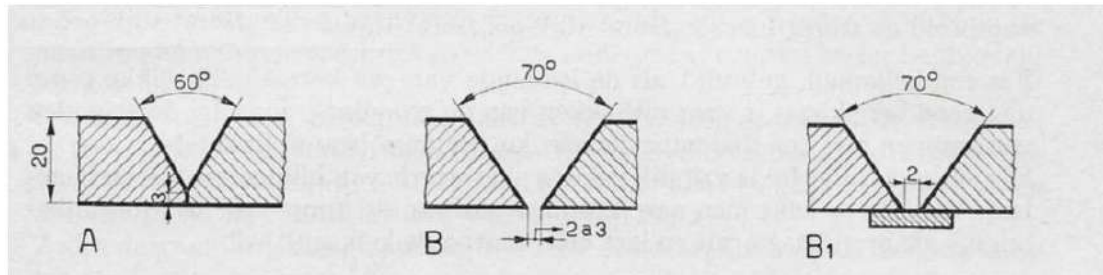


Volgorde vullen lasnaad

De eerste rups die in een naad wordt gelegd, de grondlaag, smelt niet altijd goed samen met het moeder- materiaal en wordt daarom uitgehakt als daarvoor de ruimte is of voorzien van een tegenlas. Bij grote plaatdiktes moet men bij de toepassing van een eenvoudige V-naad veel lasmateriaal versmelten. Ook zullen de onvermijdelijke krimpspanningen zich bij dit type lasgroef aan een zijde ophopen en het werkstuk asymmetrisch vervormen.

Dit is de reden dat er in de loop der tijd een aantal lasgroeven zijn ontwikkeld waarbij het uithakken en het tegen- of doorlassen beter mogelijk is dan wel achterwege kan worden gelaten en asymmetrische krimp wordt voorkomen dan wel wordt tegen gegaan.

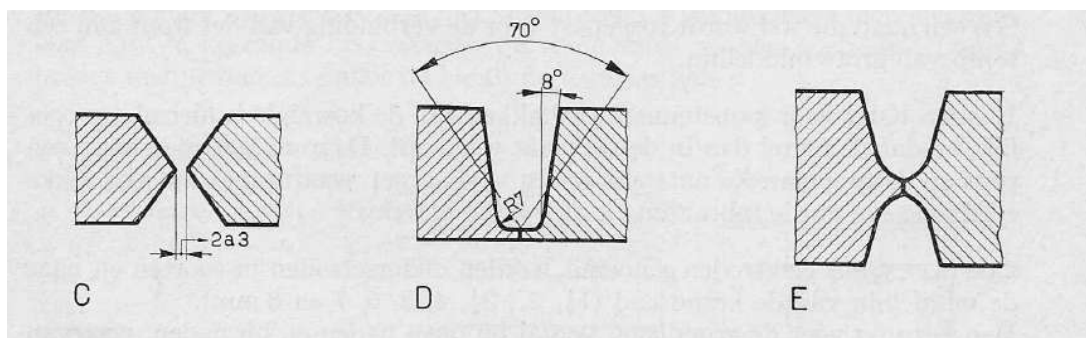
Hieronder wordt een aantal gebruikelijke lasnaad vormen weergegeven.



Gesloten V-naad

Open V-naad

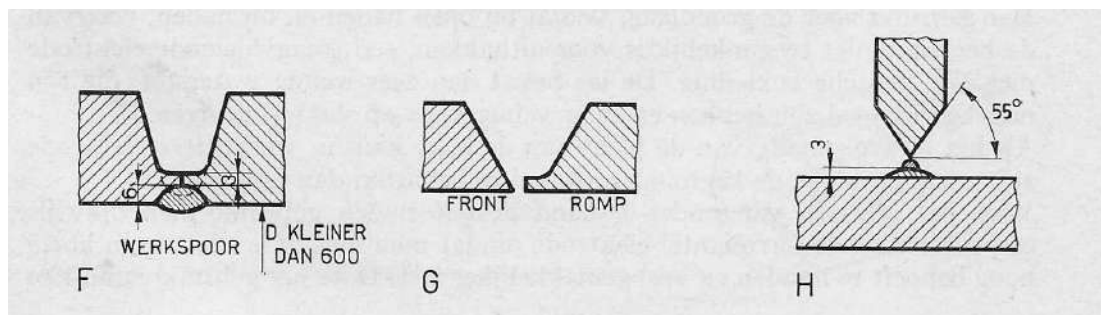
Open V-naad (doorlasstrip)



Open X-naad

Gesloten U-naad

Tweezijdige gesloten U-naad



Ongelijke U-naad

Open V/U-naad combinatie

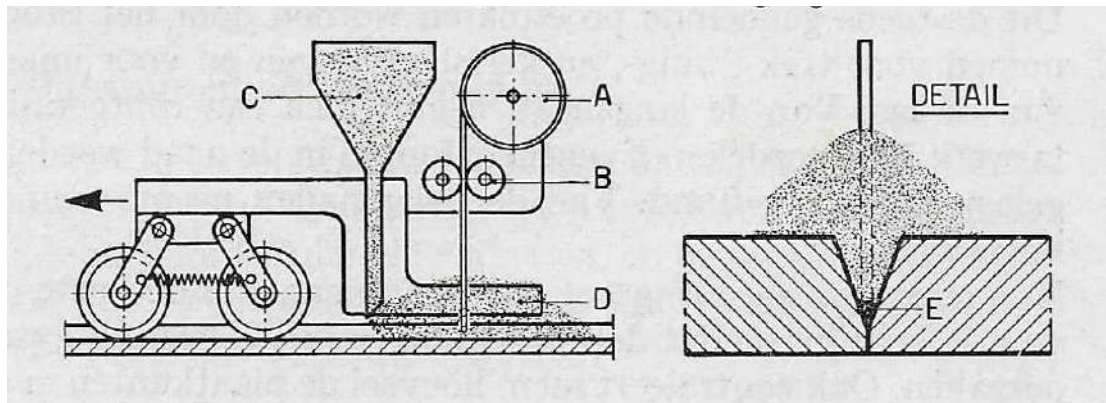
Gesloten K-naad

Lassen met een bedekte vlamboog

Naast het uit de hand lassen met een beklede elektrode zijn er ook al dan niet geautomatiseerde lassytemen ontwikkeld waar bij met een blanke draad of strip de bekleding in de vorm van poeder of door middel van een beschermend gas wordt gevormd.

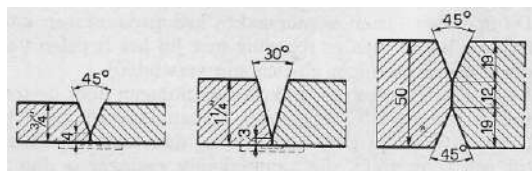
Bij deze methode wordt de toevoer van de lasdraad op mechanische wijze tot stand gebracht. Bij een geautomatiseerd systeem is ook de voortgaande beweging gemechaniseerd.

Met het hier onder afgebeelde poederdek lassysteem kan alleen onder de hand worden gelast. Bij het lassen van een langsnaad in een romp rijdt over de naad in langsrichting een wagentje met de daarop bevestigde rijdende lasinrichting; deze wordt geleid door op de rompplaat bevestigde rails. Voor het lassen van de dwarsnaden draait de op rollen bevestigde romp onder de lasinrichting door.



Poederdek lassysteem

Door het gebruik van zeer hoge stroomsterkte (500–2000 Ampère), wordt er zeer veel warmte ontwikkeld. De toegevoerde lasdraad smelt hierdoor zo snel af en van de plaatkanten wordt zo'n



groot gedeelte vloeibaar, dat de lasgroef ook bij een dikke plaat in twee keren moet worden gevuld. De inbranding is daarbij zo diep dat uithakken aan de keerzijde niet nodig is, zelfs niet bij X-naden.

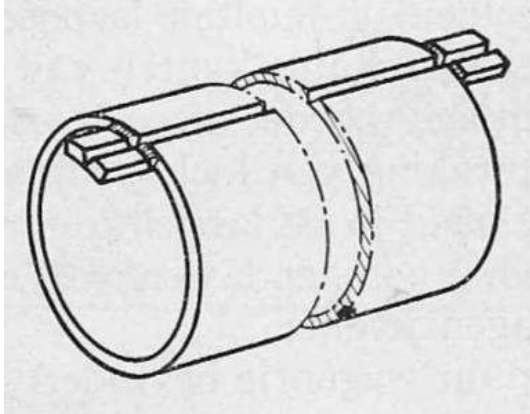
Lasnaad vormen bij poederdek-lassen

Lassen van een romp

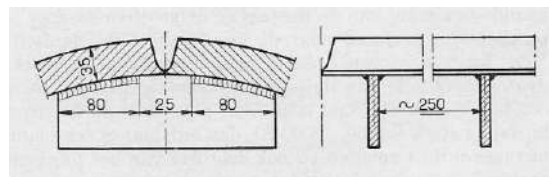
Om een naad van een romp te kunnen lassen moet men de plaatranden die stuik tegen elkaar komen te liggen zo afschaven dan wel afbranden dat zij de vereiste lasgroef vormen. Dit geldt voor zowel de langsnaad als de rondnaad van de rompringen. Dit gebeurt vóór de rompdelen en of de fronten worden gewalst. Men stelt de lasranden zuiver tegenover elkaar door aan de binnenzijde hechtplaten aan te brengen. Aan het eind van de langsnaad hecht men vlakke stukken plaat die van hetzelfde materiaal zijn gemaakt als de romp en met dezelfde lasopening en vorm als die van de te lassen naad. Proefstukken worden op dezelfde manier gelast en gegloeid als de romp zelf voordat ze ter beproeving worden aangeboden. Uit deze proefstukken worden de proefstaven voor het bepalen van de treksterkte enz. gehaald.

De onderhavige rompring wordt op twee rollen geplaatst waarmee het onder de hand lassen en eventueel uithakken van de grondnaad mogelijk wordt gemaakt. Om het vervormen van de romp naar binnen toe gedurende het leggen van de las in de hand te kunnen houden wordt hij ter plaatse

van de naad, met behulp van vijzels in de cirkelvorm gedrukt. Na elke las worden de vijzels iets ingedraaid zodanig dat na het lassen van de sluitlaag de romp de juiste cirkelvorm heeft.

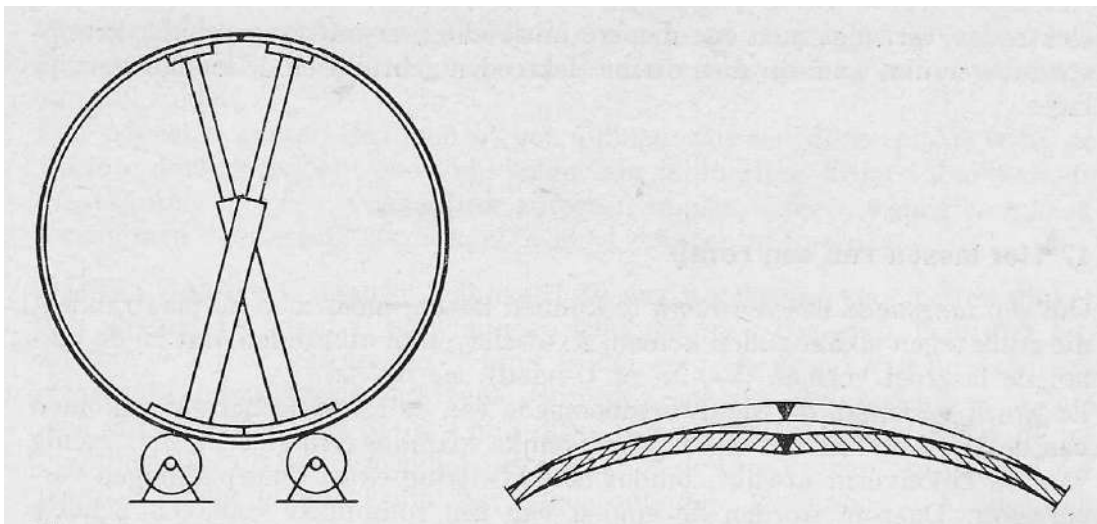


Romp met aangelaste proefstroken



Tijdelijke lassteunen

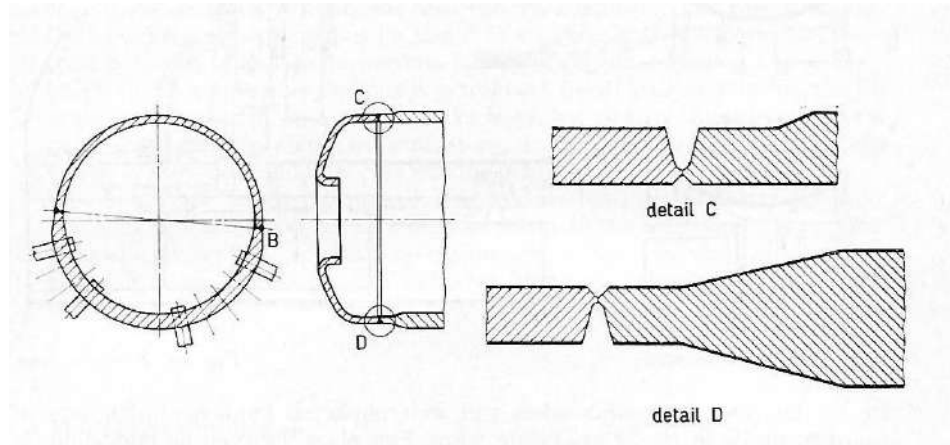
Bij een grote plaatdikte en vooral wanneer bij een hoog koolstofgehalte hiervan hardingsverschijnselen kunnen optreden wordt voor het lassen een brede strook langs de naad met behulp van een warmstook-gasbrander tot 200 °C verwarmd en gedurende het lassen op die temperatuur gehouden.



Vijzels ter voorkoming vervorming romp tijdens lassen

Lassen van een front

Om een naad van een front te kunnen lassen moet men de plaatranden die stuik tegen elkaar komen te liggen zo afschaven dan wel afbranden dat zij de vereiste lasgroef vormen. Dit gebeurt voordat de rompdelen en de fronten gewalst, geflenst of geperst worden.

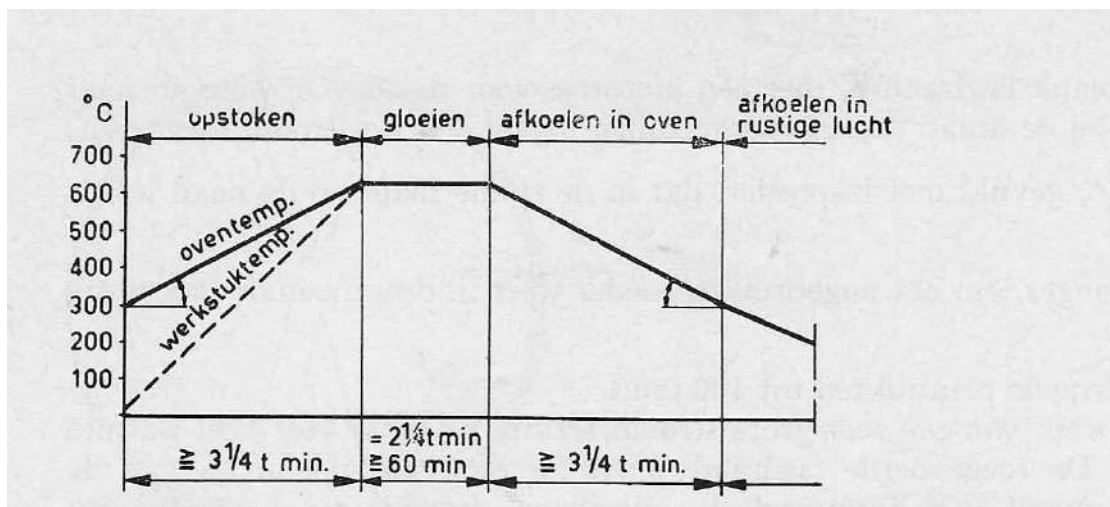


Gelaste frontverbindingen met lasnaad-details

De desbetreffende fronten worden op een aantal plaatsen aan de romping gehecht en vervolgens op twee rollen geplaatst waarmee het onder de hand lassen en eventueel uithakken van de grondnaad mogelijk wordt gemaakt. Evenals bij de langsnaad wordt bij de rondnaad soms gebruik gemaakt van tijdelijke steunen. Ook hier wordt bij een grote plaatdikte en een hoog koolstofgehalte hiervan, vóór het lassen een brede strook langs de naad, met behulp van een warmstookgasbrander tot 200 °C verwarmd en gedurende het lassen op die temperatuur gehouden.

Spanningsvrij gloeien

Door een aantal bewerkingen ontstaan spanningen in het ketelmateriaal. Deze veelal door buigen en krimp ontstane spanningen leggen voor een deel beslag op de sterkte die nodig is voor de constructie zelf en kunnen, als deze niet dan wel onvoldoende worden weggenomen tot het bezwijken hiervan leiden. Een probate methode om materiaalspanningen weg te nemen is om na fabricage, dus nadat alle vervormingen en laswerkzaamheden hebben plaats gevonden, de ketel in zijn geheel in een grote oven spanningsvrij te gloeien.



Tijdstraject spanningsvrij-gloeien

Bij het spanningsvrij-gloeien gaat men gewoonlijk als volgt te werk. Nadat de oven een temperatuur heeft bereikt van niet hoger dan 300 °C wordt het werkstuk er ingebracht. Vervolgens wordt de oven opgewarmd met een snelheid van 100/t °C/min. met een maximum van 4 °C/min. Hierbij is t de wandikte in mm van de ketel. Na het bereiken van de gloeitemperatuur (625-650 °C) wordt deze voor een periode van 2,5 t minuten gehandhaafd met een minimum van 60 minuten. Vervolgens laat men de oventemperatuur langzaam tot een temperatuur van 300 °C zakken in eenzelfde tijdsduur als de temperatuursverhoging van 300 °C naar 625 °C heeft plaatsgevonden. Tenslotte kan het werkstuk uit de oven worden genomen en in rustige lucht verder afkoelen tot de omgevingstemperatuur en is dan vrij van alle spanningen. De tijdsduur voor het spanningsvrij gloeien is zoals hiervoor is aangegeven afhankelijk van de materiaaldikte en kan weken duren. Als voorbeeld: het uitgloeien van een gelaste Schotse ketel met een wanddikte van 35 mm duurt ongeveer 14 dagen.

Met na het gloeien uitgevoerde bewerkingen aan de ketel waarbij warmte wordt toegevoerd dan wel vervormingen plaats vinden zal het effect van spanningsvrij-gloeien geheel of gedeeltelijk verloren gaan. Het spreekt dan ook voor zich dat later uit te voeren lasreparaties met de grootst mogelijke zorgvuldigheid uitgevoerd dienen te worden.

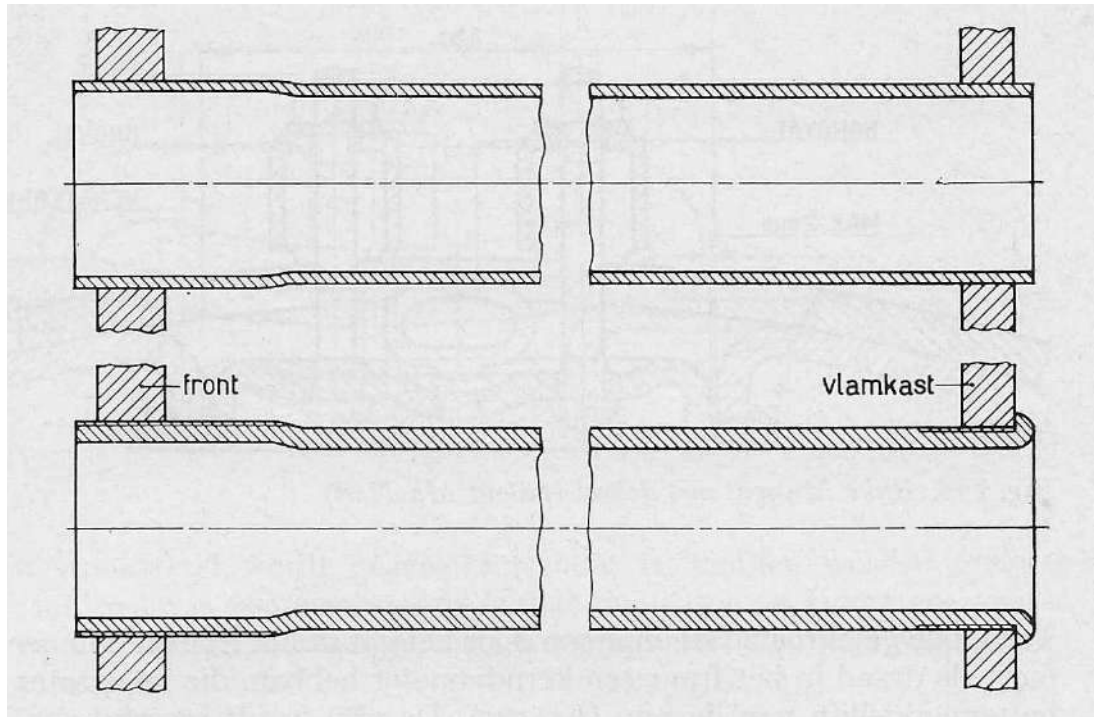
4.12.16 Bevestigen van pijpen

De vlam- en waterpijpen bij stoomketels worden gerold. Bij het rollen wordt de pijp met behulp van een pijpenroller bij kamertemperatuur zodanig vervormd dat ze klem in de pijpplaat komt te zitten en stoom- en of waterdicht afdicht. De pijpen neemt men zo lang dat ze aan beide einden 5 -10 mm buiten de desbetreffende pijpplaat steken. De gaten in het front waar de pijpen naar binnen worden gebracht boort of kottert men 2 - 3 mm groter om de pijpen eenvoudiger te kunnen aanbrengen. De pijp diameter wordt voor ze wordt aangebracht aan één zijde verwijdd en zodoende in overeenstemming gebracht met de vergrote diameter in de pijpplaat. Nadat de gaten in de pijpplaten zijn schoongemaakt en de pijpeinden zijn uitgegloeid en blank geschuurd wordt een pijp met een pijpenroller verwijdd totdat zij krachtig tegen de wand van het gat wordt aangedrukt. Een blank geschuurde pijp komt vaster te zitten dan wanneer hierop de oxide laag of andere ongerechtigheden nog aanwezig zijn. Ook de warmte overdracht van een gladgeschuurde pijp op de pijpplaat is beter waardoor de verbinding dicht blijft.

Na het uitrollen bestaat er tussen de plaat, de wand van het gat en de pijp een contact dat te vergelijken is met een krimpverbinding. Om de pijp bevindt zich in de plaat een elastisch vervormde ringvormige zone, waarin trekspanningen optreden, terwijl er in de pijp zelf voornamelijk drukspanningen zijn ontstaan als gevolg van het uitrollen. Voor het verkrijgen van een goede verbinding worden de pijpuiteinden daarom van tevoren uitgegloeid.

De bevestiging verkregen door het uitrollen is bij kamertemperatuur niet alleen drukdicht, maar kan ook grote krachten opnemen in de lengterichting van de pijp. Bij de hoge temperatuur, die het uiteinde van bij- voorbeeld een vlampijp in de vlamkastpijpplaat kan bereiken, wordt de inklemming minder. Daarom wordt het boorgat in de pijpplaat van een groef voorzien zodat zich bij het uitrollen op de pijp een opstaande rand vormt, die de afdichting verbetert.

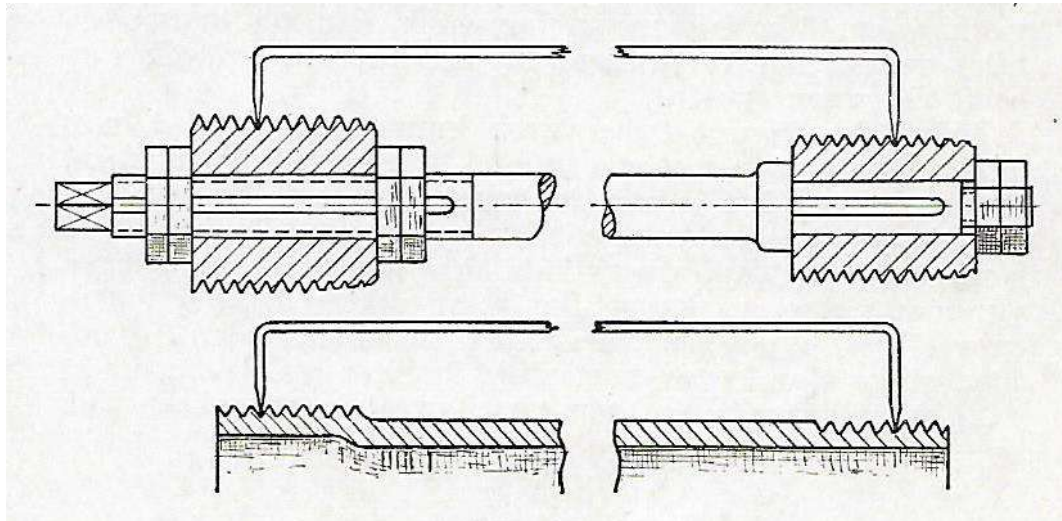
Verder worden om de stromingsweerstand te verminderen de pijpen aan het uiteinde omgezet of getrompt.



Gerolde en geschroefde steunpijpen

Vlakke pijpplaten in een vlampijpketel hebben, ten gevolge van de stoomdruk, de neiging bol te gaan staan. Dit vervormen wordt tegengegaan met massieve langs steunen en door zogenoemde steunpijpen. Deze steunpijpen worden bevestigd door middel van schroefdraad en door lassen. De vlampijpen hebben een wanddikte van 2,95 en 3,25 mm en een uitwendige diameter van 3". Steunpijpen hebben een wanddikte van 6 tot 8 mm. Bij geschroefde verbindingen zijn de pijpplaten en de einden van de pijpen van schroefdraad voorzien. Ook hierbij wordt gebruik gemaakt van het verschil in pijp diameter om de pijp überhaupt in de pijpplaten te kunnen schroeven. De toegepaste schroefdraad met een draad diepte van 1,5 mm heeft 9 a 11 gangen per 1"

De moeilijkheid bij deze constructie is dat de spoed van de schroefdraad in zowel de beide pijpplaten als die op de pipeinden met elkaar in overeenstemming moeten zijn, dat wil zeggen dat de gangen niet mogen verscherven. Men maakt hierbij gebruik van een verstelbare draadtap die men instelt met een draadmal waarvan de onderlinge afstand van de schroefgangen overeenkomt met die van de te monteren vlampijp. Bij een eventuele vervanging van een steunpijp dient men in omgekeerde volgorde te werk te gaan en zal de schroefdraad op de pijp aan die van de reeds aanwezige draad in de pijpplaten moeten worden aangepast. Na het inschroeven van de pijp wordt deze gerold om een drukdichte afsluiting te krijgen.



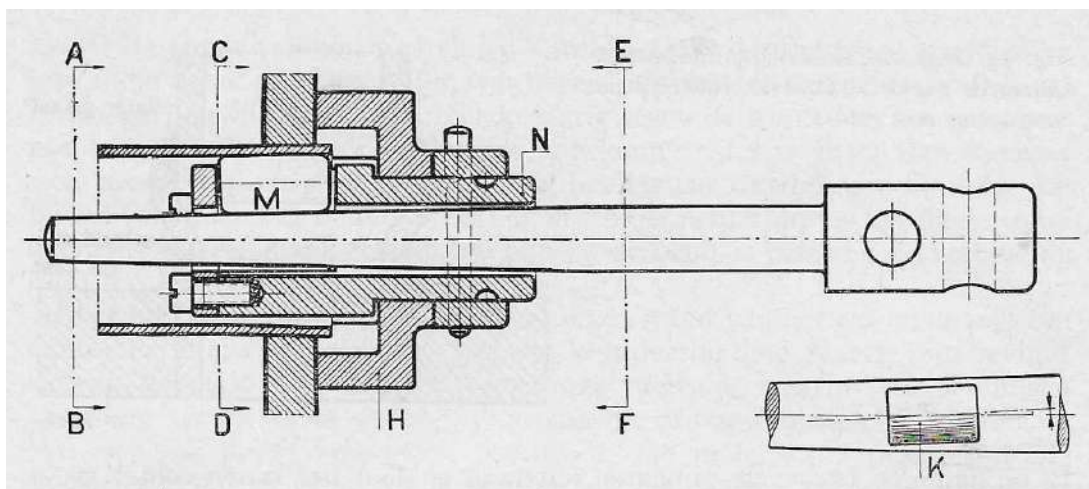
Verstelbare tappen

Als later, bijvoorbeeld in verband met reparaties, de pijpen met een snijbrander worden verwijderd en nieuwe pijpen worden ingelast, ontstaan nieuwe krimpspanningen die dan niet door uitgloeien kunnen worden opgeheven en dus scheuren in de dammen kunnen veroorzaken. Om dit te beperken wordt ongeveer twee derde van de vlampijpen gerold. Ook bij lassen, worden om een goede aansluiting van de pijp en de pijpplaat te krijgen, de vlampijpen na het lassen gerold. Bij waterpijpketels staat er druk in de ruimte waarin de pijpen uitmonden zodat in de dammen tussen de ingerolde pijpen trekspanningen optreden, niet alleen vanwege het uitrollen maar bovendien door de druk in de stoomketel.

Pijpenroller

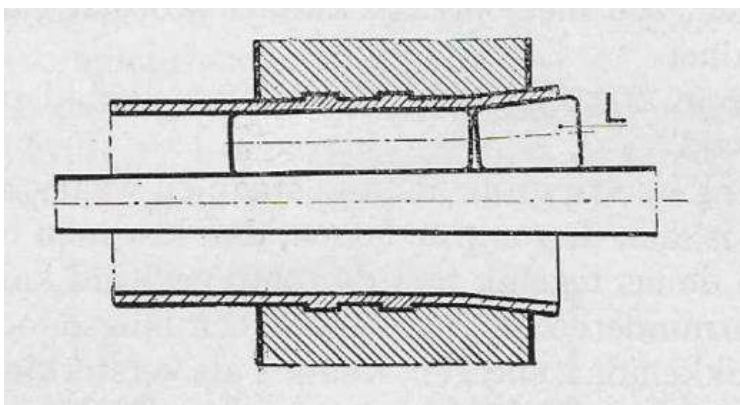
Niet zelden komt het voor dat een gerolde vlam- stoom- of waterpijp vervangen moet worden. Ook de pijpen van oppervlakte condensors zijn meestal aan een zijde gerold. In het kader van onderhoud dan wel het beoordelen van uit te voeren reparaties is het dan ook goed kennis te hebben van het rollen.

De pijpenroller bestaat in de eerste plaats uit een bus ,waarin drie gleuven zijn aangebracht voor de rollen. Deze rollen zijn gemaakt van gehard staal en hebben enige speling in radiale zin. In het midden van deze drie rollen wordt een tapse pen of doorn gestoken die aan het einde is voorzien van een verdikking met twee gaten waarin een ronde pen kan worden gestoken om de doorn te draaien. Plaatst men de pijpenroller in de pijp, dan zorgen de voetjes van de ovale aanslag ervoor dat de rollen op de juiste plaats ten opzichte van de pijpplaat komen te zitten. Door nu de tapse pen aan te drukken en vervolgens rechtsom rond te draaien brengt men de rollen in een linksom ronddraaiende beweging ten opzichte van de eigen assen. Van de drie rollen is er een die niet evenwijdig aan de hartlijn van de doorn is opgesteld. Deze iets schuin opgestelde rol zorgt ervoor dat de doorn volgens een schroeflijn de roller wordt ingetrokken.



Pijpenroller

De doorn, onder de rol M, hoeft dus niet aangedrukt te worden en zorgt er zelf voor dat de rollen met grote kracht tegen de pijpwand aan worden gedrukt en deze uitrolt. Direct voor en achter de pijpplaat ontstaat een rand waardoor de pijp zeer vast in het boorgat komt te zitten en verschuiving in de lengterichting afdoende wordt belet. Voor het trompen van de pijpen om de stromingsweerstand van de gassen te verminderen worden pijpenrollers gebruikt met een dubbel stel rollen. De korte rollen voor het trompen zijn taps. Alleen de einden van de vlampijpen in de stromingsrichting van de rookgassen worden getrompt of gekraald.



Pijpenroller met tromprollen

4.12.17 Materiaalspanningen

Om voor bepaalde omstandigheden de dikte van een ketelromp te kunnen berekenen is het nodig vast te stellen welke krachten er in de ketelromp optreden en welke materiaalspanningen daarvan het gevolg zijn in een langs- en dwarsdoorsnede. Tevens geeft het inzicht in de wijze waarop een ketel is samengesteld, bijvoorbeeld waarom een langsnaad anders wordt uitgevoerd dan een rondnaad.

Spanning in langsdoorsnede

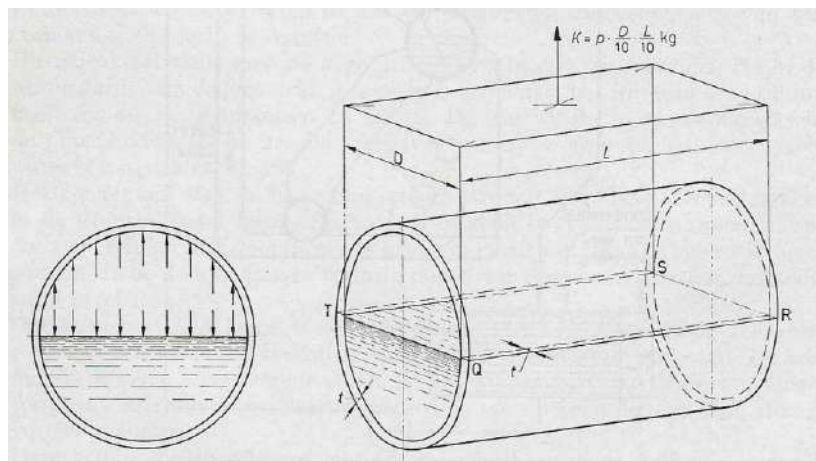
Van een romp, voor de helft gevuld met water, waarboven een druk heerst van $p \text{ kg/cm}^2$ is de resultante van de verticaal gerichte krachten:

$$\text{kracht (kg)} = \text{druk (kg/cm}^2\text{)} \times \text{oppervlakte waterspiegel (cm}^2\text{)}$$

$$K = p \cdot F_1 \text{ [kg]}$$

$$F_1 = \frac{D}{10} \cdot \frac{L}{10} \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$K = p \cdot \frac{D}{10} \cdot \frac{L}{10} \text{ [kg]}$$



Spanning in de langsdoorsnede van een romp

Er is evenwicht van de omhoog en omlaag gerichte krachten welke op hun beurt weer in evenwicht zijn met de som der materiaal spanningen in de beschouwde en in onderstaande figuur aangegeven langsdoorsnede.

Bij een rompdikte van $t \text{ mm}$ is het oppervlak van deze materiaal doorsnede:

$$F_1 = 2 \cdot L \cdot t \text{ [mm}^2\text{]}$$

Noemen we de kracht opgenomen per mm² van deze doorsnede de trekspanning S_l dan is:

$$\text{kracht (kg)} = \text{Belaste doorsnede (mm}^2\text{)} \times \text{trekspanning (kg/mm}^2\text{)}$$

$$p \cdot \frac{D}{10} \cdot \frac{L}{10} = 2 \cdot L \cdot t \cdot S_l$$

Waaruit afgeleid de trekspanning in langsrichting:

$$S_l = \frac{p \cdot D \cdot L}{200 \cdot t \cdot L} \text{ [kg/mm}^2\text{]}$$

Of:

$$S_l = \frac{p \cdot D}{200 \cdot t} \text{ [kg/mm}^2\text{]}$$

Wij zien dat bij een bepaalde wanddikte en druk de optredende trekspanning in de langsdoorsnede recht evenredig is met de inwendige middellijn en de stoomdruk. De fronten van een ketelromp verminderen de spanning in het nabijgelegen deel van de langsdoorsnede. In de hiervoor afgeleide formule is daarmee geen rekening gehouden.

Spanning in dwarsdoorsnede

In de richting van de hartlijn werkt op elk front een kracht gelijk aan:

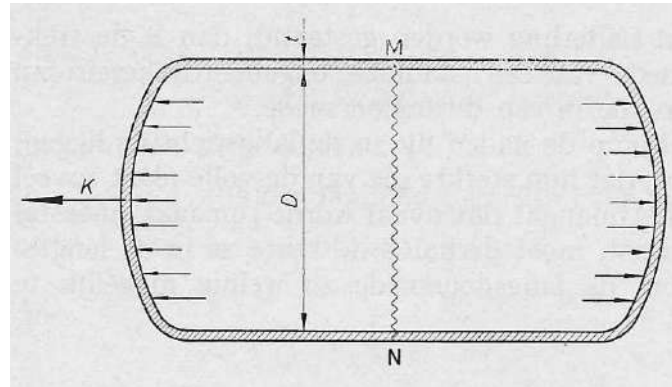
$$\text{kracht (kg)} = \text{druk (kg/cm}^2\text{)} \times \text{geprojecteerde oppervlak van het front (cm}^2\text{)}$$

Of in formule vorm:

$$K = p \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D}{10}\right)^2 \text{ [kg]}$$

Deze kracht moet in een romp waarvan de einden niet worden ondersteund, worden opgenomen door een ringvormige materiaaldorsnede waarvan, bij een wanddikte die zeer klein is vergeleken met de diameter, het oppervlak kan worden berekend met:

$$F_l = \pi D \cdot t \text{ [mm}^2\text{]}$$



Noemen we de kracht opgenomen per mm² van deze doorsnede de trekspanning S_d dan is:

kracht (kg) = belaste doorsnede (mm²) x trekspanning (kg/mm²)

$$K = \pi D \cdot t \cdot S_d \text{ [kg]}$$

Of:

$$\pi D \cdot t \cdot S_d = p \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D}{10}\right)^2 \text{ [kg]}$$

Waaruit afgeleid de trekspanning in de dwarsdoorsnede:

$$S_d = \frac{p \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D}{10}\right)^2}{\pi D \cdot t} = \frac{p \cdot D^2}{400 D \cdot t} \text{ [kg/mm}^2\text{]}$$

$$S_d = \frac{p \cdot D}{400 \cdot t} \text{ [kg/mm}^2\text{]}$$

Vergelijken wij de formule voor het bepalen van de spanning in de langsrichting met die van de dwarsrichting dan zien we dat de spanning in de langsdoorsnede twee keer zo groot is als die in de dwarsdoorsnede

$$S_l = 2 S_d$$

Hieruit volgt dat bij een ketelromp de naden, in de langsrichting, zo moeten worden uitgevoerd dat die de sterkte van de volle plaat zoveel mogelijk benaderen. Dwarsnaden hoeven slechts half zo sterk te zijn. Het ovale mangat, meestal 300 x 400 mm, plaatst men om deze reden met de korte as in de lengterichting van de romp. Als gevolg van het hier voor aangegeven verschil in spanning ziet men bij schades aan stoomketels of leidingen als gevolg van drukoverschrijding de scheur meestal in de lengterichting lopen.

4.12.18 Sterkte van een klinknaad

De sterkte van een plaat ter plaatse van een klinknaad is door het boren van de nagelgaten kleiner dan die van de ongeboorde plaat. Daarenboven moeten er in een klinkverbinding voldoende klinknagels aanwezig zijn om de krachten die op de plaatdelen worden uitgeoefend over te brengen. Verder moet de verbinding water danwel stoomdicht zijn. Een bijzonder lastige opgave gezien de verschillende en eerder aangegeven eigenschappen van het toe te passen staal.

Sterkte percentage plaat

Werken er in een plaat, verbonden door een rij nagels, gelijk verdeelde krachten dan worden de plaatdoorsneden tussen de nagels op de in de figuur aangegeven wijze op trek belast. We beschouwen van de plaat slechts een strook ter breedte van één steek.

De doorsnede, die deze strook heeft is:

$$\text{steek} \times \text{plaatdikte} = a \times t \text{ mm}^2$$

Door het boren van de nagelgaten blijft een doorsnede over van:

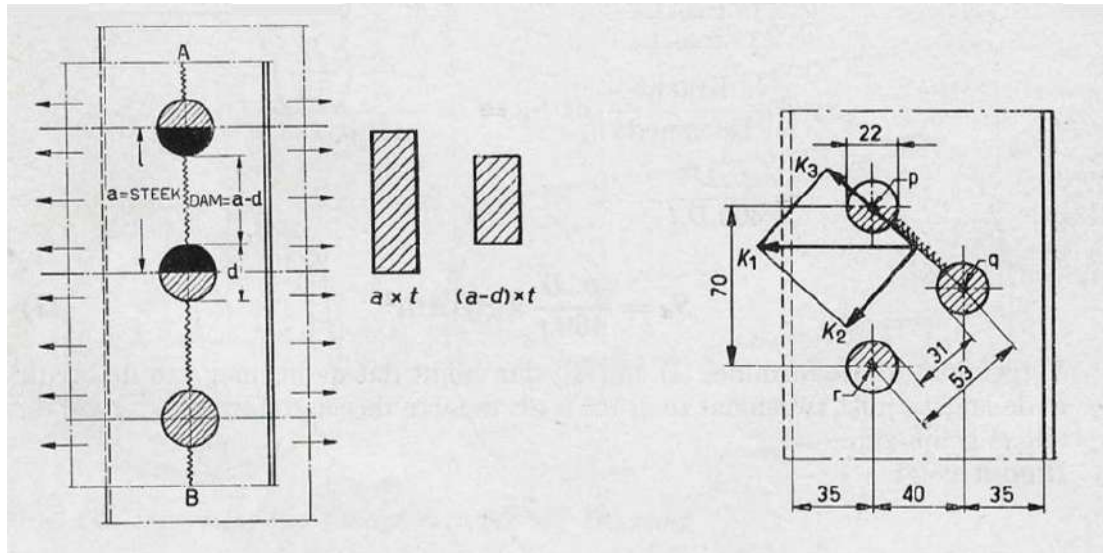
$$\text{dam} \times \text{plaatdikte} = (a - d) \times t \text{ mm}^2$$

De sterkte van de dammen wordt uitgedrukt in procenten van de sterkte van de plaat en het plaat of sterktepercentage genoemd. Het sterktepercentage van de plaat wordt in de formule aangegeven met de letter z.

$$z = \frac{(a - d) \cdot t}{a \cdot t} \cdot 100 = \frac{a - d}{a} \cdot 100$$

Het sterktepercentage van de hierna afgebeelde enkel geklonken lapnaad in de onderstaande linker figuur met een nagelsteek van 70 mm een plaatdikte van 11 mm en een nagel diameter van 22 mm is:

$$z = \frac{70 - 22}{70} \cdot 100 = 68,6 \%$$



Maataanduiding klinkverbinding

Het plaat- of sterktepercentage van de dammen in de doorsnede a-b van de dubbel geklonken lapnaad in de rechterfiguur vinden wij op dezelfde manier als hiervoor:

$$z = \frac{70 - 22}{70} \cdot 100 = 68,6 \%$$

Behalve in de lijn a-b kunnen de dammen echter ook bezwijken volgens de lijn p-q in de bovenstaande figuur. Voor het berekenen moet dan rekening gehouden worden met de scheve stand van de doorsneden. Van de kracht die per steek op de naad wordt uitgeoefend moet dan de helft (K_1) worden genomen. Van K_1 werkt de ontbonden kracht (K_2) loodrecht op deze doorsnede. Dit is niet de enige kracht omdat ook de andere ontbondene (K_3) de doorsnede op afschuiven belast, terwijl de invloed hiervan weer wordt verminderd door de aanwezigheid van de nagels in de voorste rij van het klinkverband. Dit maakt een eenvoudige berekening van het plaatpercentage onmogelijk. Op grond van proeven kent men een waarde toe van $5/6$ van die van rechte dammen van dezelfde afmetingen. Voor het plaatpercentage, in dit voorbeeld van de twee schuine dammen per steek, vinden wij derhalve:

$$z = \frac{2 \cdot 31 \cdot \frac{5}{6}}{70} \cdot 100 = 73,7 \%$$

Op min of meer overeenkomstige wijze is het plaatpercentage van verschillende plaat- verbindingen te berekenen. Het sterktepercentage van de naden van stoomketels is voor de hierna aangegeven plaatverbindingen gewoonlijk niet hoger dan

Soort klinkverbinding	Sterkte percentage
enkel geklonken lapnaad	52 %

dubbel zig-zag geklonken lap naad	65 %
drievoudig zig-zag geklonken lapnaad	72 %
drievoudig zig-zag geklonken dubbele stripnaad enkel gedund	85 %

Omdat de trekspanning in de langsdoorsnede van een romp het grootst is moet de langsnaad een hoog sterktepercentage hebben. Dwarsnaden die niet door langssteunen ontlast zijn, moeten een sterkte- percentage hebben dat ten minste de helft is van dat van de langsnaad. Om lekkage te vermijden als gevolg van doorbuigen van bijvoorbeeld de ketelfronten bij een Schotse ketel worden dwarsnaden altijd tweevoudig geklonken. Ook de uitzetting van de vuurgang in lengterichting maakt, voor een goede afdichting, een dubbele rij nagels noodzakelijk.

Sterktepercentage plaat

Men kan ook de sterkte van de klinknagels uitdrukken in procenten van de volle plaat dan wel van een gegeven klinknaadverbinding nagaan of het per steek gezamenlijk op afschuiven belaste oppervlak van de nagels voldoende is om de kracht op te nemen die per steek wordt uitgeoefend.

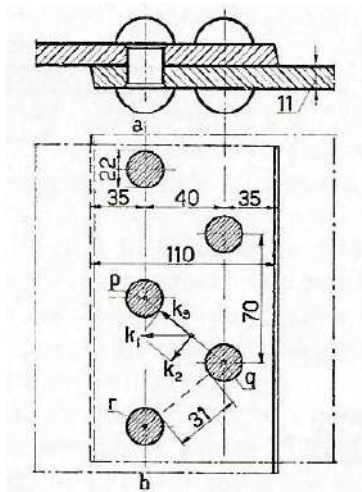
De sterkte van staal is bij belasting op afschuiven kleiner dan bij belasting op trek. Verder is de schuifspanning in elk deel van de nageldoorsnede niet even groot. Voor de sterkte bij afschuiven wordt bij berekeningen daarom 0.8 keer de treksterkte van het nagelstaal genomen. Het nagelgat wordt daarbij massief gevuld gedacht en aangenomen dat in de nagels alleen schuifspanning optreedt. Stellen we de treksterkte van de plaat gelijk aan S_p en die van het nagelmateriaal op S_n , en de sterkte van n nagels op afschuiven belaste nageldoorsneden op y % van de volle plaat dan kunnen we schrijven:

$$y = \frac{n \cdot \frac{\pi}{4} d^2 \cdot 0,8 \cdot S_n}{a \cdot t \cdot S_p} \cdot 100$$

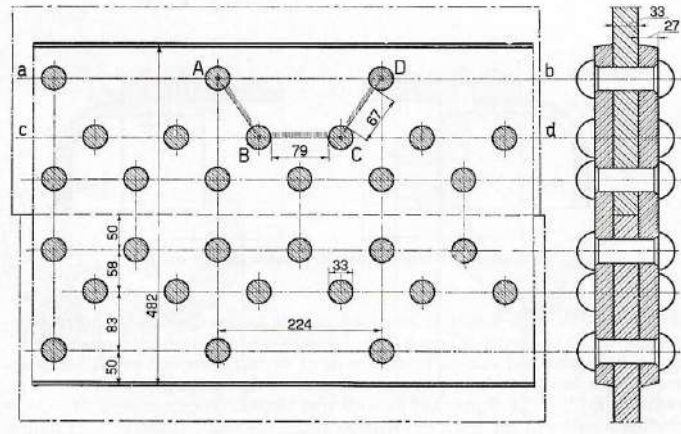
Dit percentage noemen we, in analogie aan het plaatpercentage, het nagelpercentage. Klinknagelstaal is meestal zachter dan het plaatstaal waar de ketel van wordt gemaakt omdat het sterk vervormd moet kunnen worden. Het nagelmateriaal bezit daarom een lagere treksterkte.

In onderstaande figuur is een tweevoudig zigzag geklonken lapnaad getekend met een nagelsteek van 70 mm, een plaatdikte van 11 mm en een nageldiameter van 22 mm. In een steek bevinden zich hier twee nageldoorsneden terwijl de treksterkte voor de plaat 40 kg/mm^2 en die van het nagelmateriaal 37 kg/mm^2 bedraagt . Het nagelpercentage voor deze naad is:

$$y = \frac{2 \cdot \frac{\pi}{4} 22^2 \cdot 0,8 \cdot 37}{70 \cdot 11 \cdot 40} \cdot 100 = 73 \%$$



Tweevoudig geklonken zig-zag lapnaad



Drievoudig geklonken dubbele stripnaad (enkel gedund)

Van de in de bovenstaande figuur getekende drievoudig geklonken enkel gedunde dubbele stripnaad met 5 nagels per steek en met dezelfde treksterktes als uit voorgaand voorbeeld, bedraagt het nagelpercentage:

$$y = \frac{5 \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 33^2 \cdot 0,8 \cdot 37}{224 \cdot 33 \cdot 40} \cdot 100 = 85,6 \%$$

Omdat hier sprake is van een dubbele stripnaad wordt gerekend dat elke nagel twee keer op afschuiving wordt belast.

Ook hier geldt dat de ketting breekt bij de zwakste schakel en is de reden dat bij het bepalen van de toegestane werkdruk rekening wordt gehouden met de verbinding met het laagste nagelpercentage.

Nagelformules

Met de zogenoemde nagelformules wordt de vereiste nageldoorsnede per steek berekend. Eerder is aangegeven dat de langskrachten twee keer zo groot zijn als de dwarskrachten. Dit aspect komt ook terug in de navolgende nagelformules.

Langsnaad

Als p de werkdruk in kg/cm^2 , D de diameter en a de steek in cm van de nagelverbinding van de ketel is dan geldt:

$$\frac{p}{2} \cdot \frac{D}{10} \cdot \frac{a}{10} = \frac{p \cdot D \cdot a}{200} [\text{kg}]$$

De gemiddelde schuifspanning die wordt toegelaten, is slechts een gedeelte van de sterkte op afschuiving die eerder in deze leidraad op de 0,8 van de treksterkte is gesteld.

De veiligheidsfactor x die hierbij in acht wordt genomen geeft aan welk deel daarvan als schuifspanning wordt toegelaten.

Soort klinkverbinding	Veiligheidsfactor
Langsnaad uitgevoerd als dubbele stripnaad	4
Langsnaad uitgevoerd als lapnaad	5

Stellen we nu n het aantal op afschuiven belaste nageldoorsneden dan is:

$$\frac{p \cdot D \cdot a}{200} = n \cdot \frac{\pi}{4} d^2 \cdot \frac{0,8 \cdot S_n}{x}$$

Stelt men nu het gezamenlijk op afschuiven belaste oppervlak op O mm² dan is:

$$O = n \cdot \frac{\pi}{4} d^2 \text{ [mm}^2\text{]}$$

en

$$\frac{p \cdot D \cdot a}{200} = O \cdot \frac{0,8 \cdot S_n}{x}$$

Zodat de totale per steek in de langsdoorsnede aanwezige nageldoorsnede moet zijn:

$$O \geq \frac{p \cdot D \cdot a \cdot x}{160 S_n} \text{ [mm}^2\text{]}$$

Dwarsnaad

Als p de werkdruk in kg/ cm², D de diameter en a de steek in cm van de nagelverbinding van de ketel is dan geldt voor de kracht op het front:

$$\frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D}{10}\right)^2 \cdot p \text{ [kg]}$$

Als de steek a is dan is het aantal steken in de omtrek:

$$\frac{\pi \cdot D}{a}$$

Wanneer ook hier de op afschuiving belaste doorsnede op O wordt gesteld dan is de optredende schuifspanning:

$$\frac{\frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D}{10}\right)^2 \cdot p}{\frac{\pi \cdot D}{a} \cdot O} = \frac{p \cdot D \cdot a}{400 \cdot O} \text{ [kg/mm}^2\text{]}$$

Deze schuifspanning mag niet groter zijn dan die van de hiervoor aangeven langsnaadspanning zodat:

$$\frac{0,8 \cdot S_n}{x} \geq \frac{p \cdot D \cdot a}{400 \cdot O} \text{ [kg/mm}^2\text{]}$$

Zodat de totale per steek in de dwarsdoorsnede aanwezige nageldoorsnede moet zijn:

$$O \geq \frac{p \cdot D \cdot a \cdot x}{320 S_n} \text{ [mm}^2\text{]}$$

4.12.19 Plaatdikte van een geklonken romp

Hier voor hebben we van bestaande ketels de sterkte van de klinknaden ten opzichte van de plaatdikte van de romp berekend. Bij het ontwerpen maar ook later tijdens gebruik, als er sprake is van aantasting van het ketelmateriaal, moet men ook de plaatdikte kunnen berekenen dan wel de gevolgen van de aantasting voor de sterkte kunnen vaststellen. Door de stoomketeldruk te verlagen, dus de maximale materiaal- spanningen te verlagen, kan men het afkeuren van een aangetast toestel uitstellen. De eerder afgeleide formule voor de gemiddelde trekspanning S_1 in de langsdoorsnede van een naadloze romp luidt:

$$S_1 = \frac{p \cdot D}{200 \cdot t} \text{ [kg/mm}^2\text{]}$$

De plaatdikte volgt uit:

$$t = \frac{p \cdot D}{200 \cdot S_1} \text{ [mm]}$$

Voor de gemiddelde treksterkte S_1 in de langsdoorsnede kunnen we als we de eerdergenoemde veiligheidsfactor in acht nemen:

Voor de plaatdikte kunnen we dan schrijven:

$$t = \frac{p \cdot D \cdot x}{200 \cdot S_B} \text{ [mm]}$$

Als men een klinknaad gaat toepassen dan weet men dat er z %, het plaatpercentage, overblijft voor het opnemen van de langskrachten. De hiervoor afgeleide formule voor de plaatdikte moet dus hiermee als volgt worden gecorrigeerd:

$$t = \frac{p \cdot D \cdot x}{200 \cdot S_B \cdot \frac{z}{100}} \text{ [mm]}$$

Dit geeft:

$$t = \frac{p \cdot D \cdot x}{2 \cdot S_B \cdot z} \text{ [mm]}$$

4.12.20 Plaatdikte van een gelaste romp

Bij geklonken ketels waar de werkdruk maximaal 20 kg/cm² is, heeft de romp een temperatuur die niet hoger is dan 210 °C. De treksterkte van staal wordt bepaald bij 20 °C en is tussen 20 en 210 °C wel hoger maar niet lager dan bij 20 °C.

Er werd in het verleden weinig rekening gehouden met de vermindering van de vloeigrens die bij verhoging van de temperatuur plaats vindt en bij 210 °C reeds 14 % bedraagt. Men berekende de dikte van een rompplaat met een toelaatbare spanning die slechts een bepaald deel van de trekspanning was. Zo ontstond voor geklonken ketels de hiervoor afgeleide formule die nog mag worden gebruikt als de metaal temperatuur niet hoger is dan 214 °C.

Men wenst tegenwoordig echter niet alleen het risico van breuk, maar ook het risico van vervorming te voorkomen. Daarom neemt men thans voor naadloze en gelaste rompen als basis voor de sterkte- berekening de 0,2 % rek- of warmvloeigrens, bepaalt bij de bedrijfstemperatuur.

De warmvloeigrens S_{vt} bij de bedrijfstemperatuur kan op de volgende manier berekend worden uit de treksterkte bij 20 °C met:

$$S_{vt} = \frac{5}{9} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{t}{525} \right)^2 \right\} \cdot S_{B20} \text{ [kg/mm}^2\text{]}$$

Is de vloeigrens of rekgrens bij 20 °C bekend dan berekent men de warmvloeigrens bij de bedrijfstemperatuur met:

$$S_{vt} = \left\{ 1 - \left(\frac{t}{525} \right)^2 \right\} \cdot S_{v20} \text{ [kg/mm}^2\text{]}$$

Soms wordt voor de maximaal optredende spanningen in een langsdoorsnede een waarde S_{toel} toegevoegd die 2/3 is van de warmvloeigrens, met andere woorden de veiligheidsfactor x bij de bedrijfstemperatuur is 1: 2/3 = 1,5.

Zo ontstaat uit de eerder afgeleide formule voor de plaatdikte van een naadloze stalen romp:

$$t = \frac{p \cdot D}{200 \cdot S_{toel}} \text{ [mm]}$$

Voor een romp met een naad of een aantal pijpgaten in de langsdoorsnede is de plaatdikte:

$$t = \frac{p \cdot D}{200 \cdot S_{toel} \cdot \frac{z}{100}} = \frac{p \cdot D}{2 \cdot S_{toel} \cdot z} \text{ [mm]}$$

omdat:

$$S_{toel} = \frac{S_{vt}}{x} \text{ [kg/mm}^2\text{]}$$

wordt:

$$t = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \frac{S_{vt}}{x} \cdot z} = \frac{p \cdot D \cdot x}{2 \cdot S_{vt} \cdot z} \text{ [mm]}$$

Vervolgens moet het plaatpercentage z worden verminderd met een bedrag c voor de spanningen die in het materiaal aanwezig kunnen zijn, waardoor de formule overgaat in:

$$t = \frac{p \cdot D \cdot x}{2 \cdot S_{vt} \cdot (z - c)} \text{ [mm]}$$

Tot nu toe hebben we aangenomen dat de trekspanning op elk punt van de dikte even groot is. In werkelijkheid is de trekspanning aan de binnenzijde van de ketelromp p kg/cm² dan wel $p/100$ kg mm² groter dan aan de buitenzijde. Voert men dit in de voorgaande formule in dan moet de noemer met een bedrag van $p \cdot x$ verminderd worden zodat de formule overgaat in:

$$t = \frac{p \cdot D \cdot x}{2 \cdot S_{vt} \cdot (z - c) - p \cdot x} \text{ [mm]}$$

Voor smeltlassen die vakkundig zijn gelegd en waarvan de aangelaste proefplaten mechanisch onderzocht zijn geldt:

1. $z = 100$ als de gehele lasnaad geröntgend is;
2. $z = 80$ als de langsnaad niet is geröntgend;
3. $z = (a - d) / a \times 100$ bij rijen pijpen waarbij a de steek en d de uitwendige pijpdiаметer in de langsdoorsnede voorstelt;
4. $z = 60$ als de langsnaad niet is geröntgend en niet mechanisch onderzocht is;

Mechanisch onderzoek van in het verlengde aangelaste proefplaten is altijd voorgeschreven. De waarde z , het plaatpercentage, wordt in de formule voor het bepalen van de plaatdikte nog verminderd met een grootheid c indien:

1. Tengevolge van het achterwege blijven van het spanningsvrij gloeien er nog krimpspanningen aanwezig zijn;
2. Door ongelijke verhitting tijdens het bedrijf, warmtespanningen optreden;
3. De spanningstoestand in de dammen tussen de pijpgaten door uitrollen daartoe aanleiding geeft.

De grootheid c wordt ontleend aan de volgende tabel:

	Toestellen waarbij de warmtespanningen zijn te verwaarlozen (stoomvaten)	Toestellen waarbij de warmtespanningen niet zijn te verwaarlozen (stoomketels)
Soort constructie	c	c
Naadloze rompen	0	5
Gelaste rompen, gegloeid	0	5
Gelaste rompen niet gegloeid	10	15
Bij pijpgaten met ingewalde pijpen	0	5

In stoom- en waterhouders worden aan de einden meestal een aantal wijde pijpen geplaatst. Deze zogenoemde valpijpen voorzien de headers waarin de hellend opgestelde waterpijpen zijn bevestigd van water voor de stoomvorming. De betrekkelijk kleine dammen die in de rondgaande richting overblijven, moeten een sterkte percentage hebben dat tenminste gelijk is aan:

$$z = \frac{p \cdot (D + 6) \cdot x}{4 \cdot t \cdot S_{vt}} + c$$

Voorbeeld

De romp van een Schotse ketel wordt gelast, niet gegloeid in verband met de grote afmeting, maar wel worden de lasnaden geröntgend. De gegevens van de ketel zijn: $D = 4200$ mm, $p = 14$ kg/cm², verzadigde stoomtemperatuur danwel ketelwatertemperatuur 198 °C, $S_{B20} = 42$ kg/mm², $z = 100$, $x = 1,5$ en $c = 15$. De vraag is de plaatdikte van de romp te berekenen.

De romp neemt de verzadigde stoomtemperatuur aan. De treksterkte S_{vt} bij deze temperatuur is:

$$S_{vt} = \frac{5}{9} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{t}{525} \right)^2 \right\} \cdot S_{B20} = \frac{5}{9} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{198}{525} \right)^2 \right\} \cdot 42 = 20 \text{ kg/mm}^2$$

De plaatdikte volgt dan uit:

$$t = \frac{p \cdot D \cdot x}{2 \cdot S_{vt} \cdot (z - c) - p \cdot x} = \frac{14 \cdot 4200 \cdot 1,5}{2 \cdot 20 \cdot (100 - 15) - 14 \cdot 1,5} = \frac{14 \cdot 4200 \cdot 1,5}{3400 - 21} = 26 \text{ mm}$$

Opgemerkt wordt dat in de noemer de vermindering van 3400 met 21, de correctie op de spanning in de doorsnede van de plaat, nauwelijks van invloed is op de berekende plaatdikte.

Als de romp inplaats van gelast geklonken zou worden met een dubbele stripnaad, $x = 4$, dan volgt de plaatdikte bij een plaatpercentage van $z = 85$ % uit:

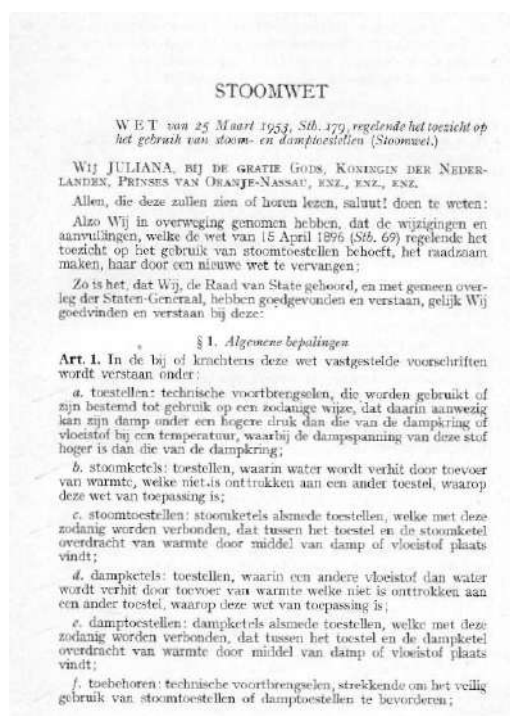
$$t = \frac{p \cdot D \cdot x}{2 \cdot S_B \cdot z} = \frac{14 \cdot 4200 \cdot 4}{2 \cdot 42 \cdot 85} = 33 \text{ mm [mm]}$$

Uit de berekende plaatdiktes voor gelaste en geklonken verbindingen mag worden opgemaakt dat door middel van lassen ongeveer 20 % kan worden bespaard op materiaal en voor zover dat van belang is op gewicht.

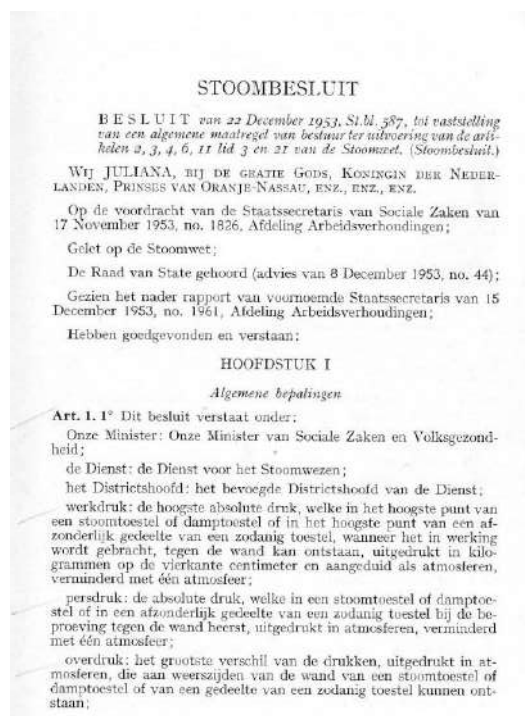
4.13 Vergunningen en beproevingen

Algemeen

Een stoom- of damptoestel dat in werking is gebracht, kan gevaar opleveren voor personen in de omgeving en ook schade aan eigendommen veroorzaken. De overheid heeft daarom, al sinds het begin van de 19^e eeuw, het gebruik wettelijk geregeld en oefent zelf toezicht uit op de vervaardiging en het gebruik van de hiervoor aangeduide toestellen.



Aanhef Stoomwet van 25 maart 1953



Aanhef Stoombesluit van 22 december 1953

De dienst die hiermee van overheidswege was belast heette het stoomwezen. Het stoomwezen is in 1994, na een proces van ongeveer 12 jaar geprivatiseerd, en bestaat als zodanig niet meer echter de oude wet- en regelgeving die is samengevat in de stoomwet en stoombesluit worden door de nieuwe toezichthoudende instanties bij installaties van voor 1994 nog steeds van toepassing verklaart. Dit betekent dat materialen, het gebruik hiervan, de inrichting van de stoomtoestellen de vereiste inspecties, bediening, onderhoud en keuringen, bij overwegend alle oude museale gemalen, nog aan de hand van deze oude wet- en regelgeving worden getoetst.

De stoomwet en de Milieuwet

De Stoomwet was een in 1824 voor het eerst opgestelde Nederlandse wet waarin veiligheidsvoorschriften omtrent stoomketels en stoommachines werden geregeld. De invoering van de wet hing samen met de opkomst van de stoommachine in Nederland en de risico's die met ondeugdelijke apparatuur, slecht onderhoud en ondeskundige of onzorgvuldige bediening ervan samenhangen. De wet is herzien in 1868, 1896, 1939 en ten slotte op 15 maart 1953. De technische regels waren vastgelegd in de Regels voor Toestellen onder Druk (RToD). De regelgevende en toezichthoudende instantie van de Nederlandse overheid hiervoor was de Dienst voor het Stoomwezen.

Privatisering stoomwezen

In de jaren tachtig en negentig van de 20^e eeuw kwam er vanuit de Europese Unie nieuwe en meer regelgeving voor de veiligheid van producten, van onder andere drukapparatuur zoals: de Richtlijn Drukapparatuur (Pressure Equipment Directive – PED, Richtlijn 97/23/EG); de Richtlijn voor Simpele Drukvatens (Simpel Pressure Vessel Directive – SPVD; de Richtlijn voor Transportabele Drukapparatuur (Transportable Pressure Directive – TPED). Hiermee werd de nieuwbouw van drukapparatuur voortaan op Europees niveau geregeld.

Binnen Nederland is de overheid vervolgens, conform deze EU regelgeving, de nationale wetgeving voor het in gebruik nemen van drukapparatuur en de gebruiksfase gaan aanpassen. Al deze regelgeving is samengevoegd in het Warenwetbesluit Drukapparatuur (WBDA). Hiermee is de nationale wetgeving met betrekking tot stoom- en dampstoestellen in Europa geharmoniseerd en is de oude stoomwet per 1 januari 2008 ingetrokken.

Het Toezicht op naleving van het WBDA is ondergebracht bij een private NL Conformiteitsbeoordelings- instantie (NL- CBI), voorheen Aangewezen Keuringsinstantie (AKI).

Een NL – CBI wordt aangewezen door het Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid (SZW). Om aangewezen te worden moet de NL CBI aantoonbaar kennis en kunde in huis hebben van drukapparatuur en werken volgens een kwaliteitssysteem ISO 17020, geaccrediteerd door de raad van Accreditatie (RVA).

Uitvoering stoomwet

De inspectie van de Stoom- en dampstoestellen werd aanvankelijk uitgevoerd door de Dienst van het Stoomwezen, De dienst met het hoofdkantoor in 's-Gravenhage was onderverdeeld in een aantal districten verspreid over het land. Het aantal districten en de districtsgrenzen zijn in de loop van de tijd veranderd en na de overname van het inmiddels geprivatiseerde Stoomwezen door Lloyds Register Stoomwezen in 1994, geheel komen te vervallen. Stoomwezen B.V., zoals de oude dienst heette, heeft substantieel meegeholpen om het WBDA en de uitvoering alsmede het toezicht hierop vorm te geven. Lloyd's Register Stoomwezen maakt deel uit van Lloyd's Register Energy Nederland. Het moederbedrijf is Lloyd's Register die kan bogen op meer dan 250 jaar ervaring met het toezicht op de bouw en survey van in werking zijnde stoominstallaties bij allerlei soorten industrieën en de scheepvaart.

Lloyd's is in 2012 tevens een van de zes aangemelde instanties voor de uitvoering van de Richtlijn Drukapparatuur zoals de periodieke keuring van stoomketels. Uitvoering van deze richtlijn valt onder verantwoordelijkheid van het Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid.

Door dit ministerie zijn inmiddels de volgende keuringsinstanties aangewezen voor de controle van drukapparatuur. Deze bevoegde instanties werden voorheen AKI's maar tegenwoordig aangemelde instanties of in het Engels Notified Bodies (NoBo's) genoemd.

Overzicht van aangemelde instanties (Notified Bodies) voor de uitvoer van de Richtlijn Drukapparatuur:

- Vinçotte - Breda, NoBo nr. 0954
- Energie Consult Holland - Ede, NoBo nr. 1242
- KIWA - Rijswijk, NoBo nr. 0620
- Lloyds Register - Rotterdam, NoBo nr. 0343
- Norske Veritas - Rotterdam, NoBo nr. 0427
- Veritas Quality International - Amersfoort, NoBo nr. 1151

4.13.1 Vergunning

In de oude stoomwet zijn alleen de principiële bepalingen vastgelegd. Een nadere omschrijving vindt plaats in Algemene Maatregelen van Bestuur (A.M.v.B.). In dit geval het Stoombesluit, het vergoedingsbesluit stoom- en dampstoestellen en voorts in ministeriële beschikkingen en voorschriften, uitgevaardigd door het Hoofd van de Dienst voor het Stoomwezen.

Tot de in de Stoomwet voorkomende algemene bepalingen behoren in het kort:

- Een ruime omschrijving van de toestellen die onder het toezicht van de Dienst voor het Stoomwezen worden gesteld;
- De verplichtingen van de gebruiker van een onder toezicht van de Dienst voor het Stoomwezen gesteld toestel;
- Een omschrijving van bevoegdheden en de verplichtingen van de ambtenaren belast met het toezicht;
- De bepalingen op welke overtredingen straffen zijn gesteld.

Een ontwerp van een wet moet een groot aantal instanties passeren, onder ander de beide Kamers der Staten -Generaal voordat de wet in werking kan treden. Dit heeft tot gevolg dat het tot stand komen van een wet of een wetswijziging veel werk en tijd vergt. Daarom geschiedt de nadere uitwerking van de in de wet gegeven algemene bepaling in een Algemene Maatregel van Bestuur (AMvB). Ook wel Koninklijk Besluit (KB) genoemd. Een Koninklijk besluit behoeft niet de goedkeuring van de 1^e en de 2^e kamer, wel die van de Raad van State, en leent zich derhalve beter dan een wet tot het snel regelen van de technische details en wijzigingen die bij de voortgang van de techniek noodzakelijk blijken. Het stoombesluit is dus een nadere en veelal technische uitwerking van de stoomwet.

Het op de Stoomwet steunende Stoombesluit viel onder de verantwoordelijkheid van de Minister van Sociale Zaken en Volksgezondheid het huidige SZW, onder wiens departement ook het Stoomwezen ressorteerde. Voor enkele bepalingen kan ook de bevoegdheid tot nadere regeling aan de desbetreffende minister worden verleend.

De Dienst voor het Stoomwezen is belast met het toezicht op de naleving van de wettelijke bepalingen (artikel 3 van de wet) en het hoofd van deze dienst is bevoegd ten aanzien van de constructie en het materiaal van stoom- en damptoestellen eisen te stellen en deze aan een keuring te onderwerpen.

De voorschriften uitgevaardigd door het Hoofd van de Dienst voor het Stoomwezen zijn ondermeer; "Grondslagen waarop de beoordeling van het materiaal en de constructie van stoom- en damptoestellen berust".

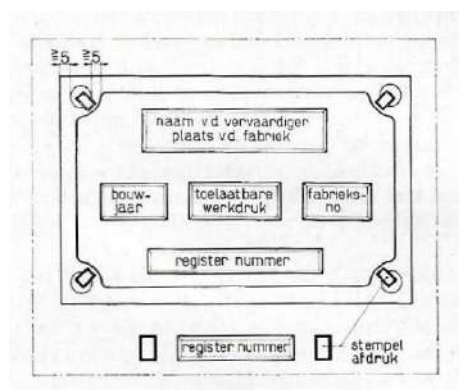
De werkzaamheden van de met de met het toezicht belaste ambtenaren van de dienst bestaan normaliter onder meer uit:

- De beoordeling van de constructie aan de hand van werktekeningen;
- De beoordeling van de attesten betreffende de beproeving van voor een toestel bestemde of gebruikte materialen;
- Eventueel het keuren van voor een toestel bestemde of gebruikte materialen;
- Het toezicht op de vervaardiging van stoom- en damptoestellen en de keuring van de bedrijfsklaar opgestelde toestellen en de toebehoren ervan. Deze keuring geschiedt dus voordat de toestellen daadwerkelijk in gebruik worden genomen;
- De periodieke controle op de toestand, waarin een toestel en de toebehoren hiervan ten gevolge van het gebruik zich bevinden;
- Het toezicht op de naleving van de voorschriften, die tijdens het bedrijf door de gebruiker en door degene die het toestel bedient in acht genomen moeten worden.

Vergunningsbewijs en controleboek

In het algemeen is voor het in werking brengen van een stoomketel bij een gemaal een vergunning nodig. Dit feit heeft consequenties voor de fabrikant van de ketel, het bedrijf dat onderhoud uitvoert, maar ook voor de gebruiker. Zo moet de gebruiker oordeelkundig met zijn toestel omgaan en rekening houden met periodieke keuringen en beproevingen.

Elk vergunning plichtig stoom- of damptoestel is voorzien van een vast met het toestel verbonden



stempelplaat van voorgeschreven afmeting, materiaal en opschrift. Op de vier hoeken is op de kop van de roodkoperen klinknagels het rijkswapen, een leeuwjtje, ingeslagen. In het ketelfront wordt onder de stempelplaat het registernummer van het op de stempelplaat vermelde nummer ingeslagen. Een en ander zoals hiernaast is aangegeven. De gegevens corresponderen met de voor de stoomketel afgegeven vergunning. Deze zogenoemde akte van vergunning wordt opgenomen in het controleboek.

Stempelplaat

De akte van vergunning vermeldt:

- De naam van de gebruiker;
- De grootte van het VO bij ketels;
- De grootte van de inhoud bij vaten;
- Een omschrijving van de wijze waarop de ketel of het vat mag worden gebruikt;
- De voorwaarden waaraan moet worden voldaan om de vergunning van kracht te doen zijn.

Deze voorwaarden zijn in het kort:

- Dat de toegestane werkdruk niet wordt overschreden;
- Dat de constructie van de ketel niet wordt gewijzigd;
- Dat de ketel in werking wordt gebracht onder de omstandigheden, op de wijze en door de gebruiker, als aangegeven in de in het controleboek opgenomen staat van gegevens;

Het controle handboek bevat de volgende documenten en gegevens;

- Het vergunningsbewijs;
- Een bewijs van onderzoek en beproeving;
- Een constructie tekening van de ketel;
- Een staat van gegevens betreffende de ketel, opgemaakt door het districtshoofd voor het Stoomwezen;
- Een aantal genummerde blanco bladen, uitsluitend bestemd voor het maken van aantekeningen door ambtenaren van het Stoomwezen.

De ambtenaar vermeldt op de hiervoor aangegeven blanco bladen na elke inspectie zijn bevindingen. Ook worden de doorgevoerde reparaties aan de ketel hier omschreven.

De gebruiker moet het controleboek in goede staat houden en altijd kunnen overleggen aan de ambtenaar van het Stoomwezen.

Het mag duidelijk zijn dat het controleboek een belangrijke gegevensbron is voor de gebruiker van de oude stoominstallaties van gemalen.

MINISTERIE VAN LANDBOUW, NIJVERHEID EN HANDEL.

DE MINISTER VAN LANDBOUW, NIJVERHEID EN HANDEL.

De uitgestrektheid van het verwarmd oppervlak bedraagt **30** M². en dat van het verwarmd oppervlak M².

Op deze ketel zijn twee veiligheidskleppen *met hefboom en gewicht belast.*

De kleppen hebben de volgende middellijn *50* m.M.
en eene totale belasting van *263.3* K.G.

De afmetingen der veeren bedragen	hoogte	middellijn (uitwendig)	spoed	dikte draad
De lengte van den korten hefboomsarm bedraagt				
De lengte van den langen hefboomsarm bedraagt				
Het gewicht aan den hefboom bedraagt <i>42.1</i> K.G., bestaande uit:				
<i>12</i> schijven van <i>225</i> m.M. middellijn, waarvan <i>11</i> elk dik <i>14</i> m.M. en <i>1</i> dik <i>16</i> m.M.				
De spanning aan den hefboom bedraagt	<i>K.G.</i>			
Het gewicht van de veerde bedraagt	<i>K.G.</i>			
De afstand tusschen onderkant hefboom en bovenkant veerde bedraagt	<i>m.M.</i>			
De hoogte der stellingen bedraagt				
De voeding geschiedt door <i>een injecteur en twee stoompompen</i>				
De ketel <i>is</i> voorzien van looden prop, <i>2</i> waterpeilglazen, <i>proefsluizen</i> , manometer en alarmfluit.				
Het onderzoek en de beproeving hebben plaats gehad op <i>5 Juli 1910</i> en het nader onderzoek van het toebehooren op <i>7 December 1910</i>				
Er is in deze geene ontheffing van voorschriften verleend, ingevolge art. 79 van bovengenoemd besluit				

IV. 13 Dec 1910

I de vergunning, uitgesloten is de toelating van de ketel in de fabriek van de Staat, in plaats van de voeding met stoom door een injecteur en twee stoompompen. De voeding van de ketel is voorzien van looden prop, 2 waterpeilglazen, manometer en alarmfluit, worden genomen. De voeding geschiedt door de machine, pompen en de injectoren. De ketel is voorzien van 2 waterpeilglazen, manometer en alarmfluit.

N^o 51608 ² De Minister van Sociale Zaken, Gelet op het verslag van de inspectie van het Stoomwese, heeft in het stadsdistrict te Brn herv, van 16 Februari 1910, N^o 50084.

Heeft goed gevonden: I

II De vergunning, uitgesloten is de toelating van de ketel in de fabriek van de Staat, in plaats van de voeding met stoom door een injecteur en twee stoompompen. De voeding van de ketel is voorzien van looden prop, 2 waterpeilglazen, manometer en alarmfluit, worden genomen. De voeding geschiedt door de machine, pompen en de injectoren. De ketel is voorzien van 2 waterpeilglazen, manometer en alarmfluit.

De ketel is voorzien van twee veiligheidskleppen met hefboom en gewicht belast. De middellijn der klepopening bedraagt 50 mm en de totale belasting 263,3 kg.

De hefboomsarmen hebben een lengte van 80 mm en 400 mm.

Het gewicht aan de hefbooms heeft een waarde van 42,6 kg en bestaat uit 11 schijven. De afmetingen van het gewicht zijn: middellijn 227 mm, hoogte 165 mm.

4.13.2 Keuring en beproeving

Keuring

Een stoom- of damptoestel zoals we die tegen komen in gemalen moeten telkens na verloop van 2 jaar aan een keuring worden onderworpen. De bedoelde keuring omvat:

- Bij stoom- en damptoestellen , welke inwendig kunnen worden onderzocht, een inwendige onderzoeken op het tijdstip , waarop het districtshoofd dit nodig acht, tevens een uitwendig onderzoek, een beproeving of een onderzoek van het materiaal.
- Bij stoom- en damptoestellen, welke niet inwendig kunnen worden onderzocht een beproeving en op het tijdstip, waarop het districtshoofd van het Stoomwezen dit nodig acht tevens een uitwendig onderzoek of een onderzoek van het materiaal.

Als het niet het niet mogelijk is het inwendige van een toestel te onderzoeken wordt meestal volstaan met een herbeproeving onder druk. Het verwijderen van de bekleding danwel bemetseling kan daarvoor noodzakelijk zijn om de 4, 8 of 12 jaar.

Stoomketels worden uiterlijk 25 jaar na de vervaardiging onder waterdruk beproefd en uitwendig onderzocht. Voor een uitwendig onderzoek is het verwijderen van de isolatie voorgeschreven en zo nodig moet de ketel worden gelicht of gekanteld om ook de oplegpunten te kunnen inspecteren. Van geklonken ketels die 40 jaar in gebruik zijn geweest moet een aantal nagels, bij voorkeur in de buitenrij van een onder de waterlijn liggende langснаad worden verwijderd (uitgeboord niet gesneden). Voor het geval er geen langснаad in de waterruimte ligt, worden twee nagels uit de in de waterruimte liggende dwarsnaden verwijderd. De nagelgaten worden met een daartoe geschikt (magnetisch) toestel onderzocht op haarscheuren.

Van de eventueel waargenomen scheurtjes stelt men vast deze zijn transkristallijn (ontstaan door te hoge klinkdruk of extra buigspanning) danwel interkristallijn (ontstaan door loogbroosheid). In het laatste geval wordt een stuk uit de ketelplaat genomen voor nader onderzoek. Na het inlassen en opnieuw klinken van de nagels wordt de ketel met waterdruk beproefd. Verwijdering van de gehele bekleding of bemetseling wordt bij dit onderzoek niet voorgeschreven.

Beproeving

Het persen, op druk beproeven, gebeurt altijd met water omdat een vloeistof anders dan een gas niet samendrukbaar is en bij een lekkage of breuk tijdens de beproeving de bezwijkende delen geen gevaar vormen voor de omgeving of schade zullen berokkenen aan installaties.

De persdruk welke bij de beproeving van een stoom of damptoestel moet worden uitgeoefend is afhankelijk van de overdruk tegen de wand van het toestel of tegen de wand van een gedeelte van het toestel, wanneer het in werking wordt gebracht.

Is de overdruk p niet groter dan 20 kg/cm² dan wordt de P_o persdruk voor de eerste beproeving:

$$P_o = 1,4 p$$

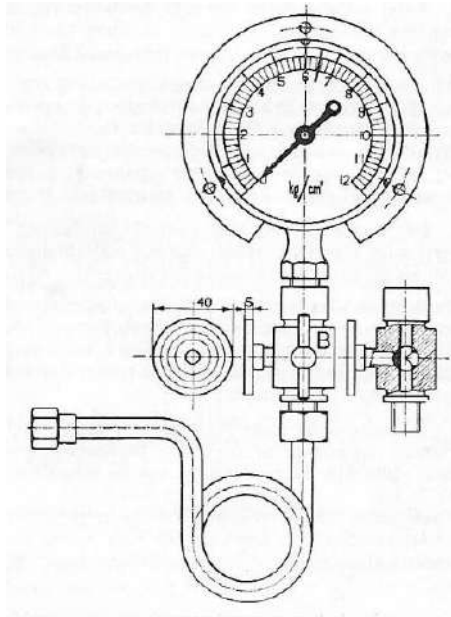
En voor een latere beproeving:

$$P_o = 1,3 p$$

Met dien verstande dat de persdruk P_o minstens 1 kg/cm^2 meer dan de overdruk p moet bedragen. Stoomdrukken groter dan 20 kg/cm^2 komen bij museale gemalen niet voor en blijven daarom in het kader van deze leidraad buiten beschouwing.

De beproeving onder druk duurt zo lang als nodig is om de verschillende delen van het stoom- of damptoestel behoorlijk te kunnen onderzoeken.

Ten behoeve van de beproeving moet het stoom- of damptoestel van een manometeraansluiting met een flens van 40 mm en een dikte van 5 mm waarop de geijkte manometer van het stoomwezen kan worden aangesloten.



Manometeraansluiting (t.b.v. beproeving)

4.14 Stoommachine

Een stoommachine kan worden beschouwd als een motor. In het algemeen verstaat men onder een motor een toestel, dat de een of andere vorm van energie kan omzetten in mechanische arbeid. De energie bij een stoommachine wordt in de vorm van een heet en onder druk staand gas – i.c. stoom - aangevoerd. Bij een verbrandingsmotor en elektromotor zijn dat respectievelijk een vloeibare- of gasvormige brandstof en elektriciteit. Al naar gelang het soort motor wordt de energie binnen of buiten het toestel omgezet in de voor de motor bruikbare vorm. Samengevat kan de stoommachine als volgt worden gedefinieerd:

Een stoommachine is een werktuig, dat energie, door middel van verbranding van een brandstof, in een afzonderlijk toestel verkregen en in de vorm van stoom aangevoerd, in mechanische arbeid omzet.

4.14.1 Soorten stoommachines

Men kan zuigerstoommachines zoals hierna is aangegeven onderscheiden in:

Direct of indirect werkende machines

Onder een direct werkende machine verstaat men een machine, waarvan de zuigerstang direct verbonden is met het aan te drijven werktuig, of waarbij de ronddraaiende beweging is verkregen via een kruk – drijfstangmechanisme.

Van de indirect werkende machines noemen we in dit kader slechts de balansmachine. Hierbij is de zuigerstang van de machine verbonden met een balansarm die vervolgens de beweging overbrengt op het aan te drijven werktuig; de pomp.

Naar de stand van de hartlijn van de cilinders in verticale en horizontale machines

De cilinders c.a. van deze soort machines liggen in een horizontaal of in een verticaal vlak. Beide uitvoeringsvormen zijn toegepast bij de aandrijving van opvoer- en hulpwerktuigen van polder- en boezemgemalen. Soms bepaalt het soort aandrijfwerktuig of gekozen moet worden voor een verticale of een horizontale stoommachine: denk hierbij aan de oude zuigerpomp installaties van de gemalen in de Haarlemmermeer. Een verticale opstelling vergt in het algemeen een kleiner bouwoppervlak maar een grote bouwhoogte om reparaties aan de zuigers van de machines uit te kunnen voeren. Bij de horizontale opstelling is daarentegen een groot vloeroppervlak vereist. De ruimte voor het uitbouwen van een zuiger moet daarbij in het horizontale vlak worden gezocht.

Naar de toegepaste stoomverdelingsorganen, schuiven of kleppen

Men noemt de machine een kleppenmachine indien de toe- en afvoer van de stoom geschiedt door middel van kleppen. Bij verreweg de meeste stoommachines worden bovengenoemde functies verricht door zogenoemde bakschuiven, zuigerschuiven en bosschuiven. Bij de bak- en bosschuif wordt nog weer onderscheid gemaakt tussen een binnenladende en een buitenladende schuif.

Enkel of dubbelwerkende machines

Een dubbelwerkende stoommachine is een krachtwerktuig waarbij aan beide zijden van de zuiger stoom wordt toegelaten en dus arbeid wordt verricht. Ten opzichte van een enkelwerkende stoommachine wordt, bij gelijke cilinder inhoud en toerental, in een dubbelwerkende stoommachine ongeveer twee maal zoveel vermogen ontwikkeld. Bovendien is de gang van een dubbelwerkende machine rustiger. Wel moet bij een dubbelwerkende machine meer aandacht worden besteed aan de zuigerstangafdichting. Enkel werkende stoommachines zijn behoudens bij het Gemaal Stroink bij Blokzijl, waar een verticaal opgesteld Jaffa stoommachine heeft gestaan, in de Nederlandse bemaling niet toegepast.

Machines met of zonder condensatie

Bij een stoommachine die met condensatie werkt wordt de afgewerkte stoom naar een condensor geleid om hierin tot water te worden verdicht, terwijl bij een machine zonder condensatie, de afgewerkte stoom naar de buitenlucht of naar een verwarmingstoestel wordt geleid. Dit soort machines noemt men ook wel hogedruk machines, waarmee wordt aangeduid dat deze met hoge, atmosferische tegendruk werken.

De afgewerkte stoom, waarvan de druk iets hoger is dan die van de dampkring, bezit nog een grote hoeveelheid warmte energie waarvan bij een doelmatige inrichting, bijvoorbeeld het voorwarmen van het ketelvoedingwater, nog een groot deel kan worden gebruikt.

De voordelen van condensatie zijn:

1. De tegendruk achter de zuiger van de stoommachine kan bijna 1 kg/cm² kleiner zijn waardoor de effectieve zuigerdruk eenzelfde bedrag groter is.
2. De stoomketel kan gevoed worden met warm dan wel warmer water waarmee op brandstof wordt bespaard.
3. Het ketelvoedingwater kan gedestilleerd water zijn hetgeen de levensduur van de stoomketel ten goede komt. Ook zijn de onderhoudskosten lager omdat de ketel minder vaak gereinigd hoeft te worden.

Bij condensatie wordt onderscheid gemaakt tussen injectie- en oppervlakte condensatie.

Injectiecondensatie

Bij injectie-condensatie wordt de afgewerkte stoom in directe aanraking gebracht met het afkoelingswater. Deze wijze van condensereren noemt men dan ook wel mengcondensatie en het toestel waar dit in gebeurt een mengcondensor. Een deel van het condensaat ook wel aangeduid als waste wordt aangewend als ketelvoeding water. Dit verklaart meteen dat een mengcondensor niet kan worden toegepast als er slechts brak koelwater beschikbaar is.

Oppervlaktecondensatie

Bij oppervlakte- condensatie wordt de stoom verdicht, door hem in aanraking te brengen met gekoelde oppervlakken, gevormd door een groot aantal nauwe dunwandige pijpjes, waar het afkoelingswater doorheen wordt gepompt. Het grote voordeel valt hier direct op. Het condensaat blijft gescheiden van het koelwater en kan na het verwijderen van de meegevoerde (cilinder)smeerolieresten naar de ketel worden gepompt.

Beide principes zullen verderop in deze leidraad nader uiteen gezet worden.

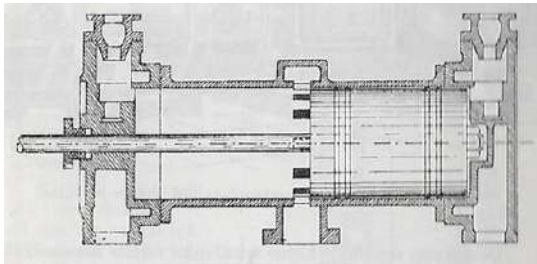
Naar de stromingsrichting van de stoom in de cilinder, wissel- of gelijkstroommachine

Wisselstroommachine

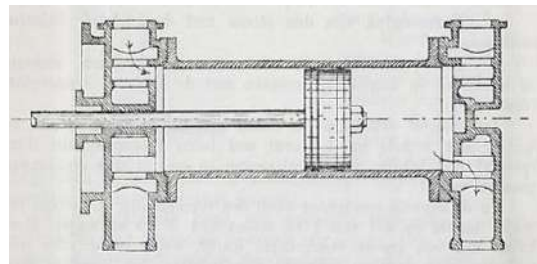
Bij een wisselstroommachine verlaat de stoom op nagenoeg dezelfde plaats de cilinder als waar de verse stoom binnen treedt. De verse stoom moet dus eerst de door de afgewerkte stoom afgekoelde vlakken opwarmen voor dat deze nuttige arbeid kan verrichten. Hoe groter het verschil in temperatuur tussen de verse- en afgewerkte stoom des te groter zijn de verliezen als gevolg van begincondensatie. Dit laatste is mede reden dat men stoommachines ontwikkeld heeft waar de expansie en daarmee de temperatuurdaling van de stoom over meerdere cilinders is verdeeld.

Gelijkstroommachine

Bij een gelijkstroommachine heeft de toelaat van stoom plaats over een klein gedeelte van de slag; daarna volgt expansie van de stoom, terwijl ongeveer 10 % voor het einde van de slag deze stoom wordt afgevoerd door openingen (poorten) die zich bij een dubbelwerkende machine in het midden van de cilinder bevinden. In tegenstelling tot de toevoer vindt de afvoer dus niet plaats via kleppen of schuiven maar door middel van de beweging van de zuiger langs de poorten in het loopvlak. De afgewerkte stoom stroomt in dezelfde richting weg als waarin de verse stoom in de cilinder is toegelaten. Hierdoor voorkomt men dat gedurende de uitlaat een sterke afkoeling langs tevoren verwarmde vlakken plaats vindt, zodat de begincondensatie van verse stoom geringer zal zijn. Doordat de poorten zich over de gehele omtrek bevinden stroomt de afgewerkte stoom gemakkelijk weg en behoeft de tegendruk nauwelijks te verschillen van de condensordruk. Terwijl het opvoeren van het vacuüm boven 80 % bij een wisselstroom installatie, wegens de begincondensatie geen nut heeft, kan bij een gelijkstroomstoommachine het vacuüm opgevoerd worden tot wel 95 %.



Gelijkstroommachine



Wisselstroommachine

Bij een wisselstroommachine verlaat de stoom op nagenoeg dezelfde plaats de cilinder als waar de verse stoom binnen treedt. De verse stoom moet dus eerst de door de afgewerkte stoom afgekoelde vlakken opwarmen voor dat deze nuttige arbeid kan verrichten. Hoe groter het verschil in temperatuur tussen de verse- en afgewerkte stoom des te groter de verliezen als gevolg van begincondensatie. Dit laatste is mede reden dat men stoommachines ontwikkeld heeft waar de expansie en daarmee de temperatuurdaling van de stoom over meerdere cilinders is verdeelt.

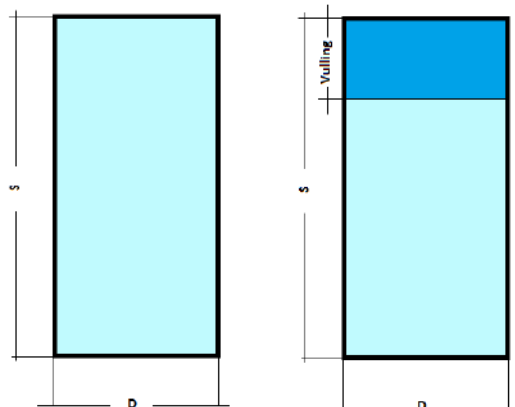
Voldruk- of expansiemachines

Bij een voldruk machine wordt gedurende de gehele zuigerslag, stoom van keteldruk in de cilinder toegelaten.

Expansiemachines werken met een gedeeltelijke stoom toelaat gedurende de zuigerslag waardoor, zoals hierna wordt uiteengezet, de in de stoom opgeslagen energie beter wordt benut.

Bij de expansiemachine wordt tevens aangegeven in hoeveel stappen de expansie plaats vindt. Men onderscheidt hierin de compoundmachine waar de expansie in twee- en de tripel-expansiemachine waar dat in drie stappen plaats vindt. Soms wordt bij de benaming de rangschikking van zuigers benoemd bijvoorbeeld: een tandem-compound stoommachine. Deze bij bemalingsinstallaties veel toegepaste stoommachine heeft twee, in diameter verschillende, zuigers op een en dezelfde zuigerstang, waarbij de expansie van de stoom in twee stappen plaats vindt.

In de techniek spreken we van een volle toelaat of volle vulling als de stoommachine gedurende de gehele zuigerslag stoom van keteldruk krijgt toegevoerd. In dit geval wordt dus bij iedere slag van de zuiger een hoeveelheid verse stoom gelijk aan de cilinderinhoud verbruikt en daarna naar de



Voldruk machine

Expansiemachine

volgende cilinder of de condensor afgevoerd. De stoomdruk in de cilinder blijft gedurende de gehele zuigerslag constant en is gelijk aan de druk van de verse stoom. Doordat het volle drukverschil tussen verse en afgewerkte stoom op de zuiger wordt uitgeoefend, zal deze met steeds de- zelfde kracht worden voortbewogen en veel arbeid (energie) leveren. Deze volle toelaat is verre van voordelig omdat er geen gebruik wordt gemaakt van de eigenschap van gassen, en dus ook stoom, om energie te leveren bij het expanderen of anders gezegd bij het uitzetten bij een lagere druk en temperatuur.

Beschouwen we, om dit nader toe te lichten, bovenstaande figuur waar de rechthoeken twee even grote stoomcilinders voorstellen met een diameter D en een zuigerslag van S meter. Werkt deze cilinder met volle toelaat dan is voor iedere zuigerslag een hoeveelheid stoom nodig van:

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot S \text{ [m}^3\text{]}$$

Heeft de stoom een druk van $P \text{ kg/m}^2$ en heerst onder de zuiger een druk van $p \text{ kg/m}^2$ dan is de kracht waarmee de zuiger wordt verplaatst :

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 (P - p) \text{ [kg]}$$

Aan het einde van de slag is een weg afgelegd van S meter en zal de stoom in de voldruk machine een arbeid hebben verricht van:

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 (P - p) \cdot S \text{ [kg.m]}$$

Als we daarentegen de stoom over slechts een deel, het eerste deel, van de zuigerslag toevoeren dan spreken we van een gedeeltelijke toelaat. In dat geval expandeert de stoom nadat de toelaat is gestopt en wordt er slechts een deel van de cilinderinhoud aan verse stoom verbruikt. Ook bij een gedeeltelijke toelaat wordt aan het einde van de slag de stoom naar een volgende cilinder of de condensor afgevoerd.

Laten we nu de stoom over slechts 25 % van de slag toe dan heeft de stoom een druk van $P \text{ kg/cm}^2$ en zal expanderen naar een druk $p \text{ kg/m}^2$ die even groot is als de tegendruk in het geval van de volle druk situatie. Ook de expanderende stoom, zij het in steeds mindere mate, zal de energie afgeven aan de zuiger. Met behulp van een indicateurdiagram kan worden aangetoond dat door deze expansie-machine dan een arbeid is verricht van 60 % van die van een voldruk-machine.

In formulevorm uitgedrukt:

$$A = 0,6 \cdot \frac{\pi}{4} D^2 (P - p) \cdot S \text{ [kg. m]}$$

In dit voorbeeld van de expansiemachine hebben we slechts een vierde deel van de hoeveelheid stoom gebruikt ten opzichte van de voldrukmachine. Als we dezelfde hoeveelheid stoom naar de expansiemachine zouden voeren zal deze vier keer zoveel energie leveren.

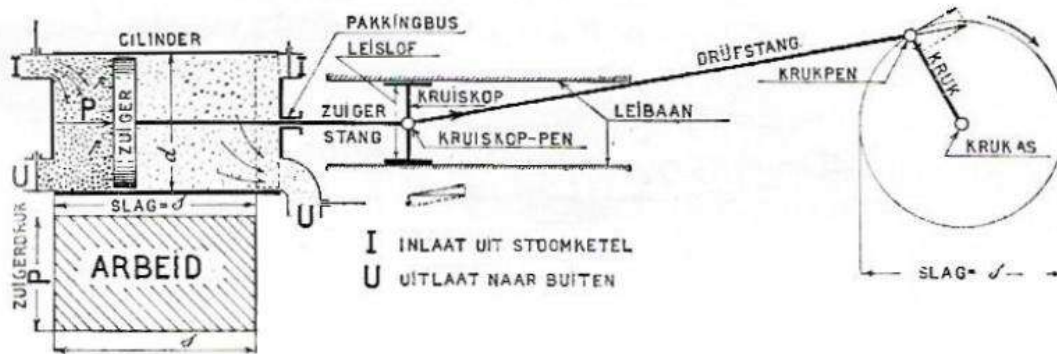
In formule vorm uitgedrukt:

$$A = 4 \times 0,6 \cdot \frac{\pi}{4} D^2 (P - p) \cdot S \quad \text{of} \quad A = 2,4 \cdot \frac{\pi}{4} D^2 (P - p) \cdot S \text{ [kg. m]}$$

Het koppel dat door een expansiemachine wordt ontwikkeld neemt tijdens de expansie steeds verder af. Bij een voldoende groot tegenwerkend koppel zal de machine dan stoppen. Dit is één van de redenen dat een expansiemachine altijd met een vliegwiel wordt uitgevoerd.

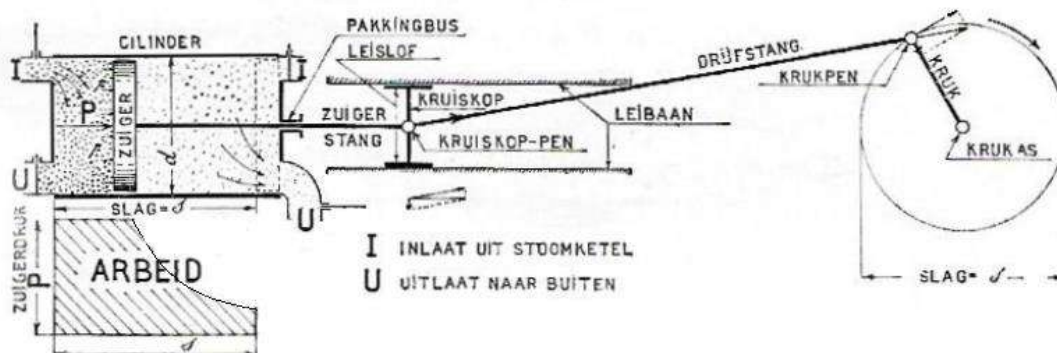
Volledruk stoommachines worden dan ook alleen toegepast waar een constant koppel over de volle slag van de zuiger wordt vereist zoals bij sommige ketelvoedingwaterpompen.

Bij de oorspronkelijk lage stoomdrukken bij stoommachines in het verleden, als gevolg van de constructieve beperkingen van de stoomketels, was expansie niet zo belangrijk. Stoom met een hogere stoomdruk maakte het mogelijk het al door James Watt (1736 – 1819) geopperde idee van expansie van de stoom praktisch toe te passen en de voordelen van een lager steenkoolverbruik op te strijken. Hogedruk-stoommachines werden voor het eerst in de praktijk gebracht door de vindingrijke Oliver Evans (1755 – 1819) in Noord Amerika en door een andere geniale uitvinder Richard Trevithick (1771 – 1833) in Engeland. Een minstens zo'n belangrijk ontwikkeling uit die tijd en waarmee ook op stookkosten kan worden bespaard is het zogenaamde compounding. De expansie van de stoom vindt dan in meerdere stappen en in verschillende steeds groter wordende cilinders plaats.



Schematische voorstelling voldrukstoommachine

Bij de voldrukmachine wordt over de gehele slag stoom van keteldruk aangevoerd. Het energieniveau van de stoom bij het afvoeren is hoog. Meestal wordt deze energie voor verwarmingsdoeleinden gebruikt zoals het opwarmen van het ketelvoedingswater.



Schematische voorstelling expansiestoommachine

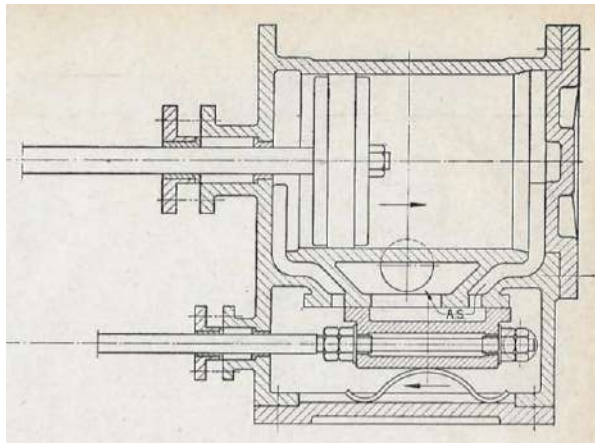
Bij de expansiemachine wordt slechts over een gedeelte van de slag stoom van keteldruk aangevoerd. Het overgrote deel van de energie in de stoom wordt als gevolg van de expansie, in de stoommachine omgezet in nuttige arbeid.

4.14.2 Begincondensatie en naverdamping meervoudige expansie

We zullen nagaan wat er gebeurt als bijvoorbeeld aan de dekselzijde van de cilinder van een expansiemachine stoom wordt toegelaten door middel van de stoomschuif.

De verse stoom van hoge temperatuur stroomt uit de schuifkast door de stoompoort naar de cilinderruimte achter de zuiger. De zuiger beweegt naar het deksel toe en, heeft zij een zekere afstand afgelegd, dan sluit de stoomschuif het toevoerkanaal en de stoom begint te expanderen in de cilinder. Tijdens deze expansie daalt zowel de druk als de temperatuur van de stoom. Is de zuiger ongeveer aan het einde van de slag gekomen dan opent de schuif de afvoerpoort en de afgewerkte stoom verlaat via dezelfde poort en langs de binnen- kant van de schuif de cilinder en wordt naar

buiten afgevoerd. Daarbij staan deze gedeelten van de cilinder en de stoompoort in verbinding met een ruimte waarin een betrekkelijk lage temperatuur heerst waardoor de wanden van de cilinder en de stoompoort eveneens sterk in temperatuur dalen. Wordt bij het begin van de volgende slag nu weer stoom toegevoerd aan A.S.-zijde, dan komt deze stoom direct in contact met deze veel



koudere wanden van de stoompoort, de zuiger, de cilinderbodem en de cilinder. Het gevolg daarvan is dat een gedeelte van de toegevoerde stoom condenseert. Dit heeft plaats bij het begin van de zuigerslag, daarom spreekt men van begincondensatie. Naarmate de zuiger verder beweegt, komt een groter gedeelte van de cilinderwand met de verse stoom in aanraking. Dit wandgedeelte bevond zich even tevoren nog aan de deksel zijde van de zuiger waar op dat moment de afvoer met een veel lagere temperatuur plaats vindt.

Stoomcilinder en schuifkast

De condensatie wordt aanvankelijk dus steeds sterker en, omdat het condensaat een zeer klein volume heeft, zal de daardoor in de cilinder ontstane ruimte onmiddellijk worden aangevuld met verse stoom uit de schuifkast. De vulling van de cilinder zal bijgevolg een grotere stoomhoeveelheid vereisen dan men in verband met de cilinderafmetingen en de door de zuiger afgelegde weg geneigd zou zijn aan te nemen. De condensatie is vooral daarom zo sterk omdat de wanden onmiddellijk worden bedekt met een veel beter geleidend laagje water dat veel sneller de warmte opneemt dan stoom.

Is de toelaat beëindigt en dus de expansie begonnen, dan daalt de stoomdruk in de cilinder, waardoor het eerst op de wanden gevormde condensaat weer begint te verdampen. Dit verschijnsel noemen we naverdamping. Voor deze verdamping is veel warmte nodig die wordt onttrokken aan de cilinderwand, die daardoor weer in temperatuur daalt nadat ze eerst door de stoom was verwarmd. Deze verdamping is vooral sterk aan het einde van de slag dus als de afvoer begint en de cilinderruimte in verbinding staat met de condensor. De aldus gevormde damp wordt dus direct afgevoerd en zal dus geen nuttige arbeid leveren. Dientengevolge zal de tegendruk op de zuiger toenemen.

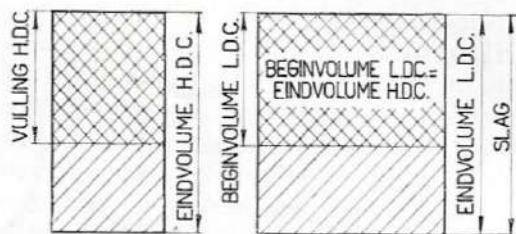
Het resultaat van de begincondensatie is dus dat het stoomverbruik van de machine groter wordt en dat door de naverdamping de wandtemperatuur wordt verlaagd en daardoor de ontwikkelde arbeid kleiner wordt.

Beide verschijnselen geven dus een belangrijk verlies, een verlies dat des te groter zal zijn, naarmate de hoogste en laagste cilindertemperatuur tijdens het arbeidsproces meer van elkaar verschillen. Om deze reden kunnen we de expansie van de stoom in de cilinder niet te ver laten doorgaan, want dan worden de begincondensatie en de naverdamping zo sterk dat alle winst van de expansie weer verloren gaat. Men kan de condensatie in de cilinder verminderen door de cilinder te voorzien van een dubbele wand, mantel genoemd, en door in deze mantel verse stoom te laten

circuleren voordat deze in de schuifkast komt. De gemiddelde temperatuur van de cilinderwand wordt daardoor hoger en vindt er minder condensatie plaats. Deze mantel verwarming kost echter weer extra stoom, zodat de winst niet erg groot is.

Een beter resultaat bereikt men door de expansie van de stoom in meerdere trappen te laten plaatsvinden.

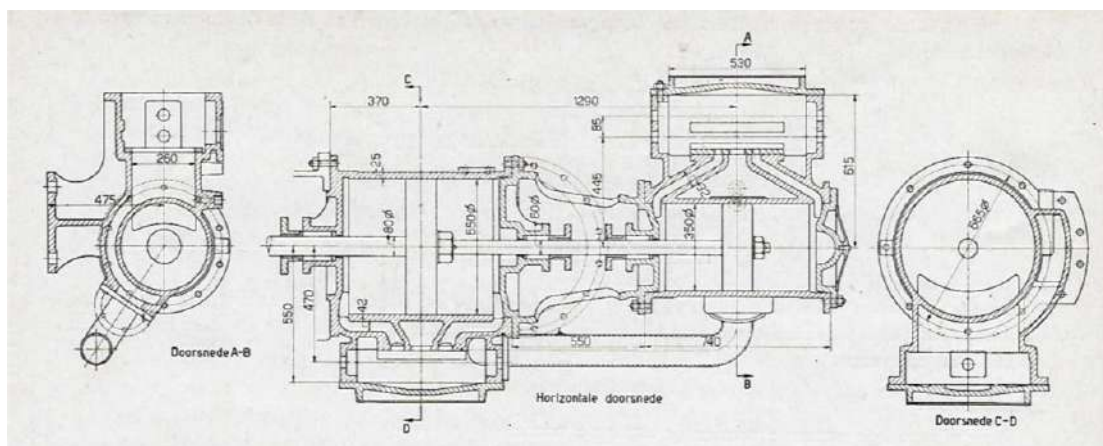
Men laat de stoom eerst expanderen in een eerste cilinder, de hogedrukcilinder (H.D.) genaamd. De vulling in deze H.D.-cilinder is, zoals onderstaande figuur laat zien, vrij groot bijvoorbeeld 60 %, waarna de stoom expandeert totdat het volume gelijk is geworden aan de totale inhoud van de H.D.-cilinder. Daarbij zijn zowel de spanning als de temperatuur gedaald. Leidt men nu de afgewerkte



stoom uit de eerste cilinder naar een volgende, dan kan in deze tweede cilinder de expansie verder worden voortgezet en opnieuw energie aan de stoom worden onttrokken. De inhoud van de tweede cilinder, lagedrukcilinder (L.D.) genaamd, moet uiteraard groter zijn dan die van de H.D.-cilinder, want de volledige inhoud van de H.D. vormt de vulling van de L.D.

Schema van tweevoudige expansie

Deze stoomhoeveelheid moet zoals in de bijgaande figuur is aangegeven in de L.D.-cilinder verder expanderen. Ook in deze tweede cilinder dalen weer de druk en de temperatuur van de stoom. De afgewerkte stoom van de L.D. wordt tenslotte afgevoerd naar de condensor. Op deze wijze kan men het totale temperatuurverschil over twee afzonderlijke cilinders verdelen waardoor de schadelijke condensatie veel geringer zal zijn. Een werktuig zoals hier voor beschreven en hier onder afgebeeld noemt men een compoundmachine.



Doorsnedes tandem compound machine

Bij de hiervoor afgebeelde horizontale stoommachine zijn de H.D. en L.D.-cilinder op één zuigerstang geplaatst. De cilinders kan men ook naast elkaar plaatsen. De machine wordt dan korter maar complexer omdat er twee krukmechanismen nodig zijn.

Men kan de expansie ook in drie of als men niet opziet tegen een nog complexere machine te construeren zelfs in vier stappen laten plaatsvinden.

Cilinderverhouding bij meervoudige expansie

Door het totale temperatuurverschil bij expansie over meerdere cilinders te verdelen kan het verlies als gevolg van begincondensatie en na-verdamping worden beperkt. Aangegeven is dat daarbij de opvolgende cilinders een steeds grotere middellijn moeten hebben omdat het specifieke volume van de stoom bij elke trap groter wordt. De vraag is hoe groot moeten we de cilinderverhoudingen nemen. Kennen we de soort verse stoom dan weten we de druk en de daarbij behorende temperatuur. Hier nemen we aan dat dit verzadigde stoom is van 12 kg/cm² (absoluut) en een temperatuur van 169,6 °C. Wordt de stoom vervolgens naar een condensor afgevoerd dan mag men hiervoor een druk van 0,4 kg/cm² (absoluut) hanteren waarbij de temperatuur, 75,4 °C, in de stoomtabel kan worden opgezocht. Uit deze gegevens kan zowel de temperatuurval als de drukval per trap worden afgeleid. Stellen we als tweede eis dat om constructie technische redenen en uniformiteit, de maximale zuiger- en de daaruit voortvloeiende drijfstangkrachten gelijk moeten zijn, dan kan men hieruit de gevraagde cilinderverhouding berekenen. We beschouwen een zogenoemde compoundmachine dus als een expansie in twee trappen.

Het totale temperatuurverschil is:

$$169,6 - 75,4 = 94,2 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

Of per trap:

$$\frac{94,2}{2} = 47,1 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

Daarmee wordt de stoomtemperatuur van de stoom in de L.D. stoomschuifkast;

$$169,6 - 47,1 = 122,5 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

Deze temperatuur komt volgens de stoomtabel overeen met een druk van 2,2 kg/cm².

Als nu D₁ en D₂ de diameters zijn van respectievelijk de H.D. en L.D. cilinder, dan kan bij gelijke drijfstangkracht de volgende betrekking worden opgesteld.

$$\frac{\pi}{4} D_1^2 (8 - 2,2) = \frac{\pi}{4} D_2^2 (2,2 - 0,4)$$

Of vereenvoudigd:

$$5,8 D_1^2 = 1,8 D_2^2$$

Dus:

$$\frac{D_1}{D_2} = \sqrt{\frac{5,8}{1,8}} = 1,8$$

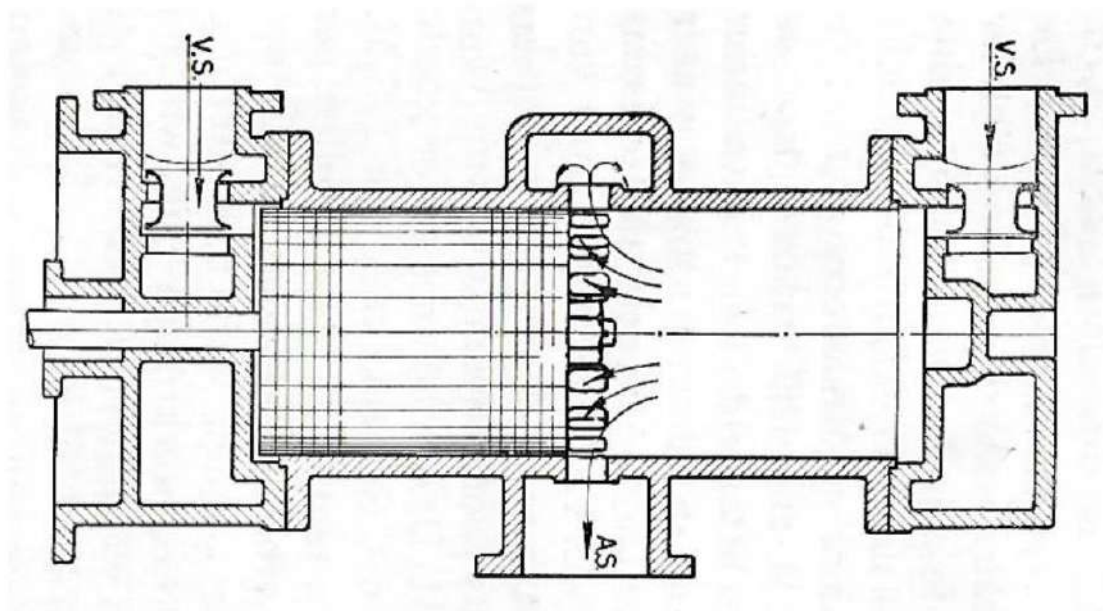
De zuigerdiameters verhouden zich als:

$$D_1 : D_2 = 1 : 1,8$$

De slagvolumes verhouden zich als:

$$D_1^2 : D_2^2 = 1^2 : 1,8^2 = 1 : 3,2$$

Bij de bovenstaande beschouwing is er steeds van uitgegaan dat de afgewerkte stoom aan dezelfde zijde van de cilinder wordt afgevoerd als ze is aangevoerd. Verlaten we dit principe en laten we de stoom toe aan één zijde van de cilinder en voeren we het af aan de andere zijde dan worden de temperatuurverschillen bij zowel de toevoer- als de afvoerszijde geringer, en treedt er minder begincondensatie en na-verdamping op. De afvoer bij een gelijkstrooommachine vindt plaats via de in de cilinder aangebrachte poorten. Deze poorten zijn in de omtrek van de cilinder aangebracht en voeren de stoom van zowel de deksel als de as-zijde van de machine af. De zuiger die het moment van het openen en sluiten van de afvoer bepaalt heeft om die reden ongeveer de lengte van de slag. De toevoer vindt meestal plaats met kleppen of zogenoemde zuigerschuiven. Een groot aantal fabrikanten hebben machines geconstrueerd waarbij de toevoer en afvoer van de H.D.-cilinder volgens het wisselstroom en de L.D. -cilinder volgens het gelijkstroom principe is uitgevoerd.



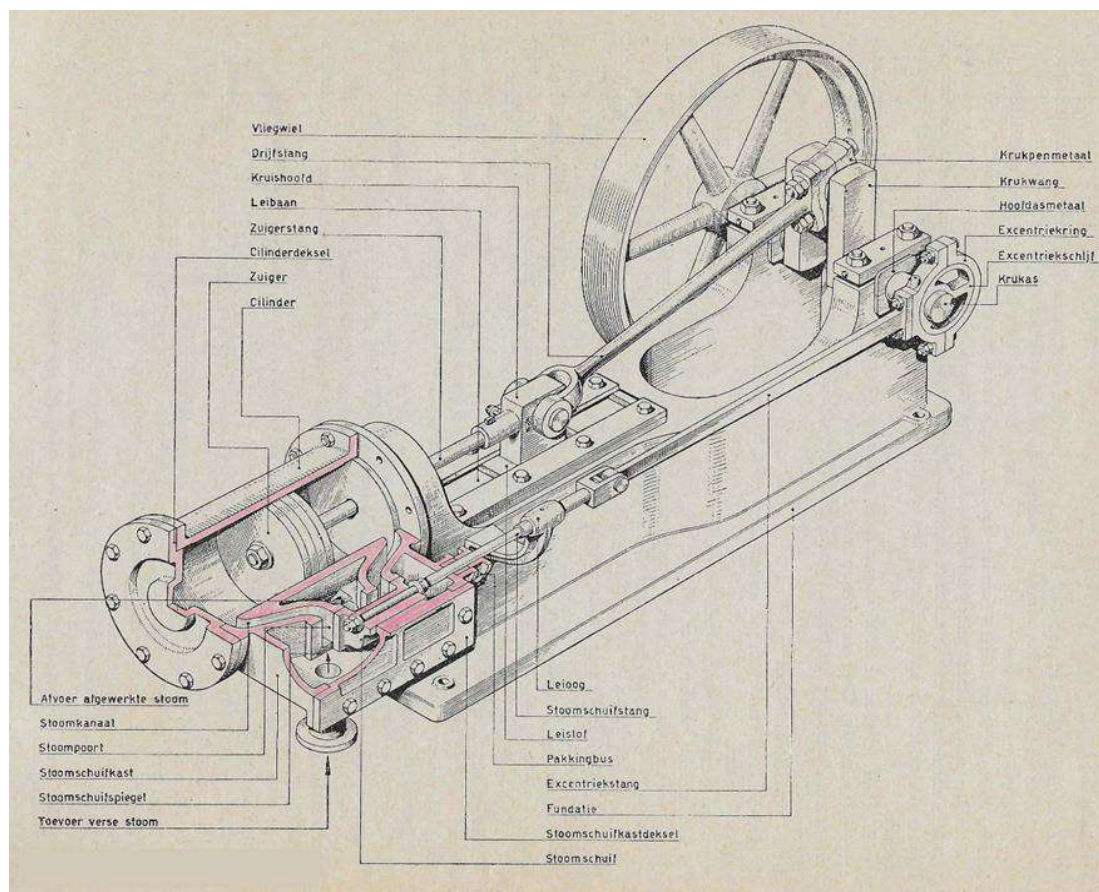
Gelijkstrooommachine

4.14.3 Inrichting en werking zuigerstoommachine

In zijn meest elementaire vorm bestaat een stoommachine uit een cilinder waarin zich een zuiger bevindt die door middel van (stoom) druk (verschil) wordt bewogen.

Door fabrikanten van stoommachines is in de loop der tijd eindeloos gevarieerd op dit basisprincipe met het oogmerk de in de stoom aanwezige energie op een zo efficiënt mogelijke manier om te zetten in nuttige arbeid. Grote doorbraken hierin zijn geweest om de stoom buiten de stoomcilinder te laten condenseren en om slechts over een deel van de slag stoom toe te voeren. Deze vindingen moeten aan de Engelsman James Watt (1736-1819) uit Glasgow worden toegeschreven. James was instrumentmaker en kreeg in de winter van 1763-1764 een demonstratiemodel van de atmosferische stoommachine van Thomas Newcomen (1663-1729) ter reparatie aangeboden. Het viel hem op dat deze machine nogal kwistig met stoom omging als gevolg van het bij elke slag afkoelen van de cilinder om condensatie mogelijk te maken. Daarna diende de cilinder opnieuw tot een temperatuur van 100 °C gebracht te worden. Dit bracht hem op het idee om de condensatie buiten de cilinder in een aparte condensor te laten plaatsvinden.

Onderstaande tekening geeft de samenstellende onderdelen weer van een eenvoudige liggende zuigerstoommachine. Aan de hand van deze tekening zullen een aantal in de techniek gebruikelijke namen en de werking nader worden verklaard.



Liggende zuigerstoommachine

In de getekende stand wordt aan de linkerzijde van de zuiger, dat is de niet krukzijde (NKZ), stoom in de cilinder toegelaten. De rechterzijde, de krukzijde (KZ) is verbonden met de condensor. Bij een verticaal opgestelde stoommachine spreekt men in dit verband over topzijde(T) en bodem zijde (B). De stoom, die uit de stoomketel wordt toegevoerd, noemt men de verse stoom (VS) en de stoom die na het verrichten van arbeid de machine verlaat de afgewerkte stoom (AS). Door het drukverschil tussen de verse stoom en de afgewerkte stoom ontwikkelde kracht wordt de zuiger naar de kruk toe bewogen.

De weg, die de zuiger in de cilinder kan afleggen noemen we de slag van de machine. Heeft de zuiger het einde van de slag bereikt dan zorgt het stoomverdelingsmechanisme, in dit geval de zogenoemde bakschuif, ervoor dat nu de verse stoom aan de rechterkant wordt toegelaten, terwijl nu de linkerkant van de cilinder met de condensor in verbinding wordt gebracht. De zuiger wordt nu naar links bewogen. Na deze cyclus begint opnieuw de toelaat aan de linkerzijde van de zuiger waardoor hij een heen- en weergaande rechtlijnige beweging krijgt. Omdat de stoom aan beide zijden van de zuiger in de cilinder wordt toegelaten is de machine dubbelwerkend. Zuigerstoommachines zijn overigens op enkele uitzonderingen na, altijd dubbelwerkend.

Behoudens bij zuigerpompgemalen moet de in de stoommachine ontwikkelde arbeid worden afgegeven aan een draaiende as, vandaar dat de heen- en weergaande beweging van de zuiger met behulp van een kruk-drijfstangmechanisme wordt omgezet in een draaiende beweging. Daartoe is het uiteinde van de zuigerstang, scharnierend bevestigd met de drijfstang. Het andere eind van de drijfstang grijpt om de krukpen van de kruk.

Het scharnier dat gevormd wordt door de zuigerstang en de drijfstang noemen we het kruishoofd. Om er voor te zorgen dat het kruishoofd zich volgens de hartlijn van de zuigerstang beweegt en om de dwarskrachten op te vangen is dit voorzien van een of twee leisloffen en een leibaan. Deze leibaan is onderdeel van de machinefundatie.

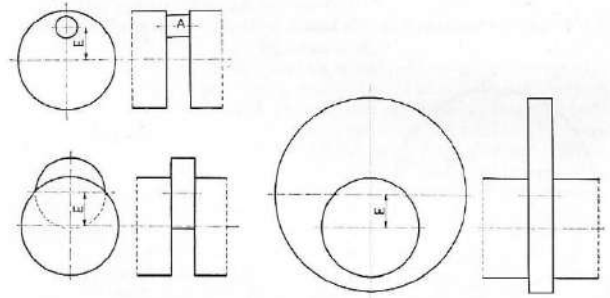
De in kussenblokken (robuust uitgevoerde glijlagers) opgelegde hoofdas van de machine noemen we de krukas. In het voorbeeld is een aan twee zijden gelagerde krukas te zien. Soms wordt hiervan afgeweken en past men een zogenoemde overhangende kruk toe. De krukas heeft dan maar één wang waarin de krukpen is bevestigd en niet zelden ook een hoofdlager dat tussen de halve kruk en het vliegwiel is bevestigd.

Voor een regelmatige gang van de machine maar in sommige gevallen, bijvoorbeeld om een enkelwerkende stoommachine te kunnen starten, wordt een vliegwiel aangebracht. Het vliegwiel doet in bepaalde situaties tevens dienst als riemschijf.

De stoomverdeling van de stoommachine in het voorbeeld is ondergebracht in een speciale aangegoten kast. In deze kast bevindt zich de stoomschuif die er voor zorgt dat steeds op het juiste moment de stoompoorten naar de cilinder worden geopend dan wel afgesloten. De stoomschuif, een zogenoemde bakschuif, wordt met behulp van een excentriek op de krukas, een excentriekstang en een schuifstang aangedreven. De stoomverdeling kan, afhankelijk van de fabrikant en het ontwikkelingsstadium van de stoommachine, ook met behulp van kleppen, zuigerschuiven of zogenoemde bosschuiven plaats vinden.

4.14.4 Excentriek

Het excentriek dient zoals eerder aangegeven om de stoom-zuiger of bossschuif die voor de stoomverdeling zorg draagt, te bewegen. Omdat de schuifslag ten opzichte van de slag van de machine slechts klein is valt de excentriciteit binnen de diameter van de as waardoor het constructief moeilijk is een klein krukje aan te brengen. Ook verzwakt het de krukas. Daarom maakt men de



kruk zodanig dik dat zij buiten de diameter van de krukas valt en de as niet verzwakt. De aldus gevormde kruktaap noemt men dan excentriekschijf. Deze schijf kan eenvoudig op de kruk of de excentriekas worden geklemd waardoor geen verzwakking optreedt als gevolg van verjonging dan wel materiaal uitsnede.

Overeenkomst excentriek met kruk

Een excentriek bestaat uit de volgende drie onderdelen:

- de excentriekschijf
- de excentriekring
- de excentriekstang

Als de excentriekschijf moet worden aangebracht tussen krukken of tussen een kruk en de as-koppeling moet men de schijf delen over het midden van het asgat. De beide delen worden dan door bouten of tapeinden met elkaar verbonden.

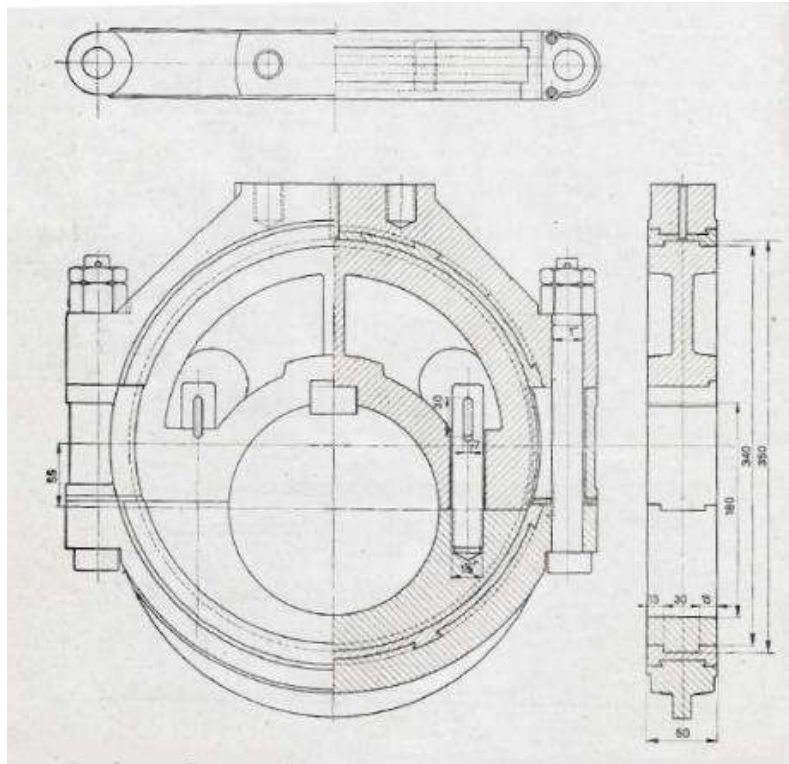
De afstand E noemt men de excentriciteit van de schijf waarvoor de volgende betrekking bestaat:

$$\text{Stoomschuifslag} = \text{dubbele excentriciteit}$$

Bij de constructie zoals in onderstaande afbeelding is te zien, zijn draadeinden met dwarsspieën gebruikt omdat er, en dat geldt vooral voor kleine machines, onvoldoende ruimte is voor moeren. Excentriek- schijven zijn in de regel van gietijzer gemaakt. Wil men de diameter zo klein mogelijk hebben dan maakt men het op de as bevestigde deel ook wel van staal.

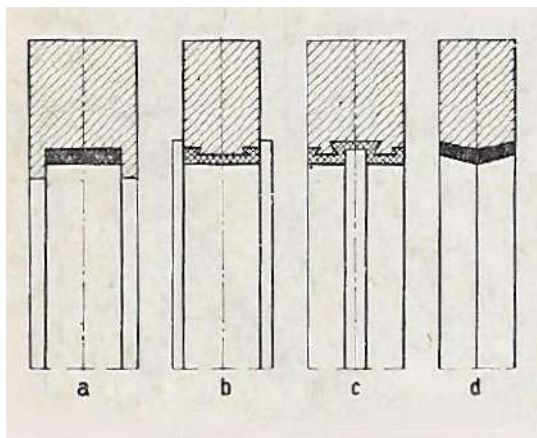
Om er voor te zorgen dat de twee schijfdelen zuiver in een vlak liggen voorziet men het deelvlak van een sponning of haakse las. Alhoewel de schijf stijf op de as wordt geklemd brengt men altijd een spie aan om draaien van de schijf om de as te voorkomen. Uit het voorgaande zien we dat de excentriekschijf noodzakelijkerwijs een grote diameter krijgt. Hierdoor kan de schijf een geringe breedte hebben zonder dat de vlaktedruk te groot wordt.

Om de excentriekschijf is de excentriekring aangebracht waarvan het ene einde is verbonden met de excentriekstang waarvan vervolgens het andere einde scharnierend aan de stoomschuifstang of het hefbomen- en stangenstelsel van de zuigerschuif is gekoppeld. Tussen de beide ringhelften worden een aantal betrekkelijk hoge holle dunne vulstukken aangebracht. Bij overmatige slijtage kan door het wegnemen van een of meerdere dunne vulstukken de daardoor ontstane speling worden teruggebracht.



Doorsnedes excentriekschijf

Bij kleine machines zijn de excentriekringen van brons gemaakt; bij de grotere van staal, gegoten staal of gietijzer. Zijn de ringen niet van brons gemaakt dan worden deze met witmetaal gevoerd.

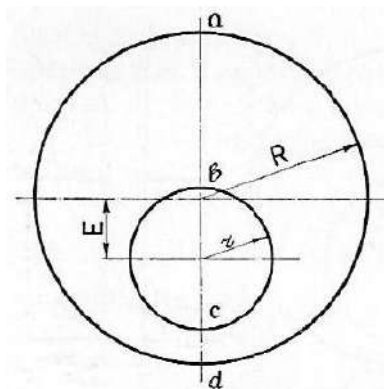


Het witmetaal wordt voorzover constructief noodzakelijk met zwaluwstaartvormige groeven vastgezet. Om te voorkomen dat de ringen zijdelings op de as bewegen past men een van de hiernaast afgebeelde constructies toe. Bij de voorbeelden a en b is de ring breder en is er dus meer ruimte nodig voor het excentriek dan bij de gevallen c en d. Bij de constructie c moet de helling niet te groot worden genomen omdat dit het draagvlak ongunstig beïnvloedt.

Soorten excentriekschijfvoeringen

Bepalen excentriciteit

Hoewel bij een op de as gemonteerde excentriekschijf de excentriciteit lastig is vast te stellen bestaat er toch een eenvoudige manier om in het werk de excentriciteit E te bepalen. Daartoe beschouwen we de hieronder afgebeelde figuur waarin R de straal van de schijf, r die van de as en E de excentriciteit voorstelt. We denken ons een hartlijn a-d getrokken door de middelpunten van de as en de schijf en zien dan de volgende twee betrekkingen:



$$ab = R + E - r$$

$$cd = R - E - r$$

Trekken we dit van elkaar af dan volgt hieruit:

$$ab - cd = 2E$$

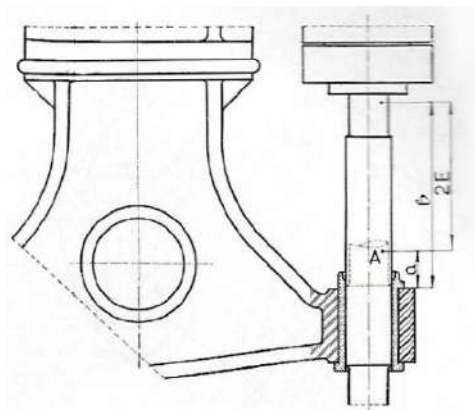
Of:

$$E = \frac{ab - cd}{2}$$

Opmeten excentriciteit

De stukken a-b en c-d, de langste- en de kortste middelpuntslijn op het oppervlak van de schijf, kunnen we gemakkelijk opmeten met behulp van een schuifmaat. E is dan het halve verschil van de twee lijnstukken.

Overigens is de excentriciteit bij een bestaande machine ook eenvoudig af te leiden door de schuifslag op te meten. Men tornt de machine zover dat de stoomschuif in de laagste stand staat.



Dan maakt men merk A op de stoomschuifstang even boven het leioog en tornt daarna de machine totdat deze in het bovenste punt staat. Was eerst a de afstand boven het leioog en is die afstand nu b geworden dan is de schuifslag $b - a$ en is dit dus de excentriciteit.

$$E = \frac{a - b}{2}$$

Opmeten van de schuifslag

Het spreekt voor zich dat het herleiden van de excentriciteit aan de hand van de schuifslag zoals hier voor is aangegeven niet opgaat bij schuiven en kleppen die door middel van een hefbomenstelsel worden bewogen.

4.14.5 Stoomverdeling

Bij de inleiding van de stoommachine hebben we al gezien dat een stoomschuif dient om regelmatig de verse stoom boven en onder de zuiger in de cilinder toe te voeren en de afgewerkte stoom af te voeren. Ook hebben we gezien dat de schuif door de machine zelf wordt bewogen. De stoommachine zorgt dus voor haar eigen stoomverdeling. Hier hoort bij iedere stand van de kruk een bepaalde stand van de stoomschuif.

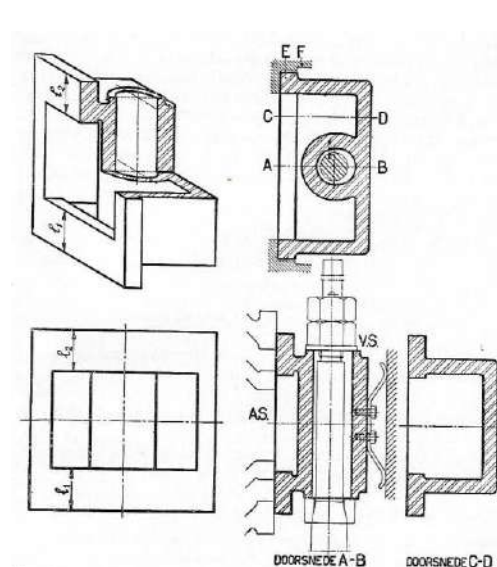
Stoomschuiven onderscheidt men in:

- Vlakke en cilindrische schuiven
- Buiten- en binnenladende schuiven
- Ontlaste- en niet ontlaste schuiven
- Gebalanceerde- en niet gebalanceerde schuiven
- Schuiven met enkelvoudige- en meervoudige toe- en afvoer

Een variant op de cilindrische schuif is de klep waarmee de stoom naar de machine wordt toe- en afgevoerd. Daarnaast kennen we een methode waarbij de stoom wordt afgevoerd via openingen, de zogenoemde poorten, in de wand van de cilinder. Bij deze manier van afvoer die onder andere bij gelijkstroomstoommachines wordt toegepast worden het moment van afvoer en de tijd geregeld door de stand van zuiger van de machine zelf.

Bakschuiven

In de onderstaande figuur zien we een vlakke schuif, de bakschuif, zo genoemd omdat zij de vorm heeft van een aan één zijde open bak. Aan deze open binnenkant heeft de schuif vlak geschaafde



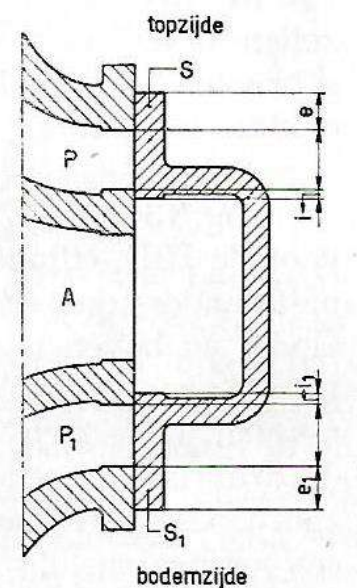
sluitranden waarmee hij over de zogenoemde spiegel heen en weer glijdt. De hoogte en de afstanden van de beide sluitvlakken bepalen de wijze van stoomverdeling. De zijranden passen met enige speling in de sponning van de spiegel zodat de schuif bij zijn beweging niet zijdelings kan uitwijken.

De schuif heeft in het midden een koker die er een geheel mee vormt en waardoor de stoomschuifstang loopt, waarmee de schuif heen en weer wordt bewogen. Het gat in de schuif maakt men ovaal met de lange as naar de spiegel gericht zodat de stang een flinke speling heeft in het gat. Ter bevestiging van de schuif op de stang heeft deze laatste een kort taps gedeelte, waarop een losse, aan de bovenkant vlakke ring past.

Bakschuif

Aan de bovenzijde heeft de stang een gedeelte met schroefdraad waarop een moer en een contra-moer zijn geschroefd. Men draait de moer met de vlak gedraaide ring zo vast dat zij juist niet tegen de koker van de schuif aanligt en fixeert deze vervolgens met de contra-moer.

De schuif kan zich daardoor van en naar de spiegel toe bewegen. Komt er bijvoorbeeld water in de cilinder dat op een bepaald moment niet via de poorten kan ontwijken, dan zal de schuif tegen de veerdruk in, van de spiegel worden gedrukt waardoor het water weg kan lopen en schade aan de machine wordt voorkomen. De schuif wordt tijdens bedrijf door de stoomdruk tegen de spiegel aangedrukt gehouden en bij stilstand door de bladveer op de rug van de schuif. De veer glijdt tijdens bedrijf langs de binnenkant van de schuifkastdeksel. Men gebruikt voor de bevestiging van de schuifstang onder de schuif een losse ring zodat deze bij demontage de pakking bus kan passeren. De schuif beweegt voortdurend tussen zijn beide uiterste standen heen en weer. Bij het heen en weergaan in het geval van een liggende stoommachine, passeert hij telkens de middenstand. In deze stand wordt de schuif meestal getekend, omdat we dan precies de afmetingen van de sluitvlakken in relatie met de stoompoorten kunnen zien. Zo toont de hierna afgebeelde figuur een bakschuif in de middenstand. We onderscheiden aan iedere schuif een top- en een bodemzijde, bij een verticaal opgestelde machine, of een deksel- en een aszijde als er sprake is van een horizontaal opgestelde machine. Gewoonlijk zijn de sluitvlakken S en S₁ groter dan de poorten P en P₁. We zullen later zien waarom dat is. De afstanden e en i die de sluitvlakken bij de middenstand van de schuif buiten de poorten uitsteken noemen we de overlappen of lappen van de schuif. De verse stoom staat hier aan de buitenzijde van schuif. De schuif moet dus een afstand e verplaatsen voordat de stoomaanvoer begint. Daarom noemen we e de toevoerlap. Hetzelfde geldt voor de afvoer. Als hier de schuif een afstand i verplaatst uit de middenstand dan begint de stoomafvoer. De afstand i noemen we de afvoerlap.

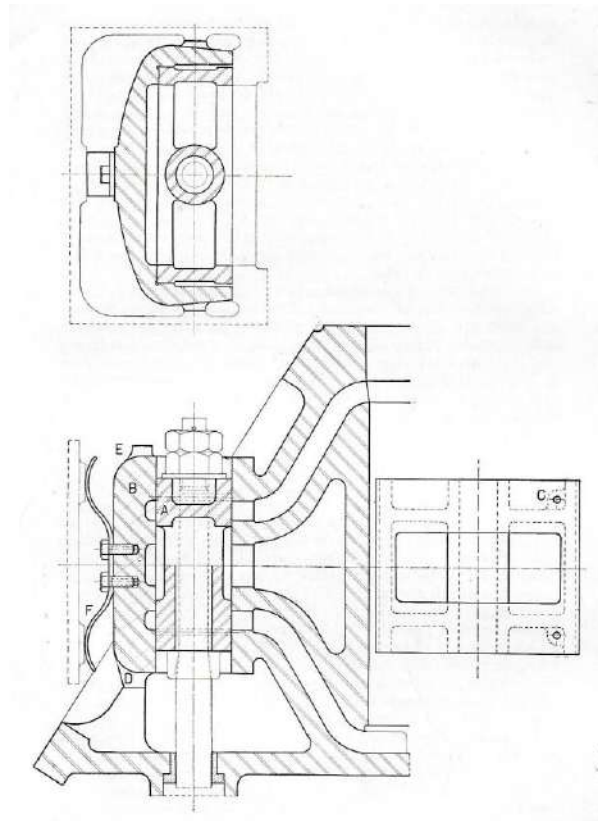


Toe- en afvoerlap bakschuif

De spiegel en de schuif zijn van fijnkorrelig gietijzer gemaakt. Bij een nieuwe machine worden de spiegel en de schuif eerst afgeschaafd en daarna met een schraapstaal zuiver vlak afgewerkt. Door de druk van de veer en de stoom op de rug van de schuif wordt deze tijdens bedrijf vast op de spiegel gedrukt, waardoor een voldoende stoomdichte afdichting is gewaarborgd. Ontstaan er op de duur door slijtagegroeven in de schuif of de spiegel, dan gaat het sluitvlak lekken en moeten beide vlakken worden opgezuiverd. Dit gebeurt door ze te vlakken met behulp van een schrapstaal of bij ernstige defecten door opnieuw schaven en schrappen. Het zuiver vlakken van een stoomschuif is, zo laat zich aanzien, een omvangrijk en tijdrovende ingreep, waarbij tevens het nodige vakmanschap wordt vereist.

Bij de vlakke schuif staat buiten op de schuif de druk van de verse stoom en binnenin die van de afgewerkte stoom. We hebben hier te maken met drukverschillen tussen de verse stoom en de afgewerkte stoom. Het gevolg hiervan is dat de schuif met grote kracht op de spiegel wordt gedrukt.

Laten we aannemen dat de H.D. cilinder van een kleine compoundmachine voorzien is van een gewone bakschuif. Is de breedte van de cilinder 35 cm, dan is de breedte van de schuif ongeveer



25 cm en de lengte 20 cm en het binnen oppervlak 500 cm². Is de druk van de verse stoom 11 en die van de afgewerkte 2 kg/cm². Er heerst dus een drukverschil van 9 kg per kg/cm² die er voor zorgt dat de schuif met een kracht van $9 \times 500 = 4500$ kg tegen de spiegel wordt gedrukt. We zien dat die kracht, zelfs bij een kleine machine, zeer groot is en een aanzienlijke wrijving en daardoor slijtage zal veroorzaken.

Daarom gebruikt men bij een enigszins groot drukverschil tussen verse- en afgewerkte stoom geen gewone bakschuif maar een bosschuif of een zuigerschuif of een klep, of een ander type schuif die ontlast is; bijvoorbeeld de mantel schuif. De spiegel hiervan heeft de normale gedaante, maar de stoomschuif is van twee geheel identieke glijvlakken voorzien. Het ene vlak loopt langs de spiegel en het vlak op de rug van de schuif beweegt langs het binnenvlak van de mantel of de bak.

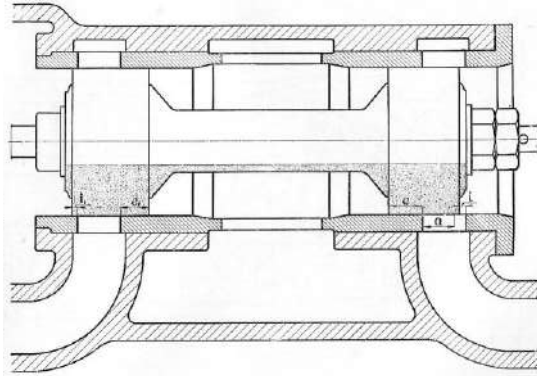
Mantelschuif

De mantel omhult de schuif aan de zijkanten. Deze zijkanten, ook wel poten genoemd, rusten op de spiegel. Ook is de mantel aan de omtrek voorzien van nokken. Deze nokken en de bladveer op de rug van de mantel zorgen voor de nodige bewegingsvrijheid van de bak in geval van waterslag. Daar de schuif in het midden open is, staat tegen het binnenvlak van de mantel de druk van de afgewerkte stoom. Wel staat de druk van de verse stoom nu op de buitenkant van de bak, echter die wordt via de poten afgevoerd naar de spiegel, en niet op de schuif. De schuif heeft afhankelijk van de grootte een speling van 0,1, 0,2 mm binnen de mantel en kan daardoor gemakkelijk heen en weer bewegen. De stoomschuif wordt dus niet op de spiegel gedrukt en is bijgevolg geheel ontlast. In de schuif zijn kanaaltjes (zie C) aangebracht om er voor te zorgen dat de stoomdruk aan beide zijden even groot is en zodoende tijdens bedrijf de schuif als het ware zweeft tussen de twee glijvlakken.

Het pasmaken van een mantelschuif vereist veel zorg en vakmanschap, veel meer dan bij een gewone bakschuif of ronde schuif. Het pasmaken gebeurt evenals bij de bakschuif door middel van schaven en schrappen met dien verstande dat men veel meer vlakken, vaak op tienden van millimeters, nauwkeurig moet pasmaken.

Bosschuiven

In de onderstaande figuur zien een cilindrische schuif de zogenoemde bosschuif. Het verschil in vorm met de eerder beschreven schuiven is dat deze rond is en de cilinder waarin de schuif beweegt een afzonderlijke voering heeft. In de figuur zien we de schuif in de middenstand getekend

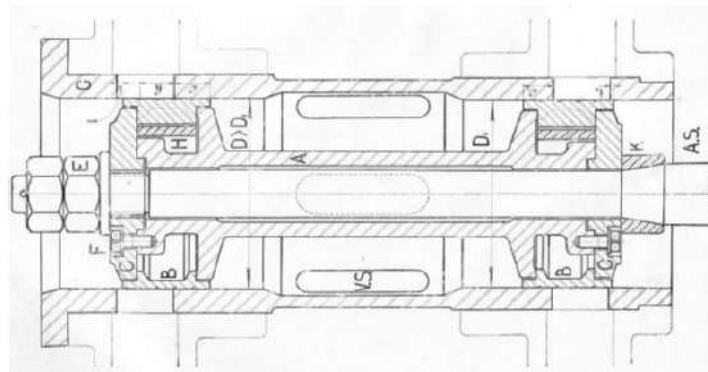


evenals bij de vlakke schuif, zodat we de toe- en afvoerlappen e en i kunnen waarnemen. Deze schuif is binnenladend, dat wil zeggen de verse stoom staat tussen de beide bossen (zuigers) in en de afgewerkte stoom aan de buitenkant van de linker- en de rechter bos. De toevoerlappen moeten uiteraard weer zijn aangebracht aan de zijde van de verse stoom en de afvoerlappen aan de zijde van de afgewerkte stoom, vandaar dat we die lappen in dit geval aan de andere zijde van de sluitvlakken aantreffen dan bij een vlakke schuif

Bosschuif

De krachten als gevolg van de stoomdruk op de bossen zijn tegengesteld en heffen elkaar op waardoor de bosschuif volledig ontlast is. De bewerking van de sluitvlakken kunnen op een draaibank worden uitgevoerd. Een vlakke schuif kan niet binnenladend zijn omdat deze door de verse stoom van de spiegel zou worden gedrukt.

De uitvoering van een bosschuif zoals hier na is afgebeeld, bestaat uit een ronde koker waardoor de stoomschuifstang gaat. Links en rechts is de koker verbreed tot een dikke schotel die dient als ligplaats voor ringen die voor de sluitvlakken van de schuif de afdichting vormen. De ringen worden weer opgesloten door deksels die met boutjes aan het schuiflichaam zijn bevestigd. De naar binnen gerichte pasranden hebben een geringe speling in hun ligplaats zodat de ringen binnen een bepaalde marge vrij kunnen bewegen. Een en ander is te vergelijken met een zuigerveer in zijn sponning. De ringen zijn aan de buitenzijde voorzien van een vijftal groefjes, die een labyrinthvormen en zodoende voor een betere afdichting van de schuifvlakken zorgen. De schuif loopt in een voering die, evenals de ringen en de deksels, van gegoten ijzer is gemaakt,



Doorsnede Bosschuif

De schuifringen bij de kleinere stoommachines zijn meestal gesloten uitgevoerd, dus niet doorgesneden of verend. Bij grote machines maakt men de ringen verend op de wijze zoals gebruikelijk bij zuigerveren. Afhankelijk van de stoomsoort maakt men de ringen meer of minder passend in de voering. Bij oververhitte stoom hebben zij dus in koude toestand de grootste speling. Hebben de ringen ten gevolge van slijtage te veel ruimte gekregen in de bussen, zodat zij niet meer goed afsluiten dan kunnen zij gemakkelijk door nieuwe worden vervangen. De bevestiging van de schuif op de stang gebeurt op nagenoeg dezelfde wijze als besproken bij de bakschuif met dien verstande dat de stang stijf verbonden is met de schuif. De schuif kan immers niet van de spiegel wijken. De voering, afhankelijk van het fabricaat stoommachine kan uit een of twee delen bestaan en wordt in de kast geperst zoals bij het voorbeeld of hiermee met een flensverbinding verbonden zijn. De stoompoorten worden gevormd door ruitvormige kanalen om slijtsproen in langsrichting te voorkomen.

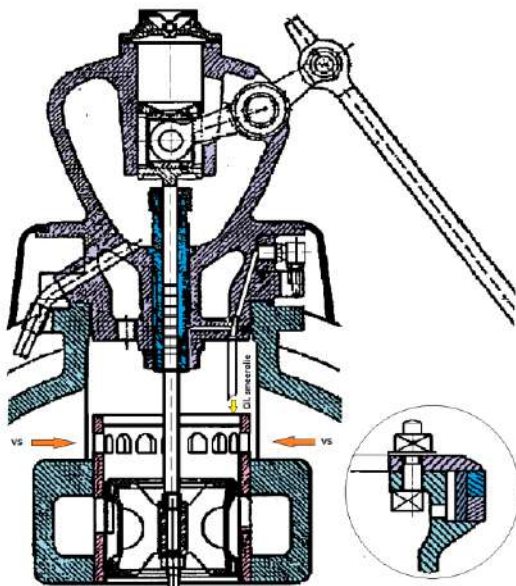
Bij een bosschuif staat de stoom rondom de koker en, door de poortopeningen, ook rondom de sluitvlakken. De stoom drukt dus in alle richtingen met dezelfde kracht op de zijanten van de schuif, met andere woorden de schuif wordt nergens tegen de spiegel gedrukt, zodat deze schuif geheel is ontlast. Dit is een belangrijke eigenschap, want daardoor zal het loopvlak van de schuif weinig slijtgage vertonen en hoeft de schuif nagenoeg geen wrijving te overwinnen.

Zuigerschuiven

Bosschuiven en zuigerschuiven worden met betrekking tot de benaming vaak door elkaar gehaald. Niet geheel onbegrijpelijk omdat de werking van een zuigerschuif te vergelijken is met die van de bosschuif met dien verstande dat de zuigerschuif maar één bos heeft en daardoor niet geschikt is

voor gelijktijdige toevoer en afvoer van de stoom. Elke schuif heeft dan ook een aparte excentriek die de zuiger van de schuif bedient. Dit heeft als voordeel dat bij het verstellen van de toevoer voor expansie het tijdstip van de afvoer niet wordt beïnvloed.

De hiernaast afgebeelde zuigerschuif is zoals die door Jaffa uit Utrecht werd toegepast bij haar stoommachines. De holle zuiger is aan de boven- en de onderzijde voorzien van twee pakketten zuigerveren. Elk pakket bestaat uit drie veren die vrij in de daarvoor ingerichte sponning kunnen bewegen. De veren worden door de stoomdruk achter de binnenvaar enigszins naar buiten gedrukt. De zuiger beweegt in een uitneembare bus die is voorzien van twee rijen poorten.



Zuigerschuif

Als de bovenste en de onderste rij poorten worden vrijgemaakt door de beweging van de zuiger dan stroomt de verse stoom via de ringvormige ruime tussen het bovenste en het onderste pakket veren naar de desbetreffende cilinder.

De zuiger is volledig uitgebalanceerd. De schuif en het bewegingsmechanisme van de schuif zijn tot één geheel samengebouwd die voor revisie en onderhoud in zijn geheel uit de machine kan worden genomen. Het pasmaken van de zuiger en de voering gebeurt door middel van afdraaien.

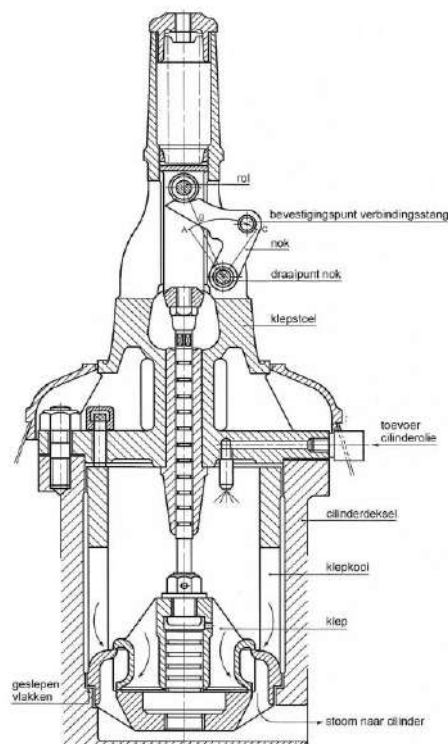
Kleppen

Het gebruik van schuiven voor de stoomverdeling heeft verschillende nadelen waarvan hierna de belangrijkste worden genoemd.

- Schuiven hebben een groot oppervlak dat gemakkelijk kan beschadigen. Vooral als de schuif niet is ontlast, zullen de langs elkaar glijdende vlakken spoedig groeven kunnen gaan vertonen, waardoor er ernstige lekken ontstaan.
- Door de optredende wrijving komen er op de stoomschuifbeweging grote krachten en ontstaat een belangrijk arbeidsverlies dat wil zeggen het mechanisch rendement daalt.
- Het zuiver pasmaken van de sluitvlakken is een lastig en tijdrovend werk.
- Het openen en sluiten van de stoompoorten gebeurt betrekkelijk langzaam waardoor in het bijzonder aan het einde van de toevoer de stoom sterk wordt geknepen; dit betekent een aanzienlijke verkleining van het diagram oppervlak en dus van het vermogen.
- Bij gebruik van oververhitte stoom is het gehele schuifoppervlak moeilijk afdoende te smeren en kan de schuif gemakkelijk krom trekken en gaan lekken.
- Schuiven, zuigerschuiven uitgezonderd, regelen in het algemeen zowel de toe- als de afvoer van de stoom, met als gevolg dat de verschillende schuifwanden voortdurend aan de ene kant met de verse en aan de andere kant met de afgewerkte stoom in aanraking zijn, wat een nutteloze warmte- overdracht geeft. Bovendien worden nu ook de stoompoorten beurtelings met verse en afgewerkte stoom doorstroomd wat de ongewenste begincondensatie in de hand werkt.
- Door de aanwezigheid van de relatief grote vlakke spiegel op enige afstand van de cilinder zijn ook de stoompoorten groot wat weer van invloed is op de schadelijke ruimte.
- Men kan zonder speciale voorzienigen aan de schuif de toevoerfunctie niet wijzigen zonder ook de afvoerfunctie te beïnvloeden en omgekeerd.

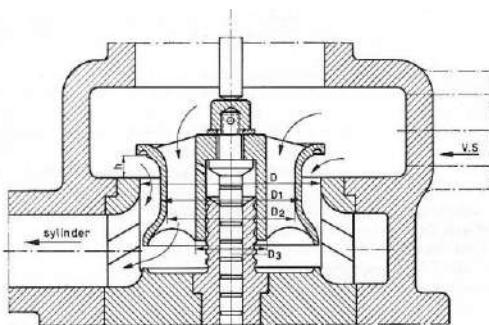
Met het gebruik van kleppen voor de stoomverdeling vervalt een groot deel van de bovengenoemde nadelen . Bij kleppen hebben we geen langs elkaar glijdende dichtingsvlakken zodat door slijtage hier geen lekkage kan optreden. Kleppen zijn nagenoeg geheel ontlast zodat er geen grote krachten nodig zijn om ze te bewegen. Een goede afdichting van de relatief kleine dichtingsvlakken van de kleppen kan door schuren worden bereikt. Kleppen worden in het algemeen geopend en gesloten met behulp van nokken op een nokkenas of zoals in de figuur hiernaast is aangegeven door een via een excentriek bewogen stang. Door de nok een geschikte vorm te geven , kan het openen en sluiten snel gebeuren zodat het onnodig knijpen van de stoom vervalt. Het toepassen van (sterk)oververhitte stoom geeft bij kleppen geen moeilijkheden: alleen de klepstangen hoeven te worden gesmeerd. Ook de klep bij een stoommachine is evenals de zuigerschuif slechts geschikt

om stoom toe of af te voeren. Het voordeel is dat de verse en de afgewerkte stoom niet door dezelfde opening stromen waardoor de begincondensatie vermindert. Bovendien kan de toevoer onafhankelijk van de afvoer worden geregeld en omgekeerd. De kleppen kunnen dicht bij de cilinders worden geplaatst zodat de schadelijke ruimte gering is. Deze voordelen maken dat bij het gebruik van oververhitte stoom vaak kleppen worden toegepast.



Stoomklep (dubbele zitting)

Kleppen bij stoommachines ziet men vooral toegepast bij snellopende machines omdat hiermee in beperkte tijd snel de juiste hoeveelheid stoom kan worden toe- en afgevoerd.



Klepdoortocht met dubbele zitting

Bij de later dan de stoommachine ontwikkelde verbrandingsmotoren past men kleppen toe met een enkele sluitrand; bij stoommachines bezigt men kleppen met een dubbele sluitrand. Het gevolg daarvan is dat de klep zo goed als geheel is ontlast, zodat voor de beweging ervan weinig kracht nodig is. Volledig kan de klep echter niet worden ontlast omdat de binnenste klep een kleinere diameter moet hebben voor het aanbrengen en het uitnemen ervan.

In de hieronder afgebeelde figuur is de doorsnede van een dubbele klep afgebeeld en is het verschil in diameter te zien. De verse stoom staat aan buiten- zijde van de klep waardoor de klep niet alleen door de drukveer, hier niet getekend, maar ook door de stoom op de zitting wordt gedrukt. Teneinde vervorming ten gevolge van ongelijkmatige uitzetting zoveel mogelijk te voorkomen geeft men dit soort kleppen een dunne wand, en maakt men ze van fijnkorrelig gegoten ijzer met een hoge treksterkte, het zogenoemde perlitisch gietijzer. Het kromtrekken van de kleppen als gevolg van grote temperatuursverschillen wordt zoveel als mogelijk voorkomen door de verbindingsruggen tangentieel te plaatsen. De sluitvlakken van de kleppen en de zitting worden eerst door afdraaien of met een speciale klepfrees vlak gemaakt en vervolgens geschuurd. Het schuren gebeurt in zo warm mogelijke toestand. Schuurt men de kleppen in koude toestand dan zullen ze tijdens gebruik onherroepelijk lekken.

De hoeveelheid stoom, die de cilinder moet vullen, of er uit moet worden afgevoerd moet door de klepopening stromen met een snelheid die een bepaalde waarde niet mag overschrijden. De stoomsnelheid door de klep waarbij de smoring binnen redelijke grenzen blijft, bedraagt hier, evenals bij een schuif, voor hoge drukken (14 kg/cm²) 60 en voor stoom van lage drukken (6 kg/cm²) 100 m/sec.

De maximum zuigersnelheid van een stoommachine is circa 1,6-keer zo groot als de gemiddelde zuigersnelheid zodat men bij de berekening van de vereiste doortochten evenals bij een stoomschuif weer uitgaat van stoomsnelheden van 30 m/sec voor de verse stoom en 40 m/sec voor de afgewerkte stoom. Voor de L.D.-cilinders van expansie-machines en voor oververhitte stoom kiest men deze snelheden 25 % groter.

Wegens de ruimte die door het kleplichaam wordt ingenomen blijft er ongeveer 0,7 deel van het kleppoppervlak beschikbaar voor het doorlaten van de stoom. Stelt men de gemiddelde klepdiameter D en de lichthoogte h, dan zal de horizontale klepdoorsnede een doortocht hebben van:

$$A = 0,7 \cdot \frac{\pi}{4} D^2$$

De beide klepopeningen leveren bij een geopende klep tezamen een cilindervormig oppervlak voor de doorlaat van:

$$A = 2\pi \cdot D \cdot h$$

Beide oppervlakken zijn aan elkaar gelijk dus is de lichthoogte:

$$0,7 \cdot \frac{\pi}{4} D^2 = 2\pi \cdot D \cdot h$$

Of:

$$h = \frac{7}{80} \cdot D = \frac{D}{11,4}$$

De maximale lichthoogte van kleppen wordt tussen 1/8 tot 1/12 van de gemiddelde klepdiameter gehouden.

De noodzakelijke klep middellijn berekent men nu op geheel dezelfde wijze als de poorthoogte bij een stoomschuif door uit te gaan van de betrekking:

zuigeroppervlak x gem. zuigersnelheid = klepdoortocht x gem. stoomsnelheid

Is hierin D_c de cilinderdiameter in mm, L de slaglengte in m, D de klepdiameter in mm, c_z de gemiddelde zuigersnelheid in m/sec, c de stoomsnelheid en n het aantal omwentelingen per minuut dan is dus

$$\frac{\pi}{4} D_c^2 \cdot c_z = 0,7 \cdot \frac{\pi}{4} D^2 \cdot c$$

Of ook:

$$D_c^2 \cdot \frac{2 \cdot L \cdot n}{60} = 0,7 D^2 \cdot c$$

Waaruit volgt

$$D = D_c \sqrt{\frac{L \cdot n}{21 \cdot c}}$$

Van een kleppen machine heeft bijvoorbeeld de cilinder een diameter van 420 mm. De slaglengte is 900 mm. Als verder nog gegeven is dat het toerental van de machine 100 omw./min is en men een gemiddelde stoomsnelheid van 35 m/sec. wil hanteren. dan bedraagt de diameter van de klep:

$$D = 420 \sqrt{\frac{0,9 \cdot 100}{21 \cdot 35}} = 147 \text{ [mm]}$$

De lichthoogte bedraagt dan

$$h = \frac{7}{80} \cdot 147 = 13 \text{ [mm]}$$

Dit is maar een kleine waarde ten opzichte van wat in de regel nodig is bij een vlakke schuif.

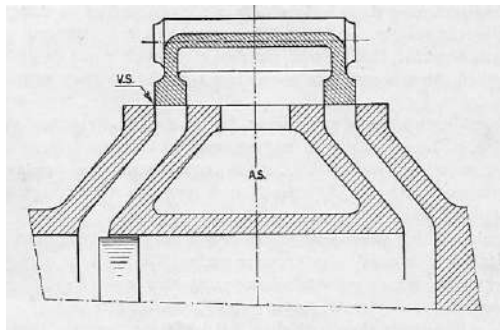
De stoomschuif en de stand van de excentriek

Met behulp van de stoomschuif en het excentriek zijn we in staat steeds op het juiste moment de machine van verse stoom te voorzien en de afgewerkte stoom af te voeren. Ook kunnen we hiermee het vermogen en het toerental regelen en hebben we invloed op het zuinige gebruik van de stoom. Voor de relatief jongere stoommachines uitgerust met kleppen en nokken die voor de beweging van kleppen zorgdragen geldt het zelfde.

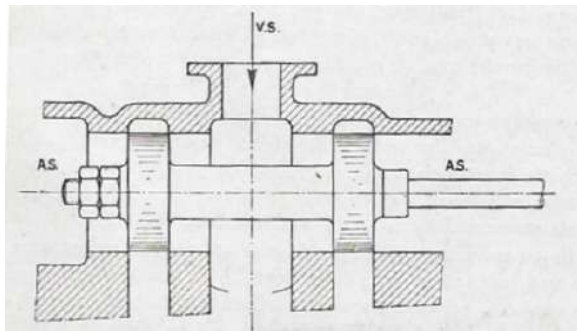
Volledruk-machine

In de linker figuur hierna is een bakschuif getekend voor een volledigdruk-machine. De schuif is getekend in de middenstand dat wil zeggen dat deze evenveel naar links als naar rechts kan uitwijken.

Bij een dergelijke machine moeten de schuif en de schuifbeweging zodanig ingericht zijn dat de toe- en afvoer over de gehele slag van de machine plaatsvinden. Staat de zuiger nu in zijn uiterste stand dan moet de toevoer aan de ene zijde beginnen en aan de andere zijde moet hij juist gesloten zijn en moet de afvoer beginnen. De enige mogelijkheid hiertoe is dat de schuif in de middenstand staat terwijl de zuiger in één van de uiterste standen staat. Zal de schuif de poort juist vol openen dan moet de excentriciteit gelijk zijn aan de poort hoogte. Omdat de V.S. (verse stoom) aan de buitenkant van de schuif staat noemt men deze buitenladend. In de rechter figuur afgebeelde bosschuif voor een voldruk-machine staat de stoom aan de binnenkant van de schuif. In dat geval spreken we van een binnenladende schuif. Binnenladende bakschuiven worden niet toegepast zoals we eerder hebben aangegeven omdat dan de bak van de spiegel wordt gedrukt.



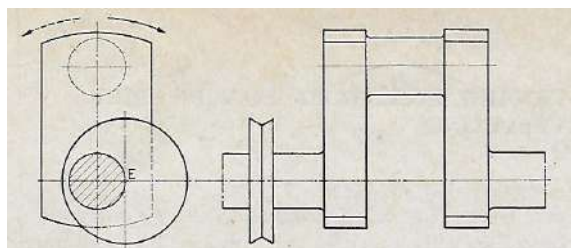
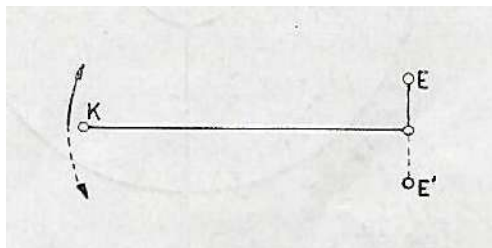
Buitenladende bakschuif (volledruk-machine)



Binnenladende bosschuif (volledruk-machine)

Voor de eenvoud denken we ons het bijbehorende excentriek vervangen door een krukje met een krukstraal gelijk aan de excentriciteit r . Uit het voorgaande volgt dat dit krukje loodrecht op de kruk van de stoommachine moet staan; immers dan staat de schuif in de middenstand als de zuiger in een van de zogenoemde dode punten staat.

Op de linker afbeelding van de volgende figuren is door enkele lijnen de kruk K van de machine en het kleinere krukje E weergegeven. Tevens zijn de draairichtingen en de bijbehorende stand van het excentriek daarbij aangegeven. Stel we hebben te maken met een horizontale machine en de zuiger bevindt zich in de figuur in de uiterste stand aan de dekselzijde.



Kruk- en excentriekstand volledruk-machine

Om de machine te kunnen laten draaien moet de schuif zodanig worden bewogen dat er aan D.Z. (deksel- zijde) stoom wordt aangevoerd en aan A.Z. (as-zijde) stoom wordt afgevoerd. De schuif van de machine moet zich daarbij naar rechts bewegen. Staat het excentriek dus in E dan kan de

machine alleen draaien in de richting van de getrokken pijl. Staat de excentriek daarentegen in E' dan is alleen een draairichting mogelijk volgens de gestippelde pijl.

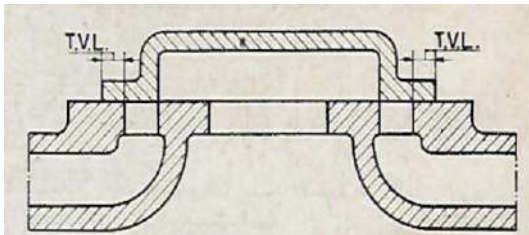
Resumerend komen we hiermee tot de conclusie dat bij een volle druk-machine met buiten ladende schuif de kruk 90° (booggraden) in de draairichting voor de kruk moet staan. Bij een volle druk machine met een binnen ladende schuif ijlt daarentegen de excentriek 90° booggraden achter op de kruk. De excentriekstand E' moet hier worden gecombineerd met de draairichting die door de getrokken pijl wordt weergegeven.

Expansiemachine

Bij een expansiemachine moet de schuif zodanig zij ingericht dat de stoom slechts over een gedeelte van de zuigerslag wordt toegelaten. De figuur hieronder laat een bakschuif zien van een expansiemachine.

Het verschil met de vorige schuif van de volledruk-machine is dat de sluitvlakken nu een stuk over de toevoerpoorten vallen. Men noemt deze stukken de toevoerlappen die korthedshalve worden aangeduid met T.V.L. De toelaat moet beginnen als de zuiger in zijn uiterste stand staat.

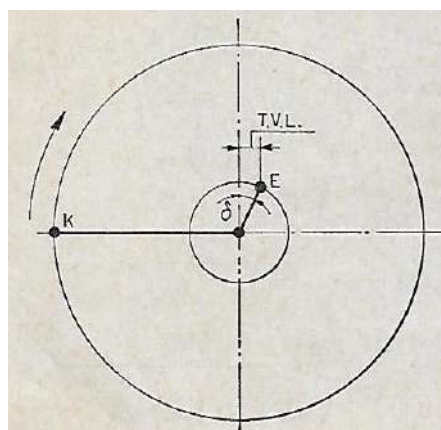
Bij de volledruk-machine stond het excentriek 90° voor de kruk, dus de kruk in de het dode punt en de schuif in de middenstand. Heeft de schuif nu toevoerlappen, dan moet, bij de kruk in het dode



punt de schuif een stuk ter grootte van de toevoerlap uit de middenstand zijn verplaatst. Het excentriek moet daartoe in de draairichting meer dan 90° voor de kruk staan. De hoek meer dan de 90° noemt men de voorloophoek δ ; spreek uit als delta.

Buitenladende bakschuif (expansie machine)

Omdat het volume van de afgewerkte stoom groter is dan dat van de verse stoom moet de poortopening voor de afvoer groter zijn dan die voor de toevoer. De poort wordt in de regel voor de toevoer gedeeltelijk en voor de afvoer geheel geopend. In verband hiermee spreekt men van de grootste poortopening voor toevoer, die meestal $\frac{3}{4}$ van is van de effectieve poorthoogte.



Schema kruk- en excentriekstand (expansiemachine)

De poortopening voor afvoer is meestal groter dan de poorthoogte. In de uiterste stand van de schuif is dus de poortopening voor toevoer maximaal. De schuif moet dan de toevoerlap plus de grootste poort-opening voor toevoer uit de middenstand verplaatst zijn. Zodat de grootte van de excentriciteit bepaald wordt door:

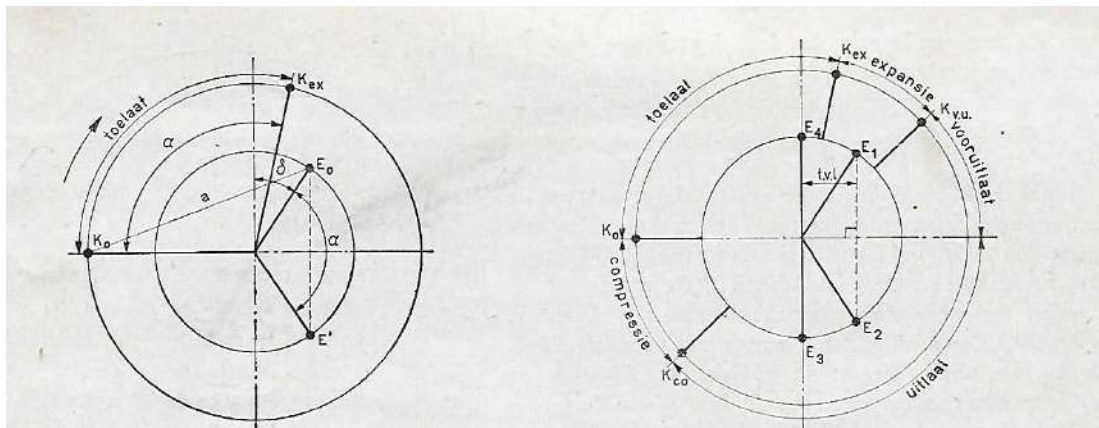
$$\text{Excentriciteit} = \text{toevoerlap} + \text{grootste poortopening voor toevoer}$$

De belangrijkste standen van de schuif zijn die waarbij de toevoer maar ook de afvoer begint en eindigt. De bij deze schuifstanden behorende zuigerstanden geven dan aan over welk gedeelte van de slag er toe- en afvoer plaats heeft. Men noemt dit de stoomverdeling van de machine.

Van de stoomverdeling hangt de goede werking van de machine af. Het is dus van belang dat men die goed kent voor het kunnen uitvoeren van inspecties, bediening en onderhoudswerkzaamheden.

Falkenberg-diagram

In de praktijk gaat men bij het ontwerp van een stoommachine uit van een gewenste stoomverdeling en construeert daar een schuif voor. Men doet dit met behulp van schuifdiagrammen. Een dergelijk diagram is ook van belang bij het afstellen van de machine na reparaties.

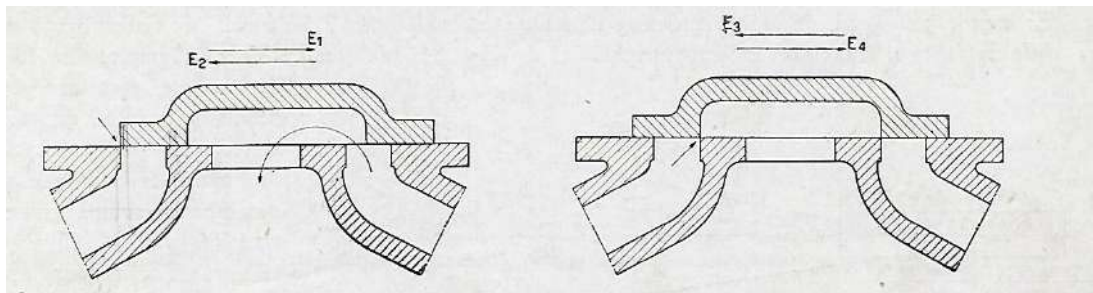


Schuifdiagram (zonder voortoelaat)

Een dergelijk diagram is ook van belang bij het opnieuw afstellen van de machine na reparaties. Het diagram bestaat uit twee cirkels: de excentriekcirkel en de krukcirkel. De excentriekcirkel tekent men op ware grootte dan wel op schaal. De krukcirkel kan men willekeurig nemen omdat vooralsnog geen rekening wordt gehouden met de invloed van de eindigheid van de drijfstaang. De reden dat we hier de kruk-cirkel willekeurig nemen is dat de verplaatsing van de schuif in mm wordt uitgedrukt en we de zuigerverplaatsing slechts willen weten in procenten van de slag. Voor het gemak stellen we de diameter van de krukcirkel op 100 mm. De diameter van de krukcirkel is gelijk aan twee keer de excentriciteit. We stellen ons nu voor dat het excentriek- middelpunt de excentriekcirkel en het middelpunt van de krukpen de krukcirkel doorloopt en het dode punt van de dekselzijde zich links van het diagram bevindt. Staat de kruk nu in dit dode punt, dan moet de schuif een afstand gelijk aan de toevoerlap naar rechts zijn verschoven. Om de bijbehorende excentriekstang te vinden moet we de toevoerlap uit het hart van de cirkel naar rechts uitzetten en dit projecteren op de

excentriekcirkel. We vinden dan de twee standen E_0 en E' voor het excentriek. Het hang nu van de draairichting af welke stand bij de krukstand K_0 hoort. Is de draairichting zoals de pijl aangeeft dan moet het excentriek-middelpunt in E_0 staan. Denken we ons de machine draaiend dan zien we de schuif toevoer geven aan de deksel zijde totdat zij in E' is aangekomen want dan staat de schuif weer in dezelfde stand als waarbij de toevoer begon. De machine heeft dus toevoer gekregen in de tijd dat zij de cirkelboog $E_0 - E'$ (hoek α) doorliep. We kunnen de krukstand waarover dus toevoer plaatsvond vinden door deze vanuit K_0 uit te zetten. Dit geeft ons K_{ex} de krukstand bij het einde van de toevoer. Bij die krukstand begint dus de expansie. De kruk heeft gedurende de toelaat de boog $K_0 - K_{ex}$ doorlopen.

Het volledige diagram ontstaat, als we hierin het begin en het einde van de uitlaat aangeven. Dit is gedaan voor de onderstaande buiten ladende bakschuif waarvan de resultaten in de rechter figuur zijn weergegeven.



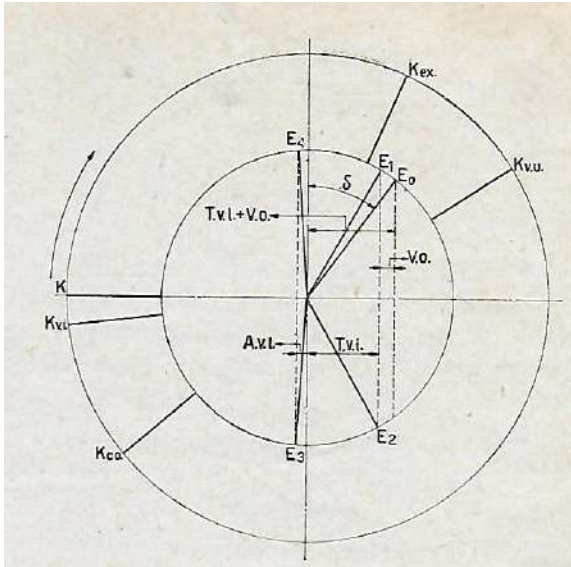
Schuifstanden behorende bij schuifdiagram op de voorgaande bladzijde

Bij deze schuif begint en eindigt de afvoer als de schuif in de middenstand staat en het excentriek middelpunt in E_3 en E_4 . Als het excentriek in E_3 staat begint dus de afvoer. De bijbehorende krukstand K_{vu} vinden we door omcirkelen van afstand a uit de linker schuifdiagram figuur. De boog $K_{ex} - K_{vu}$ wordt met expansie doorlopen. De uitlaat begint nu voordat de zuiger in zijn uiterste stand is aangekomen; dit heet vooruitlaat. De uitlaat eindigt weer als de zuiger in de middenstand staat. Het excentriek staat dan in E_4 en de kruk in K_{co} . De boog vanaf het dode punt tot K_{co} wordt met uitlaat doorlopen. We zien dat de afvoer wordt gesloten voordat de zuiger in de uiterste stand is aangekomen. De voortbewegende zuiger begint nu de zich nog in de cilinder bevindende stoom te comprimeren. We zeggen daarom dat, als de kruk in K_{co} staat de compressie begint. De boog $K_{co} - K_0$ wordt met compressie doorlopen. Door de schuif toevoerlappen te geven hebben we niet alleen expansie gekregen maar ook vooruitlaat en compressie. Wil men de vooruitlaat en de compressie nog wijzigen zonder de expansie te beïnvloeden dan moet de schuif ook een lap hebben aan de afvoerszijde, een zogenoemde afvoerlap.

Het optreden van vooruitlaat en compressie is geen nadeel van expansie. We hebben ze beide namelijk nodig. De vooruitlaat zorgt er namelijk voor dat de druk in de cilinder als de zuiger op de terugweg is reeds tot de tegendruk is gedaald. Verder zorgt de compressie ervoor dat de zuiger op het einde van de slag wordt afgeremd en dat de schadelijke ruimte wordt opgevuld.

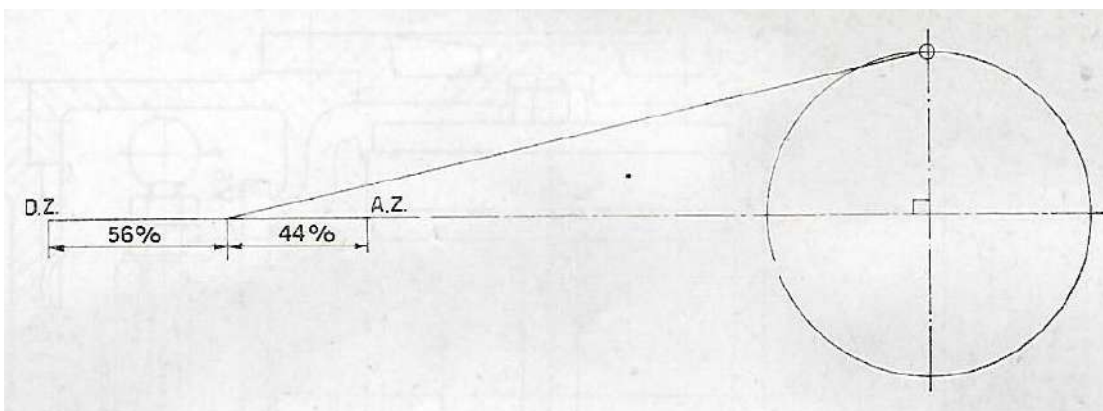
Wanneer de schuif juist snijdend staat voor toevoer als de zuiger in het dode punt staat begint de zuiger niet met de volle inlaatdruk; daarvoor gaat de schuif te langzaam open. Om deze reden geeft men de machine in de regel een voorinlaat en de schuif een vooropening.

Dit wil zeggen dat als de zuiger in de uiterste stand staat, de poort reeds een kleinstukje voor toevoer is geopend. Men bereikt dit door de voorloophoek iets groter te maken. Bij de kruk in de uiterste stand is de schuif een afstand ter grootte van de toevoerlap vermeerderd met de vooropening uit de middenstand verplaatst. Het schuifdiagram ziet er dan uit zoals in de figuur hiernaast is weergegeven



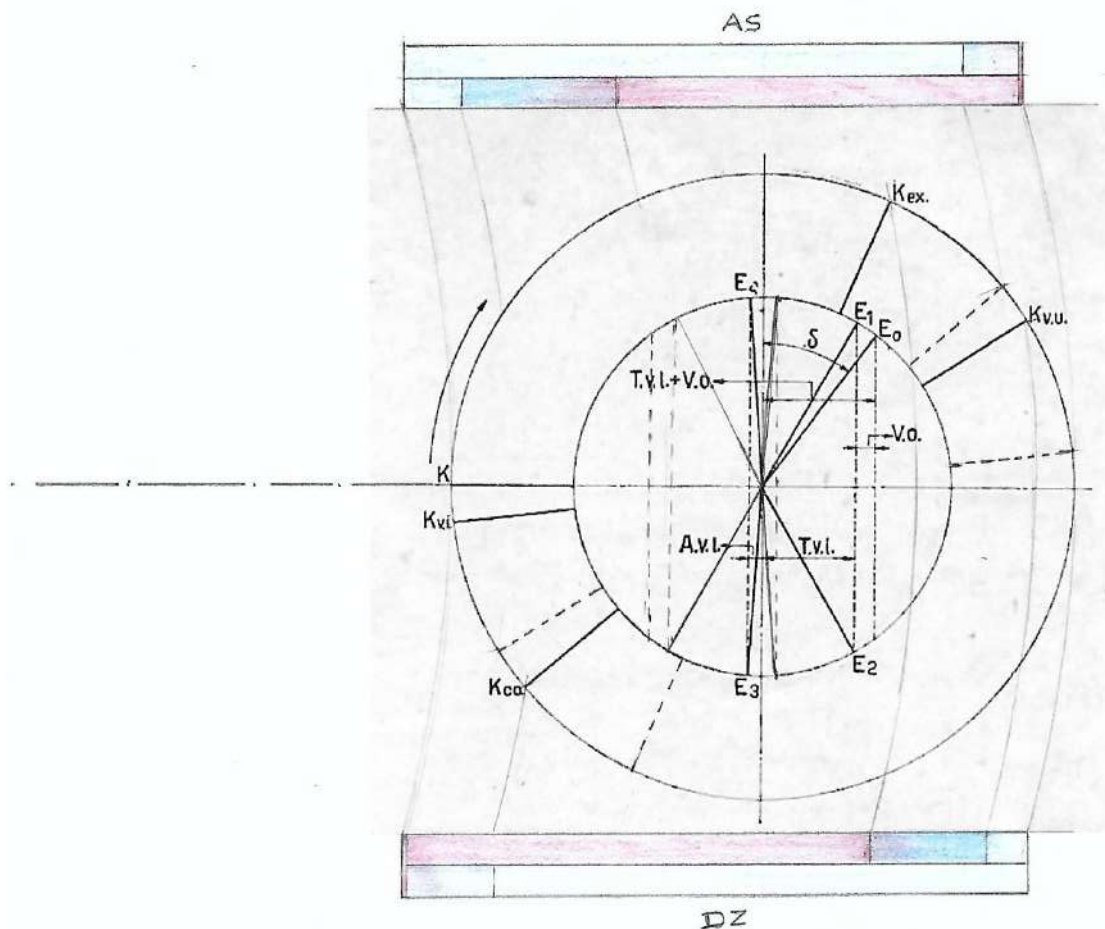
Schuifdiagram (met voortoelaat)

Het is de gewoonte om de zuigerverplaatsing uit te drukken in procenten van de slag. Beschouwen we de hierna gegeven figuur dan zien we, dat wanneer de kruk van de machine 90° uit het dode punt van de deksel DZ (deksel zijde) staat de zuiger ongeveer 56 %, dus meer dan de helft van zijn slag heeft afgelegd en bij een krukstand 90° door het dode punt aan AZ minder dan de helft. Dit wordt veroorzaakt door de schuine stand van de drijfstang van de machine. We noemen dit de drijfstangfout. Bij de behandeling van het kruk- drijfstang mechanisme komen we hierop terug. Deze afwijking is des te groter naarmate de drijfstang in verhouding tot de kruk lengte korter is, vandaar dat men de drijfstang zelden korter maakt dan $4\frac{1}{2}$ keer de kruk lengte.



Schema zuigerverplaatsing (in procenten van de slag)

Het stoomschuifdiagram van Falkenberg wat we hiervoor besproken hebben geeft wel een juist beeld van de onderlinge standen van het excentriek en de kruk tijdens de stoomverdeling, maar bij een meer nauwkeuriger beschouwing, zoals hier voor, is het niet veroorloofd om de projectie van het hart van de krukpen op de middellijn als de plaats van de zuiger langs de zuigerweg te nemen. Om de juiste zuiger verplaatsing te vinden zullen we daarom gebruik maken van de zogenoemde boogprojectie van Brix. Met deze methode worden met de drijfstanglengte als straal vanaf de doorgetrokken hartlijn de verschillende krukstanden aan de zijkant van het diagram geprojecteerd.



Falkenberg diagram (buitenladende bakschuif)

In de bovenstaande figuur zijn volgens deze methode de schuif- en krukstanden voor D.Z. en AZ getekend voor een buiten ladende bakschuif met de volgende schuifgegevens.

Schuifslag : 60 mm
 Toevoerlap : 15 mm
 Vooropening : 03 mm
 Afvoerlap : 02 mm

De stoomverdeling die met de gevolgde grafische methode is bepaald wordt in de volgende tabel weergegeven.

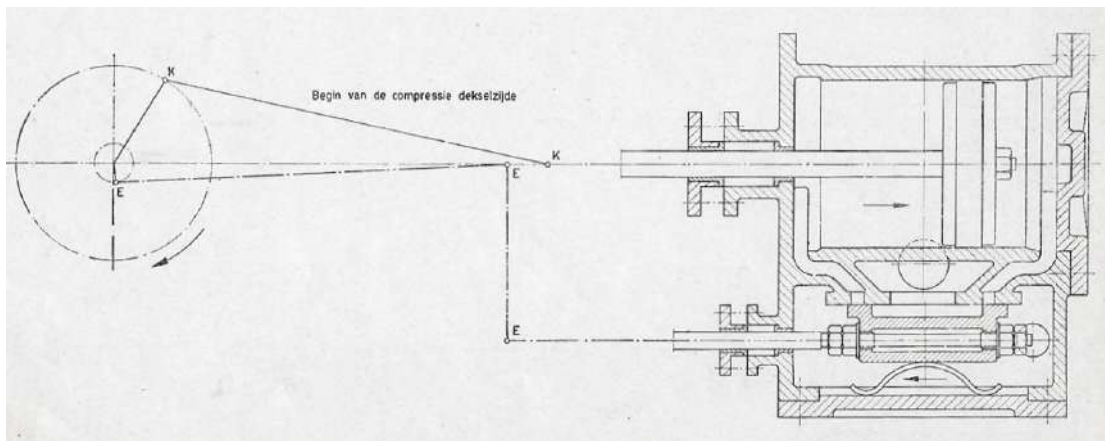
	Dekselzijde		Aszijde	
Voorinlaat	7	%	7	%
Toelaat	73,5	%	64,5	%
Expansie	19,5	%	25,5	%
Vooruitlaat	7	%	10	%
Uitlaat	85	%	90	%
Compressie	15	%	10	%

Tabel stoomverdeling

Het verschil als gevolg van de eindige lengte van de drijfstaang is opmerkelijk. Om dit verschil te verkleinen, maken we de toe- en afvoerlap aan A.Z. verschillend van die aan D.Z. Aan A.Z wordt de toevoerlap kleiner en de afvoerlap groter dan aan D.Z.

Men zal opmerken, dat we bij de beweging van de schuif geen rekening hebben gehouden met de invloed van de eindige lengte van de excentriek staang. We kunnen hier namelijk de afwijkingen verwaarlozen, aangezien de excentriek staang 20 tot 30 keer langer is dan de excentriciteit. Daarom zijn de verplaatsingen van de schuif door middel van een rechte lijn op de excentriek cirkel geprojecteerd.

In de figuur hieronder is schematisch de werking van het excentriek weergegeven. De krukas en de excentriekschijf zijn 90° verdraaid getekend om de tekening beter leesbaar te maken.



Werking kruk en excentriek

Het betreft hier een zeer eenvoudige dubbel werkende stoommachine met een buitenladende niet ontlaste bakschuif. De schuif staat snijdend voor het begin van de compressie aan de dekselzijde getekend. Dit is nagenoeg de middenstand van de schuif.

4.14.6 De reguleur

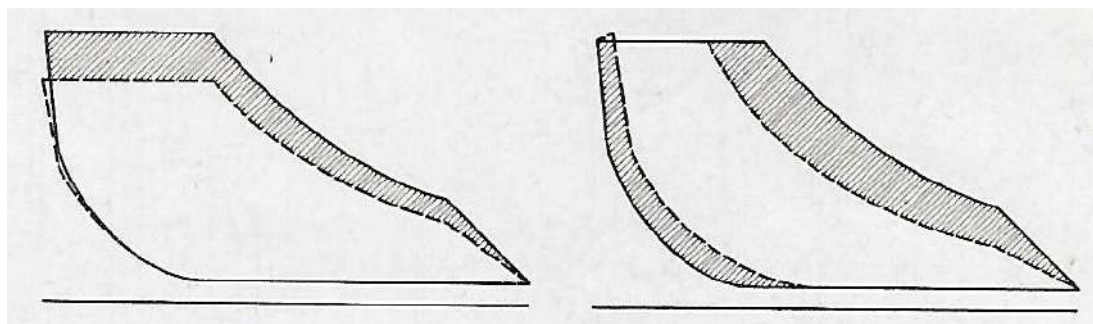
Een reguleur bij een stoommachine dient om bij veranderlijke belasting de omwentelingssnelheid van de machine binnen bepaalde grenzen te houden. Ook kan met een reguleur door het toerental te wijzigen de capaciteit van het opvoerwerktuig worden geregeld of de machine tegen een te hoog toerental, bijvoorbeeld als de belasting plotseling wegvalt, worden beveiligd.

De regeling kan bij zuigerstoommachines in hoofdzaak op twee manieren geschieden.

- Door de stoomtoevoer te regelen waarbij de begindruk van de stoom in de machine verandert.
- Door de vulling, dus het expansievoud te veranderen waarbij de begindruk constant blijft.

Men onderscheidt hierbij handmatig en door de machine zelf bediende mechanismen.

In de hier onder afgebeelde theoretische diagrammen zijn de veranderingen aangegeven volgens beide principes. Hierbij verdient de door het rechterdiagram weergegeven hoeveelheidsregeling de voorkeur ten opzichte van de in de linker figuur weergegeven smoorregeling, omdat hierbij niet alle energie in nuttige arbeid wordt omgezet.



Smoorregeling (druk)

Vullingsregeling (hoeveelheid)

De reguleurs, waarvan zeer veel uitvoeringsvormen bestaan, maken meestal gebruik van de centrifugaal kracht om de voor het verstellen van de regelorganen benodigde kracht te leveren.

We onderscheiden hierbij de volgende twee hoofdprincipes:

- De zogenoemde hulsreguleur die wordt toegepaste in combinatie met een smoorklep.
- De schijfreguleur die uitsluitend wordt toegepast in combinatie met een hoeveelheidsregeling.

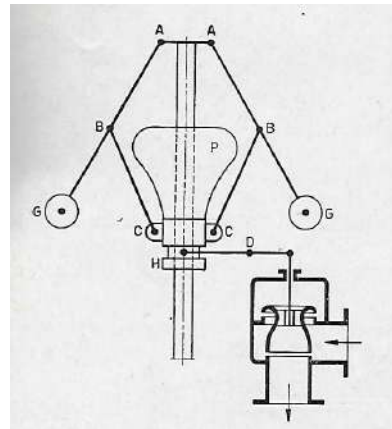
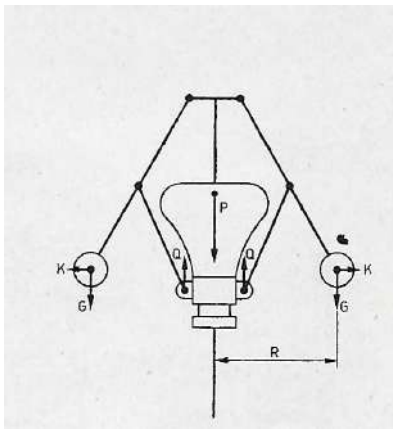
Hulsreguleur

De hulsreguleur wordt zoals hier voor is opgemerkt gebruikt om de machine te regelen door het veranderen van de toevoerdruk van de stoom.

In de hierna afgebeelde figuren is de principe werking van een hulsreguleur met gewichtsbelasting weergegeven. De as van de reguleur wordt via een overbrenging door de machine aangedreven waardoor de gewichten naar buiten worden geslingerd. Bij een bepaalde hoeksnelheid ω oefenen de gewichten G een middelpuntvliedende kracht K uit op het in A,B, en C scharnierende hefbomenstelsel van de reguleur.

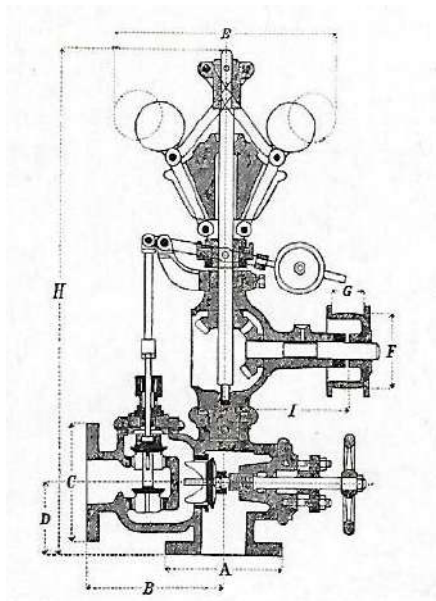
$$K = \frac{G}{g} \cdot R \cdot \omega^2 = \frac{G}{g} \cdot R \cdot \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2 \text{ [kg]}$$

De krachten Q op de huls H ten gevolge van de centrifugaal kracht worden in evenwicht gehouden door het hulsgewicht P van de reguleur. Indien nu door vermindering van de belasting de snelheid van de machine toeneemt, dus de hoeksnelheid groter wordt, dan neemt ook de centrifugaal kracht toe en worden de krachten Q op de huls groter. Als nu $2Q - P$ groter is geworden dan de verstelkracht nodig om de smoorklep te verstellen, dan gaat de huls verschuiven en wordt de stoomtoevoer naar de machine geknepen.



Schema's werking hulreguleur

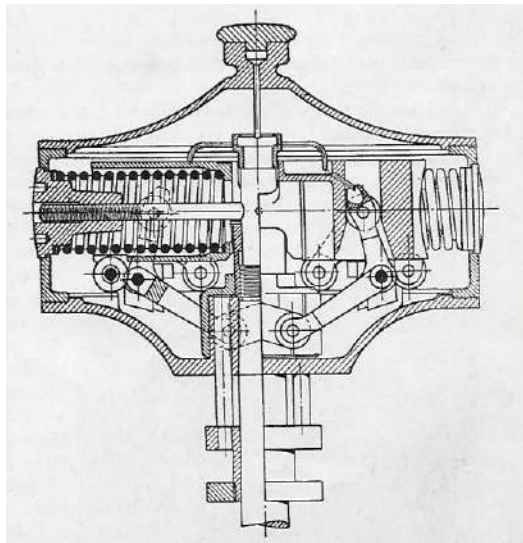
De rotatie snelheid van de machine neemt af tot er een nieuwe evenwichtstoestand is bereikt. Een dergelijke reguleur kan dus niet de rotatie snelheid exact constant houden. Immers bij een bepaalde hoeksnelheid hoort een bepaalde stand van de smoorklep. De machine zal daarom vol-belast dan ook langzamer draaien dan wanneer ze weinig of niet belast is. Door de hefboom van de regelstang naar de smoorklep van een verschuifbaar gewicht te voorzien kan het hulsgewicht worden gewijzigd en daarmee het gewenste toerental van de machine worden ingesteld. Hiernaast is een combinatie van een reguleur met smoorklep aangegeven waarbij het gewicht is te zien waarmee het toerental is te regelen.



Hulreguleur met smoorklep

Opmerkelijk is dat reguleurs vaak met een drijfriem of een snaar werden aangedreven. In de hier voor gegeven figuur is dat ook het geval. Dit betekent dat bij breuk van de riem of de snaar de machine over toeren kan raken of op hol kan slaan met als gevolg vliegwielexplosie dan wel andere ernstige machinebreuk.

In de plaats van een hulsgewicht worden ook reguleurs toegepast die zijn uitgerust met druk of spiraalveren gecombineerd met gewichten. Het verschil tussen een veer en een gewicht is, dat de laatste een constante kracht gelijk aan het gewicht, op de huls uitoefent terwijl de veer een kracht

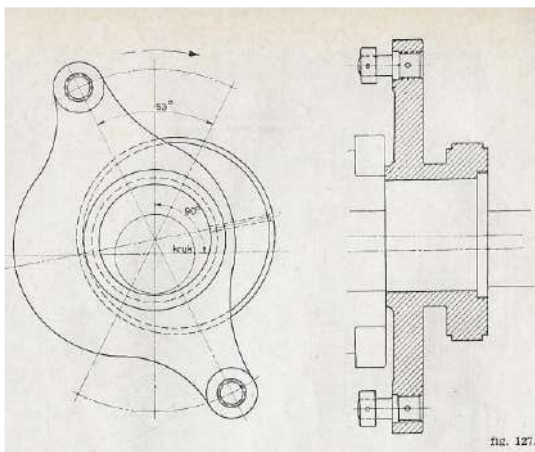


uitoefent welke evenredig is met de indrukking. Buiten de hier beschreven reguleur zijn er vele uitvoeringen waarbij de centrifugaal gewichten over een rechte meestal horizontale, geleiding kunnen schuiven en door veren of gewichten worden belast. Het hele mechanisme is dan ondergebracht in een trommel. De hier boven afgebeelde figuur is hier een voorbeeld van. Men kan nu door de juiste keuze van de gewichten en de veren de reguleur de gewenste eigenschappen geven voor gevoeligheid en regelbereik. Bij de hierboven afgebeelde reguleur kan het toerental met behulp van het veranderen van de veerdruk versteld worden.

Veerbelaste hulsgereguleur

Schijfreguleur

De schijfreguleur wordt zoals reeds werd opgemerkt, gebruikt om de machine te regelen door het veranderen van de vulling. Dit type reguleur verzet het excentriek dat de stoomschuif van de machine aandrijft zodanig dat de voorloophoek en meestal ook de schuifslag veranderen. Ook van

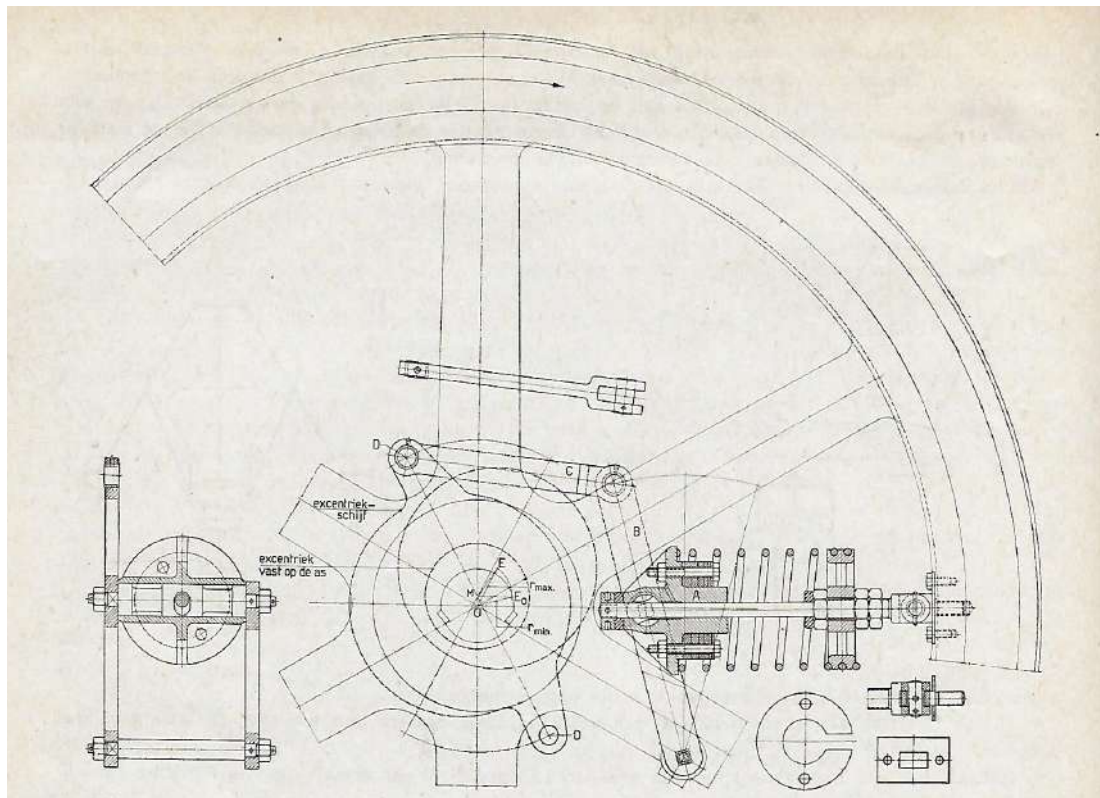


dit type reguleur zijn in de loop der tijd verschillende varianten ontwikkeld en toegepast. De werking berust op het principe dat je twee excentrieken tegen elkaar in laat werken en dat daardoor de excentriciteit van het ene excentriek door de ander kan worden opgeheven, de schuif niet meer wordt bewogen en de machine geen verse stoom meer krijgt toegediend.

In de praktijk worden beide excentrieken tot één geheel samen gebouwd waarbij de zogenoemde binnenexcentriek vast op de krukas gespied wordt terwijl de buitenexcentriek, de verstel-excentriek, draaibaar hiermee is verbonden.

Detail dubbel excentriek

De figuur op de hier onder geeft een dergelijke, in het verleden veel toegepaste, constructie weer. De veren en de gewichten die bepalend zijn voor het toerental van de machine zijn hier in het vliegwiel aangebracht.

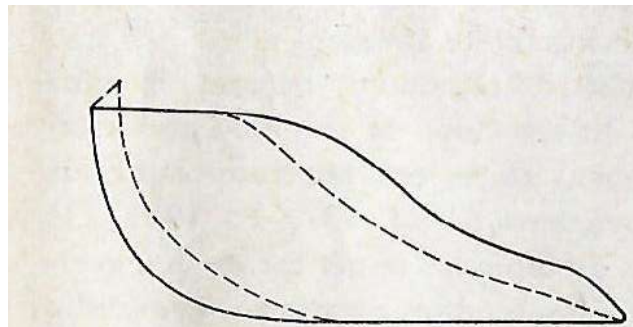
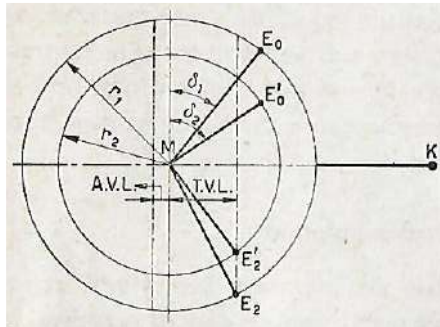


Schijfregulateur in vliegwiel (dubbelexcenriek)

De complete excentriek schijf is hier boven in detail weergegeven. We zien hier dat deze schijf kan draaien om het excentrische gedeelte op de krukas. Door het verdraaien van de losse buitenschijf veranderen zowel de voorloophoek als de excentriciteit.

In de hier na afgebeelde figuur is de voorloophoek veranderd van δ_1 tot δ_2 en de excentriciteit van r_1 tot r_2 . Zetten we nu de lappen van de schuif uit op de hartlijn dan zien we dat de hoek welke de excentriek, dus ook de kruk van de machine, met de toevoer wordt doorlopen, veranderd is van E_0 ME_2 tot E_0' ME_2' en dus kleiner is geworden. Als we het diagram verder uitwerken zien we dat, door deze verandering, de stoomverdeling zodanig is geworden dat de voortoelaat groter, de vulling kleiner, de expansie groter, de uitlaat kleiner en de compressie groter is geworden. Deze laatste kan zelfs zo groot zijn dat de keteldruk wordt overschreden en er negatieve arbeid ontstaat. De machine wordt hierdoor een klein beetje afgeremd. Het oppervlak van het theoretische diagram, hier voorgesteld door de gestippelde lijnen, wordt kleiner en dus ook het door de machine

ontwikkelde vermogen. De boogvormige baan welke het middelpunt van het excentriek bij het verstellen kan afleggen noemt men de verstelweg van het excentriek. Bij het gegeven voorbeeld bedraagt deze 53° .



Invloed voorloophoek en excentriciteit op prestatie

Expansieschuiven

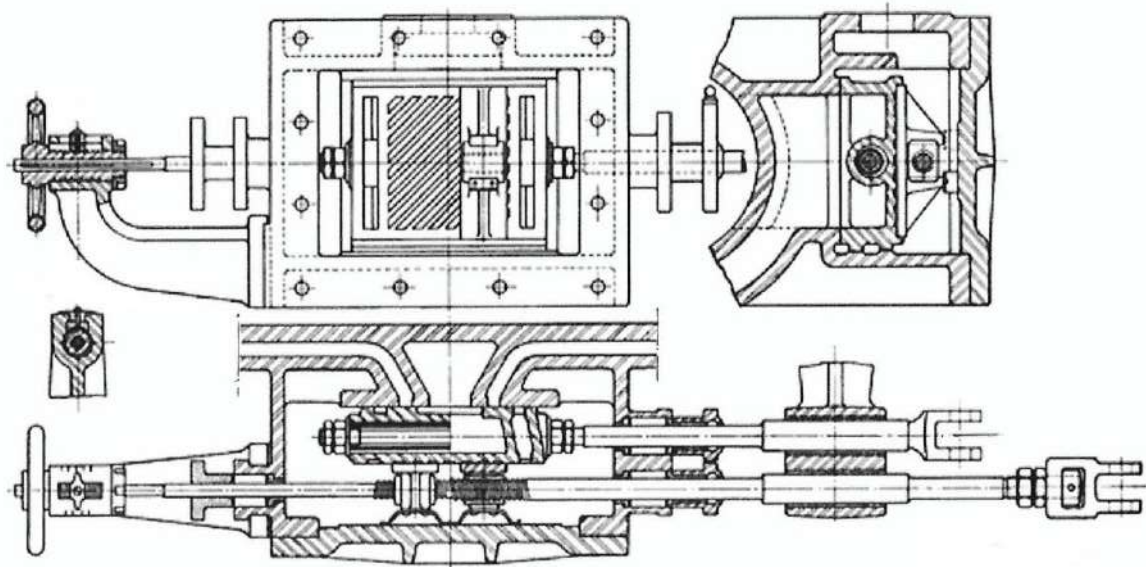
Zoals hier voor in deze paragraaf is aangetoond wordt de duur van de toevoer, en daarmee de expansie van de stoom, beheerst door de overlap aan de toevoerszijde, en van de afvoer en daarmee van de compressie, door de overlap aan de afvoerszijde. Met een gewone bakschuif kan men de machine dus al met expansie laten werken. Vergroot men de toevoerlap, dan wordt de vulling kleiner en werkt de machine met meer expansie. Is echter de afvoerlap te klein, dan begint de afvoer al gauw te vroeg en zou men dit willen verhelpen door vergroting van de afvoerlap, dan stijgt de compressie al spoedig boven de gewenste grens. Het blijkt daarom ondoenlijk met minder dan 50 % vulling te werken. Daar bovendien de stoomverdeling door middel van een bakschuif niet toelaat de vulling tijdens bedrijf te verstellen heeft men naar andere middelen gezocht om de vulling te regelen.

Meijerschuif

Een van de eerste pioniers op dit gebied die er in slaagde de expansie en daarmee het vermogen van de met een bakschuif uitgeruste stoommachines te regelen was Meijer te Mulhouse. Hij plaatste hiertoe op de rug van de grondschiif een tweede schuif, de zogenoemde expansieschuif, die door middel van een afzonderlijke excentriek van af de machineas bewogen werd.

Het excentriek van de expansieschuif heeft een veel grotere voorloop hoek dan de grondschiif. Bij deze inrichting, die vaak is toegepast bij de stoommachines van gemalen, kan de machinist met behulp van een handwiel, dat buiten de de stoomschuifkast is geplaatst, op elk moment het gewenste vermogen, het toerental en daarmee het waterverzet van het gemaal regelen. Zoals uit de hierna volgende figuur blijkt bestaat de expansieschuif uit twee blokjes die op de tekening tegen elkaar liggen. De blokjes zijn evenals de schuifstang van linkse- en rechtse schroefdraad voorzien. Door nu aan het handwiel te draaien worden de blokjes van elkaar af of naar elkaar toe bewogen, waardoor de toevoerpoorten in de grondschiif verder openen of sluiten en de vulling wordt geregeld. Het handwiel is voorzien van een lange bus met spiebaan waar de verlengde schuifstang in heen en weer beweegt. Naast het handwiel is een blokje met een wijzer aangebracht dat, langs een schaallineaal bewegend, de grootte van de vulling aangeeft.

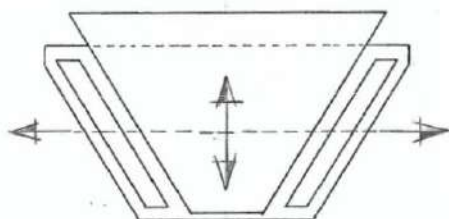
De grondschiuf laat de stoom toe in de cilinder via de daarin aangebrachte kanalen en dus niet zoals bij de bakschiuf langs de buitenkant. Het mag duidelijk zijn dat de vulling niet door de machine zelf wordt geregeld met behulp van een reguleur maar uitsluitend met de hand. Verder wordt met deze inrichting bereikt dat de in- en de uitlaat van elkaar zijn gescheiden waarbij de grondschiuf de afvoer en de expansieschiuf hoofdzakelijk de toevoer van de stoom beheerst. Een groot bezwaar van deze schuifconstructie is dat de stoomdruk de schuif met grote kracht tegen de spiegel drukt met een groot energieverbruik en veel slijtage als gevolg. Ook moet hierdoor de verstelinrichting noodgedwongen van een schroefdraad met geringe spoed worden voorzien om het handwiel zonder al te veel kracht inspanning te kunnen verdraaien.



Inrichting Meijerschiuf

Ridderschiuf

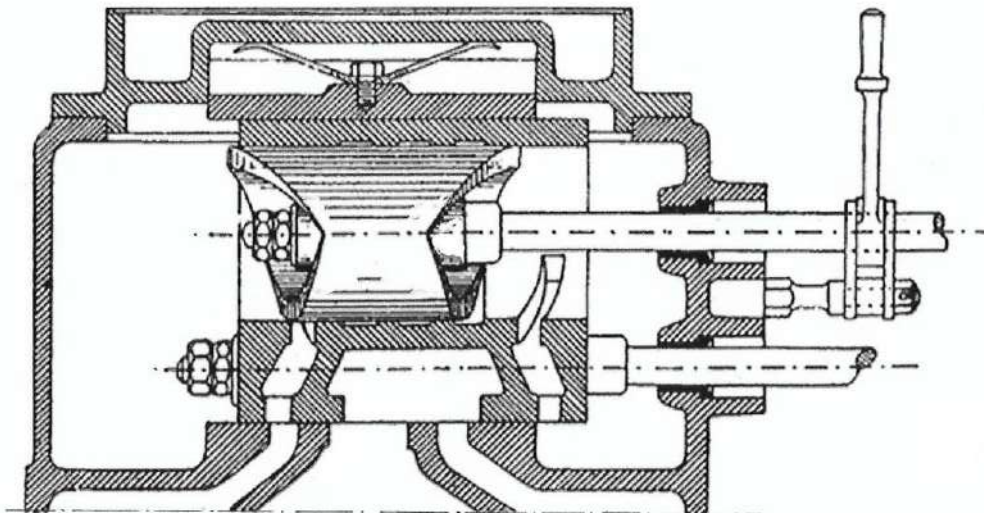
Uit de hier onder afgebeelde figuur is de werking van een vlakke Ridder expansieschiuf af te leiden. De expansieschiuf in de tekening wordt door een trapeziumvormige plaat voorgesteld. Deze plaat beweegt over de onderliggende grondschiuf waarin twee parallellogramvormige sleufgaten zijn aangebracht.



De grondschiuf wordt door een excentriek aangedreven in een horizontale beweging. De expansieschiuf wordt door een verstelmecanisme, bijvoorbeeld de reguleur, in verticale richting bewogen. Door deze verstelling worden de poorten in de grondschiuf eerder of later geopend dan wel gesloten en zal de expansie vroeger of later beginnen.

Principe werking Ridderschiuf

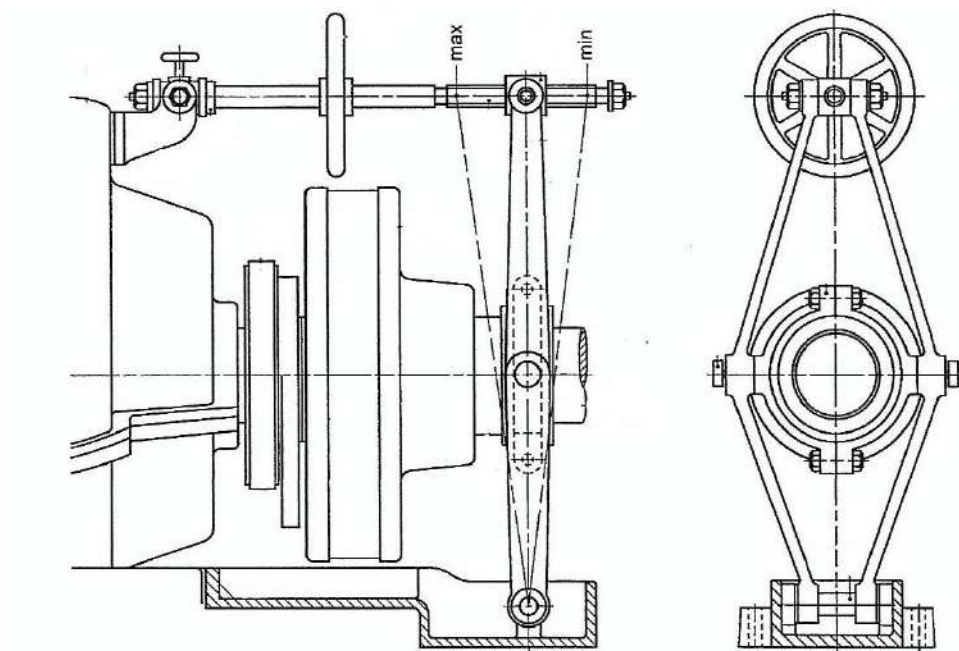
De verticale beweging van de schuif vindt plaats met een op de schuif geplaatste getande baan. In deze baan is een tandwielje aangebracht dat met een stang met de reguleur verbonden is. Denkt men nu de vlakke Ridderschuif samen met de rug van de grondschiuf opgerold tot een hele of gedeeltelijke cilinder, dan ontstaat de vlakke Ridderschuif zoals hier is afgebeeld. De hartlijn van de expansie schuif en de grondschiuf moeten hierbij samen vallen. De rug van de grondschiuf vormt dan een holte met schroefvormige kanalen. De buisvormige expansieschuif, waarvan de randen eveneens schroefvormig zijn afgewerkt, past in deze holte. Door de expansieschuif te verdraaien wordt op identieke wijze een grotere of kleinere vulling verkregen en kan het gewenste vermogen en het toerental worden geregeld. Doordat de expansieschuif een ronde vorm heeft is deze ontlast en is de verstelkracht tot een minimum beperkt. Ook de slijtage van dit onderdeel is daardoor gering. In de figuur van de Ridderschuif is een handbediening getekend. Door het bedieningshandel met behulp van een hefboomstelsel met een reguleur te verbinden wordt een door de machine zelf geactiveerde regeling verkregen. Hier worden de expansieschuif en de grondschiuf door aparte excentrieken bewogen.



Doorsnede Ridderschuif

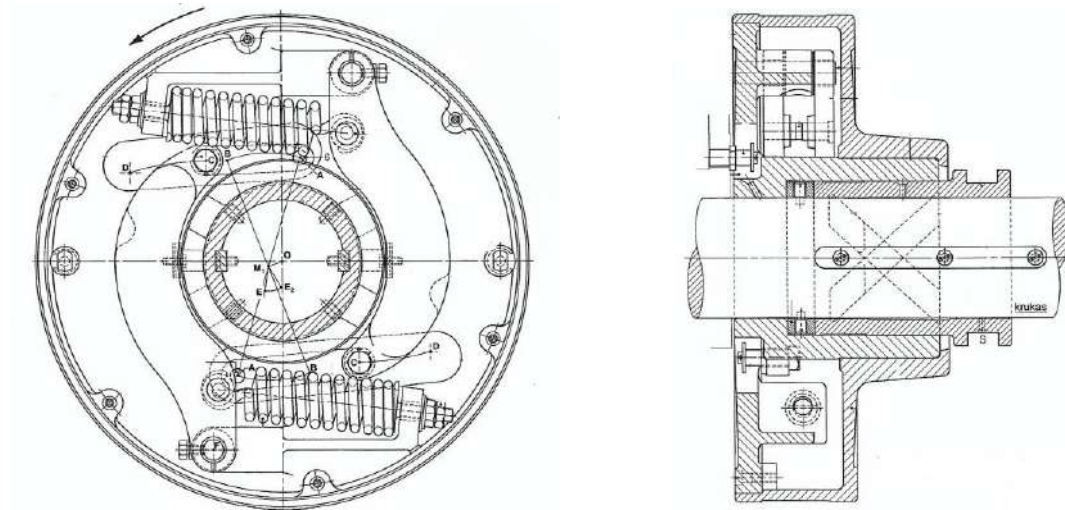
Verstelbaar excentriek

In de hier onder aangegeven tekening wordt een voorbeeld gegeven van een verstelbaar excentriek. De werking van het excentriek berust op die van een dubbelexcentriek zoals hiervoor is behandeld. Door het excentriek los op de krukas te bevestigen kan men de voorloophoek en daarmee de vulling van de machine tijdens bedrijf regelen. Het binnenexcentriek is met een spieverbinding vast op de krukas gezet. Het buitenexcentriek daarentegen is verdraaibaar om het binnenexcentriek aangebracht.



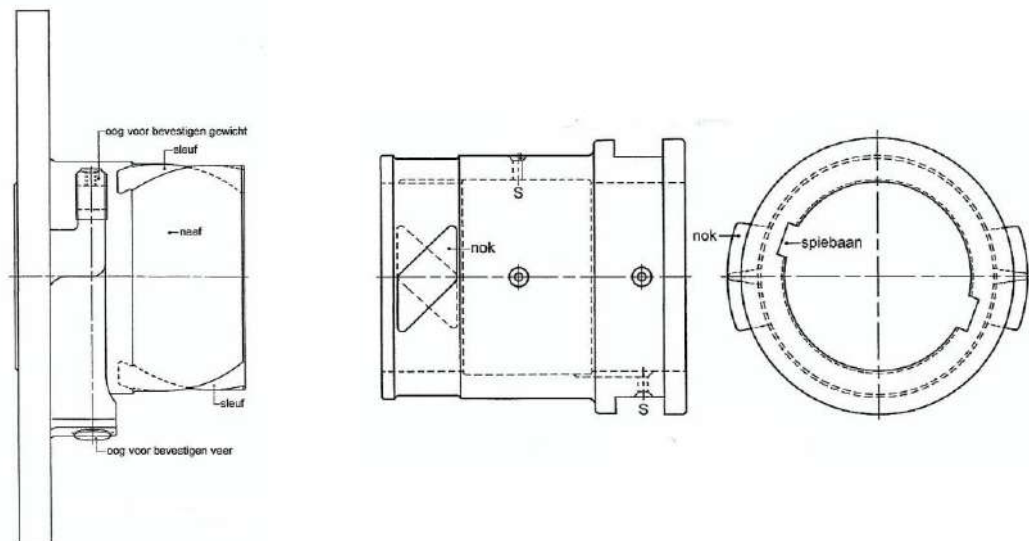
Verstellenrichting excentriek

De excentriekschijf is voorzien van holle as of naaf waarin twee schroefvormige sleuven zijn aangebracht. In deze naaf is een schuif bus met daarop twee nokken, die in de sleuven passen, bevestigd en met een spieverbinding met de krukas verbonden. De bus is glijdend op de as bevestigd en kan alleen in axiale zin worden verplaatst. Door de schuif bus, bijvoorbeeld met het in het voorbeeld getekende hefboomstelsel, draadstang en handwiel, naar binnen of naar buiten te bewegen zal de excentriekschijf over een bepaalde hoek worden verdraaid en dus de voorloophoek veranderen. De machine zal hierdoor met meer of minder expansie werken. Ook de excentriciteit en daarmee de slag van de schuif of de opening van de klep wordt bij het verstellen groter of kleiner, waardoor er meer of minder stoom naar de machine worden gevoerd met als gevolg dat het vermogen toe- of afneemt.



Verstelinrichting en reguleur

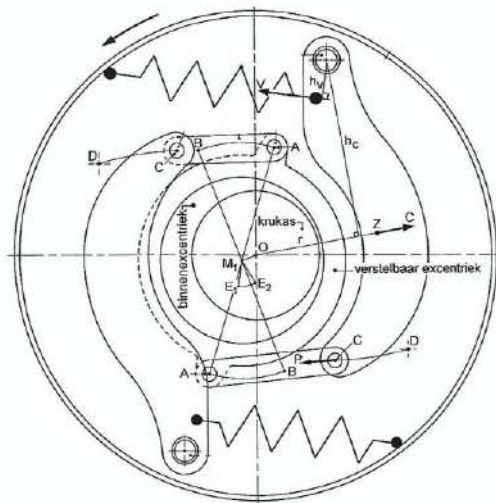
In de figuur hierboven is zowel de verstelinrichting als de hiermee gekoppelde veerbelaste gewichtsreguleur getekend. Hieronder zijn de details van de excentriekschijf waarop de gewichten en de trekveren van de reguleur zijn aangebracht, weergegeven. Het geheel is ondergebracht in een trommel.



Details van de verstelinrichting en reguleur

In de hierna volgende principe tekening is de werking van de verstelinrichting en de daarmee verbonden belaste gewichtsreguleur weergegeven. Als het draadblok naast het handwiel van de verstelinrichting wordt verplaatst van minimum naar maximum dan zal de schuifbus naar links

schuiven. De reguleurschijf en het verstelbare excentriek draaien dan rechtsom. Het middelpunt van het excentriek wordt dan over de verstelweg van E_2 naar E_1 verplaatst. Al naar gelang de belasting van de machine zal het toerental toenemen totdat het gevraagde vermogen in evenwicht is met het geleverde vermogen. Wanneer bij het, met behulp van de veren ingestelde maximum aantal omwentelingen, het effectief vermogen groter is dan het krachtverbruik zal het toerental nog verder toenemen en grijpt de reguleur in. Er ontstaat een grotere centrifugaalkracht waardoor de gewichten C naar buiten bewegen. De koppelstang doorloopt daarbij een gedeelte van de boog $C-D$ in de hierbij afgebeelde figuur en draait het verstelbare excentriek linksom. Het middelpunt van



het excentriek beweegt daarbij over de verstelweg richting E_2 . De resulterende excentriciteit en dientengevolge de vulling worden kleiner. De gewichten bewegen zover naar buiten tot zich een evenwicht tussen het gevraagde en het geleverde vermogen heeft ingesteld. Als onbedoeld de belasting wegvalt, of er nog geen belasting aanwezig is, zoals bij het opstarten van een droog opgestelde waaierpomp, zullen de gewichten maximaal uitslaan en tegen een nok aankomen. Het verstell excentriek wordt nu zover teruggedraaid en de vulling zo klein dat de machine niet op hol slaat maar onbelast blijft doordraaien.

Schema verstelinrichting en reguleur

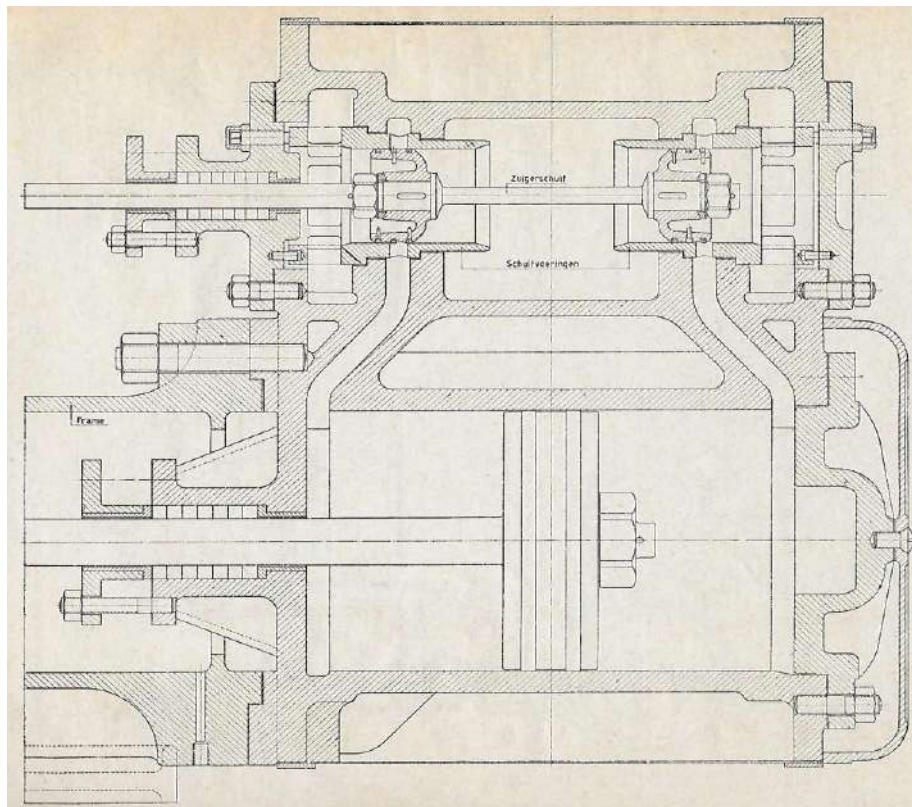
Het nominale toerental van de machine wordt ingesteld door de trekveren de juiste voorspanning te geven. Hiertoe moet de trommel worden verwijderd en moeten de moeren achter de veren worden aangedraaid voor een hoger toerental. Door de moeren terug te draaien wordt het tegenovergestelde bereikt. Het instellen van het nominale toerental is een eenmalige gebeurtenis en zal slechts plaatsvinden bij het opnieuw in bedrijf stellen na uitgebreide revisies of reparaties van de reguleur dan wel een gewenste verandering van de nominale pompcapaciteit en opvoerhoogte.

4.14.7 Stoomcilinder en schuifspiegel

In de stoomcilinder beweegt zich de zuiger.. De cilinder, zoals hier onder afgebeeld, met daaraan vast de schuifkast, wordt vervaardigd van fijnkorrelig gietijzer. Dit heeft de eigenschap een mooi glad oppervlak te vormen aan de binnenzijde van de cilinder als de zuigerveren hier voortdurend langs glijden. De cilinder moet na mechanische bewerking stoomdicht, dus vrij van gietgallen en te hoge materiaalspanningen zijn. Het spreekt voor zich dat bij dergelijke complexe gietstukken hoge eisen worden gesteld aan het materiaal maar nog meer aan het vakmanschap van het personeel in de gieterij.

Cilinderconstructie

De wand van de schuifkast tegen de cilinder wordt gevormd door een vlakke of ronde spiegel, waarin zich de stoompoorten bevinden. Vaak is de cilinderbodem, waar de zuigerstang doorheen beweegt, één stuk met de cilinder. Het cilinderdeksel sluit het andere einde van de cilinder af. Het deksel is soms vanwege gewichtsbesparing van gegoten staal maar meestal ook van het fijnkorrelige gietijzer gemaakt, hetzelfde materiaal waar ook de cilinder van is vervaardigd. De cilinder is met stevige draadeinden aan het frame vastgemaakt.



Stoomcilinder met aangegoten schuifkast

De wanddikte van de stoomcilinder kiest men zo groot dat:

- Tijdens het gieten van de cilinder een kleine verschuiving van de gietkern het gietstuk niet waardeloos maakt.
- Voldoende weerstand wordt geboden aan de krachten die optreden bij de bewerking
- De stoomdichtheid is verzekerd
- De materiaalspanningen tijdens het bedrijf de hoogst toegestane waarden niet overschrijden
- De cilinder later nog eens uitgedraaid of gekotterd kan worden als dat nodig blijkt te zijn.

De wandikte s na bewerking wordt bepaald met dezelfde formule waarmee ook de wandikte van een ketelromp wordt bepaald.

$$s = \frac{p \cdot D}{2 \sigma} [\text{cm}]$$

Waarin:

s = wanddikte van de stoomcilinder na bewerking in cm

p = druk van de stoom in de cilinder kg/cm^2

D = inwendige cilinderdiameter in cm

σ = toe te laten trekspanning voor gietijzer in kg/cm^2

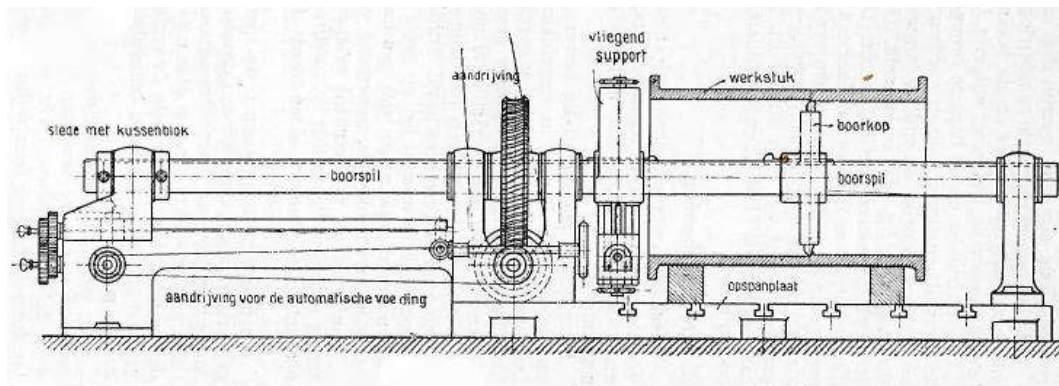
Voor de toelaatbare treksterkte neemt men bij gegoten ijzer 180 kg/cm^2 . Is de cilinderdiameter van de gelijkstroombank op de volgende bladzijde 45 cm en de werkdruk 12 kg/cm^2 dan is de minimale wanddikte na bewerking:

$$s = \frac{12 \cdot 45}{2 \cdot 180} = 1,5 \text{ cm of } 15 \text{ mm}$$

De wanddikte van het deksel en de bodem kiest men gewoonlijk gelijk aan die van de cilinder.

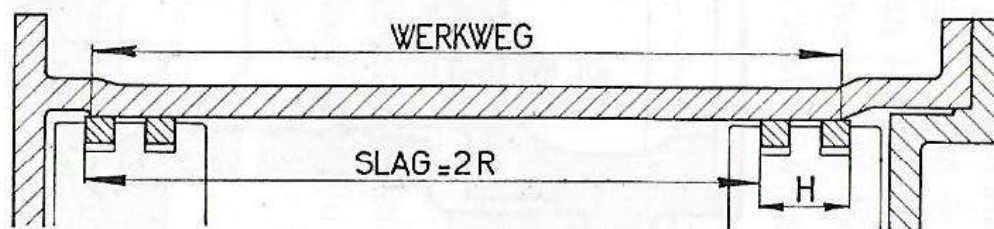
Poten of stoelen dienen voor de bevestiging van de cilinder aan de fundatie en vormen één geheel met het cilindergietstuk. Bij stoommachines met een gering vermogen worden de poten of de stoelen achterwege gelaten en is de cilinder aan het frame opgehangen, men spreekt dan van een overhangende cilinder.

De cilinder wordt bij wisselstroombanken over de volle lengte op een kotter- carrousel- of speciale cilinderboorbank recht uitgeboord. Grote stoomcilinders moeten bij voorkeur in dezelfde stand geboord worden als de stand waarin zij dienst gaan doen omdat bijvoorbeeld een vertikaal geboorde cilinder door zijn eigen gewicht bij horizontale plaatsing iets onrond wordt. Er zijn dus twee soorten cilinderboorbanken; horizontale en verticale.



Horizontale cilinderboorbank

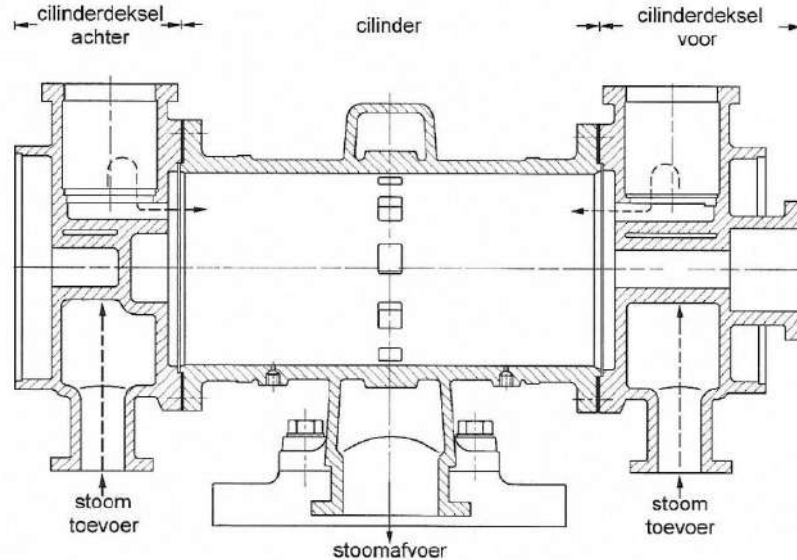
De cilinder moet voor een goede afdichting zuiver rond en glad bewerkt zijn. Het middelste gedeelte van de binnenkant van de cilinder, waarlangs de veren lopen noemen we de werkweg. Aan de einden is de cilinder iets wijder uitgedraaid om het ontstaan van stootranden te voorkomen. De buitenste zuigerveren steken dan in de uiterste stand iets over de rand van het schuine gedeelte. De veren steken dus iets buiten de werkweg. De afschuining aan de dekselzijde heeft naast het voorkomen van een stootrand verder nog als doel om bij revisies de zuiger met het verenpakket gemakkelijker te kunnen monteren.



Relatie tussen zuigerslag en werkweg

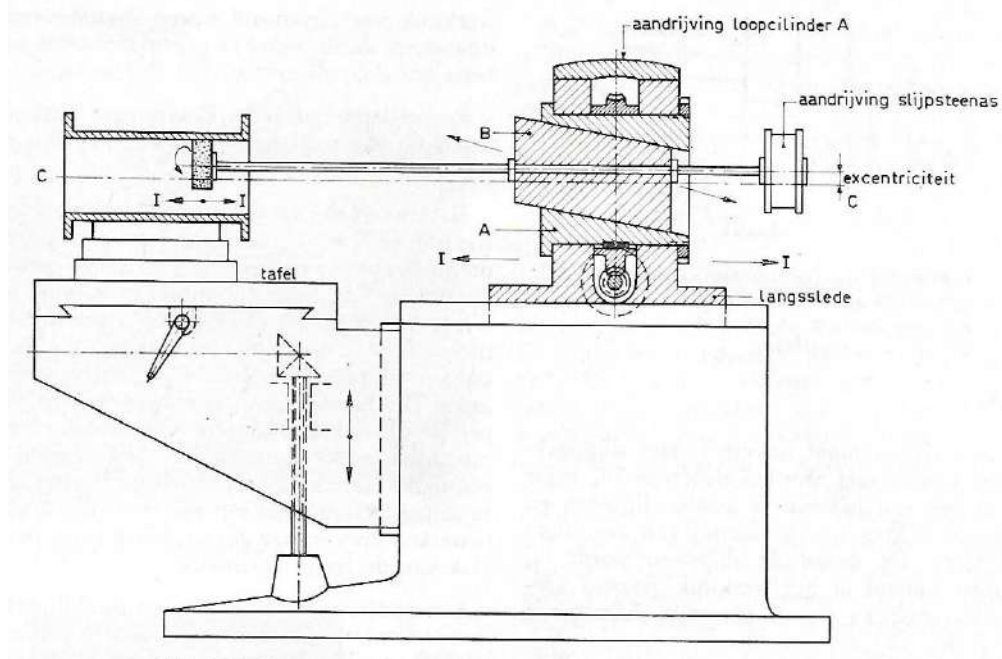
Het gemiddelde temperatuurverschil tussen de aan- en afvoerzijde van cilinders bij gelijkstroommachines is groot. Een en ander doordat, anders dan bij wisselstroommachines waar de aan- en afvoer van de stoom aan één zijde plaatsvindt, bij de gelijkstroommachines de stoom aan de zijkanten wordt toegevoerd en in het midden wordt afgevoerd. Dit betekent dat als gevolg van het uitzetten van het cilinder materiaal tijdens bedrijf (grote) maat-verschillen optreden. De zuigerveren zullen continue de diabolovormige cilinderwand moeten volgen hetgeen overmatige slijtage van de veren en de sponningen tot gevolg heeft. Ook treedt eerder vermoeidheid op van het materiaal waar de veren van gemaakt zijn. Sommige stoommachine fabrikanten boren daarom de cilinders van dit type stoommachine tonvormig uit. In warme toestand is de cilinder dan recht met overal dezelfde speling voor de zuiger. Bij revisies is het zaak de cilinder diameters zowel in de hoogte als in de breedte op een aantal plaatsen in de lengterichting van de cilinder nauwkeurig op te meten en dit vast te leggen. Aan de hand hiervan kan men het slijtagepatroon en de onrondheid vaststellen dan wel bepalen of de cilinder opgeboord moet worden en nieuwe, overmaatse, zuigerveren moeten worden toegepast. Bij cilinders met een voering zal men de voering trekken en

vervangen. Uit de meetgegevens kan men tevens de ton-vorm in koude toestand afleiden. Deze dient gebruikt te worden bij het opboren van de cilinder of bij het boren van de nieuwe voering.



Cilinder met deksels voor gelijkstroommachine

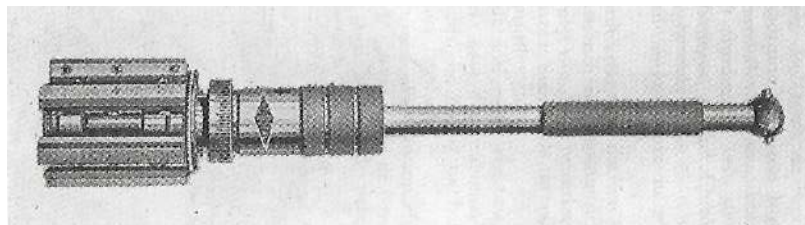
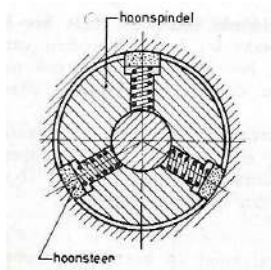
Tegenwoordig worden cilindervoeringen na het boren geslepen of gehoond. Bij het slijpen maakt de ronde slijpsteen een sneldraaiende tolbeweging en rolt gelijktijdig langs het te bewerken cilinderoppervlak.



Cilinderslijpmachine

De slijpsteen heeft dus gelijktijdig twee draaiende bewegingen. Verder wordt de zogenoemde loopcilinder heen en weer bewogen met behulp van de langsvoeding waardoor de cilinderwand in kruisslag wordt bewerkt. Met deze slijpmachine, zoals afgebeeld op de vorige bladzijde, is het betrekkelijk eenvoudig om de cilinder tonvormig te bewerken. Met slijpen wordt een zeer glad en grote vorm- nauwkeurigheid (zuiver rond en recht) oppervlak bereikt.

Honen of trekslijpen is een verspaningstechniek die te vergelijken is met ruimen, met dien verstande dat de messen vervangen zijn door stroken gemaakt van diamant, kubisch boornitride of keramisch gebonden materiaal. De stroken slijpmateriaal zijn in sleuven op een cilindervormige schacht aangebracht en worden al draaiende diametraal door lichte veren of hydraulisch tegen de te bewerken cilinderwand gedrukt.

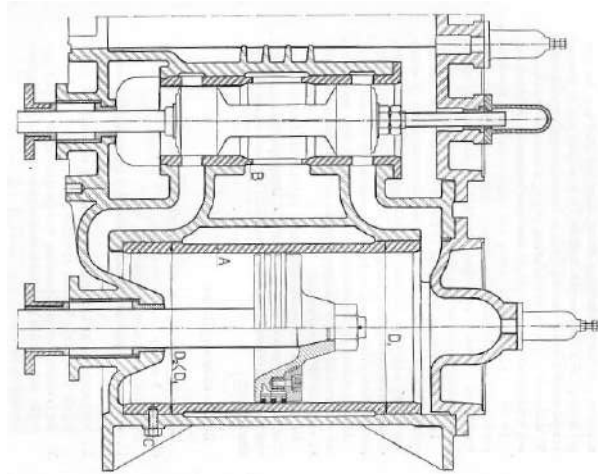


Hoonspindel zonder aandrijving

Tijdens het bewerken wordt de slijpschacht al naar gelang de opstelling van de cilinder op en neer of heen en weer bewogen zodat een kruisslag slijppatroon ontstaat. De verbinding van de aandrijfspil van de slijpschacht is flexibel verbonden met de aandrijving zodat deze zich volledig richt naar de te bewerken boring. Een dergelijke bewerking kan ook ter plaatse met behulp van een speciaal daar voor aangepaste mobiele opstelling worden uitgevoerd.

Cilindervoering

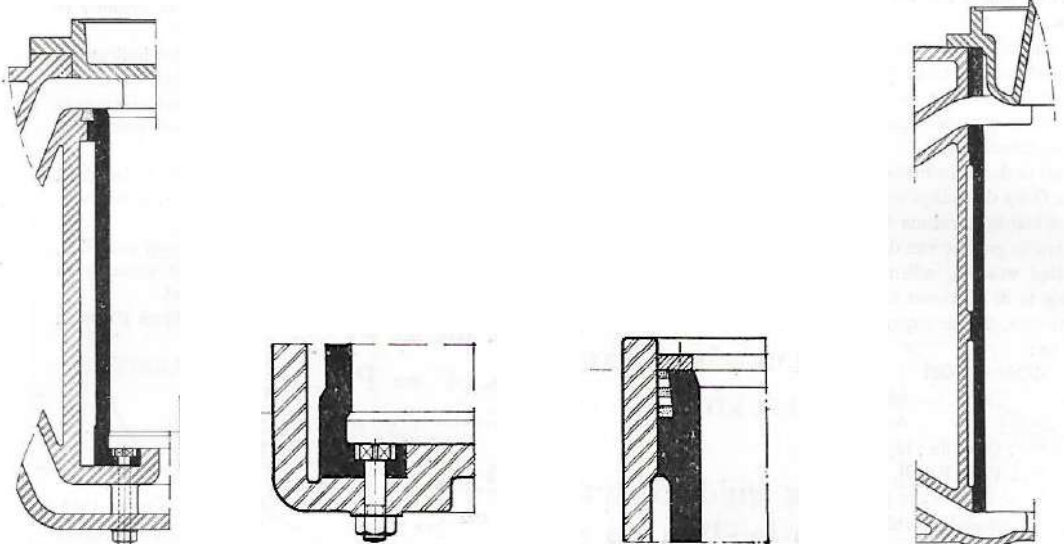
Het materiaal waarvan cilinders worden gemaakt moet zo taai mogelijk zijn om weerstand te kunnen bieden aan de erop werkende krachten. Het loopvlak van de cilinder moet hard zijn om de slijtage zo gering mogelijk te maken. Vooral bij gebruik van stoom met een hoge druk en temperatuur is dit van belang. Deze verschillende eisen die aan het cilindermateriaal worden gesteld zijn de reden dat men deze van een voering voorziet.



Stoomcilinder met voering

De hardheid van de voering bedraagt dan 180 – 200 Brinell, wat te vergelijken is met uitgegloeid staal. De cilinder wordt van taaier en minder hard gietijzer gemaakt. Het aanbrengen van een afzonderlijke voering heeft ook nog het voordeel dat zij, indien nodig door slijtage of beschadiging vervangen moet worden, gemakkelijk kunnen worden vernieuwd. Ook als een stoommantel wenselijk wordt geacht is dat met een voering eenvoudiger te realiseren.

De voering wordt in de buitencilinder geperst of getrokken. Voor het gemakkelijk inbrengen van de voering wordt soms de cilinder van tevoren met stoom verwarmd. Verschuiven van de voering in de cilinder wordt voorkomen door het inschroeven van enkele borgbouten.



Cilindervoeringen en constructiedetails

Soms wordt de voering voorzien van een naar binnen gerichte flens. Deze flens wordt door middel van tapbouten in de vlak gedraaide sponning op de cilinderbodem vastgezet. Aan de bovenkant of

de dekselzijde is in vele gevallen een zwaluwstaartvormige groef gedraaid waarin lood, babbith of een uitgegloeide koperen ring wordt aangebracht. Deze constructie maakt de verplaatsing van de cilinder ten opzichte van de voering mogelijk. Ook komt het voor dat de groef is gevuld met het tegenwoordig verboden asbest, dat door een metalen ring wordt aangedrukt. Soms maakt men de voering zo lang dat deze in het vlak van de cilinder komt te liggen. Het cilinderdeksel kan dan tevens dienst doen als borg tegen verschuiven van de voering in langsrichting. Bij grote lengte heeft de voering meestal halverwege nog een steunrand.

Stoommantel

Als de ruimte tussen de binnen- en de buitencilinder gebruikt wordt als stoommantel, dan moet uiterste zorg worden besteed aan het aftappen van het condensaat. Te veel condensaat heeft namelijk een averechtse uitwerking op het beoogde vermijden van (begin)condensatie in de cilinder. Over het nut van een stoommantel is men het niet altijd eens. In de praktijk heeft men het nut van het toepassen van mantelstoom meermalen kunnen aantonen zodat sommige machines hiermee zijn uitgerust. Een stoommantel kan ook gebruikt worden om de stoommachine voor te warmen voordat deze vanuit een koude toestand in bedrijf wordt gesteld.

Cilindersmering

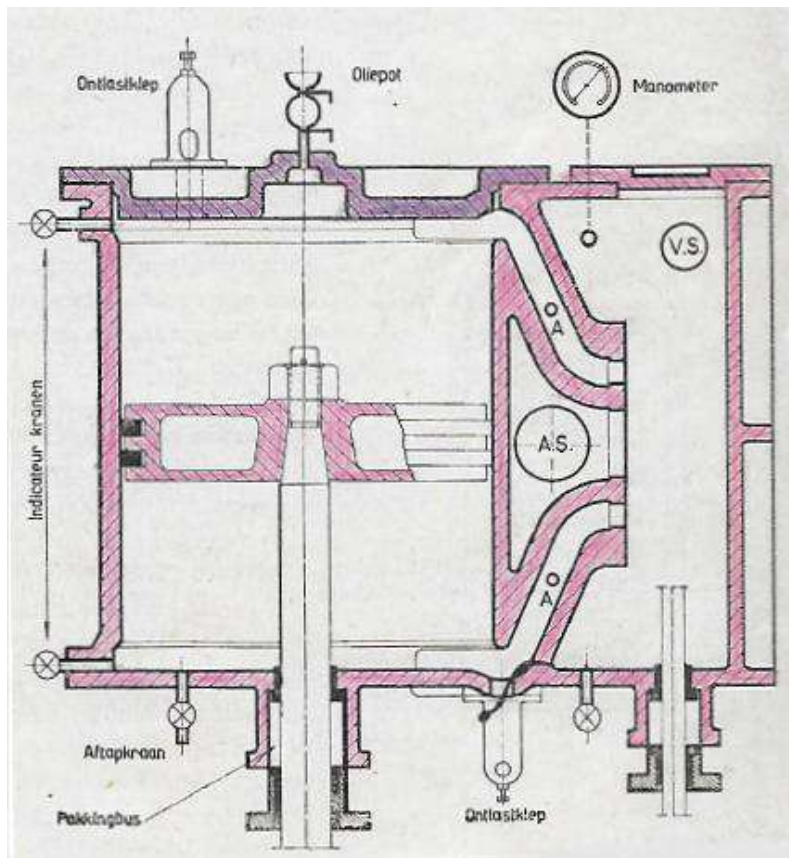
De zuiger in de cilinder maar ook de schuiven die voor de toevoer van de stoom zorgen moeten gesmeerd worden. Hierbij doet zich het probleem voor dat deze delen onder druk staan en het smeermiddel, uitsluitend speciale cilindersmeerolie, met de hete stoom in aanraking komt. Daarenboven vervuilt de olie het condensaat en mag daarom niet zondermeer naar de ketelinstallatie worden teruggevoerd. De speciale olie die wordt toegepast bij stoommachines wordt in deze leidraad behandeld in de paragraaf over smeermiddelen. Hier volgen de methodes waarop de hiervoor genoemde onderdelen worden gesmeerd.

Oliepotsmering (drukverdrrijving)

De smering van de schuiven en de zuigers in de stoomcilinders geschiedt onder druk maar aanzienlijk minder overvloedig dan bij de uitwendige machineonderdelen omdat deze olie in het condensaat terecht komt; een plek waar we dat liever niet hebben.

Een enigszins primitieve methode is om de smeerolie in de cilinder te laten vallen en door de stoom te laten meevoeren naar de te smeren vlakken. Een en ander zoals op de tekening op de volgende bladzijde is aangegeven.

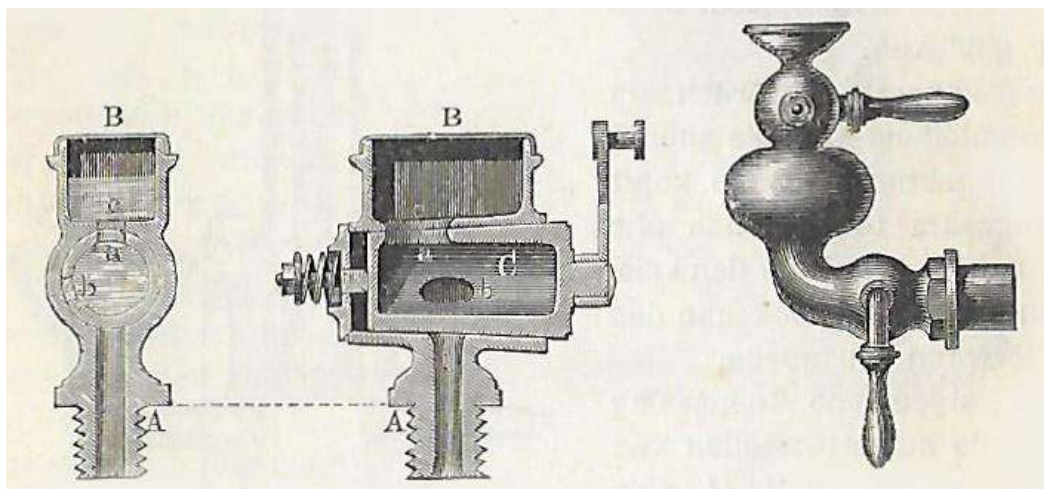
De oliepot die hierbij wordt gebruikt is gescheiden van de onder druk staande cilinder door twee kranen waartussen zich een voorraadkamertje bevindt. Deze kamer wordt gevuld door de kraan aan de cilinderzijde te sluiten en die aan de vulzijde te openen. Het kamertje kan dan met een oliekan worden gevuld. Eenmaal gevuld wordt de kraan aan de vulzijde gesloten en die aan de cilinderzijde een klein beetje geopend. In het kamertje heerst dan de- zelfde druk als in de betreffende cilinder zodat de olie naar beneden druppelt.



Ollepoot voor smering cilinder en schuif

Een variant met de oliekamer tussen de twee kranen is die waarbij de holte van de kraan wordt gebruikt staat hier onder afgebeeld.

Het hoeft geen betoog dat de goede smering afhangt van de ervaring van de met de bediening belaste machinist en hoe consequent hij op gezette tijden de oliepot bijvult.

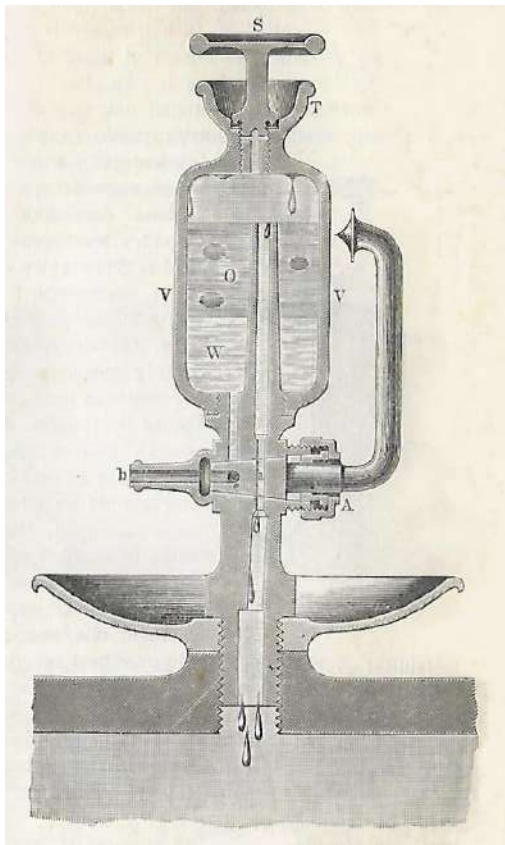


Ollepoot met kamer in kraan

Ollepoot met kamer tussen de kranen

Oliepotsmering (vloeistof verdrijving)

Een variant op de hier voor beschreven oliepot voor cilindersmering is de oliepot van Klein Schanzlin en Becker, het huidige KSB. De stoom komt bij deze inrichting via de standpijp in het oliereservoir,



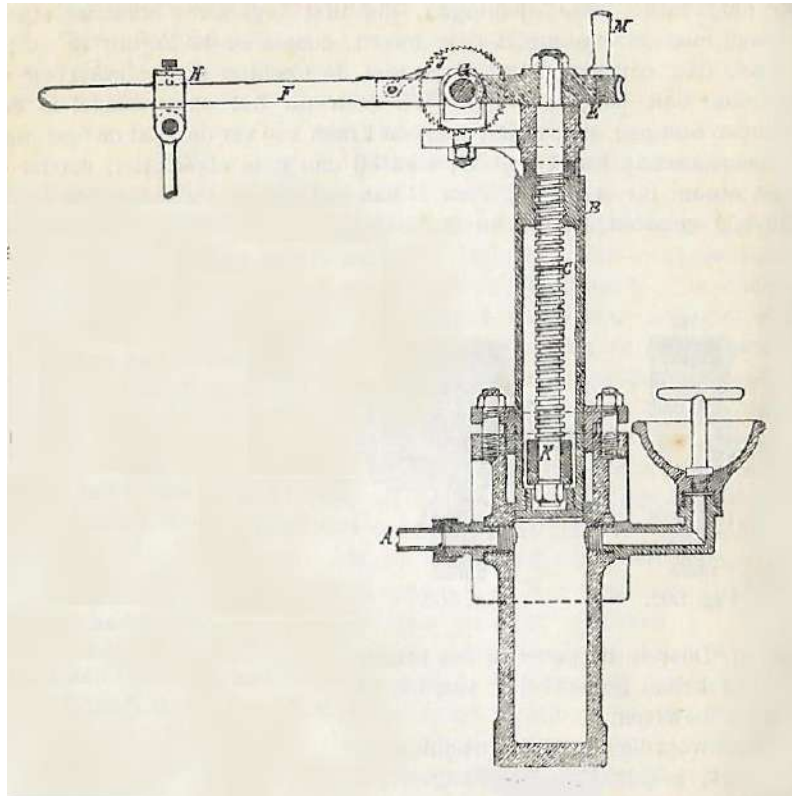
condenseert hier en zakt naar de bodem. Hierbij wordt eenzelfde hoeveelheid olie uitgedreven naar het betreffende smeerpunt in de cilinder. Bij stilstand van de machine wordt geen stoom gecondenseerd en olie verbruikt. Als het reservoir geheel gevuld is met condensaat moet men de kraan A omzetten en het condensaat aftappen. Door de plug S kan het reservoir belucht en bijgevuld worden. Meestal wordt de inrichting onder de kraan voorzien van een kijkglasje zodat men het doordruppelen van de olie kan waarnemen en men weet of er opnieuw bijgevuld moet worden. Het condensatie proces verloopt langzaam waardoor de olie gelijkmatig wordt gedoseerd. Het smeren van de machine met een dergelijke oliepot is eenvoudiger dan die met een kamer tussen de kranen.

Oliepot KSB uitvoering (vloeistof verdrijving)

Doseersmeerapparaat (druk-smering)

Bij sommige oude stoommachines treft men een smeertoestel aan dat de olie met behulp van een door de stoommachiene zelf aangedreven plunjerpomp naar de smeerpunten perst. Dit gebeurt langzaam, regelmatig en in verhouding tot het toerental.

Het bedoelde en hier onder afgebeelde smeertoestel staat bekend onder de naam van Ritter en van Molenrup. In het oliereservoir wordt een plunjer naar beneden bewogen door de draaiing van een schroefspindel C in de aan de bovenzijde van de plunjer E bevestigde moer B. De schroefspindel is aan de bovenzijde voorzien van een wormwiel dat aangedreven wordt door de worm G die met het palwiel J een geheel vormt. De hefboom F, draaibaar om de as van de worm, verkrijgt door de stang bij H een op- en neergaande beweging en doet via een pal het palrad een of meer tanden verdraaien. Op deze wijze is de verplaatsing van de plunjer en daarmee de hoeveelheid smeerolie uiterst gering.



Smeertoestel van Ritter en Van Molenrup

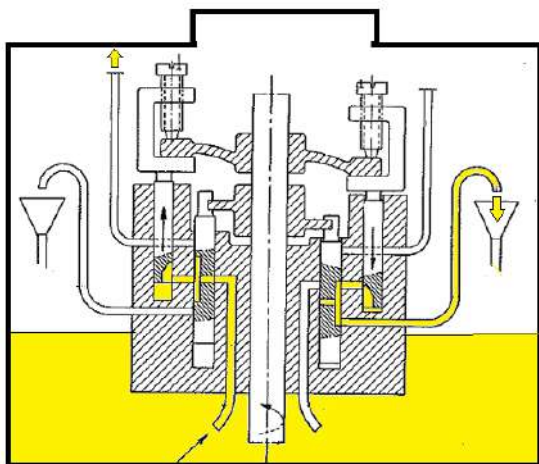
De hefboom F wordt door de schuifstang of door de hefboom van een klep bewogen. Door de koppelstang bij H over de hefboom te verschuiven kan men de slag wijzigen en de hoeveelheid smeerolie regelen.

Om het toestel te vullen als de plunjer beneden is aangekomen sluit men eerst de leiding A naar de cilinder af, opent de plugschroef rechts, giet olie in de trechter en trekt vervolgens de plunjer E. Dit doet men door deze met behulp van handwiel M naar boven te draaien nadat de worm is ontkoppeld. De dienstdoende machinist kan aan de stand van de plunjer zien of er olie moet worden bijgevuld.

Druppelsmeerapparaat (druk-smering)

Een relatief modern cilindersmeerapparaat is die van Bosch. Dit druppel- smeerapparaat heeft voor elk smeerpunt een plunjerpompje ter grootte van nauwelijks een sigaret. Deze plunjers zijn naast elkaar met een bijbehorend bosschuifje rond een centrale as opgesteld. De beweging van de plunjers wordt ontleend aan een ronddraaiende gegolfde schijf die op de centrale as is bevestigd. Deze centrale as wordt op haar beurt weer aangedreven door de excentriek of machine-as. Het apparaat is zodanig ingericht dat met behulp van het bosschuifje per omwenteling een instelbare hoeveelheid smeermiddel naar het te smeren smeerpunt wordt gevoerd en eenzelfde hoeveelheid via een controle pijpje zichtbaar wordt gemaakt. Deze olie vloeit terug in het reservoir van het toestel en dient alleen om aan te geven dat het systeem functioneert. Met dit druppel-smeerapparaat is men in staat een groot aantal smeerpunten van een verschillende hoeveelheid smeerolie te

voorzien. Omdat er spaarzaam kan worden gedoseerd vindt er minder vervuiling van het condensaat plaats. Het apparaat moet op gezette tijden handmatig worden bijgevuld, hiertoe is een vuldop en een peilglas op het apparaat aangebracht.



Principewerking Bosch smeertoestel



Bosch smeertoestel in ir D.F. Woudagemaal

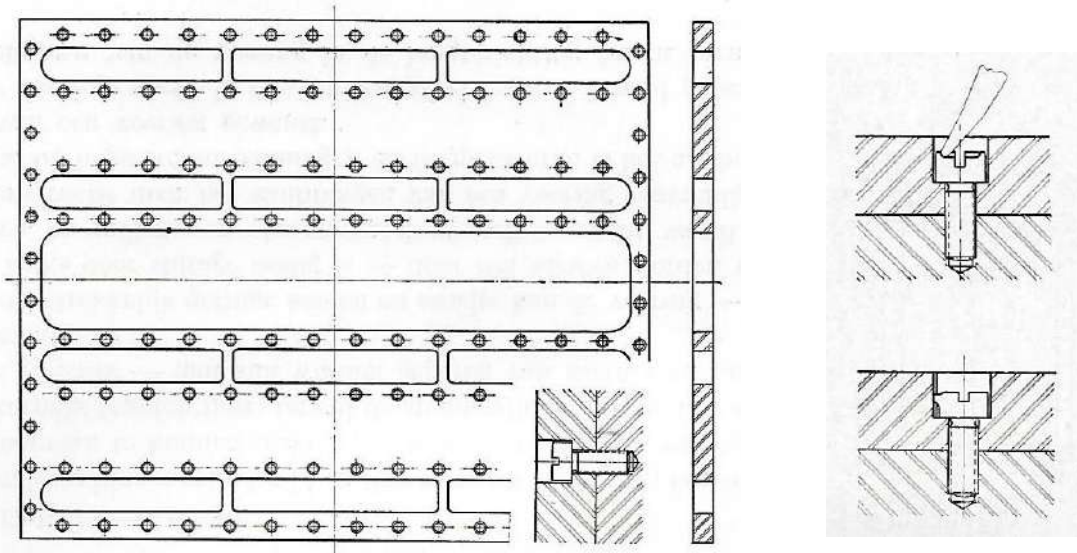
Op de aandrijfas van het toestel is een handwiel aangebracht. Hiermee kan men de goede werking van het apparaat bij stilstaande machine controleren. Ook kan men met behulp van dit handwiel de machine voorsmeren en de olie hoeveelheid naar de verschillende smeerpunten afstellen.

4.14.8 Schuifspiegel

De stoomschuifspiegel vormt bij de meeste stoommachines een geheel met de cilinder. De spiegel kan vlak, zoals bij bakschuiven, dan wel rond zijn uitgevoerd zoals bij bos- of zuigerschuiven. De schuif moet om lekkage te voorkomen glad zijn afgewerkt en uiterst precies op of in elkaar passen.

Vlakke schuifspiegel

Bij de vervaardiging van de cilinder wordt de spiegel eerst afgeschaafd op de schaaftbank en daarna zorgvuldig vlak geschraapt met een schraapstaal. Tenslotte wordt het sluitvlak van de stoomschuif ook door middel van schrapen pas gemaakt op de spiegel. Evenals men een cilinder met het oog op een juiste materiaalkeuze en gemakkelijk vervangen voorziet van een voering, geeft men de spiegel een afzonderlijk spiegelplaat. Deze is dus van harder materiaal gemaakt dan de cilinder. Hier onder wordt een voorbeeld gegeven van een spiegelplaat van een roosterschuif.



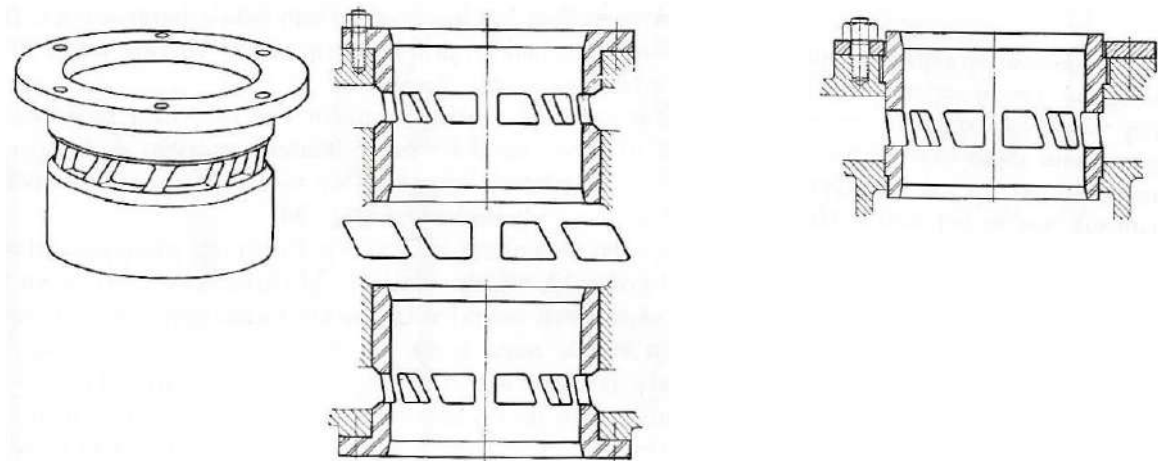
Spiegelplaat, bevestiging en borging

Deze vlakke plaat van hard, fijnkorrelig gietijzer, waarin de stoomkanalen zijn uitgestoken, wordt op de spiegel pasgeslepen en vervolgens met loodwit en geklopte menie verpakt en met Muntzmetalen tapschroeven vastgezet. De koppen van de schroeven zijn in de spiegelplaat ingelaten en moeten enige millimeters onder het loopvlak liggen. De uitsparingen in de spiegelplaat doen tevens dienst als smeeroliekamers, maar nog meer als stootkussentjes, waardoor de druk van de stoomschuif op de spiegelplaat wordt verminderd. Het loswerken van de schroeven wordt voorkomen door materiaal van de cilindrische schroefkop in een daarvoor in de spiegelplaat aangebracht groefje te stempelen.

Ronde schuifspiegel

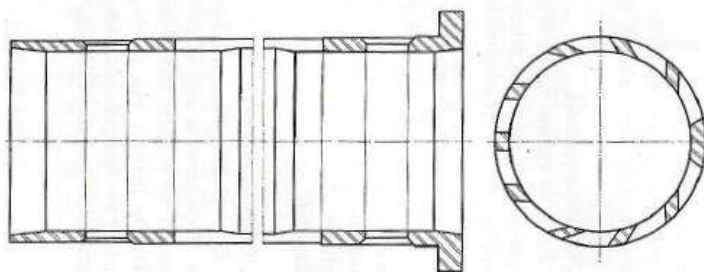
De spiegels van bosschuiven en zuigerschuiven -kleine schuiven uitgezonderd- zijn als regel voorzien van een voering. Dat zijn cilindrische bussen van hard, fijnkorrelig gietijzer. Ook worden ze wel van een geschikte koperlegering gemaakt. Soms bestaat de voering uit twee bussen die in

de cilindrische spiegel geperst zijn en elk afzonderlijk met bouten of draadeinden bevestigd worden. Een andere bevestigingsmethode is de bus met een dikke sluitring op zijn plaats te houden.



Bevestigingsmethode voeringen van ronde schuiven

Een enkele keer maakt men de voeringbussen uit een stuk en worden deze met een van de hiervoor aangegeven methodes vastgezet. De dammen tussen de poorten plaats men bij voorkeur schuin



teneinde het ontstaan van groeven in de sluitvlakken van de stoomschuif te voorkomen. Ook worden de poorten in de richting van de stoom toe- of afvoer geplaatst zodat er minder botsingsverschijnselen en dus stromingsverliezen optreden.

Schuifvoering uit een stuk

De wanddikte s van de bussen kiest men als D de diameter van de schuif is:

$$s = \frac{D}{30} + 10 \text{ [mm]}$$

Voor een redelijk grote schuif met een diameter van bijvoorbeeld 16 cm betekent dit dat de wanddikte van de voering naar boven afgerond 16 mm dient te bedragen.

$$s = \frac{160}{30} + 10 = 15,3 \text{ mm}$$

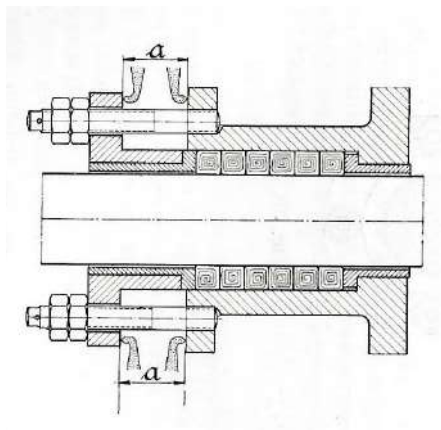
Omdat de bussen in de cilindrische opening worden geperst mag de wanddikte niet te dun zijn om voldoende spanning in het materiaal te kunnen opbouwen om het loswerken tegen te gaan.

4.14.9 Pakkingbus

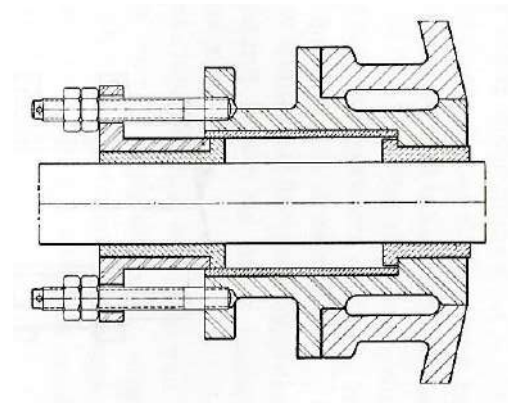
De zuigerstang moet door de cilinderbodem kunnen schuiven zonder dat stoom of in geval van onderdruk in de cilinder, lucht langs de stang lekt. Het eerste leidt tot energieverlies, het laatste tot het wegvallen van vacuüm in de condensor. Dit is de reden dat de cilinder van een pakkingbus wordt voorzien.

Pakkingbusconstructies

De eenvoudigste vorm van een pakking- of stopbus is hier onder weergegeven.



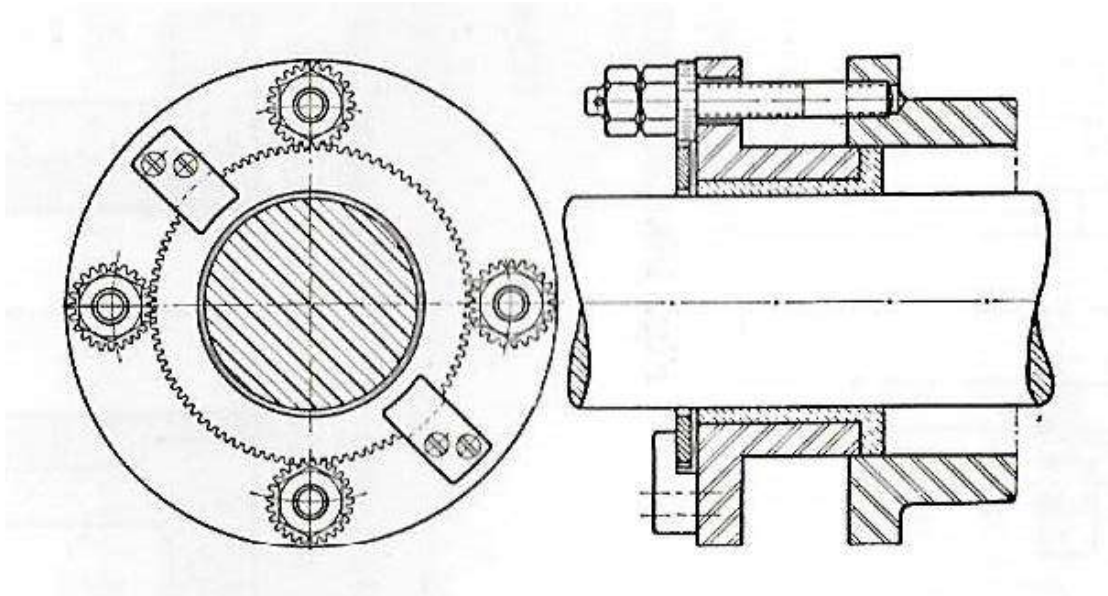
Aangegoten pakkingbus



Losse pakkingbus (bodestuk)

In het midden van de cilinderbodem is een stomp gegoten, die zodanig is uitgeboord dat rondom de stang een ruimte ontstaat, de zogenoemde pakkingkamer. In de pakkingkamer van dit type pakkingbus worden zachte en half metallieke ringen gelegd van vierkante doorsnede. De bodem van de pakkingbus is voorzien van een bronzen grondring, die hierin stijf is pasgemaakt en rond de zuigerstang een geringe ruimte heeft. De pakking wordt door middel van een pakkingdrukstuk en tapeinden met moeren aangedrukt. Ook het drukstuk is voorzien van een bronzen bus die samen met de bus in de bodem de zuigerstang geleidt.

Men dient er voor te zorgen dat de flens van het pakkingdrukstuk nauwkeurig evenwijdig gesteld is aan de flens van de pakkingkamer. Hierdoor is men er zeker van dat de pakkingringen overal even zwaar aanliggen tegen de zuigerstang en de zuigerstang niet gegroefd wordt door het aanlopen tegen het drukstuk. Van de juiste stand van het pakkingdrukstuk overtuigt men zich door de afstand tussen de beide flenzen te controleren met behulp van een voetjespasser. Sommige pakkingdrukstukken hebben een tandkrans met van een rondsel voorziene moeren. Een en ander zoals is weergegeven met de tekening op de volgende bladzijde. Alle moeren worden bij het aanzetten met behulp van deze constructie over een- zelfde hoek verdraaid zodat ongelijkmatig aanzetten uitgesloten is.

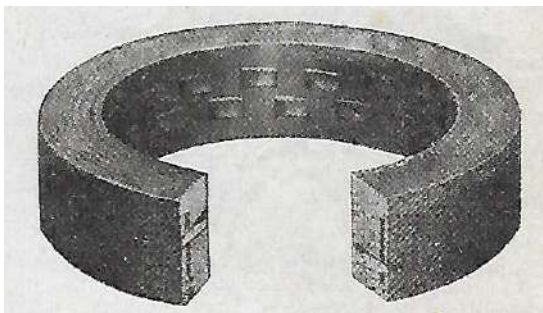


Pakkingdrukstuk-aanzetinrichting met tandwielen

Zachte en half metallieke pakking

De pakking moet bestand zijn tegen hoge temperaturen en druk; bovendien moet zij veerkrachtig zijn en slechts een geringe weerstand veroorzaken. Het aantal pakkingringen dat men toepast is afhankelijk van de stoomdruk. Als regel wordt zachte pakking in de handel gebracht als vlechtwerk met ronde, trapeziumvormig vierkante of rechthoekige doorsnede, enige overeenkomst vertonende met touw. Deze zogenoemde blokpakking wordt in lange opgerolde strengen geleverd en ter plaatse op maat gesneden of, bij stugge soorten, gezaagd. De ringen worden op een buis of as met de diameter van de zuigerstang schuin afgesneden en verschervend in de te verpakken bus aangebracht.

In aanmerking komen voor lage stoomtemperaturen geperste ringen katoendraad en dun henneptouw, gedrenkt in vet en grafiet en voor wat hogere stoomtemperaturen opgerold asbestdoek met een rubberkern. Een andere soort bestaat uit een rubberen kern waar om in een natuurrubber oplossing gedrenkt zeildoek is gewonden. Natuurrubber komt in oude technische verhandelingen vaak voor onder de naam India rubber, Latex, Caocho, Caoutchouc of Amazone rubber.



Tuskpakking met metaal blokjes

Caoutchouc of rubber is het kleverige melksap van de Hevea boom. Door dit ingedikte sap te vermengen met enige procenten zwavel en te verwarmen tot ongeveer 120 C verkrijgt men het bijzonder veerkrachtige en waterbestendige rubber. De eerder genoemde pakking met een rubber inlage wordt Tusks-pakking genoemd.

Ook wordt asbestdoek met inlagen van kopergaas, looddraad of met metaalblokjes, meestal witmetaal, toegepast.

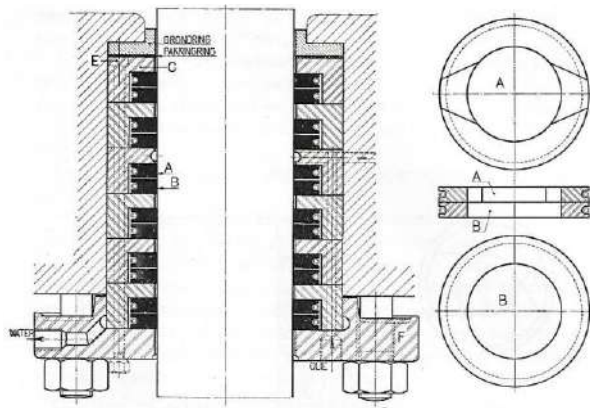
Asbest is kanker verwekkend en mag niet meer worden toegepast. Dit neemt niet weg dat deze pakking bij oude machines van stoominstallaties kan worden aangetroffen en men in dat geval met de nodige zorg te werk moet gaan bij de vervanging er van.

Metallieke-pakking

De pakking van de pakkingbussen met de hiervoor genoemde zachte pakking zijn steeds in contact met de zuigerstang en daardoor onderhevig aan slijtage. Men moet ze daarom regelmatig aanzetten en opnieuw verpakken. Ook moet men af en toe de zuigerstang opzuiveren. Ook is de zachte pakking minder geschikt voor hoge temperaturen en drukken. Grote machines worden daarom voorzien van een half metallieke pakking met witmetaal blokjes of een pakking die geheel is opgebouwd uit metalen ringen. De metallieke pakkingbussen zijn tevens zo ingericht dat zij zijdelingse bewegingen kunnen opnemen zonder dat daardoor de goede afdichting wordt verstoord of dat er schade aan de zuigerstang of de pakking zelf wordt toegebracht.

Kreizinger-pakking

Bij metallieke pakking is de wrijving en dus ook de slijtage van de stang gering. Voor oververhitte stoom past men vaak het Kreizinger systeem met gegoten ijzeren ringen toe. Vanzelfsprekend is dit systeem ook geschikt voor verzadigde stoom. Bij dit systeem zijn enige hoekvormige ringen



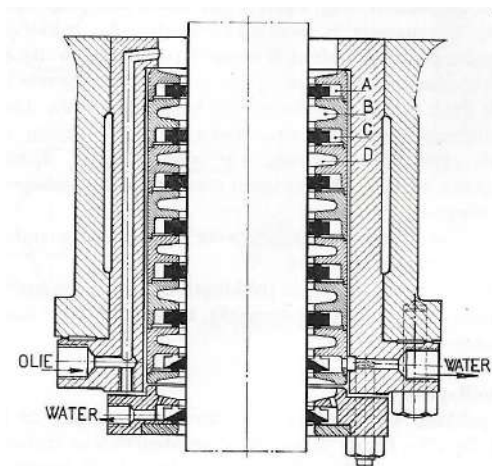
aangebracht, zodat er een aantal ringvormige kamers ontstaan. In deze kamers worden nu de gegoten en uit meerdere stukken bestaande pakkingringen aangebracht. Een slappe veer drukt de pakking tegen de stang. Het is van groot belang dat de pakking op de hoekvormige ringen goed afsluit. Deze vlakken zijn daarom zuiver vlak geslepen. De olie voor de smering van de zuigerstang wordt met behulp van een oliepomp onder druk aangevoerd.

Kreizinger-pakking

Voor lage druk cilinders wordt een klein beetje stoom tussen de tweede en de derde pakkingring toegelaten om te verhinderen dat er lucht naar binnen wordt gezogen en in de condensor komt. Het condensaat dat ontstaat en de overtollige smeerolie worden onder atmosferische druk via het drukstuk afgetapt.

Lentz-pakking

Pakkingbussen waarbij de pakkingringen bestaan uit zuiver om de geslepen zuigerstang passende niet gedeelde gegoten ijzeren ringen noemt men een Labyrintpakking. Een voorbeeld hiervan is de Lentz-pakking zoals in de tekening hier onder te zien is . De pakkingringen bij dit type pakking

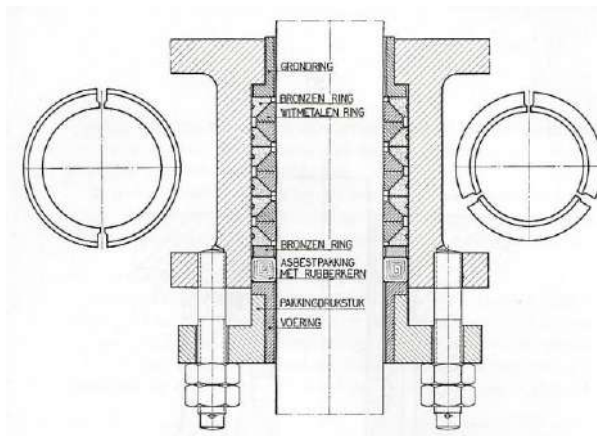


passen met een zeer geringe speling in de door de buitering gevormde groeven zodat de stang enige zijdelingse beweging kan maken. De bovenste ring bij A, laat een weinig stoom door die vervolgens expandeert in kamer B. Deze stoom lekt nu via C door naar kamer D waar deze verder expandeert. Telkens wordt na het passeren van een ring de druk lager tot zij de druk van de atmosfeer bereikt. De stoom is daarbij gecondenseerd zodat men een weinig water moet aftappen. Ook bij deze uitvoering wordt de smeerolie onder druk aangevoerd. Het aantal ringen dat men moet toepassen hangt af van de stoomdruk waartegen afgedicht moet worden.

Lentz-pakking (verticale uitvoering)

Jacobspakking

De Jacobspakking bestaat uit kegelvormige witmetalen en bronzen ringen. Elke witmetalen ring bestaat uit twee of drie gelijke delen, welke precies rond de zuigerstang passen en elke bronzen ring uit twee helften die tegen de wand van de pakking kamer aanliggen. Onder de laatste -bronzen-ring wordt nog een torn- zachte pakking gelegd. Teneinde de montage te vergemakkelijken is in de omtrek van elke bronzen ring een groefje gedraaid, zodat de ringdelen met een dun touwtje bij

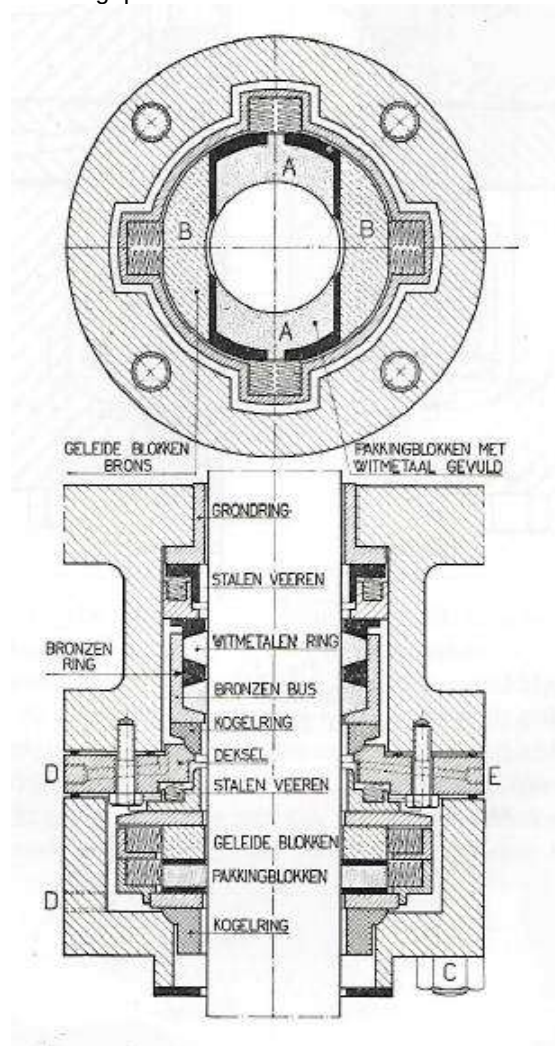


elkaar kunnen worden gehouden. De pakking bus is voorzien van een vlak gedraaide grondring. De pakking kan als dat nodig is worden aangezet, waarbij de witmetalen ringen tegen de zuigerstang en de bronzen ringen tegen de wand van de pakking kamer worden gedrukt. Bij het aanzetten moeten de witmetalen ringen opnieuw inlopen op de zuigerstang. Het spreekt voor zich dat het aanzetten heel voorzichtig moet gebeuren en alleen bij draaiende machine kan worden uitgevoerd.

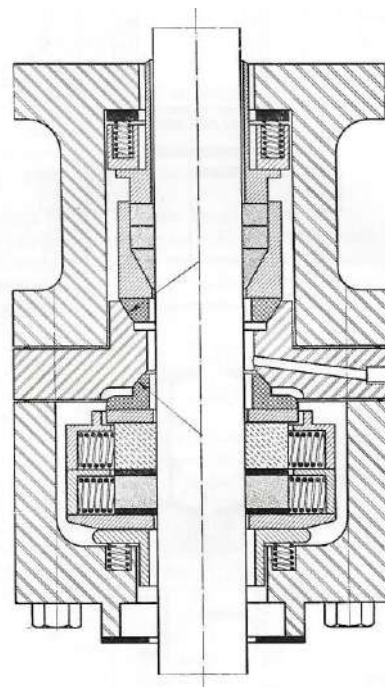
Jacobspakking

United States pakking

De United States pakking bestaat uit twee delen. Het eerste gedeelte bevat een pakkingkamer, waarin een bronzen bus geplaatst is met kegelvormige bronzen en witmetalen ringdelen, soortgelijk aan die van de Jacobspakking. De koperen bus rust op een bolvormige ring, die op zijn beurt steunt op een flens welke met koperen ringen de pakkingkamer sluit. De kracht op de pakkingringen en bijgevolg die van de ringen tegen de zuigerstang, wordt verkregen door de aan de bovenzijde in de omtrek geplaatste stalen drukveren.



U.S. pakking voor H.D. pakkingbus



U.S. pakking voor L.D. pakkingbus

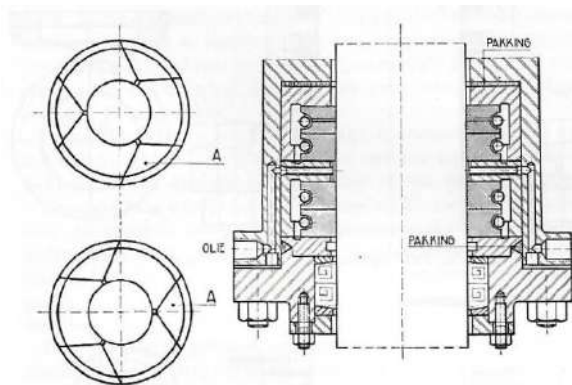
Het tweede gedeelte is een aparte gegoten ijzeren doos, waarin twee ringen van rechthoekige doorsnede liggen. Elke ring bestaat uit vier stukken, waarvan er twee hol zijn waarbij de holte met witmetaal is gevuld. Deze twee blokken A die recht tegenover elkaar liggen, omsluiten de zuigerstang voor het grootste gedeelte van de omtrek. De beide andere ringdelen liggen vrij van de stang. De blokken van de onderste ring zijn ten opzichte van de bovenste ring negentig graden gedraaid. Elk ringgedeelte wordt door middel van twee horizontale spiraalveren tegen de

zuigerstang gedrukt terwijl het geheel door twee verticaal geplaatste veren bij elkaar wordt gehouden. Evenals het bovengedeelte rust ook deze pakking op een bolvormige ring waardoor de pakkingbus beweeglijk is en de zuigerstang een geringe zijdelingse beweging kan maken. In de ruimte onder de bolvormige ring brengt men vaak nog een zachte pakking aan om de stang vet te houden, wanneer deze handmatig wordt gesmeerd. In de tussenflens zijn kanalen aangebracht om het condensaat en overtollige smeerolie af te tappen en om onder druk te smeren.

Met het oog op de onderdruk worden voor L.D.- zuigerstangen de pakkingringen in de doos, te beginnen met de onderste bolvormige ring, in omgekeerde volgorde gelegd. De onderste bolvormige ring wordt dan bij de uitgaande slag van de L.D. zuiger door de buitenlucht aangedrukt, die daarbij wordt geholpen door de verticaal geplaatste drukveren in de onderste bus.

Proell-pakking

De Proell-pakking komt in veel opzichten overeen met de Lentz-pakking. In elke kamer liggen twee gegoten ijzeren ringen. Elke ring bestaat uit zes delen die door een slappe spiraalveer bij elkaar worden gehouden. De ringen liggen in de kamers zonder ruimte in langsrichting en worden, met uitzondering van de wigvormige blokjes, gelijkmatig tegen de zuigerstang gedrukt. Naar de zijden kan deze pakking gering bewegen. De ringen zijn zuiver vlak en op de stang passend rond



geslepen. Een drukstuk, dat tevens dienst doet als pakkingkamer voor een zachte pakking, houdt de ringkamers op elkaar gedrukt. Nadat de pakkingringen op de stang zijn ingelopen kan eventueel de zachte pakking uit de buitenste pakkingkamer worden verwijderd. In het midden van de twee pakking-kamers zijn kanaaltjes geboord voor de smeerolie-toevoer en de afvoer van condensaat en overtollige smeerolie. De smeerolie wordt onder druk toegevoerd.

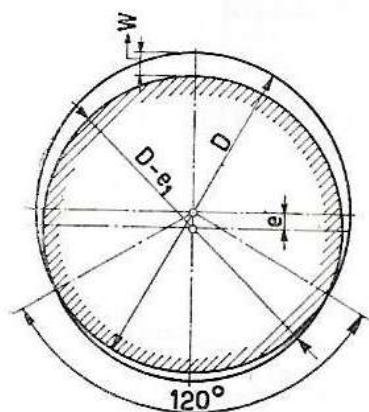
Proell-pakking

4.14.10 Zuiger, zuigerstang en zuigerveren

Zuigers hebben tot doel de kracht, veroorzaakt door de druk van de stoom, naar buiten toe over te brengen. Zij lopen in de cilinder en zijn gewoonlijk door een zuigerstang met de andere machinedelen verbonden. De gas(stoom)dichte afdichting van de zuiger met de cilinder(wand) vindt plaats met behulp van op de zuiger aangebrachte zuigerveren en wordt aan de zuigerstangzijde gecombineerd met een pakkingbus in de cilinder.

Constructieve aspecten zuigerlichaam

Aan de zuiger voor een stoommachine worden een aantal constructieve eisen gesteld. Zo moet de zuiger zo licht mogelijk, maar sterk genoeg zijn. De heen en weer gaande massa's moeten in het algemeen zo klein mogelijk worden gehouden. Bovendien moet de wrijving zo gering mogelijk zijn ook wanneer de zuiger wordt belast door krachten loodrecht op de cilinder-hartlijn. Dit is de reden dat stoommachines anders dan bij stoommotoren uitgerust zijn met een leibaan die de dwarskrachten van de drijfstang opneemt. Bij horizontale machines worden de dwarskrachten als gevolg van het eigen gewicht van de zuiger gedragen door de zuigerstang of zij worden aan de onderzijde op de cilinderwand overgedragen. We noemen dat een slepende zuiger. Wanneer de zuigerstang de zuiger draagt zal de stang doorbuigen. Men neemt de diameter van de zuiger in dat



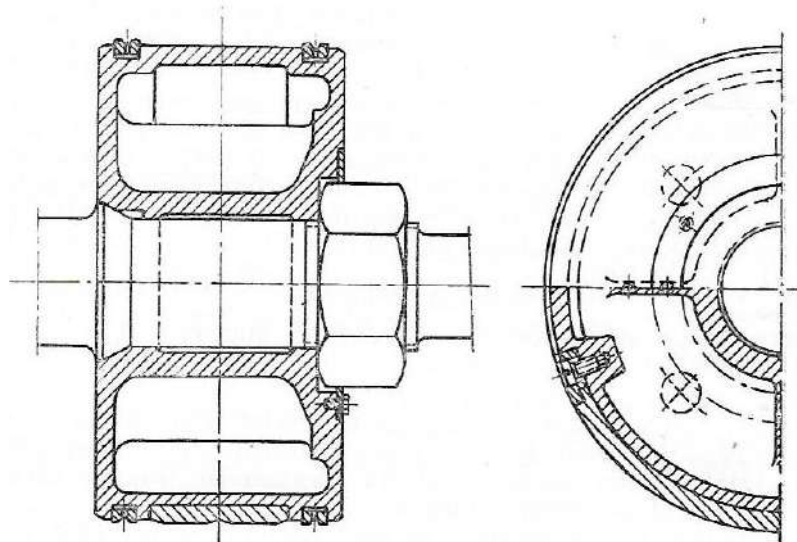
geval 3 – 4 keer de doorbuiging kleiner dan die van de cilinder. Slepende zuigers worden meestal volgens de hiernaast gegeven afbeelding ten dele excentrisch afgedraaid zodat het onderste deel over 1/3 van de omtrek draagt. Bovendien wordt aan de bovenzijde W mm weggenomen.

Wanneer de zuiger wegens een goedkopere bewerking over de gehele omtrek iets kleiner is gedraaid dan de cilinderdiameter, of in zijn geheel excentrisch is gedraaid, dan is aanvankelijk weinig draagvlak voor de zuiger beschikbaar, zodat men deze zuigers voorzichtig moet laten inlopen.

Excentrisch gedraaide zuiger

Bij het bepalen van de middellijn van de zuiger is rekening gehouden dat tijdens bedrijf de zuiger een hogere temperatuur heeft dan de cilinderwand. De zuiger moet om die reden dus een kleinere diameter hebben dan de cilinder. In koude toestand mag de zuiger dan niet precies in de cilinder passen.

Een andere belangrijke constructieve eis is dat de zuiger zo smal als mogelijk moet zijn bij een goede afdichting. Een bredere zuiger maakt een langere cilinder en dus een grotere machine noodzakelijk. Een slepende zuiger moet echter zo breed zijn dat hij niet kan kantelen en de vlaktedruk niet te groot wordt. Dit laatste is de reden dat men zware zuigers aan de onderzijde met extra draagsloffen uitrust. De sloffen zijn met bouten op de zuiger bevestigd en kunnen in geval van overmatige slijtage eenvoudig door nieuwe vervangen worden.

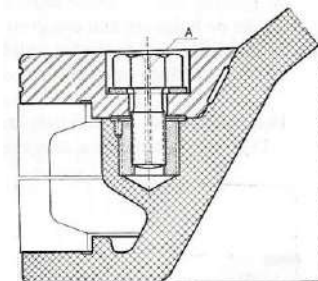
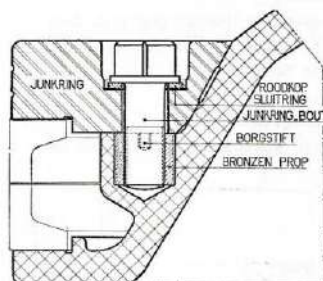


Dooszuiger met draagsloffen

De zuigerstang is voorzien van een kleine inlegspie om te voorkomen dat de zuiger bij revisiewerkzaamheden verkeerd gemonteerd wordt.

Zuigerveer bevestiging

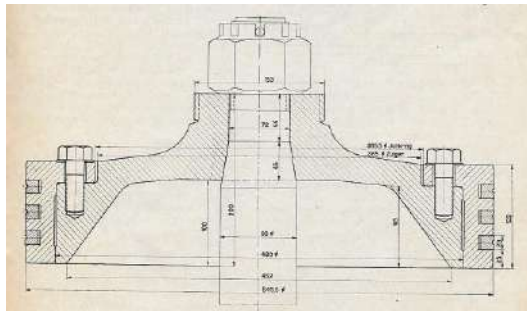
De zuigerveren die voor de afdichting in de cilinder zorgdragen moeten gemakkelijk kunnen worden gemonteerd, nagezien en verwisseld. Zuigers worden daarom vaak van een deksel (of in het Engels junkring) voorzien. De zuigerveren worden in de veergroeven van de junkring geplaatst of als een pakket met een afstandsring door de junkring op zijn plaats gehouden. Een en ander zoals bij respectievelijk de voorbeelden van de enkelwandige en de dubbelwandige zuiger is te zien. De uitvoering met een junkring is zwaarder en als gevolg van het grotere aantal losse delen en boutverbindingen minder veilig omdat deze onderdelen los kunnen raken.



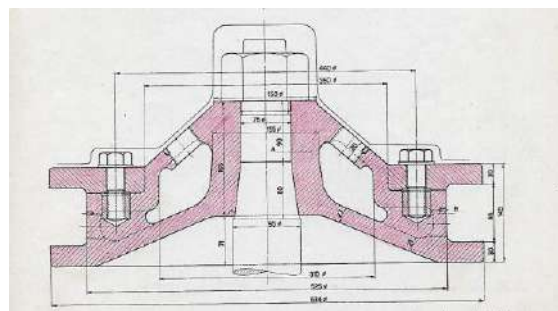
Junkring constructies

Het zuigerlichaam is van gietijzer of gietstaal gemaakt en kan enkel- of dubbelwandig zijn om op gewicht te besparen. In gegoten ijzer gebruikt men geen tapbouten wanneer deze geregeld losgenomen moeten worden of past men, zoals de rechter figuur van de junkring constructie laat

zien, bronzen invoegers of draadbussen toe. Gietijzer brokkelt namelijk snel af, een euvel dat men bij gietstaal niet tegenkomt. Door de toepassing van bronzen invoegers voorkomt men tevens dat de bouten vast roesten.



Enkelwandige zuiger met junkring



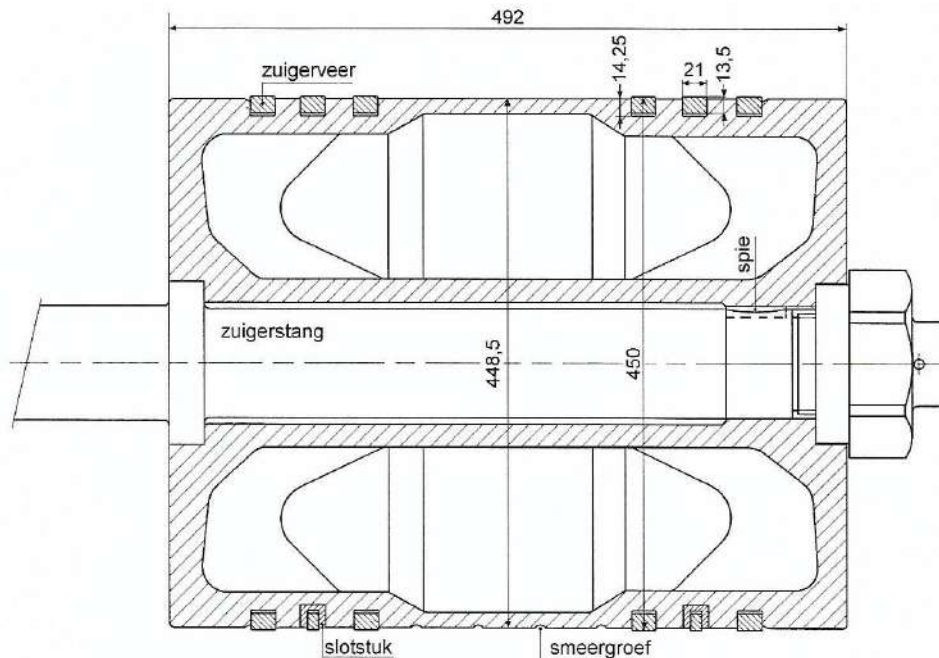
Dubbelwandige zuiger met junkring

De bouten waarmee de ring wordt vastgezet moeten goed worden geborgd want als de bouten loswerken zouden ze tegen de cilinderdeksel kunnen stoten met als mogelijk gevolg het breken van het deksel of kromdrukken van de zuigerstang. Het meest past men een uitgegloeide koperen ring onder de bout kop toe. Het relatief zachte koper zorgt er voor dat de bout kop over het gehele vlak goed draagt, enigszins hiermee verkleeft en daardoor zelden of nooit losraakt.

De dubbelwandige zuiger is als gietstuk minder geschikt voor gegoten staal. Bovendien is de doosvormige constructie, die bovendien nog door ruggen verstijfd is, ook van gietijzer op zich al sterk genoeg.

Zuigers vormen in de cilinder de scheidingswand tussen de verse en de afgewerkte stoom. Het temperatuurverschil tussen deze twee is oorzaak van warmteverlies. Dit warmteverlies is groter bij een enkelwandige- dan bij een dubbelwandige zuiger. De enkelwandige zuiger is lichter dan de dubbelwandige zuiger. Als de zuiger van gietstaal is gemaakt kan men vanwege de grotere sterkte de wanddikte geringer maken. Om voldoende stijfheid te krijgen maakt men de zuigers vaak kegelvormig. De cilinderbodem en het cilinderdeksel krijgen dan een daarop aansluitende vorm.

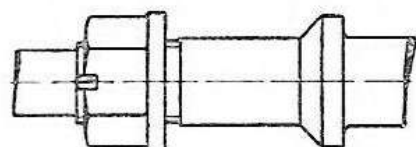
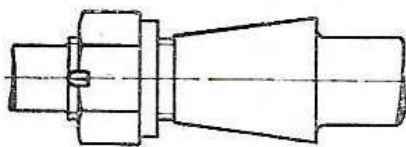
De zuiger van een gelijkstroom stoommachine heeft, omdat hij ook de stoomafvoer moet regelen, een langgerekte vorm en is altijd dubbelwandig uitgevoerd. Bij dit soort zuigers, ook wel dooszuigers genoemd, zijn de veergroeven in de zuiger gestoken. De langgerekte zware zuiger met een relatief groot wrijvingsvlak is tussen de twee zuigerveerpakketten aan de onderzijde van smeergroeven voorzien. Ook hier zijn de zuigerstang en de zuiger voorzien van een spie die een verkeerde montage van de zuiger moet voorkomen. Verkeerde montage van de zuiger zal lang onopgemerkt kunnen blijven en leiden tot ernstige schade aan de zuiger, de cilinder en de pakkingbus van de onderhavige stoommachine.



Dubbelwandige zuiger voor gelijkstroommachine

Zuigerstang bevestiging

De verbinding van de zuiger met de zuigerstang geschiedt in het algemeen door middel van een borst en een moer. De borst is soms conisch en wordt dan ingeslepen. De halvekegel tophoek bedraagt 30 of 45°. De tophoek van de verbinding met een spitse kegel bedraagt 15°.mm. De spitse kegel heeft het voordeel dat de zuiger beter wordt gecentreerd. In de hier voor getoonde afbeelding van een lange dubbelwandige zuiger is de zuigerstang en de bijbehorende borgmoer uitgevoerd met een cilindrische borst.



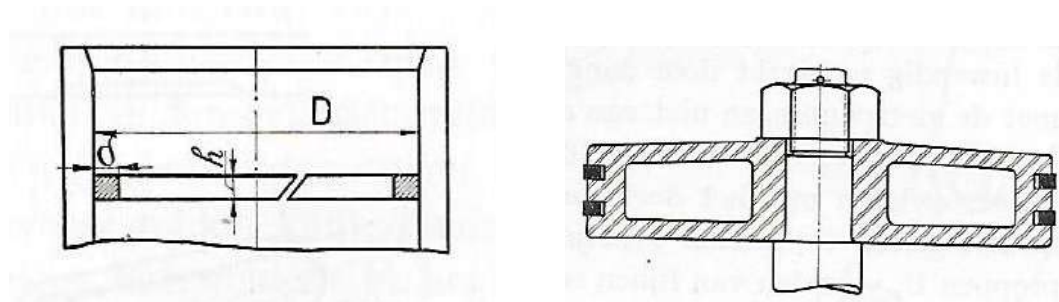
Voorbeelden van kegelvormige borst op zuigerstang

De zuigermoer, gewoonlijk gemaakt van brons of bij oververhitte stoom uit staal, moet tegen loswerken worden geborgd door een koperen splitpen.

Zuigerveren

De stoomdichte beweging van de zuiger in de cilinder wordt verkregen door een metallieke zuigerpakking. Deze pakking bestaat uit één of meerdere, afhankelijk van de druk, gegoten ijzeren of soms stalen, gespleten ringen (veren), die zuiver rond afgedraaid, op een uitwendige diameter

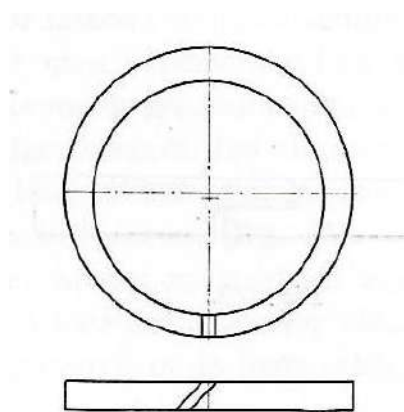
gelijk aan de inwendige diameter van de cilinder verend tegen het loopvlak van de cilinder aanliggen. De zuigerpakking welke verreweg het meest is toegepast bestaat uit gegoten ijzeren verende ringen van rechthoekige doorsnede. Het zuigerlichaam is hiertoe van groeven (spooningen) voorzien of van een speciale constructie waarin ze zijn ondergebracht.



Zuigerpakking d.m.v. metalen veren

De hoogte van de groef moet nauwkeurig gelijk zijn aan de dikte van de zuigerveer. De diepte van de groef daarentegen is iets groter dan de breedte van de veer. Dit laatste is om de volgende redenen nodig.

Ten eerste moet de zuiger zijdelings kunnen bewegen zonder de veren tegen de cilinderwand te drukken. Ten tweede moeten de veren zich bij het passeren van een oneffenheid, naar binnen kunnen bewegen. De zuigerveer dient langs de gehele omtrek met een even grote specifieke druk tegen de cilinder aan te liggen. Dit laatste bereikt men door de horizontale doorsnede de vorm te

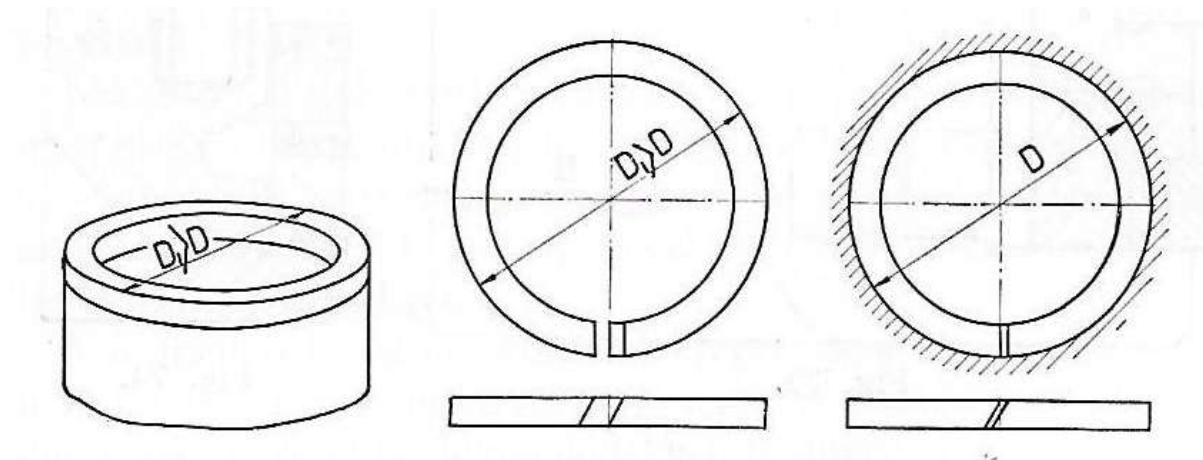


geven van twee excentrische cirkels zoals hiernaast is afgebeeld. De vlaktedruk, waarmee de veren tegen de cilinderwand aandrukken bedraagt minder dan $0,25 \text{ kg/cm}^2$, bij uitzondering $0,5 \text{ kg/cm}^2$.

Voor de vervaardiging van deze rechthoekige, ook wel Ramsbottom genoemde, zuigerveren giet men een bus, waarvoor het materiaal is verkregen door wit ruwijzer te smelten met oud gietijzer en afval zoals draaikrullen van smeedbaar ijzer. Dit harde, fijnkorrelige gietijzer bezit een grote taaiheid en is zachter dan de cilinderwand waardoor de relatief goedkope veren meer slijten dan de cilinderwand.

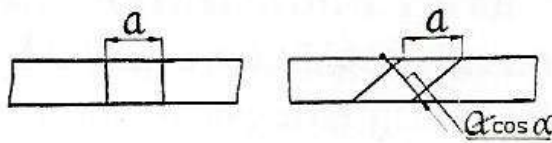
Excentrisch gedraaide zuigerveer

De bus wordt inwendig schoon gedraaid en uitwendig afgedraaid op een diameter, die afhankelijk van de middellijn van de cilinder, enkele millimeters groter is dan deze. Vervolgens worden de veren afgestoken en wordt een stuk uit de veer genomen. Daarna buigt men de veer in de klauwplaat van een draaibank naar binnen zodat de doorsneden op elkaar komen te liggen. Vervolgens soldeert men de einden aan elkaar. De veer, die nu onrond is, wordt daarna nauwkeurig op de cilinderdiameter afgedraaid. Wenst men veren van gelijke breedte dan wordt gelijktijdig ook de binnenomtrek uitgeboord.



Bewerkingsvolgorde Ramsbottom zuigerveer

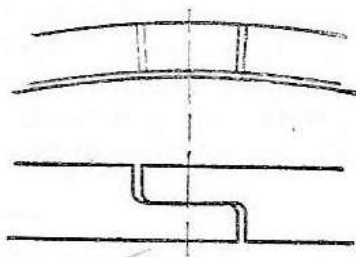
De veer past nu nauwkeurig in de cilinder. Maakt men de las los, dan heeft de veer in de cilinder enige spanning. Buiten de cilinder is de veer onrond, spaningsvrij en ligt de las over een betrekkelijk groot stuk open. Na de laatste bewerking van de veer neemt men nog een klein stukje van de las weg zodat deze zich naar binnen kan bewegen bij het passeren van oneffenheden in de cilinderwand en bij ongelijkmatige verwarming en diensgevolge uitzetting. De las maakt men meestal schuin waarmee men voorkomt dat er ribbels in de cilinderwand ontstaan.



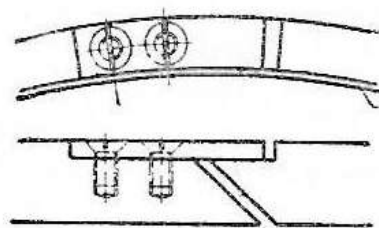
Rechte en schuine las

De lassen van de verschillende zuigerveren in een en dezelfde zuiger legt men verschervend en aan de overkant van eventuele stoompoorten. Als men bij een veer met schuine las een vervorming van a mm wil bewerkstelligen dan dient de las een ruimte te bezitten van $a \cos \alpha$.

Om lekkage tegen te gaan past men bij grote zuigers en dus dikke zuigerveren een lipconstructie toe. De lippen hebben de halve dikte van een veer en breken makkelijk. Vanwege dit breukgevaar kan deze constructie niet worden toegepast bij zuigers met dunne veren.



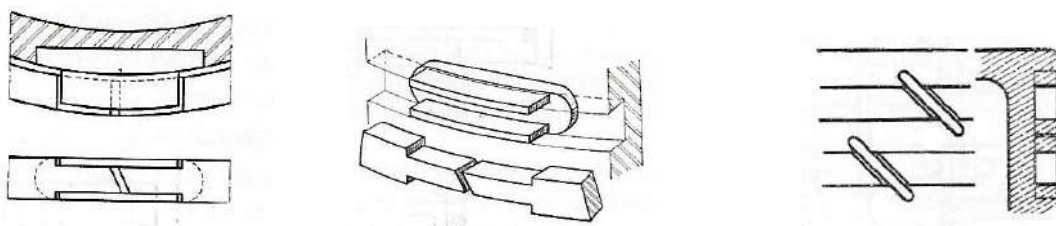
Zuigerveer met liplas



Zuigerveer met slotplaatje

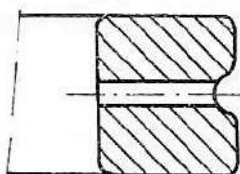
Een andere veel toegepaste methode om lekkage over de veren tegen te gaan is de veer aan drukzijde van een messing plaatje te voorzien. Het plaatje wordt met twee verzonken schroefjes vastgezet en met de centerpons tegen loswerken geborgd. Bij montage van de veer moet er op worden gelet dat deze op de juiste wijze wordt gemonteerd.

Bij sommige zuigeruitvoeringen voorkomt men met behulp van borgnokken of pennen het draaien van de veren om het zuigerlichaam. De borgnokken dienen dan tevens om de doortocht van de stoom over de las te beletten.



Borgnok constructies

De aan roestvorming onderhevige nokonderdelen worden meestal van messing gemaakt en in de daarvoor in de zuiger gemaakte uitsparingen gestempeld. In brede zuigerveren brengt men wel eens een groef aan om de smering te bevorderen. Deze groef moet niet tot het veerslot doorlopen omdat dan de stoom er in kan binnendringen. Past de veer met enige ruimte -als gevolg van slijtage-

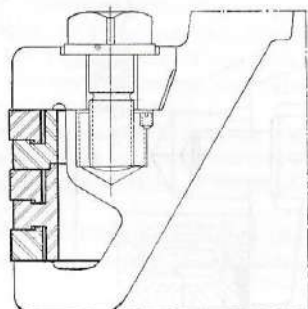


in de sponning, dan kan bij het begin van de slag stoom achter de veer komen en deze naar buiten drukken, waardoor de druk tussen de veer en de cilinderwand zo kan toenemen dat beschadiging optreedt. Om dit te voorkomen boort men in de omtrek van de veer op regelmatige afstand kleine gaatjes, die in de groef uitkomen, waardoor de druk in de groef gelijk wordt aan de druk achter de veer. Vooral bij oververhitte stoom past men dit toe.

Zuigerveer met oliegroef

Limietveren

Limietveren volgens het Ramsbottom systeem zijn voorzien van een opstaande rand waarmee zij tegen een masieve ring van gegoten ijzer komen te liggen. Door een groot stuk uit de zuigerveer te nemen, geeft men deze veer iets meer spanning dan de gewone Ramsbottom veer, hetgeen in eerste instantie niet van betekenis is omdat de veer door de opstaande rand van de tussenring beperkt wordt in het uitbuigen. Geeft men de veren aanvankelijk de juiste spanning dan zullen na het inlopen de veren juist pas en nagenoeg zonder wrijving langs de cilinderwand lopen.

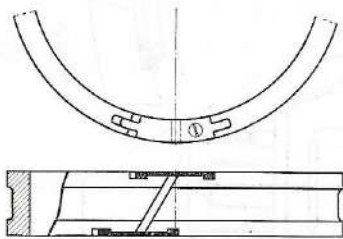


Limietveer Systeem Ramsbottom

Mocht nu later blijken dat de veren lekken dan kunnen door de opstaande rand te verruimen door middel van afdraaien of vijlen, de veren weer op de juiste spanning worden gebracht.

Dokveren

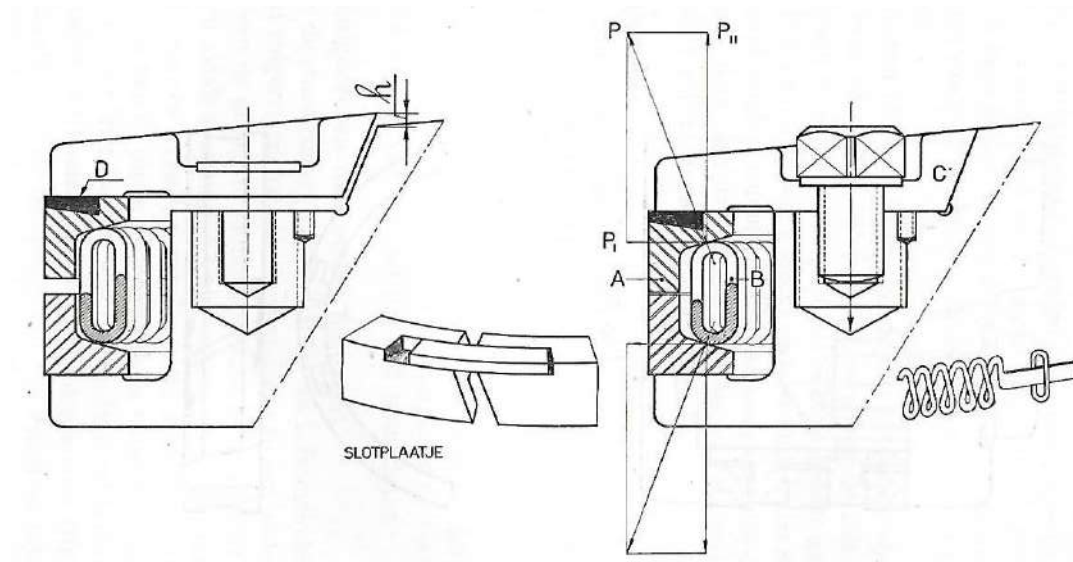
Een ander type limiet veer die veel wordt toegepast bij gebruik van oververhitte stoom is de hiernaast afgebeelde dokveer. Bij deze veerconstructie wordt het ontspannen beperkt door twee sluitplaatjes in de vorm van halters. De halters doen tevens dienst als sluitplaatje. Voor het pasmaken van de halters wordt gebruik gemaakt van een ketting en spanschroef die men in de uitsparing van de veer aanbrengt. Het spreekt voor zich dat limietveren uitsluitend met behulp van een junkring constructie op de zuiger kunnen worden aangebracht.



Dokveer

Zuigerveren met hulpveer

Voor de stoomzuigers van de L.D cylindrs past men vaak zuigerveren toe die door middel van een stalen hulpveer zowel in radiale als in axiale zin worden aangedrukt. Het verenpakket bestaat uit twee gietijzeren ringen en een uit zichzelf terugkerende stalen spiraalveer met ovale windingen.



Zuigerveren met hulpveer

De veerspanning die wordt opgewekt door het aanschroeven van de junkring veroorzaakt een kracht, loodrecht op de schuine rand van de zuigerveer. Deze kracht kan worden ontbonden in twee loodrecht op elkaar staande componenten, waarvan de kleinste de zuigerveer tegen de cilinderwand en de grootste de zuigerveer tegen het zuigerlichaam dan wel de junkring drukt. De schuinite van de binnenrand van de zuigerveer bepaalt de grootte van de beide ontbondenen. Aan

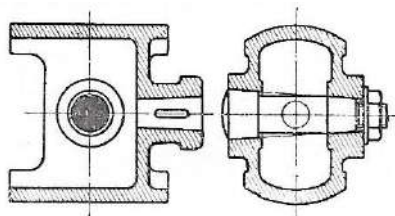
de hulpveer kan een grotere spanning worden gegeven door op de plaats van de las een vulplaatje in de vorm van een ovale sluitring over de veertong te schuiven. Men overtuigt zich in de praktijk van de juiste spanning van de hulpveer door de junkring aan te schroeven en door het lossen van de bouten deze weer op te laten komen. Afhankelijk van de doorsnede van de zuiger en het gewicht van de junkring bedraagt de afstand dat deze omhoog komt 1 tot 4 mm.

In de loop der tijd is een aantal zuigerveer-systemen ontwikkeld die met de naam van de uitvinders hiervan worden aangeduid. De constructies van die systemen zijn op kleine details na, nagenoeg hetzelfde. In de bovenstaande figuur is het steem van Buckley weergegeven. Hier is de spiraalveer in een rechthoekige uitsparing aangebracht. Bij die van Lockwood & Carlisle, hier niet getoond, is de spiraalveer in een ovale kamer aangebracht.

4.14.11 Kruishoofd en drijfstang

Kruishoofdconstructies

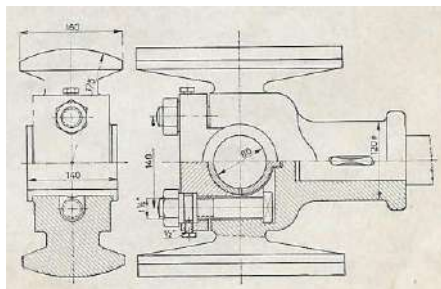
De scharnierende verbinding van de zuigerstang en de drijfstang die nodig is om de lineaire beweging om te zetten in een roterende beweging, verkrijgt men met behulp van het kruishoofd. Voor de rechtgeleiding is dit kruishoofd voorzien van één of twee leisloffen die langs een cirkelvormige of vlakke baan bewegen. De zuigerstang is één geheel met het kruishoofd of is hiermee met een spie-koppelbus verbonden. Ook wordt vaak een konusverbinding toegepast zoals hierna in de linker figuur van het dubbele kruishoofd is weergegeven. De drijfstang is, zoals hierna nader aangegeven wordt, scharnierend met het centrale deel van de het kruishoofd verbonden. Het materiaal van het kruishoofd is bij kleine stoommachines gegoten ijzer of gegoten staal. Bij grote machines past men meestal gegoten staal of smeedstaal toe waarbij de tappen soms worden



ingezet en gehard. De sloffen zijn van gegoten ijzer, soms met witmetaal gevoerd, gegoten staal of smeedstaal. In de laatste twee gevallen past men om reden van de slechte loopeigenschappen van deze materiaalsoorten altijd een witmetalen voering toe. Hier naast is een eenvoudige constructie van een kruishoofd voor een horizontale machine afgebeeld

Enkel kruishoofd voor kleine machine

De vorm van het kruishoofd hangt er hoofdzakelijk van af of de tap in het kruishoofd is bevestigd en de drijfstang om de tap scharniert, of dat de gevorkte drijfstang de tap vasthoudt, dan wel om de tappen scharniert. Het eerste geval noemt men een enkel kruishoofd. Het tweede geval, waarbij



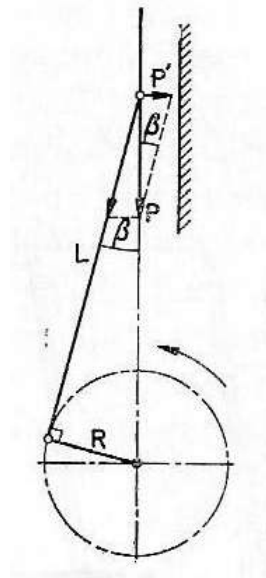
men altijd is aangewezen op een constructie met een gevorkte- of gaffeldrijfstang, noemen we een dubbel kruishoofd. De hier naast afgebeelde tekening laat een dubbel kruishoofd zien waar de lagering van de drijfstang in de zogenoemde dobbelsteen is ondergebracht. Verder komt het er op aan of de leibaan rond of vlak is en het kruishoofd aan één of twee zijden de dwarskrachten overdraagt.

Dubbel kruishoofd voor grote machine

De afmetingen van de leibaan en de leisloffen hangen af van de daarop uitgeoefende kracht. Men rekent deze kracht het grootst als de kruk loodrecht op de drijfstang staat. Is daarbij β de hoek die de drijfstang met de verticale of de horizontale hartlijn van de machine maakt, dan is P' de ontbondene van de zuigerstangkracht P die op de leislof en de leibaan werkt. Een en ander wordt voorgesteld door:

$$P' = P \cdot \tan \beta = P \cdot \frac{R}{L}$$

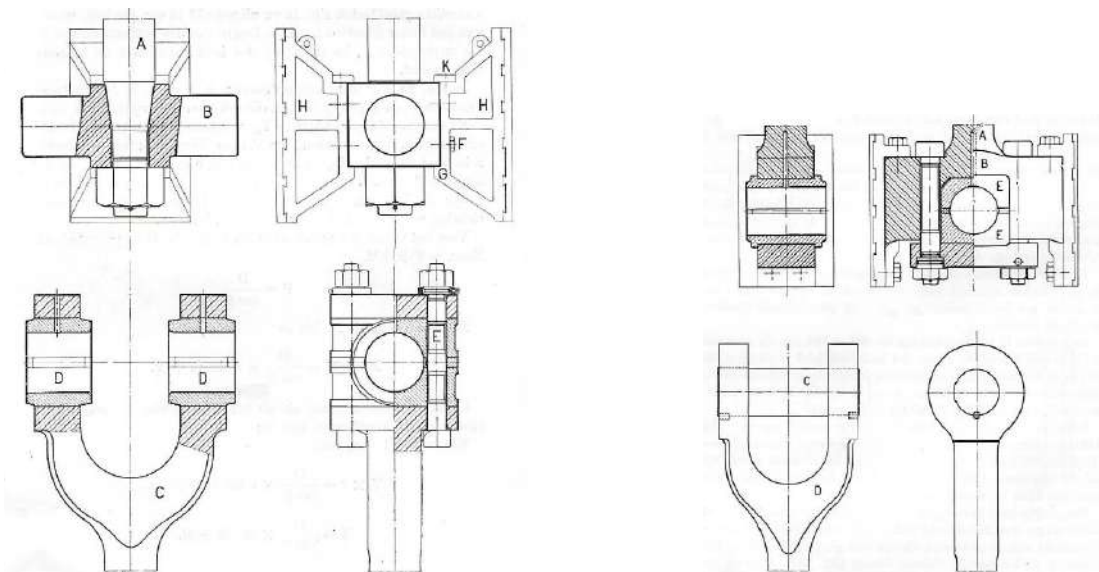
Men neemt het oppervlak van de leislof zo groot dat de door de kracht P' veroorzaakte druk niet meer dan 3,5 a 4,5 kg/cm^2 bedraagt.



Is bijvoorbeeld de stangkracht van een liggende tandem-compoundmachine 32150 kg en is de krukstang vierenhalf keer zo lang als de kruk dan drukt de slof met een kracht van 7145 kg tegen de leibaan. Als het eigengewicht van het kruishoofd wordt verwaarloosd en de toegestane vlaktedruk 4 kg/cm^2 bedraagt dan moet de leislof een oppervlak hebben van 1786 cm^2 . Is de breedte van de slof 35 cm dan moet de lengte 51 cm bedragen. Bij een buisvormige leibaan is dit de geprojecteerde breedte van de cirkelboog. Om schranken te voorkomen neemt men de lengte meestal 1,2 tot 1,5 keer de breedte.

Grootste leibaankracht

De hierna volgende figuren tonen kruishoofden met afzonderlijke vlakke leisloffen. De dobbelsteen die grote krachten moet overbrengen kan dan van gegoten staal of gesmeed staal worden gemaakt en de sloffen, al of niet gevoerd met witmetaal, van gegoten ijzer dat minder de neiging heeft tot vreten.



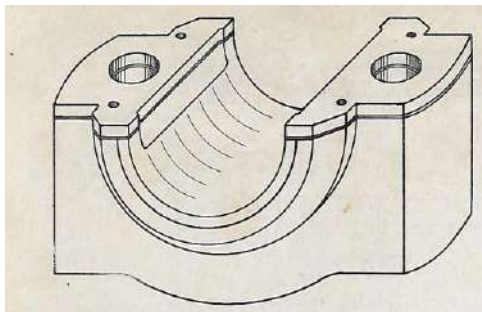
Dubbel kruishoofd scharnierpennen aan de dobbelsteen

Dubbel kruishoofd scharnierpen in de drijfstang

Ondanks de smering van de verschillende draaipunten en glijvlakken slijten de metalen van het kruishoofd en de drijfstang. Hoe beter de smering, des te geringer de slijtage. De door slijtage veroorzaakte speling maakt dat de machine gaat stoten. De nominale speling moet dan weer worden teruggebracht.

Wanneer de sloffen als gevolg van slijtage versteld moeten worden kan onder de voeten van de sloffen een plaatje latoenkoper aangebracht worden. Dit zal echter zelden voor komen omdat de slijtage bij de overwegend lage vlaktedrukken uiterst gering is.

Bij metalen onderdelen kan men het opnieuw pasmaken bereiken door van de scheidingsvlakken van de metaalhelften iets af te nemen en ze opnieuw te schrapen. Om dit pasmaken gemakkelijker te kunnen uitvoeren heeft men de metalen op het scheidingsvlak voorzien van een zogenoemde vulling. Een dergelijke vulling bestaat uit een dikke plaat en een aantal dunne plaatjes messing (latoenkoper). Het latoenkoper is daarvoor speciaal in de handel in platen met diktes van 0,05, 0,10 en 0,15 mm en kan met een (plaat)schaar op maat worden geknipt. Gaten worden met behulp van een holpijp aangebracht. Een paar pennetjes in een van de twee metaalhelften voorkomt het



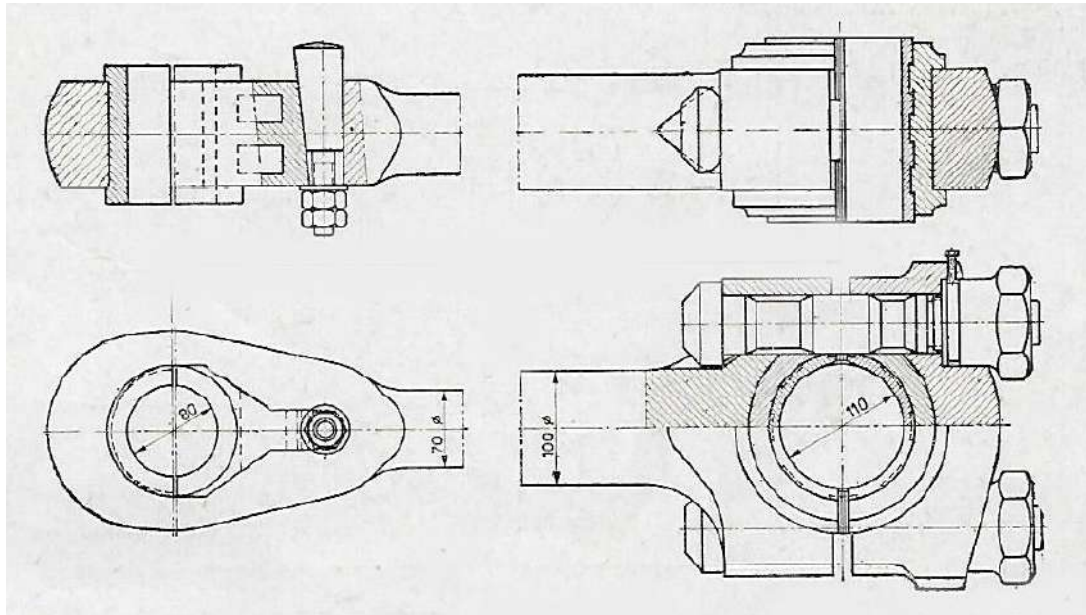
verschuiven van de flinterdunne plaatjes en de dikke vulplaat. Men neemt van de kant die naar de as of de pen is gekeerd over een groot gedeelte van de lengte iets af waardoor een smeeroilie- kamer gevormd wordt. Om te voorkomen dat de scherpe randen van de metaalhelften de olie van de as of de pen schrapen, voorziet men deze van een schuine kant waardoor een wigvormige ruimte ontstaat waar de olie in geperst wordt.

Ondermetaal met vulling

Drijfstangconstructies

De drijfstang vormt de verbinding van het kruishoofd met de kruk. Het einde van de drijfstang dat aan het kruishoofd zit noemt men de kleine kop, het andere einde de grote kop van de drijfstang. Drijfstangen zijn in de regel van staal vervaardigd. Het gedeelte van de stang tussen de beide koppen noemen we de schacht.

De kleine kop van de drijfstang is, zoals hier na is aangegeven, plat of heeft de vorm van een vork en wordt uit één blok gesmeed.

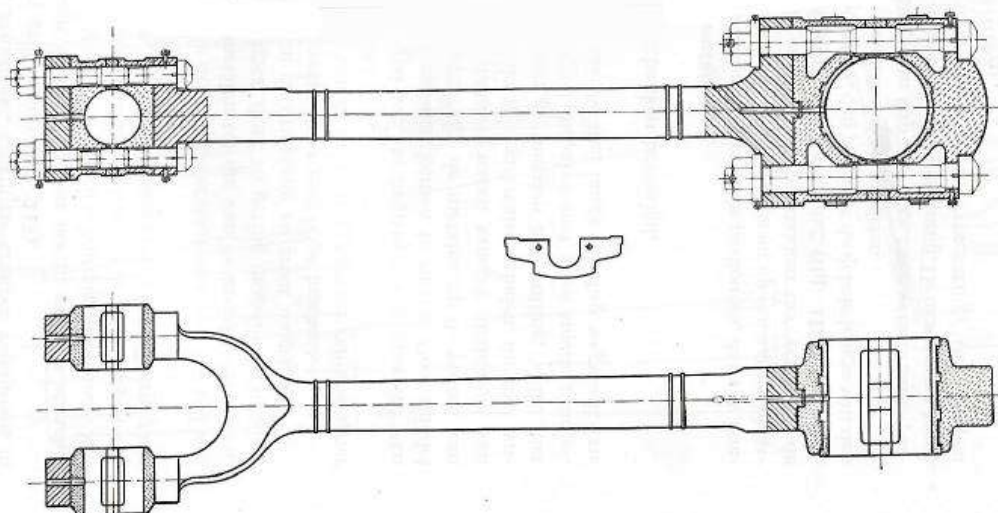


Drijfstang met een platte kleine kop

Als de kleine kop van de drijfstang bij een enkel kruishoofd, is uitgevoerd zoals hier voor is aangegeven dan noemen we dat een gesloten kop. Bij een dubbel kruishoofd, dus uitgevoerd met een gevorkte drijfstang, worden aan de wangen van de kleine kop platte voeten gesmeed, waarop de metalen komen te rusten. Deze uitvoering noemen we een open kop.

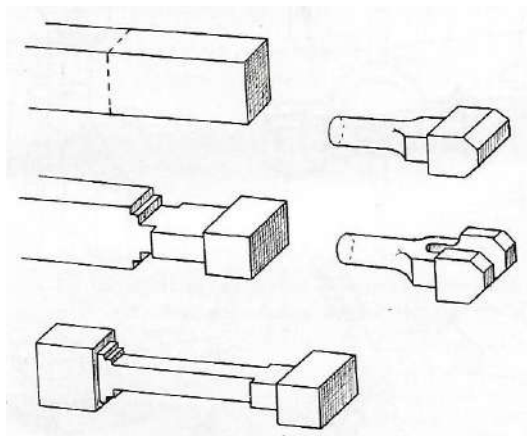
De grote kop van de drijfstang bestaat uit een voet waaraan de uit twee delen bestaande krukpenmetalen zijn bevestigd. Een en ander zoals hieronder is afgebeeld.

Onder de lengte van een drijfstang wordt verstaan de afstand tussen de krukpenmetalen en het kruishoofd. Gewoonlijk is de lengte van de drijfstang ongeveer gelijk aan vierenhalf keer de krukstraal.

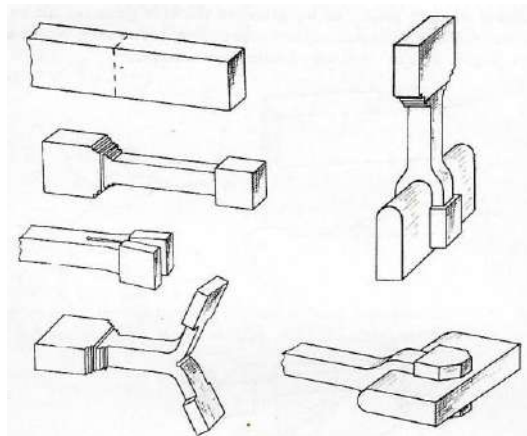


Drijfstang met gevorkte kleine kop

Het smeden van een drijfstang kan op twee manieren worden uitgevoerd. Meestal worden de kopschacht en de voet volgens de hoofdmaten ruw voorgesmeed en daarna geboord, geschaafd of gestoken en gefreesd. De vork wordt bij kleine stangen altijd, en bij grotere meestal gemaakt zoals hier onder in de linkerfiguur wordt weergegeven. Hierbij wordt het materiaal in de vorkopening, het tussenstuk, verwijderd door boren zagen, steken, frezen of autogeen snijden.



Drijfstang smeedmethode 1



Drijfstang smeedmethode 2

Is het tussenstuk te groot en wil men op materiaal besparen dan worden de wangen aan de vork gesmeed op de wijze zoals in de rechterfiguur is aangegeven. Op de plaats waar de benen van de vork zich spreiden wordt eerst een gat geboord en vervolgens naar het uiteinde toe onder de smeedhamer gekloofd. Bij het buigen en verder opsmeden van de vork wordt gebruik gemaakt van een speciaal daarvoor gemaakte vulder, mal. Anders dan bij het machinaal verwijderen van het tussenstuk wordt de draad van het materiaal niet doorgesneden en is de volgens deze methode vervaardigde vork sterker. Evenals bij de eerste smeedmethode worden de verschillende ronde vormen opgesmeed en met behulp van verschillende werktuigmachines afgewerkt.

Een veel toegepaste manier voor het bevestigen van het metaal in de kleine kop bij een platte- en gesloten drijfstang is die met een trekspie, zoals op de volgende bladzijde is afgebeeld.

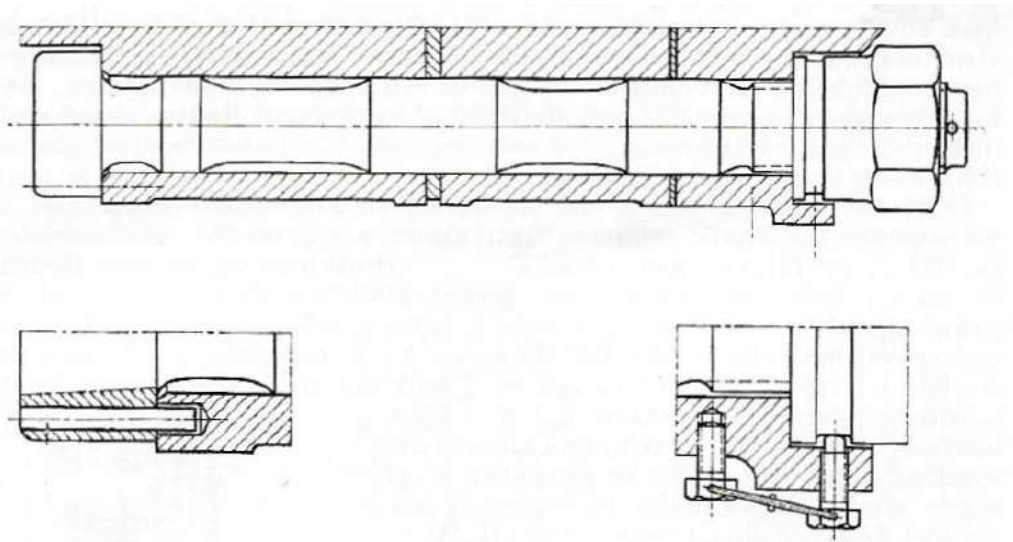
De lagering bestaat uit twee metalen schalen waarvan de ene schaal is voorzien van een uitstekende brug waar de spie tegenaan rust en de andere schaal aan beide zijden van een borst die het uitbreken moet voorkomen. De twee metaalhelften worden hierbij in de sleufvormige opening van de kop geplaatst en aangedrukt met een in doorsnede maanvormige en in lengterichting enkel hellende spie. De spie is voorzien van een draadeind, een drukring, een moer en een contramoer om het geheel te borgen. Bovendien wordt de contramoer nog een keer geborgd tegen loslopen met een splitpen. Al naar gelang de helling van de spie kunnen grote (druk)krachten op de constructie worden uitgeoefend en deze vervormen dan wel laten bezwijken. De helling van de getoonde spie bedraagt 1 : 8 De moer moet bij voorkeur met een zogenoemde momentsleutel worden aangehaald.



geruimde gaten zijn pas geslepen en op twee plaatsen tussen de raakvlakken van de verschillende metalen, op de kerndiameter van de schroefdraad afgedraaid. Het doel dat men hiermee beoogt, is de rek gelijkmatig over de gehele lengte van de steel te verdelen waardoor deze beter de veranderende krachten kan opnemen en deze minder makkelijk breekt

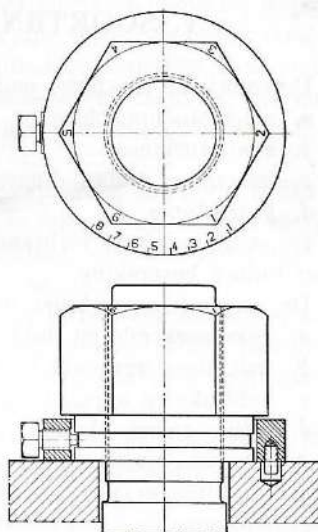
302/578

De moer wordt met een boutje geborgd tegen verdraaien. Daartoe is aan de moer een borst gedraaid die iets kleiner in diameter is dan de sleutelwijdte van de moer. In het cilindrische gedeelte van de moer is een groef gestoken waarin de stift van de borgbout past.



Penn'se zekering

Hiermee wordt voorkomen dat er bramen aan het cilindrische gedeelte van de bout ontstaan. Het loswerken van het borgboutje wordt voorkomen door deze te voorzien van een klein gaatje in de kop en met een gegloeid ijzerdraadje te verbinden met een precies eender uitgerust boutje. Beide boutjes zijn op korte afstand in de voet van de drijfstaaf of de kap van het lagerblok aangebracht. Bij revisie werkzaamheden wordt het ijzerdraadje doorgesneden en vervangen. Een andere uitvoering



is die waar om de aangedraaide borst een ring wordt gelegd. De ring wordt ten opzichte van de kap of voet geborgd met een pennetje. De uiteindelijke borging van de moer vindt op dezelfde als de hier voor aangegeven wijze plaats.

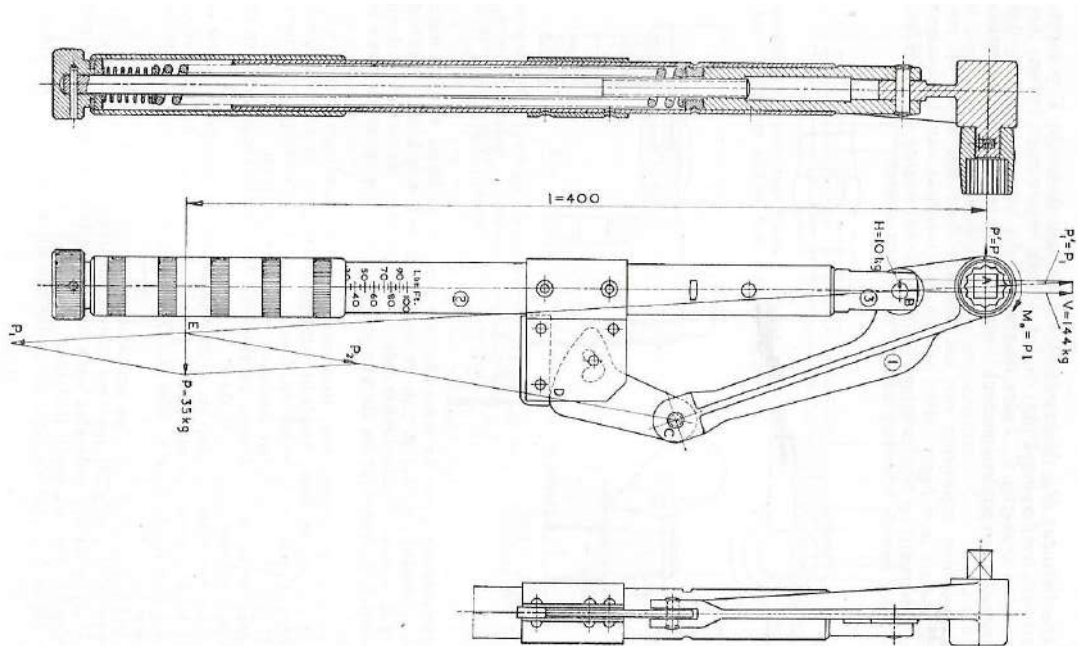
Bij grote lager constructies zijn de hoekpunten van de moer genummerd en is op de ring een cirkelboog-verdeling aangebracht met het doel de stand van de moeren te kunnen noteren voordat ze bij een revisie van de metalen losgenomen worden. Als de metaalvullingen niet zijn gewijzigd kan men na de revisie de moeren tot hetzelfde merkteken weer vastslaan om hetzelfde aanhaalmoment te bereiken. In andere gevallen kan men aan de hand van de spoed van de boutschroefdraad en de gewijzigde vullingdikte uitrekenen hoeveel meer of minder de moer moet worden aangeslagen.

Markering Penn'se zekering

Een andere manier, maar met hetzelfde doel, is het met een koudbeitel of centerpons en slagletters een markering op de boutsteel en de moer aan te brengen. De onhebbelijkheid die zich hierbij

voordoet is dat er na verloop van tijd een veelvoud aan merktekens ontstaat en men door de bomen het bos niet meer ziet. Het is daarom in voorkomende gevallen beter gebruik te maken van een momentsleutel dan om af te gaan op het gevoel en het gehoor van de werktuigkundige. Door de moer te vast te draaien wordt de bout overrekt, verliest daardoor zijn sterkte en breekt. Een onvoldoende aangetrokken bout heeft, ondanks de borging, het loswerken van de desbetreffende moer tot gevolg. Ook ontstaan dan te grote sprongen in de belastingwisselingen van het boutmateriaal wat tot breuk leidt. Beide gevallen kunnen tot grote schade aan de machine leiden.

Bij het handmatig aantrekken of aanslaan met een slagsleutel van moeren van boutconstructies ontbreekt elke controle op het aanhaalmoment. Ervaren machinisten kunnen door met een hamer tegen de moer te tikken aan de hand van de toonhoogte van het aldus veroorzaakte geluid voorspellen of de moer voldoende is aangehaald echter niet met welk moment. Heel lang werd dit voldoende geacht. Tegenwoordig hebben we de beschikking over speciale sleutels waarmee het moment van het koppel waarmee de moer wordt aangehaald nauwkeurig kan worden bereikt. Een dergelijke sleutel is hieronder afgebeeld.



Momentsleutel (schaal in Lbs.ft)

De sleutel kan men door het verdraaien van de moer achterop het gekartelde handvat instellen voor het aanhalen van een moer met een bepaald moment. Bij de sleutel horen een aantal doppen voor moeren van een aantal standaard boutafmetingen. De getoonde momentsleutel heeft een schaal in lbs.ft. (spreek uit "voet-ponden") en heeft een maximum bereik van 100 lbs.ft, wat overeenkomt met ongeveer 14 kg.m. Immers de afgeleide Angelsaksische eenheid van 1 lbs.ft = 0,1383 kg.m daarentegen is 1 kg.m = 7,232 lbs.ft. In de figuur is bij het handvat de kracht P getekend, die nodig is om het grootste aanhaalmoment van 14 kgm te kunnen leveren. De lengte $l = 0,40$ m, dus is $P = 35$ kg.

Op de moersleuteldop moeten bij A voor evenwicht de kracht $P' = P$ en het tegenwerkende koppel M_a werken. Op de hefboom I werken behalve de kracht P' en het koppel M_a nog een kracht P_2 met werklijn C D en een kracht P_1 op punt B. Daar P' en M_2 evenwicht maken met P en dit eveneens met de krachten P_1 en P_2 moeten doen, moet P de resultante van P_1 en P_2 zijn. Hieruit volgt de constructie van deze krachten.

De hefboom I oefent dus een kracht P_1' gelijk maar tegengesteld aan P_1 op het leistik 3 uit. Ontbindt men de kracht P_1' in H en V dan blijkt dat H wordt opgenomen door de geleiding van buis 2 en V door de spiraalveer in deze buis, die men door het verdraaien van het handvat meer of minder spant. Trekt men harder dan de gewenste kracht P aan de hefboom dan worden het aanhaalmoment M_a en de kracht P_1 en dus ook de kracht V te groot, de veer wordt ingedrukt en het leistik knikt naar buiten bij draaipunt C. Zodra dit plaatsvindt is de moer met het ingestelde moment aangehaald en moet men stoppen met verder aantrekken. Sleutels met aanwijzing op een wijzerplaat stellen hogere eisen aan de oplettendheid van de monteur of machinist en is er kans op overrekken van de bout. Echter de aanwijzing van de wijzer is nauwkeuriger dan de afstelling met de besproken momentsleutel die met een spiraalveer is uitgerust.

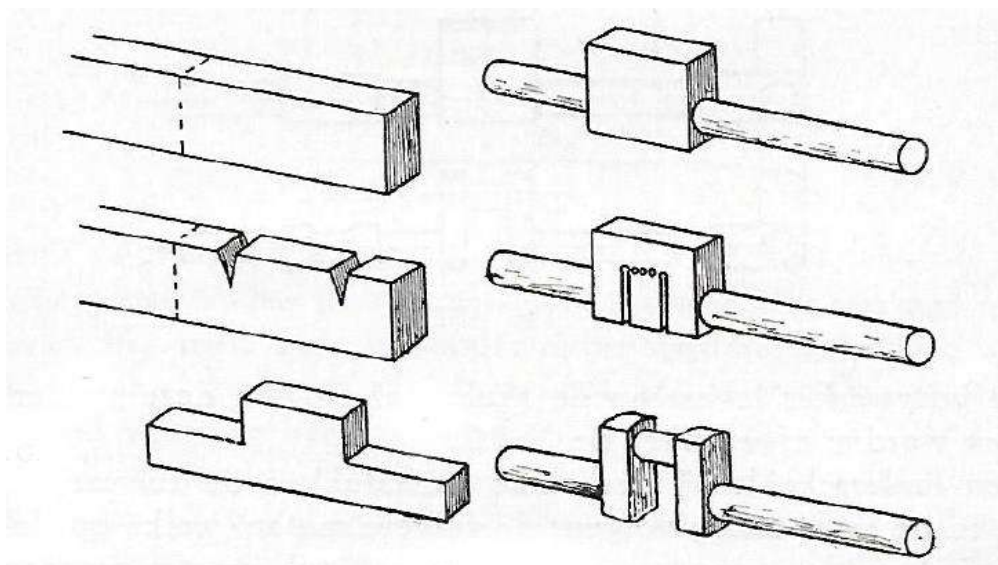
In de praktijk zet men moeren meestal eerst hand vast, waarna in twee of drie stappen en over en weer de bouten op spanning gebracht worden. De lagerkappen worden zodoende gelijkmatig aangetrokken. Het verdient sowieso aanbeveling ook het lossen van de moeren over en weer en in meerdere stappen te laten plaatsvinden om scheve belasting en dus kromtrekken van de pasbouten te voorkomen.

Soms borgde men een dergelijke verbinding met een half in de as en in de naaf aan gebrachte pen. Een dergelijke pen doet echter meer kwaad dan goed en is in de loop der tijd steeds minder toegepast. Het nadeel van een krimpverbinding is dat men hem niet meer kan losnemen.

De krukpen is, zoals in bovenstaande linker figuur wordt weergegeven, taps uitgevoerd en met een spie geborgd. In geval van overmatige slijtage kan de krukpen op een eenvoudige manier door een nieuwe vervangen worden. Bij de rechter figuur is de krukpen door middel van oppersen en klinken bevestigd. Bij een eventuele vervanging moet eerst de krukschijf verwijderd worden en de pen uitgeboord.

Gesmede krukas

Krukassen worden vooral bij kleine machines vaak uit één stuk gesmeed. De door de smid gevolgde bewerkingsvolgorde van walsblok tot as wordt in onderstaande figuur weergegeven. Van het ruwe materiaal moeten de maten overeenkomen met de breedte en de dikte van de krukwingen. De lengte van het blok bepaalt de smid op het oog. Eerst word het blok afgekort en op twee plaatsen ingenomen waarna de aseinden worden gesmeed.



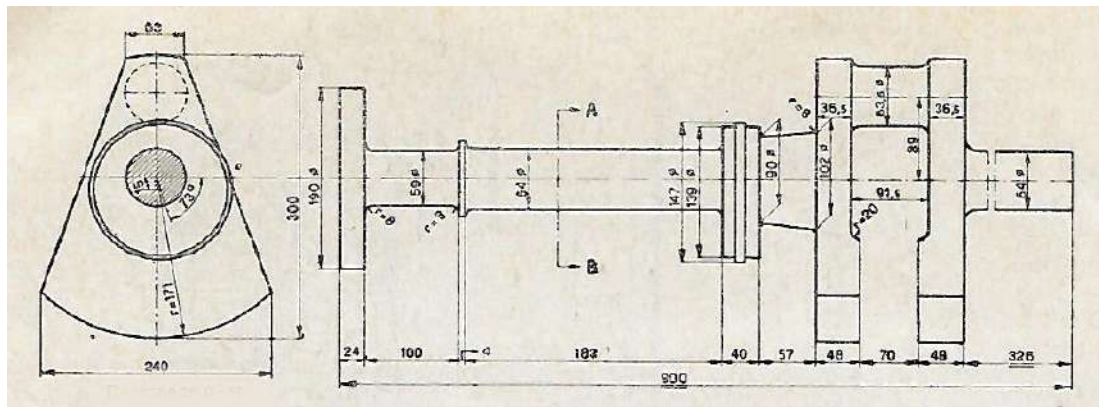
Bewerkingsvolgorde gesmede krukas

Eerst vierkant in de breedte van de krukwing en vervolgens rond opgesmeed met een ruime materiaal toegift voor het later bewerken van de as. In deze vorm wordt het smeedstuk door de smid opgeleverd. De verdere bewerking vindt in koude toestand plaats door boren en uitzagen of door autogeen uitsnijden. Hierna wordt de krukas afgewerkt op de draaibank

Op de voorgaande bladzijde zien we een voorbeeld van een bewerkte krukas met twee krukwingen die uit een dergelijk smeedstuk gemaakt zou kunnen zijn. Deze as is op drie plaatsen gelagerd en voorzien van een verdikt gedeelte ter plaatse van het zware vliegwiel. Voor de smering van de krukpen is in de krukas en in de krukwing een oliekanaal geboord met op de kopse kant van de as een cilindrische oliekamer. Tijdens bedrijf wordt deze kamer handmatig met olie gevuld. Het schuin

geboorde kanaal in de krukvang zorgt ervoor dat de smeeroilie naar de smeergroef in het krukpen-metaal wordt gevoerd.

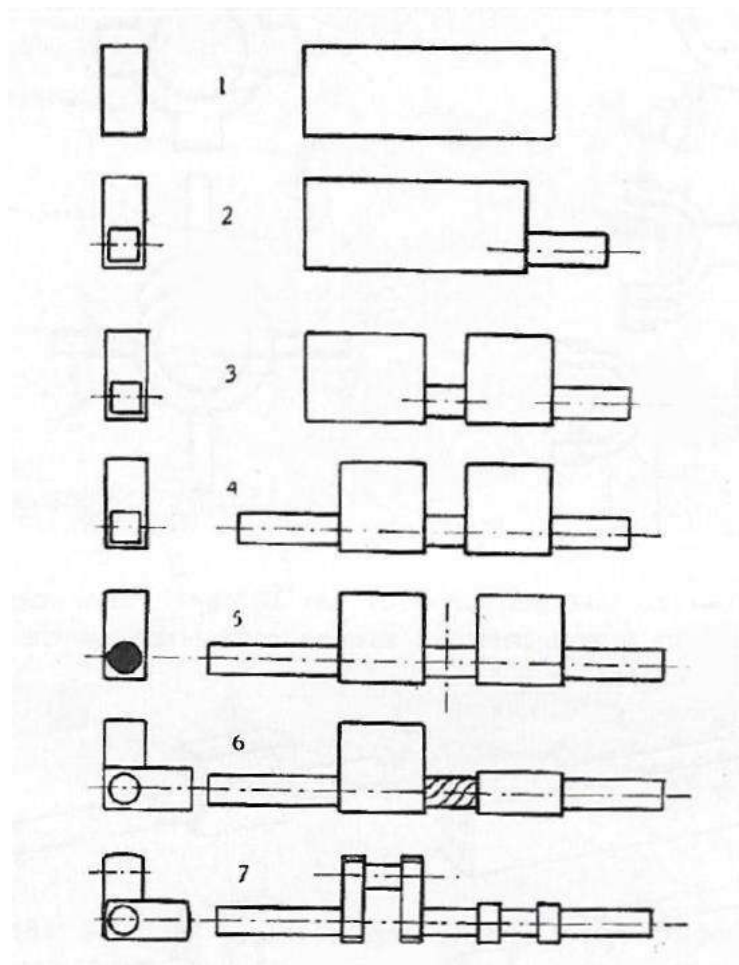
In onderstaande figuur is een krukas getekend voor een kleine stoommachine. Deze as is met kruk, contragewicht, excentriekschijf en koppelflens uit één stuk gesmeed. Het vliegwiel bij deze krukas is aan de (pas)flens bevestigd.



Gesmede krukas met koppelflens

Een gesmede krukas wordt uit één ingot gesmeed. De ingot moet dus voldoende materiaal bevatten om hieruit de as te kunnen smeden. In de hier na volgende figuren 1 tot en met 7 wordt de bewerkingsvolgorde geschetst van het smeden van een as met twee krukken. Evenals bij het smeden van de enkele kruk wordt uit een ingot een blok gesmeed waarvan de materiaalbreedte en -dikte overeenkomt met die van de krukwingen. Vervolgens worden de ashalzen gesmeed. Ook hier worden deze eerst vierkant gemaakt en later rond opgesmeed. De krukwingen staan dan nog steeds evenwijdig aan elkaar. Vervolgens worden de krukken getorst zodat ze onder de juiste hoek ten opzichte van elkaar komen te staan. Hierbij wordt de ene krukwing op het aambeeld van de smeedpers of stoomhamer gelegd en vastgehouden door de hamerbeer terwijl de andere wang met behulp van een hefboom en eventueel een takel verdraaid wordt.

De smid levert nu het werkstuk af waarna het verder in de fabriek mechanische bewerkt wordt. Men onderscheidt bij dergelijke werkstukken de zuivere , schone maat en de ruwe maat. Volgens de zuivere maat, welke op de werktekening wordt aangegeven, wordt het werkstuk bewerkt door middel van draaien, frezen en schaven. De ruwe maten , welke voor buitenmaten 3-5 mm groter en voor binnen- maten even zoveel kleiner genomen worden als de schone maat, zijn de hoofdmaten voor de smid. Bovendien moet hij rekening houden met krimp bij afkoeling , en wel ongeveer 1,2 %. Ook wordt het smeedstuk dunner door het verlies aan hamerslag.

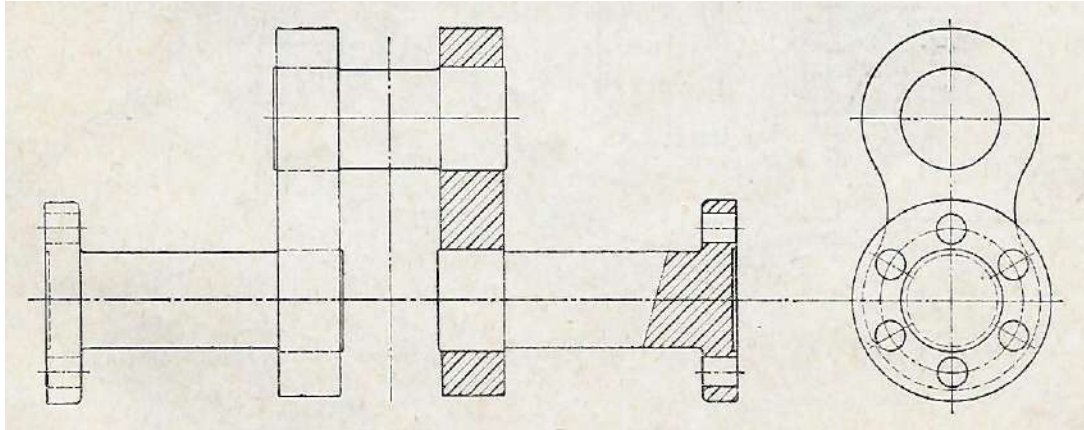


Smeedvolgorde krukas met twee krukken

Opgebouwde krukas

Bij machines met een groot vermogen en meerdere cilinders is het volume van één ingot niet toereikend en wordt de krukas zoals hier na wordt weergegeven opgebouwd uit meerdere delen. De flenzen aan de ashalzen worden bij deze opbouwmethode wel gesmeed. Hierbij wordt de ruwe as aan een zijde gestuikt en in een zaalblok plat gesmeed. Door het smeden worden de vezels, de draad, van het as-materiaal in de flens doorgezekt en wordt een sterkere constructie verkregen.

De ashalzen en de krukpen zijn in de krukwanen of vioolstukken gekrompen. De krukas kan bijvoorbeeld bij een tweeling- machine opgebouwd worden uit twee dezelfde krukken die 180 verdraaid met elkaar zijn verbonden. Men maakt die gedeeltes van de krukpen en de ashals, die in de krukwan worden gekrompen doorgaans iets groter dan de diameter van de bewerkte krukpen en de ashals zelf. Men kan dan in de hoeken van de wangen aan de krukpen en de ashalzen een grote afronding geven en daarmee de zogenoemde kerfwerking, het ontstaan van haarscheurtjes, verminderen of zelfs voorkomen.



Opgebouwde krukas

Krukas afmetingen

Het door een stoommachine ontwikkelde vermogen N dat via de krukas wordt overgebracht wordt bepaald door het koppel M en de hoeksnelheid ω , en kan als volgt in een formule worden genoteerd:

$$N = \frac{M \cdot \omega}{75} \text{ [pk]}$$

Of als de hoeksnelheid wordt ingevoerd:

$$N = \frac{M \cdot 2\pi \cdot n}{75 \cdot 60} \text{ [pk]}$$

Een krukas is hoofdzakelijk belast op wringing. De dikte van de as zal dan ook moeten worden bepaald aan de hand van de daarin optredende wringspanning. Deze spanning hangt weer af van het op de as werkende koppel of wringmoment. Brengt een draaiende as een vermogen over van N pk bij een toerental van n omwentelingen per minuut dan is de grootte van het wringmoment M_w :

$$M_w = \frac{60 \cdot 100 \cdot 75 \cdot N}{2\pi \cdot n} \text{ [kg. cm]}$$

Of:

$$M_w = 71620 \frac{N}{n} \text{ [kg. cm]}$$

Dit moment veroorzaakt in de as een wringspanning τ_w , die we vinden door M_w te delen door het zogenoemde polaire weerstandsmoment W_w van de asdoorsnede.

$$\tau_w = \frac{M_w}{W_w} \text{ [kg. cm}^2\text{]}$$

Voor een massieve as is het polaire weerstandsmoment;

$$W_w = \frac{\pi}{16} \cdot d^3 [\text{cm}^3]$$

Als d de asdiameter in cm is geeft substitutie:

$$\tau_w = \frac{M_w}{\frac{\pi}{16} \cdot d^3} [\text{kg/cm}^2]$$

Waaruit volgt:

$$d^3 = \frac{16 \cdot 71620}{\pi \cdot \tau_w \cdot n} \text{ N}$$

In de praktijk wordt voor het wringmoment τ_w niet meer dan 300 kg/cm² genomen. Dit lijkt zeer weinig, maar in de formule wordt gebruik gemaakt van slechts het gemiddelde moment op de as. In werkelijkheid varieert het moment M zeer sterk gedurende een omwenteling, omdat niet alleen de kracht op de zuiger voortdurend van grootte verandert, maar ook de arm waarmee de drijfstaangkracht op de as werkt.

Houden we de hier voor genoemde waarde aan dan wordt:

$$d^3 = \frac{16 \cdot 71620}{\pi \cdot 300 \cdot n} \text{ N}$$

Als het vermogen en het toerental van de machine bekend zijn kan de krukasdiameter berekend worden met de volgende vereenvoudigde formule:

$$d = 10,7 \sqrt[3]{\frac{N}{n}} [\text{cm}]$$

Passen we deze formule toe op de krukas van een machine van 500 pk die ontwikkeld wordt bij een toerental van 120 omw./min dan bedraagt de krukasdiameter:

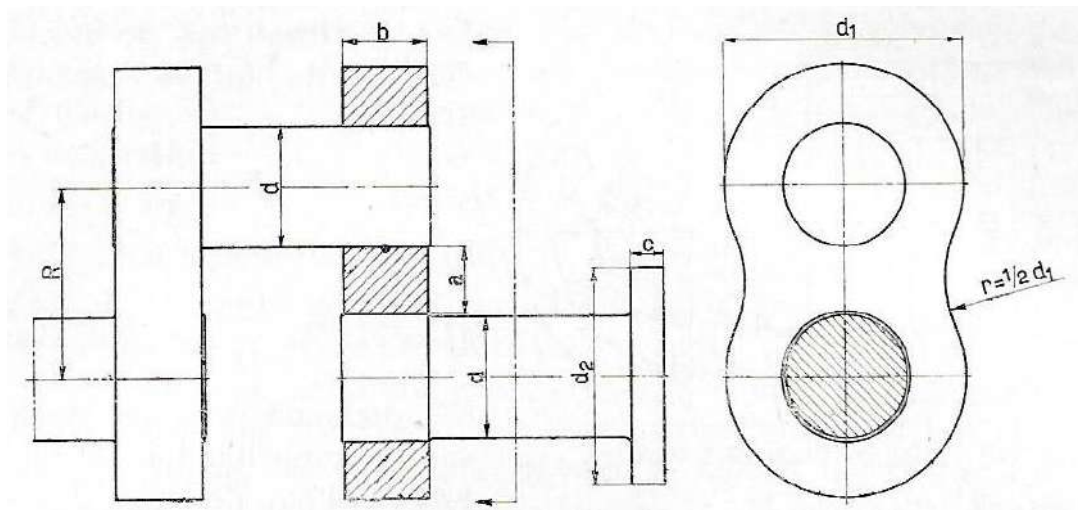
$$d = 10,7 \sqrt[3]{\frac{500}{120}} = 17,2 [\text{cm}]$$

Is de asdiameter en het toerental bekend dan kan men met behulp van de hier voor gegeven formules bij benadering het vermogen uitrekenen van de desbetreffende stoommachine.

De krukwingen, de krukpen en de as van een opgebouwde krukas geeft men bepaalde afmetingen. Een en ander zoals op de hieronder afgebeelde tekening is aangegeven. De

krukpen neemt men even dik als de as. Het gedeelte van de ashalzen dat in de krukwanen wordt gekrompen neemt men 2 tot 3 % dikker dan de as. Het gedeelte krukpen dat in de wangen wordt gekrompen maakt men even dik als de pen of slechts heel weinig dikker. De breedte van de wangen neemt men 1,8- tot 2-maal de asdikte. De afrondingsstraal van de afronding van de krukvang-verschraling is de helft van de breedte. Voor de dikte van de wangen wordt 0,6 tot 0,7 keer de asdiameter aangehouden.

De ruimte tussen de pen en de as neemt men niet kleiner dan 0,45 keer de asdiameter omdat anders de sterkte van de twee krimpverbindingen in gevaar komt. De diameter van de koppelflensen neemt men ongeveer 1,8 keer de diameter van de as. Dit mag iets groter of kleiner zijn in verband met de boutdikte. De dikte van de wang is 0,25 tot 0,28 keer de as diameter.

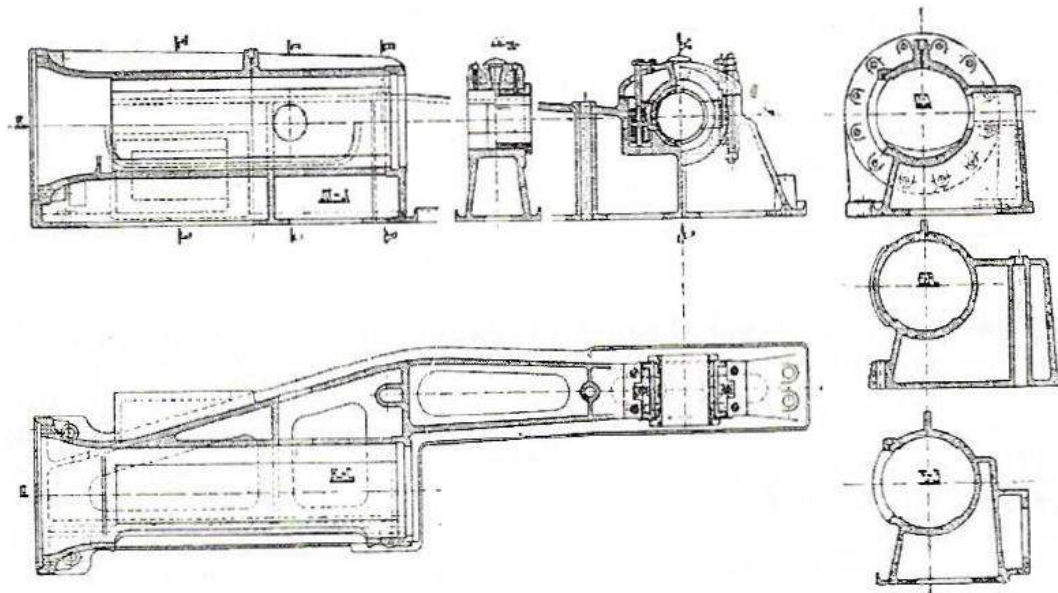


Afmetingsverhoudingen opgebouwde kruk

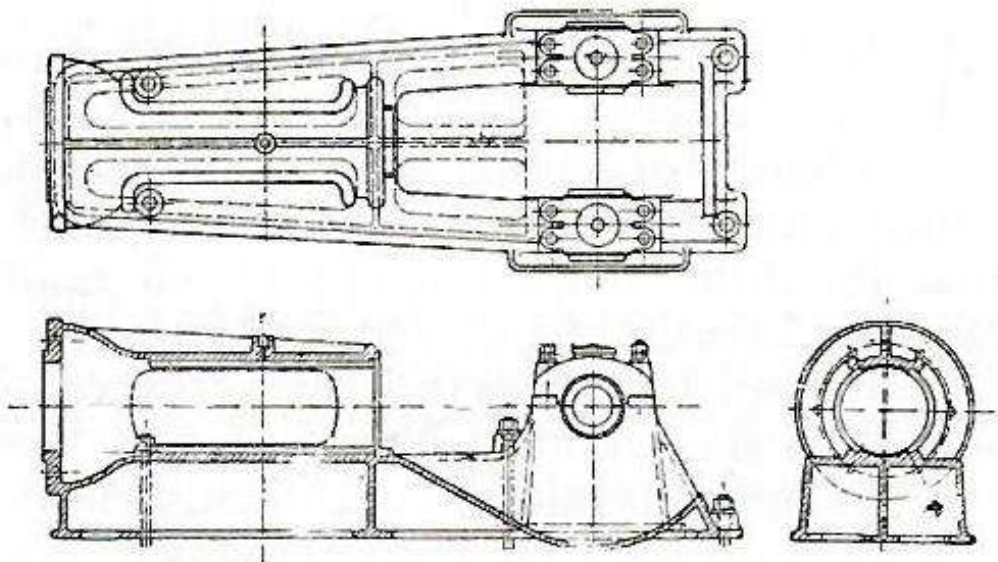
4.14.13 Fundatie en Frame

De krachten die in de machine optreden door de druk op de zuiger maken het noodzakelijk dat het hoofdas metaal of -metalen met de cilinder worden verbonden. Tevens moet de verandering van de rechtlijnige beweging omgezet worden in een draaiend beweging. Hiervoor zijn machinedelen nodig die het rechtlijnige bewogen deel geleiden: de zogeheten recht geleiding. Bij een stoommachine geschiedt dit door een bijzondere leibaan met behulp van een kruishoofd of leislof. De leibanen dienen daarbij tegelijkertijd als verbinding van de cilinder met de lagering en vormen samen het frame van de machine. Bij een horizontale machine vormt dit frame tevens de fundatie van de machine. Een verticale machine wordt uitgevoerd met een aparte fundatieplaat waarin de lagering is ondergebracht en waarop tevens de kolommen steunen. In de machinefundaties is een aantal gaten aangebracht voor de ankerbouten. Na het zuiver horizontaal en in lijn stellen van de machines worden bij een betonfundatie de ankerbouten met cementmortel aangegoten en de voeten onderkaut. Bij een gemetselde fundatie maakt men gebruik van een ankermal en worden de meestal zeer lange ankerbouten in het metselwerk opgenomen en hoeft de fundatie na het stellen alleen maar worden onderkaut. Het aanrakingsoppervlak tussen frame en fundament moet zo groot zijn dat de oppervlakedruk niet meer bedraagt dan 2 kg/cm^2 .

Afhankelijk of de machine is uitgevoerd met een enkele of een dubbele kruk krijgt deze een daarbij aangepast frame. Zo wordt bij een enkele kruk de stoommachine uitgerust met een zogenoemd bajonet of Corlissframe, en de machine met een dubbele kruk, een gaffel- of vorkframe.

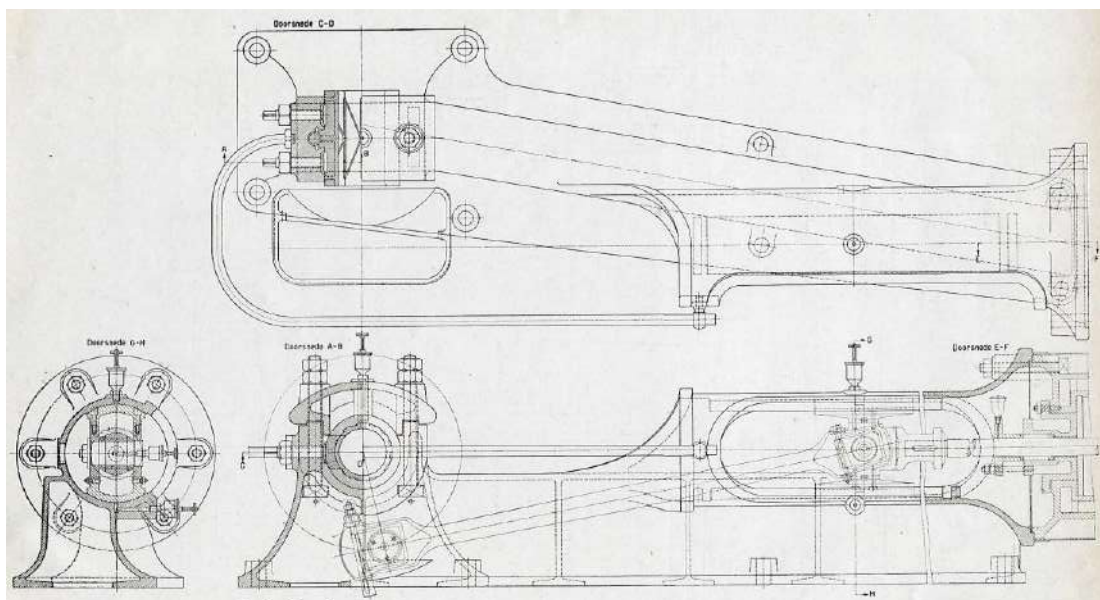


Bajonetframe voor horizontale stoommachine



Gaffelframe voor horizontale stoommachine

Bij alle frames wordt er naar gestreefd dat de hefboom-armen van de optredende momenten zo klein als mogelijk zijn zodat aan het frame alleen getrokken of gedrukt wordt. Ook mag men er niet mee rekenen dat krachten door het fundament worden overgebracht. In deze opzichten voldoet een gaffel- of vorkframe beter dan een bajonetframe.



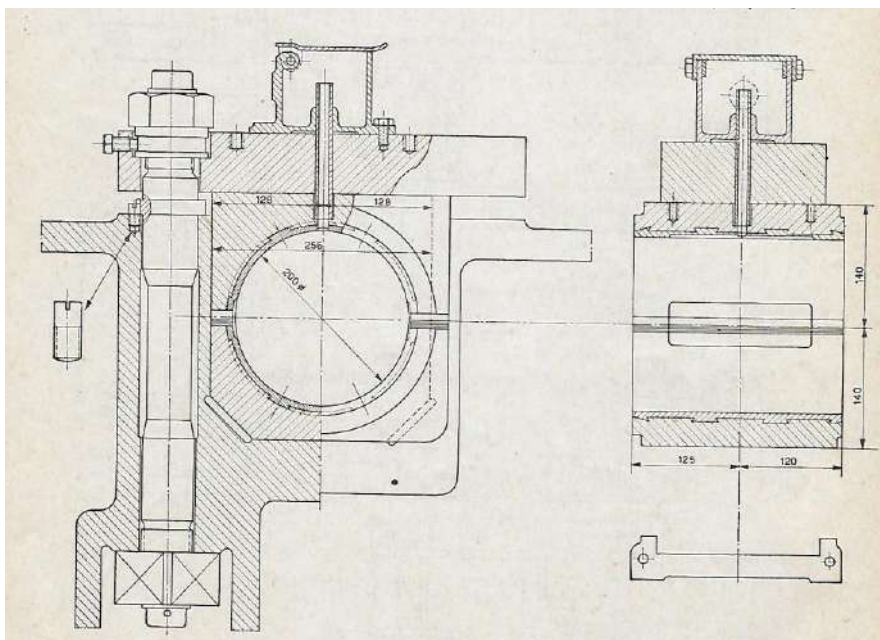
Bajonetframe machine

De meest kritische doorsnede bij een bajonetframe ligt bij de aansluiting van de cilinder op de bajonetbalk. Deze doorsnede wordt zowel op buiging als op trek belast en moet dus punt van aandacht zijn bij inspecties. In onderstaande tekening worden de details van een bajonetframe voor een horizontale stoommachine met een enkele kruk weergegeven. Tegen de flens, rechts, wordt de cilinder van de machine bevestigd. Een deel van het frame vormt tevens de leibaan.

De lagering of het kussenblok voor de krukas bij deze machine zal vooral slijten aan de zijkanten omdat hier de as met grote kracht tegenaan wordt gedrukt. Om eventuele slijtage te kunnen verhelpen is er een verstelbaar stuk in de lagerschaal aangebracht. Dit stuk kan men met twee stelbouten verstellen.

De leibaan van deze machine is ondergebracht in het ronde gedeelte van het frame. De loopvlakken zijn aangegoten verdikkingen die nauwkeurig in lijn met de stoomcilinder zijn uitgekotterd. De ronde vorm van dit gedeelte en de verdikking bieden voldoende weerstand tegen doorbuigen ten gevolge van de dwarskrachten tijdens bedrijf. Om stootranden te voorkomen wordt de lengte van het leibaanloopvlak 2 tot 3 cm korter gehouden dan de slag van de machine vermeerderd met de lengte van het kruishoofd.

Bij een verticale stoommachine ligt de krukas in de fundatieplaat. Tussen deze plaat en de stoomcilinder zijn kolommen aangebracht welke het frame van de machine vormen. Bij kleine machines is de fundatieplaat uit één stuk gegoten. Bij grote machines wordt deze plaat uit twee of drie delen gegoten, die van pasvlakken worden voorzien en met bouten aan elkaar verbonden worden. In principe bestaan deze fundaties uit twee langs balken met even zoveel dwarsbalken als er kussenblokken zijn. De vierkante kussenblokhelften worden zoals in de tekening hieronder is aangegeven in vierkante uitsparingen van de dwarsbalk aangebracht en met een vlakke plaat aan een zijde vastgezet.

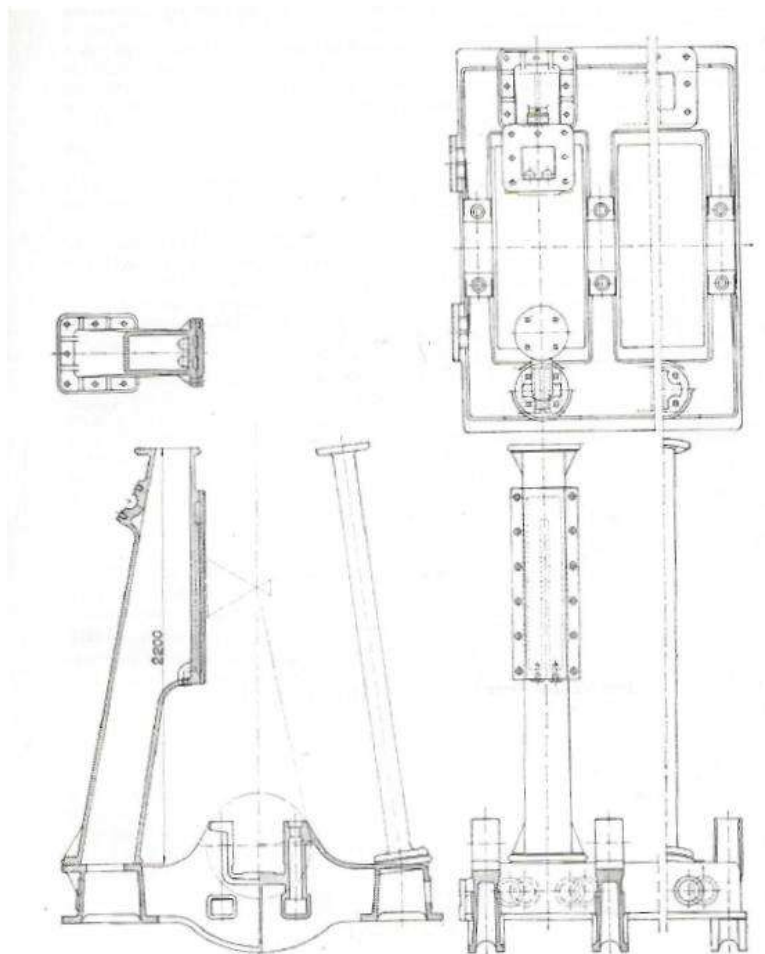


Kussenblok verticale stoommachine

Bij de tekening op deze bladzijde van een grote stoommachine zijn de balken kokervormig. Kleine stoommachines worden ook wel met I vormige balken uitgevoerd.

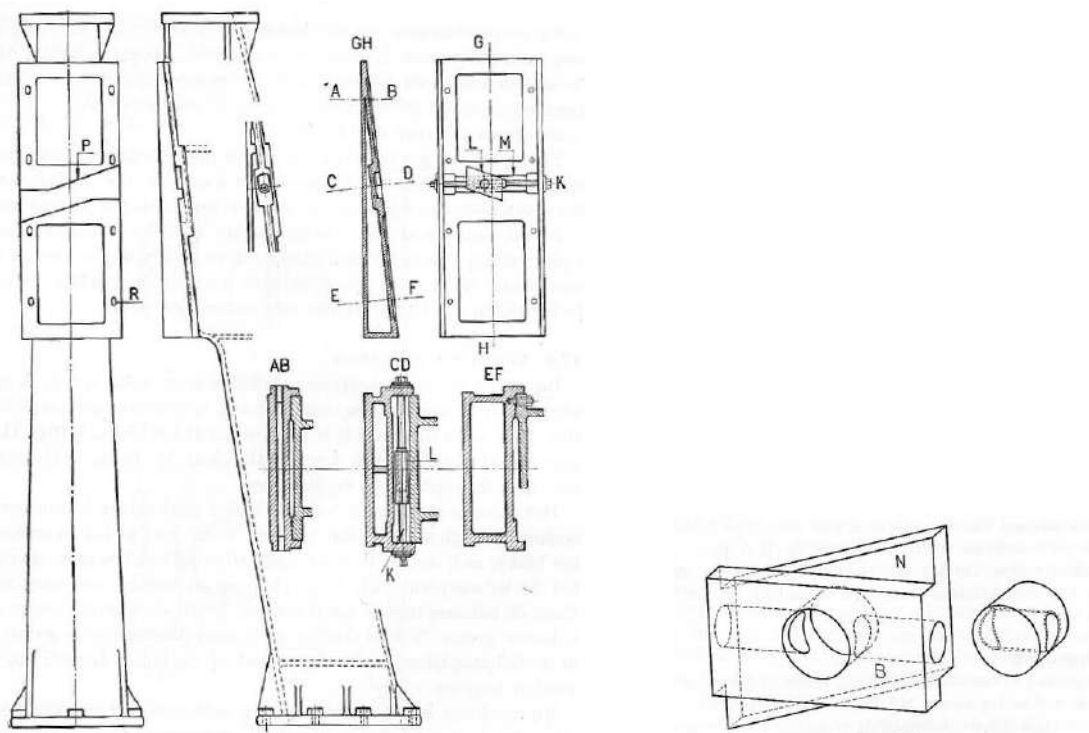
De kolom waaraan de leibaan is bevestigd is in het voorbeeld kokervormig met aan de andere zijde een massieve stalen kolom. Meestal worden echter twee kokervormige kolommen toegepast met aan weerszijden een leibaan. Een nadeel van deze uitvoeringsvorm is dat de machine minder goed toegankelijk is, bijvoorbeeld voor het smeren van de lagers. De kokers zijn ter plaatse van de leibaan verdikt om samen met de doosvormige leibaan voldoende weerstand te bieden tegen buigen. Het doosvormige gedeelte wordt met bouten aan de kolom bevestigd. Evenals bij de horizontale stoommachine wordt het loopvlak van de leibaan enige centimeters korter gemaakt dan de slaglengte vermeerderd met de hoogte van kruishoofd.

Bij machines met aan weerszijden een leibaan ontstaat ten gevolge van warmte uitzetting speling. Ten einde deze speling op te heffen maakt men bij twee leibanen constructies waarbij de leibaan over een gering hellend vlak kan worden versteld. In de tekening op de volgende bladzijde wordt een voorbeeld gegeven van een dergelijke constructie voor een verticaal opgestelde stoommachine.



Kolom en fundatieplaat verticale stoommachine

Bij machines met aan weerszijden een leibaan ontstaat speling ten gevolge van warmte uitzetting.. Teneinde deze speling op te heffen maakt men bij twee leibanen constructies waarbij de leibaan over een gering hellend vlak kan worden versteld. In de tekening op deze bladzijde wordt een voorbeeld gegeven van een dergelijke constructie. Het uiteindelijke verstellen gebeurt door de schroeven in de wigvormige plaat los te nemen en vervolgens de schroefspindel aan de zijkant van de kolom te verdraaien. De plaat beweegt in de sleufgaten rondom de schroefverbinding naar boven of naar beneden al naar gelang de speling kleiner of groter gemaakt moet worden. Na het verstellen moet de plaat weer goed vastgezet worden.



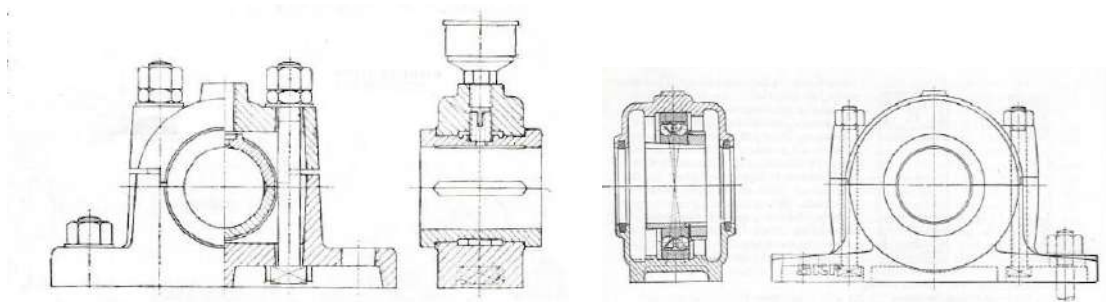
Constructie leibaan verstelinrichting

De schuin opgestelde kolommen in combinatie met de zuiger bij een verticale stoommachine lijken met enige fantasie op de letter A. Het geheel wordt daarom vaak aangeduid met A-frame. Verticaal opgestelde stoommachines zijn slechts sporadisch toegepast bij gemalen. Het gemaal A.F. Stroink is uitgerust geweest met verticaal opgestelde stoommachines.

4.14.14 Lagers en lagervoeringen

Kussenblokken

Kussenblokken of wat we tegenwoordig lagers noemen, dienen voor ondersteuning van draaiende machinedelen. Men kan ze indelen in lagers die in hoofdzaak worden belast door radiaal werkende krachten, en die welke voornamelijk belast worden door axiaal werkende krachten. Afhankelijk van de constructie worden de lagers weer ingedeeld in glijlagers en kogel- of rollenlagers. De laatste categorie lagers wordt niet aangetroffen bij de veelal oude stoommachine installaties van gemalen, maar wel bij de meestal later aan de installaties toegevoegde en modernere (hulp)werktuigen.



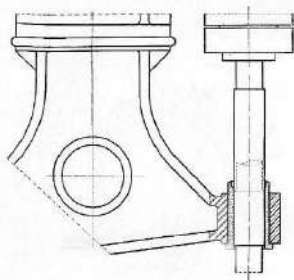
Glijlagers hebben ten opzichte van kogel- en rollenlagers de volgende voordelen:

- Geringe wrijvingsverliezen
- Bestand tegen schokken
- Gemakkelijk te herstellen en nastelbaar uit te voeren
- Geruisloos
- Eenvoudige montage

De voordelen van kogel- of rollenlagers ten opzichte van glijlagers zijn:

- Zeer geringe wrijvingsverliezen
- Geringe slijtage
- Gering verbruik van smeermiddelen
- Betrekkelijk kleine afmetingen in axiale zin

Bij de constructie van een glijlager gaat men uit van de afmeting van de tap dan wel de belasting hiervan. In zijn eenvoudigste vorm is een glijlager een metalen bus met goede loopeigenschappen die in een blok is geperst. Een dergelijke gesloten lagerconstructie treft men bij stoom- machines vaak aan bij de schuifstangen en wordt met oogblok aangeduid.



Het open lager bestaat uit een bloklichaam met daarin opgenomen het onder- en bovenmetaal, de kap en de bouten waarmee met behulp van de kap de metalen bijeen worden gehouden. De metalen worden ook wel kussens genoemd vandaar ook de naam; kussenblok. Het kussenbloklichaam is bij stoommachines een geïntegreerd onderdeel en bestaat meestal uit hetzelfde materiaal als de machine zelf.

Oogblok schuifstang

Het materiaal voor de metalen is gegoten ijzer, brons of witmetaal, als voering aangebracht in gegoten ijzeren, stalen of bronzen schalen. In bijzondere gevallen past men gesinterd staal of brons toe dat poreus is en daardoor goed gesmeerd kan worden en een uitstekende restsmering bezit voor het geval dat de toevoer van het smeermiddel stagneert. Ook bezigt men voor de metalen wel eens een zinklegering. Het lagermateriaal moet in het algemeen weker zijn dan het materiaal waar de tap van is gemaakt. Metaal en tap mogen in geen geval van hetzelfde materiaal zijn gemaakt, want dan ontstaat spoedig "vreten". Het metaal moet glad en nauwkeurig kunnen worden bewerkt.

Gietijzer

Gietijzer is relatief goedkoop en kan gebruikt worden als de omtreksnelheid van de tap gering of het bedrijf intermitterend is, anders wordt de slijtage te groot. De toelaatbare vlaktedruk σ_0 is 25 – 40 kg/cm², waarbij de hoogste waarde slechts is toegestaan bij geharde en geslepen tappen en geslepen speciaal gegoten gietijzer.

Brons

Brons is een legering van 87% koper en 13% tin en soms een weinig zink. Het is duur en omdat het een grotere uitzettingscoëfficiënt heeft dan het gegoten ijzer dat het metaal gewoonlijk omgeeft, moet aan het pasmaken van bronzen metalen bijzondere aandacht worden besteed aan de passing, dat wil zeggen ruimere speling. Brons heeft na bewerking een glad en dicht oppervlak en is geschikt voor het opnemen van stoten. De toelaatbare vlaktedruk σ_0 is 30 – 60 kg/cm². Bij bepaalde soorten zoals fosfor- en loodbrons laat men een vlaktedruk toe van 80 kg/cm².

Witmetaal

Witmetaal, ook wel Babbitt, genoemd naar de uitvinder uit Amerika Isaac Babbitt, is een vooral op tin of lood gebaseerde legering voor glijlager metaal met een lage wrijvingscoëfficiënt. Het kan verschillende samenstellingen hebben zoals in onderstaande tabel wordt aangegeven. Deze (ASTM) tabel is slechts een greep uit een zeer groot scala aan legeringen dat in de loop der tijd ontwikkeld is door de fabrikanten van stoommachines en andere werktuigen.

Aanduiding	Samenstelling %					Hardheid Rockwell 3				
	S _n	S _b	C _u	P _b	Andere toevoegingen			20°C	50°C	100°C
Lg P _b S _n 5	5	15,5	1	78,5				22	13	6
Lg P _b S _n 10	10	15,5	1	73,5				23	16	9
Lg S _n 80	80	12	6	2				27	20	10
					C _d	A _s	Ni			
Lg P _b S _n 5 C _d	5	15	1	77	0,8	0,7	0,5	26	21	15
Lg P _b S _n 9 C _d	9	14	1	74,3	0,5	0,7	0,5	29	23	15
					C _a	N _a				
Lg P _b	-	-	-	99	0,5	0,5				

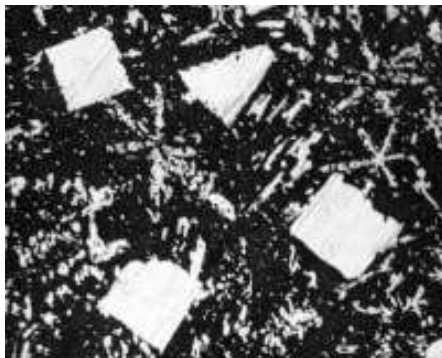
Witmetaallegeringen

Een legering is een mengsel van twee of meer afzonderlijke metalen. Zij kunnen daarbij ook niet-metalen bevatten; echter allemaal om de eigenschappen van het uiteindelijke materiaal te verbeteren dan wel geschikt te maken voor de beoogde toepassing. De legeringen voor de metalen van lagers zijn overwegend samengesteld uit de elementen Tin (S_n), Koper (C_u), Lood (P_b), en Antimoon (S_b), waarbij lood vaak voor een deel het duurdere tin vervangt. Om een grotere hardheid te bereiken worden soms kleine hoeveelheden van de elementen Cadmium (C_d), Arseen (A_s) en Nikkel (N_i) gebruikt. Verder zijn er voorbeelden dat men vanwege tin-schaarste zink (Z_n) toepaste of kleine hoeveelheden Calcium (C_a) en Natrium (N_a) aan het lood toevoegde om hiermee de voering voor glijlagers te gieten.

Bij een goede samenstelling van het witmetaal en bewerking van het lager komt "vreten" ten gevolge van warmteuitzetting minder snel voor dan bij bronzen lagers. Witmetaal wordt in het algemeen gebruikt voor minder zwaar belaste snel draaiende assen, echter door zijn weekheid kan het alleen als relatief dunne voering worden gebruikt en mogen eventuele stoten niet al te groot zijn. De vlaktedruk kan tot 200 kg/cm^2 bedragen.

Materiaalstructuur witmetaal

De structuur van witmetaal bestaat uit harde metallische tin- en antimoondeeltjes, gebed in een zachter grondmetaal. Als het zachtere metaal wegslijt komen de harde kristallen aan de oppervlakte waar de smeerolie tussendoor beweegt. De smeeroliefilm draagt de as. Het witmetaal wordt in de gietijzeren bronzen of stalen lagerschaal aangebracht. De hardheid volgens Vickers van het grondmetaal bedraagt circa 10 kg/mm^2 , de hardheid van de ingebedde kristallen is circa 45 kg/mm^2 . Bij oververhitting: warmlopen als gevolg van overbelasting, falende smering of een te strakke



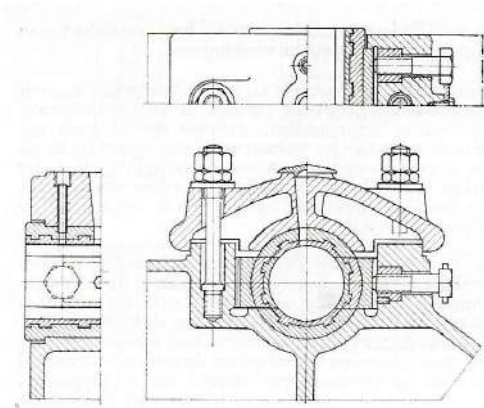
passing smelt de witmetaal voering en wordt de as tijdelijk opgevangen door de onderliggende hardere schaal zonder dat de machine ernstig beschadigd wordt. Het witmetaal werkt in dat geval dus ook als (smelt)veiligheid. Het fenomeen "warmlopen" voltrekt zich, vanwege de lage smelttemperatuur ($\sim 140^\circ \text{C}$) van het witmetaal, in een razend snel tempo en moet daarom onmiddellijk worden opgemerkt dan wel gesignaleerd. De machine moet dan onmiddellijk worden stopgezet en het desbetreffende lager worden vervangen.

Kristalstructuur witmetaal

Algemene constructie aspecten voor kussenblokken

- Een kussenblok moet zo sterk zijn uitgevoerd dat het voldoende weerstand kan bieden aan de krachten die er op werken, zonder dat er schadelijke vormveranderingen optreden.

- Omdat de oppervlakteruwheid van grote invloed is op de slijtage moeten de metalen zo glad als mogelijk zijn bewerkt. Verder moeten zij de tap, rekening houdend met de nodige speling voor een smeeroliefilm, nauwkeurig omsluiten zonder dat plaatselijk hoge vlaktedrukken ontstaan. Ten einde na slijtage de juiste speling weer in te kunnen stellen, maakt men bij onvolkomen smering soms het blok nastelbaar. Een en ander zoals in de doorsnedes van de figuur hiernaast is weergegeven. De metalen moeten op de scheidingsvlakken nauwkeurig op elkaar aansluiten om het wegvloeiën van de smeerolie te voorkomen. De schalen mogen niet om de tap klemmen, zelfs al worden de moeren van de kap abusievelijk te sterk aangehaald.

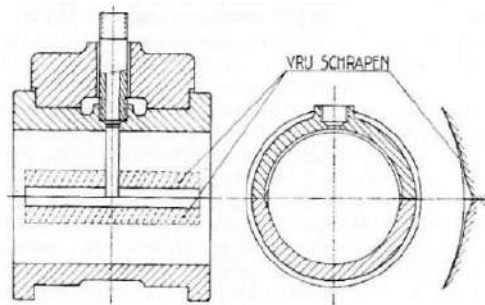


Verstelbaar hoofdlager stoommachine

Om er zeker van te zijn dat de metalen goed op elkaar rusten mag de kap via de metalen op de fundatie rusten. Door gebruik te maken van vulstukken tussen de twee metaalhelften is het mogelijk om de verlangde sluiting op de sluitvlakken te verkrijgen en later de slijtage in de metalen te compenseren zonder de scheidingsvlakken opnieuw te moeten bewerken.

- De metalen mogen niet kunnen draaien of in axiale richting kunnen verschuiven. Het eerste wordt belet door een aangegoten nok van het metaal die met enige speling in de bovenkap past. Deze methode heeft als nadeel dat een deel van het buitenvlak van het metaal niet bewerkt kan worden. Daardoor valt een deel van het steunvlak kleiner uit en wordt de warmteafvoer verminderd. Voor hetzelfde doel bezigt men ook wel pennen, oliepijpjes of aangeschroefde plaatjes. Bij deze constructie is door de constructeur reeds rekening gehouden met de mogelijkheid van de- en montage van de metalen, ook als de as slechts zeer weinig gelicht kan worden. In het ondermetaal zal men dus geen nokken of iets dergelijks aantreffen. Het verschuiven van de metalen wordt belet door kragen aan de einden of in het middengedeelte.
- De olie moet in de metalen worden aangevoerd op plaatsen, waar geen of slechts weinig vlaktedruk heerst. Bij "volkomen" smering zijn dan alleen smeergroeven nodig voor de verdeling van de olie in axiale richting, cirkelvormig of halfcirkelvormig. De groef wordt in het metaal gekotterd, gestoken of gehakt en daarna met een schraapstaal vloeiend bijgewerkt. Eén en ander zoals om de hierna te noemen redenen, in de hiernaast afgebeelde figuur is aangegeven. Van belang hierbij is de juiste plaats en de vorm van de groef. Vooral vroeger werden in dit opzicht fouten gemaakt en hakte men groeven naar plaatsen die hoog belast werden. De door de draaiing van de tap opgebouwde oliefilmdruk valt dan weg, juist op de plaats waar deze het meest nodig is. Verder mag nergens de olie door scherpe kanten van de glijvlakken worden afgeschrapt. Dit is ook de reden voor het vrij schrappen van de oliegroef.

De oliegroef mag overigens niet doorlopen tot de einden van de lagers omdat dan de olie onbelemmerd kan wegvloeien. De plaats van de scheidingsvlakken van de metalen wordt



daarom zo gekozen dat de grootste vlaktedruk niet in de nabijheid hiervan ligt. Het vloeiende verloop van de oliegroeven naar het loopvlak zorgt er tevens voor dat de olie uit de groef gemakkelijk wordt meegenomen door de astap.

Plaats en vorm smeeroliegroef

- De moeren van de kussenblok bouten mag men niet meer dan nodig aandraaien teneinde de kap zo min mogelijk te verbuigen. De moeren worden dus niet steeds door de wrijving tussen de schroefdraad vlakken voldoende vastgehouden en moeten dus worden geborgd. Dit geschiedt gewoonlijk door contramoeren of door een reeds eerder in deze leidraad behandelde Penn'se zekering. Bij ongelijke moerhoogte wordt de hoogste moer bovenop gelegd. Men maakt de bouten zo lang als constructief mogelijk is zodat ze bij voorkomende schokken zoveel mogelijk veren en niet breken. Ook het afdraaien van de bouten tot de kerndiameter van de schroefdraad zorgt voor een gelijkmatige verdeling van de rek en voorkomt breuk. Tapeinden worden bij kussenblokken vermeden ook al om de reden dat ze bij breuk moeilijk te verwijderen zijn. Bij brede kussenblokken brengt men aan weerszijden twee of soms meer bouten aan. Bij gebruik van 4 kapbouten deelt men de kap ook wel volgens een vlak loodrecht op de as in tweeën om scheef aandrukken te voorkomen.
- Gewoonlijk heeft het kussenblok een ontbondene van de reactiekracht evenwijdig aan het scheidingsvlak van de metalen en loodrecht op de hartlijn van de as en is de kap in het blok gepast of grijpt er omheen. De kap moet daarom zo sterk zijn dat zij bij het aandraaien van de moeren en gedurende het bedrijf slechts zeer weinig doorbuigt, anders zou het boven metaal vervormd kunnen worden en de tap warmlopen. De metalen moeten daarom met tot het juiste moment aangehaalde moeren in het werk pas gemaakt worden.

Smering

Bij de diverse kussenblokconstructies van stoommachines of andere werktuigen wordt met de volgende aspecten rekening gehouden:

- Dat voldoende veiligheid bestaat op grond van sterkteberekening, tegen het afbreken, en bij lange assen tegen het doorbuigen van de tap.
- Dat de vlaktedruk tussen de tap en het metaal niet te groot is, dus dat de blokken goed gedimensioneerd zijn. Is P de kracht in kg, die de tap belast, en f het geprojecteerde oppervlak in cm^2 van de tap op een vlak loodrecht op de kracht P , dan is de gemiddelde vlaktedruk:

$$\sigma_o = \frac{P}{f} \text{ [kg/cm}^2\text{]}$$

Voor een cilindrische tap met een diameter van d cm en een lengte van l cm die belast wordt loodrecht op de hartlijn van de as is:

$$f = l \cdot d \text{ [cm}^2\text{]}$$

Constructie glijvlakken	Vlaktedruk kg/cm ²
Gehard staal, lopend op gehard staal	≤ 150
Gehard staal, lopend op brons of witmetaal	≤ 90
Ongehard staal, lopend op brons of witmetaal	≤ 60
Gegoten ijzer, lopend op brons	≤ 30
Staal, lopend op gietijzer	≤ 25
Staal, lopend op pokhout bij watersmering	≤ 25

Tabel voor glijvlakconstructie versus vlaktedruk

Deze gemiddelde vlaktedruk zou alleen dan overeenkomen met de in werkelijkheid optredende vlaktedruk als de druk op het halve oppervlak van de tap overal even groot zou zijn. Dit is echter nooit het geval. Wordt de waarde van σ_o te hoog, dan treedt abnormale slijtage, wrijving en dientengevolge zeer sterke warmteontwikkeling op, zodat er gevaar voor "warmlopen" en "vreten" ontstaat.

- Dat de hoeveelheid warmte, waar het grootste deel van de wrijvingsenergie in wordt omgezet, niet meer bedraagt dan de hoeveelheid warmte, welke terzelfder tijd door het kussenblok en de tap wordt onttrokken. Hieruit volgt dat als het niet anders kan, de warmte op kunstmatige wijze, bijvoorbeeld met de smeerolie moet worden afgevoerd.

Om de wrijving te verminderen tussen de tap of as en de metalen van het kussenblok moet men zorgen, dat er een voldoende hoeveelheid van een passend smeermiddel aanwezig is. Hiervoor gebruikt men tegenwoordig in hoofdzaak een minerale olie. Voor langzaam draaiende of schommelende tappen komt consistentvet in aanmerking.

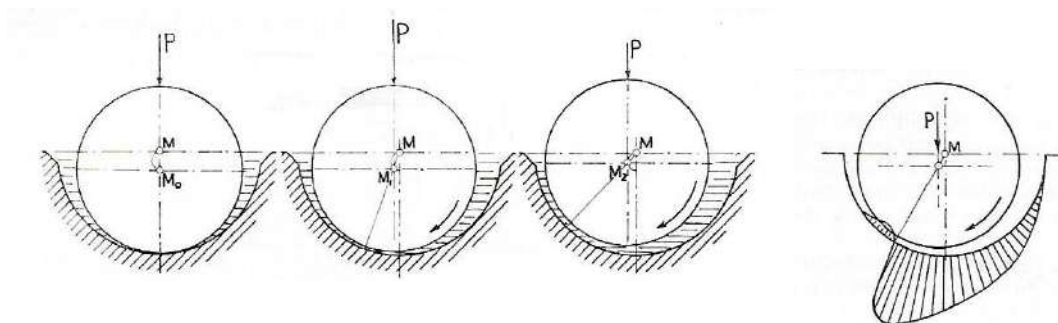
Tussen de tap en het metaal moet dus ruimte zijn voor dit smeermiddel. Een ashals zal dus altijd iets kleiner zijn dan het bijbehorende metaal. Hoe groot deze speling moet zijn is van allerlei omstandigheden afhankelijk. Tegenwoordig zal men zich houden aan de maattolerantie voor een lopende passing, die voor een "lopende passing" bij een diameter van 100 mm een gemiddelde speling van 87 micron oftewel 0,08 mm bedraagt. Deze speling neemt, zoals uit onderstaande formule kan worden afgeleid, ongeveer evenredig toe of af met de derde macht van de diameter.

$$i = 0,45 \sqrt[3]{D} + 0,001 D \text{ [micron]}$$

De tolerantie-eenheid i bedraagt 2,1889 voor een as van 100 mm die, als deze wordt vermenigvuldigd met de basistolerantie 40 welke hoort bij het kwaliteitscijfer 8 voor deze constructies, de eerder genoemde speling van 0,08 mm oplevert. Tegenwoordig kan aan de hand van de belasting, de bedrijfstoestand en de wijze van smering en met behulp van ervaringscijfers de speling nauwkeurig worden berekend.

De assen en de lagers van een groot aantal stoommachines in gemalen zijn gemaakt voordat er een genormaliseerd passingstelsel en nauwkeurige meetinstrumenten bestonden. De metalen in de kussenblokken en tappen werden veelal met behulp van een liniaal, krom- en steekpasser in het werk pasgemaakt. De uiteindelijk gehanteerde speling hing af van de ervaring van de vakman die de machine maakte. Het kan daarom voorkomen dat de ene tap en de bijbehorende lagering van bijvoorbeeld een kruishoofd enkele tienden van millimeters groter is dan het andere. Bij reparaties aan oude stoommachines dient daarmee dan ook terdege rekening gehouden te worden.

Hoe de astap wordt gedragen en hoe de hiervoor benodigde oliefilm tot stand komt en de druk in de oliefilm wordt opgebouwd, wordt geïllustreerd met de onderstaande figuren. De stilstaande as zal aanvankelijk, overdreven voorgesteld, in het ondermetaal rusten zoals in de linker figuur is te zien. Nemen we aan dat de ruimte van de speling geheel met olie gevuld is, en dat aan de tap ook verder olie in overvloed wordt toegevoerd, dan zal de tap als hij gaat draaien door de adhesie en de wrijving olie met zich meevoeren in de wigvormige ruimte tussen tap en metaal. Het gevolg is dat de olie de tap van het metaal licht. De oliefilm draagt de tap en neemt de tap druk op, hetgeen met de tweede figuur van links wordt aangegeven. Hoe sneller de tap draait des te meer olie wordt er meegenomen en des te dikker wordt de oliefilm op de nauwste plaats bij een gelijkblijvende belasting P van de tap. Het hart van de as verplaatst zich volgens een cirkel om het hart van het lager vanuit de positie M_0 via M_1 naar M_2 . Een en ander zoals in de derde figuur van links voorgesteld wordt.



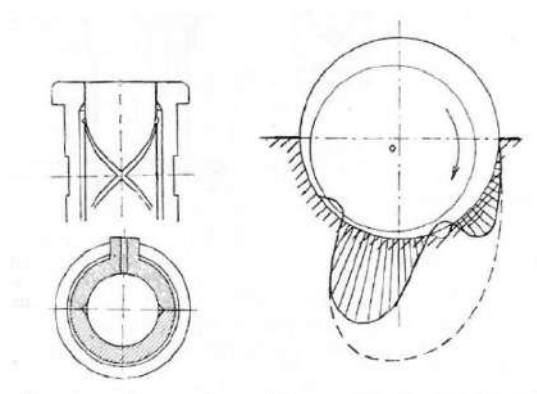
Ligging van de as en druk in de oliefilm

De as, dan wel de belasting hierop, kan door de oliefilm worden gedragen omdat de olie onder druk staat. De rechter figuur geeft het verloop van deze druk bij een draaiende tap aan. Deze straalsgewijs uitgezette druk blijkt in de richting van de draairichting toe te nemen tot dicht bij het nauwste punt. In dat punt is de statische druk nul om daar voorbij, als gevolg van het omzetten van druk in snelheid, zelfs negatief te worden.

De kracht veroorzaakt door de resultante van deze drukken maakt evenwicht met de belasting P van de tap.

Is de beschreven toestand ingetreden dan is er geen contact meer tussen het materiaal van de as en het lager. De enige wrijving die overblijft is die tussen de vloeistoflagen van de smeerolie; immers aan de omtrek van de tap heeft deze de snelheid van de tap terwijl die bij het metaal nul is. Daartussen neemt de snelheid toe van nul naar de omtreksnelheid. We hebben hier dus te maken met vloeistofwrijving. Evenals bij droge wrijving, dus wrijving tussen het as- en lagermateriaal, of vochtige wrijving, een combinatie van droge en natte wrijving, wordt de wrijvingsenergie omgezet in warmte. Deze warmte moet worden afgevoerd.

Uit het voorgaande kan worden afgeleid dat de juiste plaats en de vorm van de oliegroeven in de metalen van groot belang zijn voor de smering en diensgevolge de levensduur van het lager. De oude gedachtegang dat waar de grootste belasting optreedt de smeerolie moet worden toegevoerd is pertinent onjuist en wordt met de hiernaast staande figuur nadrukkelijk geïllustreerd. Het gedeelte waar de olie onder hoge druk is gekomen wordt namelijk door de oliegroef in verbinding gebracht

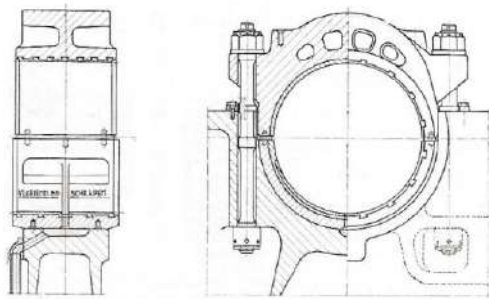


met een gedeelte in het metaal waar de olie onder lage druk staat. De druk bij de oliegroef is dus laag waardoor de olie in de volgende spleet opnieuw onder druk gebracht moet worden. In plaats van de olie toe te voeren aan het te smeren oppervlak voert de groef de olie daarvan af. Het verloop van de druk wordt door het gearceerde gedeelte weergegeven. Als de oliegroef niet zou zijn aangebracht zou de drukopbouw volgens de stippellijn zijn verlopen

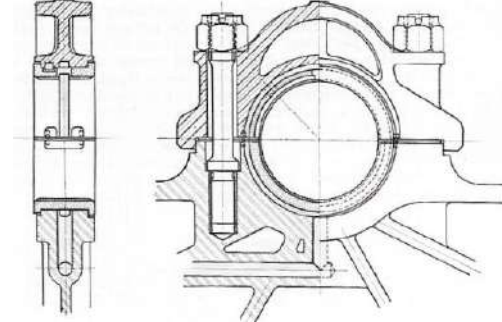
Invloed van verkeerd aangebrachte oliegroef

Onder overigens dezelfde omstandigheden kan als gevolg van oppervlakte vermindering door de olie groeven het kussenblok minder tap druk opnemen. Bij gelijkblijvende tap druk neemt de kans op vochtige wrijving en daardoor slijtage toe.

Bij druksmering leidt een half cirkelvormige groef de smeerolie naar een oliekamer. De tap neemt dan de olie mee naar het dragende deel van het metaal. De groef bij het metaal van het kussenblok, in de linker figuur loopt door het draagvlak en vermindert het dragend vermogen. Zij verbetert echter de olietoevoer achter het nauwste deel van de spleet en verhindert daarmee het toetreden van lucht. Soms maakt men de groef cirkelvormig. De smeerolie onder druk kan dan uit het hoofdblok via een doorboring van de krukas naar het krukpenlager stromen.

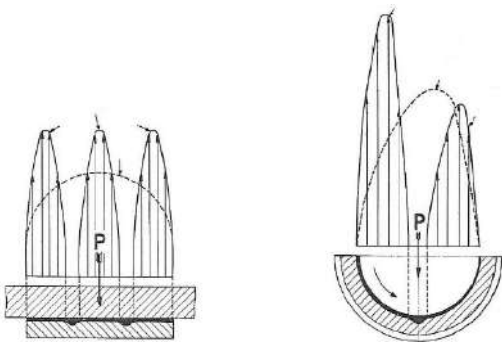


Druksmering via groef in ondermetaal



Druksmering via groef in bovenmetaal

Hier voor is uiteengezet dat als gevolg van de vloeistofwrijving tussen het metaal en de tap er druk wordt opgebouwd in het smeermiddel, welke nul bedraagt waar de olie niet is opgesloten. Met andere woorden aan de einden van de metalen en ter plaatse van de olie-groeven. Op andere plaatsen vertoont het drukverloop een parabolisch karakter, dus zoals in de figuur hiernaast is



Drukverloop tussen oliegroeven

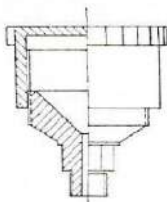
aangegeven. De som van alle drukken maakt evenwicht met de belasting P . Vervallen de oliegroeven dan worden de oliedrukken kleiner en wel ongeveer zo als is aangegeven met de gestippelde lijn, immers de som van deze oliedrukken is weer gelijk aan de belasting P . Het is duidelijk dat de oliegroeven onvermijdelijk tot gevolg hebben, dat de drukken in de oliefilm aanzienlijk toenemen naarmate het loopvlak verder verdeeld is door deze groeven

Smeermethodes voor lagers en geleidingen

Voor het smeren van lagers en geleidingen is in de loop der tijd een aantal methodes ontwikkeld. Van een aantal hiervan wordt hierna de toepassing in samenhang met het smeermiddel, en de werking uiteengezet

Vetsmering

Voor de smering van glijblokken gebruikt men behalve smeerolie ook wel Consistentvet. Dit vet kan door het aanschroeven van het deksel van de vetpot of door middel van een pompbeweging van de vetspuit met een daartoe in het machinedeel bevestigde nippel op de as worden gebracht. Ook

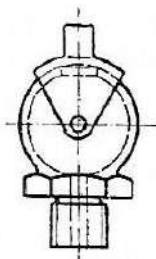


Stauffer vetpot

worden vetpotten toegepast, waaruit het vet doormiddel van een door een veer aangedrukte zuiger op de as geperst wordt. Als het reservoir leeg is moet bij deze systemen het vet handmatig worden bijgevuld. Deze smering wordt slechts toegepast voor machinedelen die langzaam of slechts nu en dan draaien. De smerpunten zijn afhankelijk van regelmatige bediening en moeten te allen tijden goed en op een veilige manier bereikbaar zijn.

Oliesmering

Bij kleine machinedelen, bijvoorbeeld stangen die in een slingerende beweging zijn, wordt vaak voor oliesmering van de tappen een oliepotje gebruikt zoals hier onder is afgebeeld. De olievoorraad

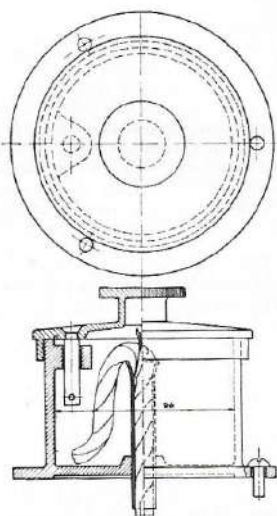


moet met een olie-spuitkan regelmatig worden bijgevuld. Het cilindervormige reservoirtje is met een verdraaibaar deksel afsluitbaar, zodat geen stof of andere ongerechtigheden kunnen toetreden.

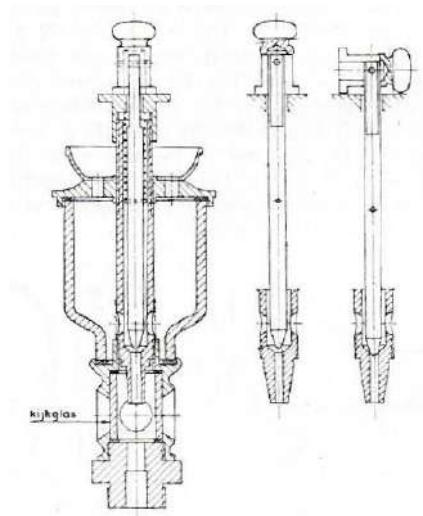
Als de tappens grotere afmetingen hebben dan is de olievoorraad te klein en wordt een meer geautomatiseerde smering toegepast zoals door middel van een lampenkatoen (petroleumlamp) waarvan op deze bladzijde een voorbeeld wordt gegeven.

Klein smeeroliepotje

Voor deze oliepot geldt dat deze op een goed toegankelijke plaats moet staan opgesteld om het met een oliekan bij te kunnen vullen. Het katoentje hangt in de olie en zuigt deze op als gevolg van de capillaire werking van het katoen, en laat deze druppelsgewijs los op de as. Het katoentje werkt als hevel terwijl de dikte van de streng en de hoogte van het olieniveau ten opzichte van het einde van de streng bepalend zijn voor de hoeveelheid olie die aan het metaal wordt toegevoerd. Deze smering is eenvoudig maar heeft het nadeel dat de olietoevoer door het na verloop van tijd verharren van de olie minder wordt. Ook kan de streng vervilt als het einde hiervan over de as strijkt. Als dit niet wordt opgemerkt zal de as drooglopen. Voor de controle op de olievoorraad en het bijvullen moet het deksel op de pot iets gelicht en verdraaid worden. Een en ander vereist permanente aandacht van de dienstdoende machinist.



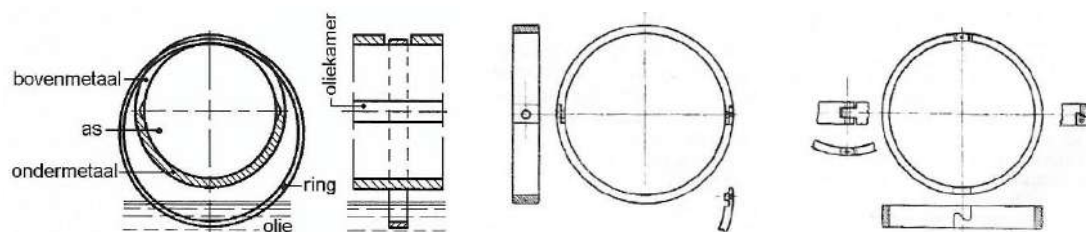
Oliepot met lampenkatoen



Druppel-oliepot

De stoommachines die we in gemalen tegenkomen zijn vaak uitgerust met de druppel- oliepot zoals in de rechter figuur hierboven is afgebeeld. Is de naald in de hoogste stand van de zitting gebracht dan stroomt olie uit de glazen voorraadpot via een fijn messing-gaasje via enige openingen in de standbuis tussen naald en zitting door naar het lager. Door de naald met behulp van de schroefdraad op het einde van de stand buis met de stelschroef hoger of lager te stellen kan men het aantal druppels olie per tijdseenheid regelen. Een kijkglasje beneden in de oliepot biedt de mogelijkheid de druppels te tellen. Met deze oliepot is goed zicht mogelijk op de olievoorraad en de toevoer naar het lager. De naald wordt met een spiraalveer in de richting van de zitting gedrukt. Als de machine buiten bedrijf wordt gesteld kan door het lichtmechanisme bovenop de naald te knikken de olietoevoer naar het lager worden afgesloten en treedt geen olieverlies op. De oliepot wordt aan de bovenzijde afgesloten door een komvormige vizierschijf. Om het reservoir bij te kunnen vullen moet eerst de kom zover worden verdraaid dat de boringen in de kom en de grondplaat tegenover elkaar komen te liggen.

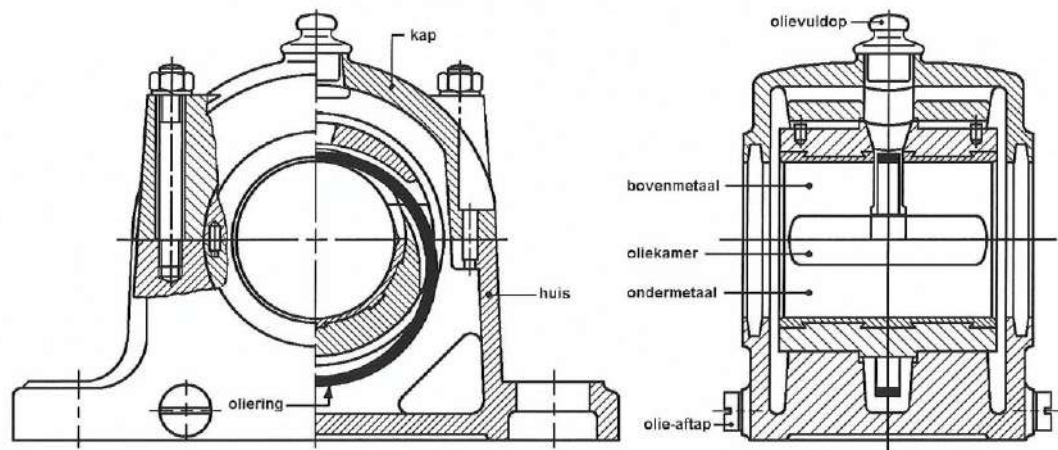
Bij een aantal museale stoominstallaties van gemalen zijn de kussenblokken uitgerust met ringsmering. Men onderscheidt hierbij smering met een losse om de as gedrapeerde ring of ketting en die waarbij een deelbare ring vast op de as wordt geklemd. De losse ring sleept op de as en wordt door de wrijving meegenomen waarbij hij olie uit het onderliggende reservoir meeneemt naar de bovenkant van de ashals. De olie wordt dan door oliegroeven over de gehele taplengte verdeeld.



Principe ringsmering

Olieringen uit twee delen

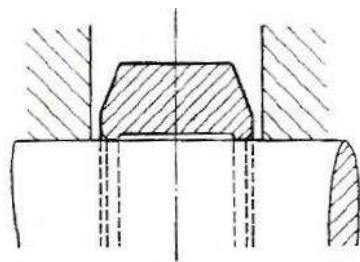
De olieringen worden van gietijzer, staal of messing gemaakt. De ringen worden soms uit één stuk maar meestal uit twee delen gemaakt om ze te kunnen vervangen zonder de as te hoeven lichten. De wijze waarop de delen zijn samengevoegd is in de bovenstaande figuren aangegeven. Om het gevaar te vermijden dat de ring aan de zijken van de sponning blijft kleven, geeft men de ringdoorsnede wel afgeronde hoeken of een trapeziumvorm waardoor tevens het aflopen van de olie wordt bevorderd. Ook wordt voor dit doel wel een klein nokje aan de sponningranden gegoten.



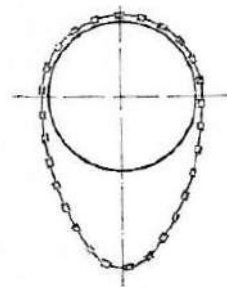
Kussenblok met ringsmering

Voor langzaam draaiende assen en voor assen met een kleine middellijn wordt de oliering uitgevoerd volgens de linker figuur op de volgende bladzijde. Deze ring loopt op slechts twee zeer smalle ringoppervlakken zodat de druk tussen ring en as is verhoogd waardoor deze minder slijpt en een grote olieopbrengst wordt bereikt.

In plaats van een ring wordt ook wel een olieketting toegepast. Hierdoor kan het blok smaller worden uitgevoerd hetgeen de sterkte van de constructie ten goede komt. Deze methode heeft als nadeel dat de ketting door korstvorming van de olie stijf kan worden, de as onder de ketting doordraait en het blok droogloopt. Men kan dit voorkomen door op gezette tijden de ketting los te nemen en uit te wassen in petroleum of wasbenzine.

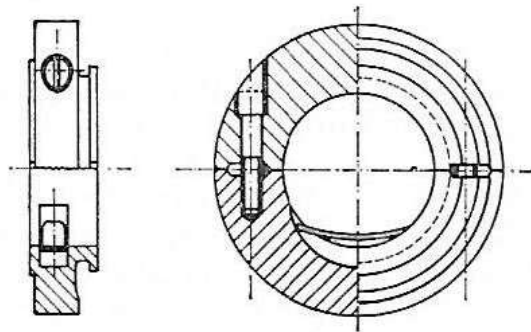


Oliering met randen



Olieketting

De onderstaande figuur laat een voorbeeld zien van een vaste oliering. De ring bestaat uit twee delen die met schroeven aan elkaar zijn vastgemaakt en met een bladveer tegen de as wordt gedrukt. De oliering wordt aan het uiteinde van de metalen geplaatst. Het draagvlak van de metalen

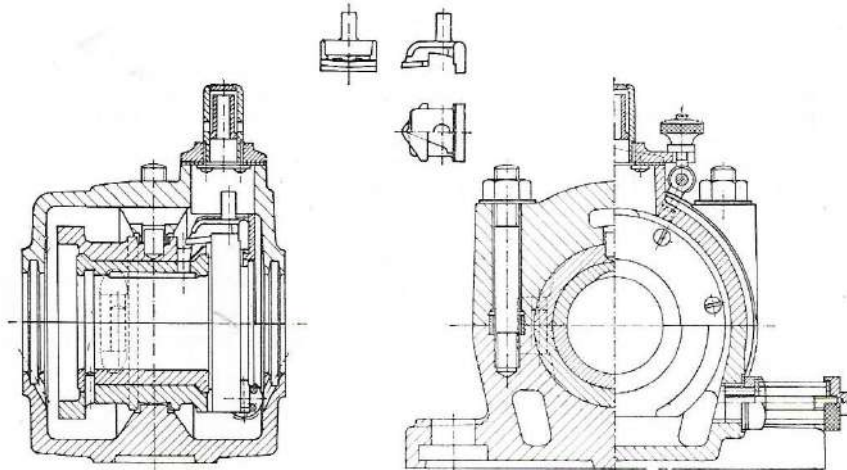


wordt, voornamelijk in de bovenkap, dus niet onderbroken hetgeen met het oog op de draagkracht van de oliefilm en dus het lager van belang is. Bovenop de oliering rust een olieschraper. De door de ring opgevoerde olie wordt tegen de wand, die ten opzichte van de as scheef is opgesteld, van deze schraper opgestuwd en zijwaarts afgeleid. Ze stroomt vervolgens in de toevoer opening van de oliekamer, die zich bevindt in het bovenmetaal,

midden boven de as.

Vaste oliering

De vorm van de oliekamer bevordert de toevoer van de olie in de speelruimte tussen as en metalen. De oliefilm die zich in deze speelruimte vormt komt in het bijzonder daar, waar de as tegen de metalen wordt gedrukt en deze niet door smeergroeven onderbroken is. Is de tapdruk naar boven gericht dan zal de oliekamer aan de onderzijde van de metalen worden aangebracht en de olie om de schaal heen hier naar toe worden geleid.



Kussenblok met vaste oliering

Boven de schraper bevindt zich een controle-opening met deksel. Aan de zijde van de oliering is voor de afdichting een plaat aangebracht in de vorm van een halve ring. De doorgangen van de as door de blokken zijn door middel van viltringen stofdicht afgesloten. De viltringen beletten ook het uittreden van de olie in enige mate. Tegenwoordig worden hiervoor al of niet in combinatie met de viltringen, speciale oliekeerringen gebruikt. Deze worden met Simmerringen aangeduid.

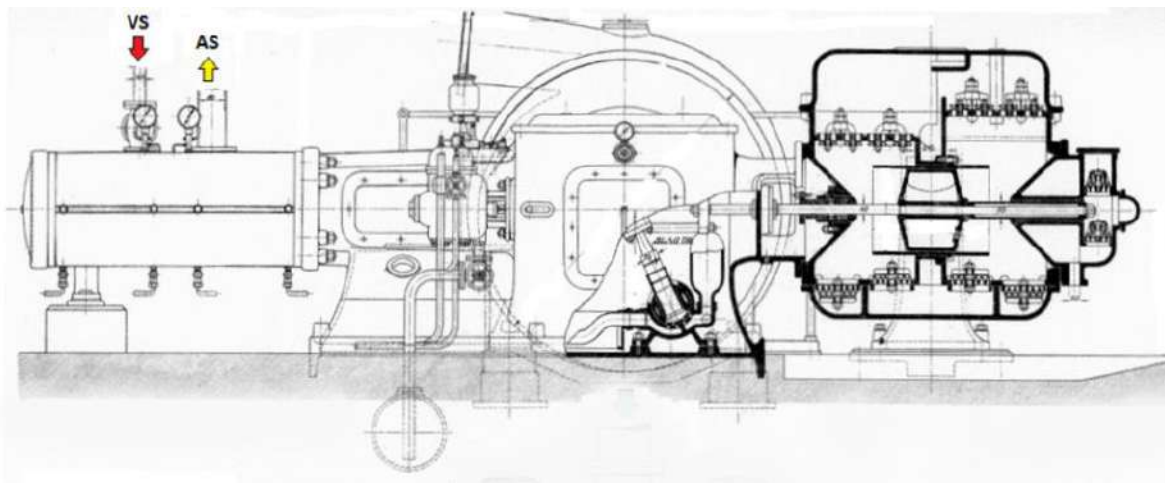
De vaste olieringen worden voor langzaam lopende assen of bij dik vloeibare oliesoorten toegepast. In deze gevallen zou een losse ring of ketting een onvoldoende hoeveelheid olie opbrengen.

De ringsmering geeft ten opzichte van andere hiervoor besproken smeermethodes met verbruikssmering een grote besparing. Bovendien is deze smering buitengewoon zindelijk. De olie die aan de einden uit de metalen lekt, vloeit weer terug in het oliereservoir, bezinkt daar en wordt opnieuw ingezet. Het bezinksel in de oliereservoirs moet op gezette tijden worden verwijderd. De reservoirs moeten daarbij gereinigd worden door ze uit te spoelen met een speciale dunne oliesoort. Het laagste deel van het kussenblok is daartoe voorzien van een aftap plug of -kraantje.

Druksmering

Bij sommige installaties worden de kussenblokken en in het verlengde daarvan de krukpen en de smerpunten van het kruishoofd onder druk gesmeerd. Ook bij kleine compact samengebouwde stoom- machines, bijvoorbeeld blaasmachines, wordt bij de lagers druksmering toegepast. Meestal wordt de smering onder druk verkregen door de fundatie van de machine in te richten als opvangbak en oliereservoir en daarin een door de machine zelf aangedreven plunjer- of tandwielpompe onder te brengen die via filters en eventueel een oliekoeler de olie naar de verschillende smerpunten voert. De olie stroomt dan uit de lagers terug in de opvangbak. De machine moet dus (spat)oliedicht zijn uitgevoerd. De persdruk van de pompe wordt geregeld met behulp van een veiligheid en bedraagt tussen de 1 ... 1,5 kg/cm². Met behulp van een manometer kan de druk worden ingesteld en tijdens bedrijf worden gecontroleerd. De in de persleiding opgenomen veiligheid zal bij in goede conditie verkerende lagers de olie-overmaat terug storten in het reservoir. Ten gevolge van slijtage van de lagers zullen deze steeds meer olie doorlaten en zal de gewenste persdruk niet bereikt worden. Dit betekent dat de kussenblokken te veel speelruimte hebben of dat de pompe defect is. Meestal wordt bij druksmering naast de door de machine gedreven pompe, een eenvoudige handpompe toegepast. Met deze handpompe, bijvoorbeeld een vleugelpompe, moet bij het opstarten van de installatie de machine worden voorgesmeerd. Deze handpompe kan ook worden gebruikt om lekkages in het smeersysteem of defecte lagers op te sporen.

Sommige stoommachine-installaties zijn uitgerust met een apart opgestelde verzameling van hulpwerktuigen die door een kleine stoommachine worden aangedreven. In geval van druksmering is de smeroliepompe voor de lagers van de hoofdmachine en het smerolie reservoir ondergebracht in deze hulpinstallatie.



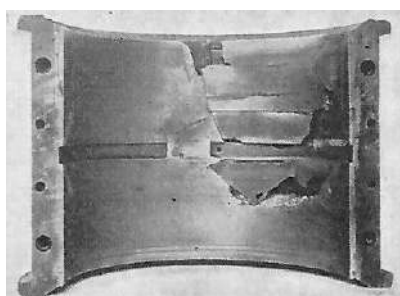
Hulpwerktuigen opstelling in D.F. Woudagemaal

In de figuur op de voorgaande bladzijde is in het midden van de krukkast de schuin opgestelde plunjerpomp voor de lagers van de Jaffa hoofdmachine van het Woudagemaal te zien.

De plunjer van de pomp is met een excentriek gekoppeld aan de krukas en maakt met het cilindrische en draaibare pomphuis een oscillerende beweging. De toe- en afvoer van de pomp wordt geregeld door de schuifwerking van de beweegbare kop van het pomphuis. Deze plunjerpomp heeft dus geen kleppen en is daardoor minder onderhoudsgevoelig. De luchthelm om de drukgolven van de pomp af te vlakken is in de krukkast ondergebracht, die tevens dienst doet als opslag voor de smeerolie voorraad.

Witmetaal lagervoeringen vernieuwen

Onvermijdelijke slijtage aan lagers en schade als gevolg van warmlopen en falende smering



noodzaken de gebruiker van de machine de metalen te vernieuwen. Ook schade aan het draagvlak van de metalen veroorzaakt door het op een onjuiste manier ingieten leidt vroeg of laat tot vervanging hiervan. De metalen moeten daartoe uit de machine genomen worden en opnieuw worden ingegoten en pasgemaakt. Hierbij moeten de originele maat-toleranties en bewerkingswijze in acht genomen worden.

Beschadigd krukpenmetaal

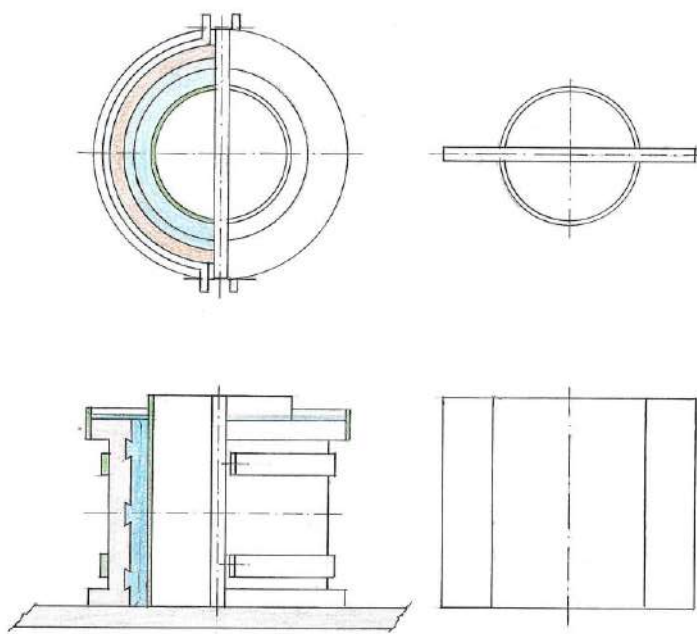
De meeste van de stoommachines en daarvan de lagerconstructie van museale gemaal-installaties zijn vaak met zeer eenvoudige hulpmiddelen zoals krom- en voetjespasser gemaakt. Het inzicht maar bovenal het vakmanschap met betrekking tot het ingieten en pasmaken van lagers, zo blijkt uit terugkerende schadegevallen, is in een aantal praktijkgevallen niet te ondervangen door moderne en uiterst nauwkeurig werkende bewerkingsmachines. Daarom een opsomming van

aandachtspunten in deze leidraad met betrekking tot het vernieuwen van witmetaal- of Babbitt-lagers, op de oude en beproefde wijze.

Vorbereidende werkzaamheden

- Het defecte lager moet uit de machine worden genomen en voor zover dat bij eerdere reparaties niet is gebeurd op onderdeel-niveau en positie worden gemarkeerd met slagletters en of -cijfers. Ook moet, voor zover niet beschikbaar, een tekening worden gemaakt van het lager en de as of de pen waarbij de as- of pendiameter, de hartmaat van de boring en de lengte van het lager nauwkeurig in kaart moeten worden gebracht. Bij het inmeten van het lager moet ook aandacht worden besteed aan een eventuele scheefstand van lageronderdelen als gevolg van bewerkingson nauwkeurigheden uit het verleden. Niet zelden werd in het verleden zo'n scheefstand gecompenseerd door het metaal ook scheef te bewerken. Bij het vervaardigen van een nieuw lager zal dan dezelfde afwijking moeten worden aangebracht.
- Als gevolg van vreten kan de as ter plaatse van het lager beschadigd zijn. Ook kunnen rondgaande ribbels, als gevolg van voortdurende slijtage op de as zijn ontstaan. De as moet dan ter plaatse worden opgezuiverd met behulp van een zoetvijl en schuurlijnen. De omgeving van de te bewerken as of pen moet bij die bewerking zorgvuldig worden afgedekt met pluïsvrije poetsdoeken om te voorkomen dat ijzervijzel in het smeersysteem of op andere ongewenste plaatsen terecht komt.
- De uit twee delen bestaande lagers of schalen moeten vervolgens uit elkaar genomen worden en leeggehaald worden door middel van draaien of kotteren. Hierbij zorgt men ervoor dat de vertinde laag niet, dan wel zo min mogelijk, aangetast wordt. Ook het witmetaal in de zwaluwstaartvormige sponningen moet zorgvuldig worden geruimd. De bewerkingsmachines die voor het leeghalen worden gebruikt moeten voorafgaand aan de bewerking zorgvuldig zijn schoongemaakt en ontdaan van draaikrullen en spanen van andere materiaalsoorten. Het bij het leeghalen vrijgekomen witmetaal kan opnieuw worden gebruikt bij het ingieten van de nieuwe metalen.
- Het leeggehaalde en opnieuw te gieten lager moet met betrekking tot de vlakken waarop het metaal moet hechten zorgvuldig worden schoongemaakt. Met name olie- of vetresten moeten door afbranden en of beitsen verwijderd worden. Voor het beitsen kan verdund zoutzuur (HCl) worden gebruikt. Hiervoor verdunt men 5 liter zoutzuur (HCl) met 1 liter water (H₂O).
- Voor een goede hechting van het witmetaal aan de schaal moet deze voor het gieten worden vertint dan wel de eventueel beschadigde tin laag worden bijgewerkt. Gietijzeren schalen die zich minder makkelijk laten vertinnen zijn voor dit doel vaak gegalvaniseerd oftewel van een zinklaag voorzien. Kleine beschadigingen van deze verzinkte laag kunnen door middel van vertinnen hersteld worden.
- Het vertinnen gebeurt met zuurvrij soldeerwater en strooi-tin of soldeertin, respectievelijk in de vorm van korrels of platte stangen. Het soldeerwater kan men bereiden door:

- a) een $\frac{1}{2}$ kg ammoniumchloride, salmiak, (NH_4Cl , wit kristallijn poeder) op te lossen in een $\frac{1}{2}$ l water;
 - b) 1 kg zinkchloride (ZnCl_2 , wit poeder) op te lossen in een $\frac{1}{2}$ l kokend water;
 - c) deze mengsels bijeen te voegen;
 - d) nog 2 liter zuiver water bij te mengen
- Voor het vertinnen wordt de te vertinnen schaal met een schone kwast met soldeerwater bestreken en worden de bestreken oppervlakken met strooi-tin bedekt. Men legt vervolgens de lagerschaal zolang met de rug op een matig brandend smidsvuur, dat het strooi-tin begint te smelten. Afhankelijk van de tin - loodverhouding van het te gebruiken zachtsoldeer ligt dit tussen de 213 en 230° C. De schaal of het blok wordt uit het vuur gehaald en het te vertinnen oppervalk met een staalborstel uitgeborsteld. Er ontstaat dan bij goede hechting een mat zilverkleurig oppervlak. Het verwarmen kan uiteraard ook in een oven of tussen vuurvaste stenen met een gasgestookte warmstookbrander. Plaatsen waar het tin onvoldoende hecht moeten schoon worden geschraapt en opnieuw worden vertint. Hierbij is het gemakkelijker om gebruik te maken van een brander en stangen tinsoldeer. Na het vertinnen moeten de blokken of schalen met schoon water worden afgespoeld of 12 uur in kalkwater worden gelegd om alle zuren te verwijderen c.q. te neutraliseren zodat deze het materiaal van de schalen of lagerblokkenmetalen niet aantasten.
 - De metalen worden met de lange zijde in verticale positie gegoten. Bij het gieten wordt gebruik gemaakt van een uit staal vervaardigde mal. Een en ander zoals in de figuur hier onder is aangegeven.



Gietopstelling en mal voor witmetaal lagerschalen

De mal, bestaande uit een in langsrichting doormidden gezaagde stalen buis en een stalen plaat ter dikte van de vulling van de lagers die aan elkaar zijn gelast, wordt tussen de uitgehaalde en vertinde lagerhelften geklemd. Voor het samenvoegen van de helften zijn hier kapbeugels getekend, maar hiervoor kan natuurlijk ook de originele boutconstructie van het lager of ketelklemmen worden gebruikt. Aan de bovenkant wordt rondom het lager nog een band gespannen om een kleine overvloed aan metaal af te kunnen gieten om het nazuigen ten gevolge van krimp te compenseren. De uitstulping die op deze wijze ontstaat wordt bij het bewerken van het lager verwijderd. Hiermee worden de eventuele slakken en andere lichte verontreinigingen buiten het uiteindelijk bewerkte metaal gehouden.

Gietvoorschriften

- Het smelten van legeringen dus ook van witmetaal gebeurt bij voorkeur in een met een deksel afgedekte kroes om nadelige verontreinigingen uit de brandstof te voorkomen. De smeltkroes,



gemaakt van een mengsel van grafiet en vuurvaste klei, en de ijzeren gietlepel moeten voor gebruik van eventuele slakken en metaalresten worden ontdaan. Kleinschalig gietwerk gebeurt meestal in een gasgestookte kachelvormige oven waarbij het witmetaal in een bij passende gietijzeren gietpan wordt gesmolten.

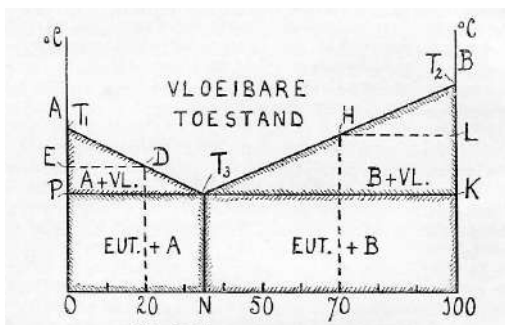
Voorbeeld kleine oven met gietpan

- Het witmetaal in de vorm van schuitjes, broodjes en draaikrullen uit leeggehaalde oude dan wel nieuwe bewerkte lagers moet op een matig vuur zolang worden verhit tot het dun vloeibaar is. In oude vakliteratuur wordt de vloeibaarheid vergeleken met afgeroomde melk. Bij gietwerk van metalen wordt dit meestal tussen 150 - 200° C boven de smelttemperatuur van het toegepaste metaal verwarmd. Deze temperatuur verschilt om de volgende redenen van metaal tot metaal.

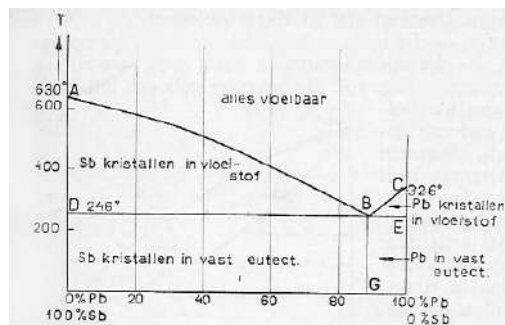
Bij legeringen, een mengsel van verschillende metalen en soms ook niet-metalen, is de ene stof in oplossing bij de andere stof en heeft daarom geen vast smeltpunt. Deze temperatuur is afhankelijk van de samenstelling en kan, zoals hierna wordt aangetoond, beduidend lager liggen dan die van de afzonderlijke smeltemperatures van de bestanddelen van het te gieten witmetaal.

Met het hierna afgebeelde toestandsdiagram kan een voorstelling worden gemaakt hoe het smeltpunt van een legering wordt beïnvloed. Het diagram is eenvoudshalve getekend voor twee willekeurige metalen, het metaal A met het smeltpunt T_1 en metaal B met het smeltpunt T_2 . Op de horizontale as zijn de gewichtsprocenten van de stoffen aangegeven en op de verticale as leest men de temperatuur af. Voegt men aan het metaal B gaandeweg het metaal A toe dan zal het smeltpunt dalen. De temperatuurdaling wordt aangegeven door de lijn $T_2 H$. Bestaat de legering bijvoorbeeld uit 70% metaal B en 30% metaal A, dan geeft het punt H loodrecht boven de 70 het punt aan waarbij het stollen begint. Bij L leest men dan de temperatuur af. In dit punt gaan deeltjes van de stof B over in vaste toestand, terwijl in de overgebleven vloeibare rest het gehalte van het metaal A toeneemt.

Gaat men uit van het metaal A en voegt men daaraan meer en meer toe van het metaal B dan daalt ook daarvan het smeltpunt. Het verloop van die temperatuurdaling wordt weergegeven met de lijn $T_1 D$. Bestaat de legering bijvoorbeeld uit 20% metaal B en 80% metaal A dan geeft D loodrecht boven de 20 het punt aan waar het stollen begint. De temperatuur leest men af bij E. In dit punt gaan deeltjes van A over in vaste toestand terwijl in de overgebleven vloeibare rest het gehalte van het metaal toeneemt.



Toestandsdiagram willekeurige legering



Toestandsdiagram antimoon(Sb) - lood(Pb)

De doorgetrokken lijnen $T_1 D$ en $T_2 H$ zullen elkaar snijden in een punt T_3 . Trekt men hier de loodlijn $T_3 N$ dan geeft N het aantal procenten van het metaal B aan. Het gehalte van het metaal A is dan $(100-N)\%$.

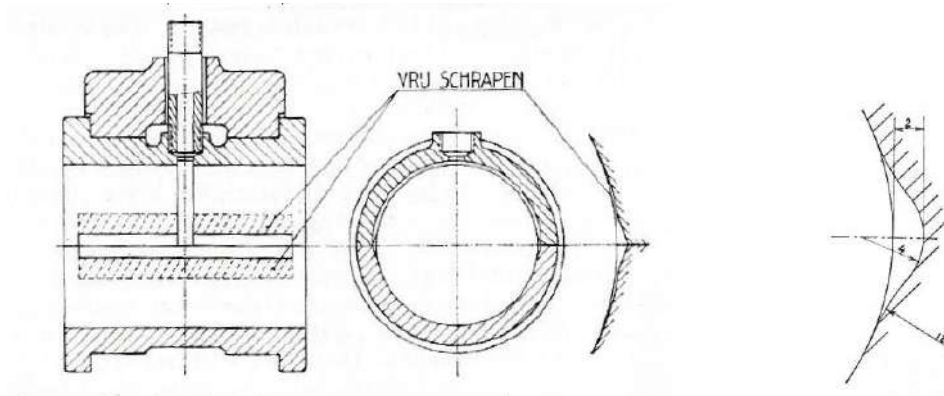
Bij het punt T_3 gaat het mengsel geheel in vaste toestand over. Men noemt T_3 het eutectische punt en de legering een eutectische samenstelling. Een voorbeeld van de enkelvoudige legering van lood en antimoon als bestanddeel van de meervoudige legering witmetaal wordt in de rechter figuur hierboven gegeven. In het diagram is te zien is dat het mengsel van ongeveer 12% antimoon en 88% lood met een smeltemperatuur van respectievelijk 630°C en 326°C , leidt tot een stollings- smeltemperatuur van 246°C .

- Voor gieten moet met behulp van de tekening van het lager met een mal het volume en aan de hand daarvan het gewicht aan gietmateriaal worden bepaald. Hierbij moet rekening worden gehouden met gietverlies bij het afschenken van de slakken en de extra hoeveelheid gietmateriaal dat bij het model wordt geschonken voor de krimp. De smeltkroes wordt hiermee zover mogelijk gevuld en vervolgens in de oven geplaatst. Kan de kroes niet in één keer worden gevuld dan voegt men het resterende materiaal later toe. De snelheid waarmee het later toegevoegde materiaal smelt is een maat voor de hoogte van de temperatuur van het gesmolten materiaal. Om het oxideren tijdens het smelten tegen te gaan moet het metaalbad steeds met houtskoolpoeder worden bedekt.
- Voor het uitgieten moet het metaalbad met een houten spatel goed worden omgeroerd. Soms beveelt men een dikke groene tak aan om te roeren. Als het hout daarbij vlam vat is dit een bewijs dat de juiste giettemperatuur is bereikt.
- Het samengestelde lager wordt op een dikke en vrij-opgestelde staalplaat geplaatst. De mal en eventueel andere delen die niet aan het witmetaal mogen hechten worden met water aangelengd grafiet bestreken. Deze onderdelen kunnen, en met hetzelfde effect, ook beroet worden met een sterk gereduceerde gasvlam. Omdat het gietmateriaal dun vloeibaar is, moeten alle reten en kieren met behulp van klei worden dicht gemaakt. De klei moet voor het gieten met een vlam drooggestookt worden zodat tijdens het gieten geen stoom of een ander gas in het gietwerk kan worden opgesloten. De dikke staalplaat helpt om de warmte gelijkmatig te verdelen.
- Voor het ingieten moeten de kussenblokken tot een temperatuur van ongeveer 230° C worden voor- gewarmd. Bij de aangegeven temperatuur begint de vertinde laag in de schalen te zweten hetgeen is waar te nemen doordat de dof geborstelde laag begint te glinsteren. Evenals bij het vertinnen moet er hierbij op worden toegezien dat dit langzaam en gelijkmatig gebeurt om geen warmtespanningen in de blokken te creëren. De dikke staalplaat helpt hierbij om de warmte gelijkmatig te verdelen.
- Het gieten zelf gebeurt door om de smeltkroes een klembeugel aan te brengen en deze met behulp van een verrijdbare kraan uit de oven te lichten en boven het te gieten voorwerp te brengen. De klembeugel is aan beide zijden voorzien van een stang met twee handvatten waarmee de kroes kan worden gekipt. Bij het gieten moet worden voorkomen dat er lucht wordt ingesloten; bijvoorbeeld door het vloeibare metaal via een stalen gootje naar de bodem van de gietholte te leiden. Verder moet het uitgegoten metaal aan de oppervlakte het langst vloeibaar worden gehouden om bij het stollen, en dus krimpen van het metaal, te kunnen nagieten. Dit kan men bereiken door het te gieten voorwerp tussen vuurvaste stenen op te stellen en deze stenen mee voor te warmen. Verder bij het gieten tocht te vermijden. De eventueel gevormde luchtinsluitingen kunnen worden verwijderd door een voorverwarmde ijzeren staaf in de vloeibare massa op en neer te bewegen, het zogenoemde pompen.

- Bij grote kussenblokken mag het volgieten met witmetaal niet ineens plaatsvinden. Om een gelijkmatig en volkomen dicht gietwerk te verkrijgen, moet men eerst een laag van ongeveer 5-10 cm ingieten en zoals hiervoor is aangegeven met een goed verwarmde ijzeren staaf net zolang pompen, tot alle luchtbellens verwijderd zijn. Het ingieten kan nu met een regelmatige straal plaats vinden en zal versneld moeten worden, als uit het pompen met de ijzeren staaf blijkt dat het vast worden van het metaal begonnen is.
- Om het metaal de nodige hardheid en sterkte te geven, verdient het aanbeveling het ingegoten metaal snel af te koelen. Deze afkoeling kan het beste geschieden door het gegoten blok op een natte doek of jutezak te plaatsen en in zijn geheel onder te dompelen in een waterbad. Bij grote lagers wordt weleens het loopvlak verdicht waardoor grotere sterkte wordt verkregen. Het verdichten gebeurt door voor de laatste bewerking, dus na het ruwe voordraaien of kotteren, het loopvlak minutieus met een bolhamer te bekloppen. De bankwerker gebruikt hiervoor in elke hand een niet al te zware bolhamer. Het aldus gebutste oppervlak wordt bij het op maat maken van de schalen weggedraaid dan wel gekotterd en geschraapt.
- Nadat het gietstuk voldoende is afgekoeld kunnen de helften door het losnemen van de kapbeugels worden gescheiden en de mal eruit worden genomen. Hierbij moet men er op letten dat er geen stukken metaal uit het verse gietwerk worden getrokken. Het gietwerk moet dan visueel worden gecontroleerd op slak- of luchtinsluitingen. Men kan ook met een hamer tegen het metaal tikken en aan de hand van het geluid de kwaliteit van het gietwerk vaststellen; een goed ingegoten lager zal helder klinken.

Pasmaken lagers

- Na het verwijderen van eventueel uitgelopen gietmateriaal moeten de pasvlakken met een vijl worden glad gemaakt, de vulstukken worden aangebracht en het lager worden samengesteld en opgespannen op de draaibank of kotterbank. Hierbij moet de gewenste hartlijn, met behulp van de tekening van het lager, nauwkeurig worden ingesteld. Het lager moet vervolgens met inachtnaam van de gewenste speling nauwkeurig en glad worden bewerkt. Het gebruik van schuurpapier is hierbij niet toegestaan. Bij voldoende ruim bemeten lagers kunnen na deze bewerkingsgang met een ritsbeitel ook de smeergroeven worden aangebracht.
- Na de voorgaande bewerking wordt het lager uiteengenomen, worden de eventuele dichtgelopen smeerolie gaten uitgeboord en de smeeroliegroeven, voorzover nog niet machinaal aangebracht, door middel van hakken aangebracht en met een schraapstaal bijgewerkt zodat er geen scherpe randen meer aanwezig zijn.



Voorbeeld van vrij-schrappen oliegroef en vorm van de oliegroef

Voor het hakken van oliegroeven gebruikt men een half rond geslepen ritsbeitel. Voor het pasmaken en vrij-schrappen van de oliegroeven gebruikt men bij lagers met een relatief kleine diameter en dus klein te bewerken oppervlak meestal een schraapstaal in de vorm van een driehoek of lepel. Bij grote lagers maakt men gebruik van een relatief lang getordeerd mes. De schraper wordt gemaakt van een 3 – 4 mm dikke plaatstrook van gereedschapsstaal, dat voordat het getordeerd wordt in een rechte hoek is gezet. Door de hoek die het mes heeft krijgt deze twee snijkanten en buigt zij niet door tijdens gebruik. Beide snijkanten worden met behulp van een speciale opspaninrichting op een bepaalde cirkeldiameter geslepen. Door de spiraalvorm van de schraper wordt een uitstekende snijdende werking verkregen en kan in één beweging een groot vlak worden bestreken.

Het ene been van het mes wordt gebruikt als handvat bij het schrappen waarbij er op gelet moet worden dat men zich niet verwondt aan de scherpe rand.



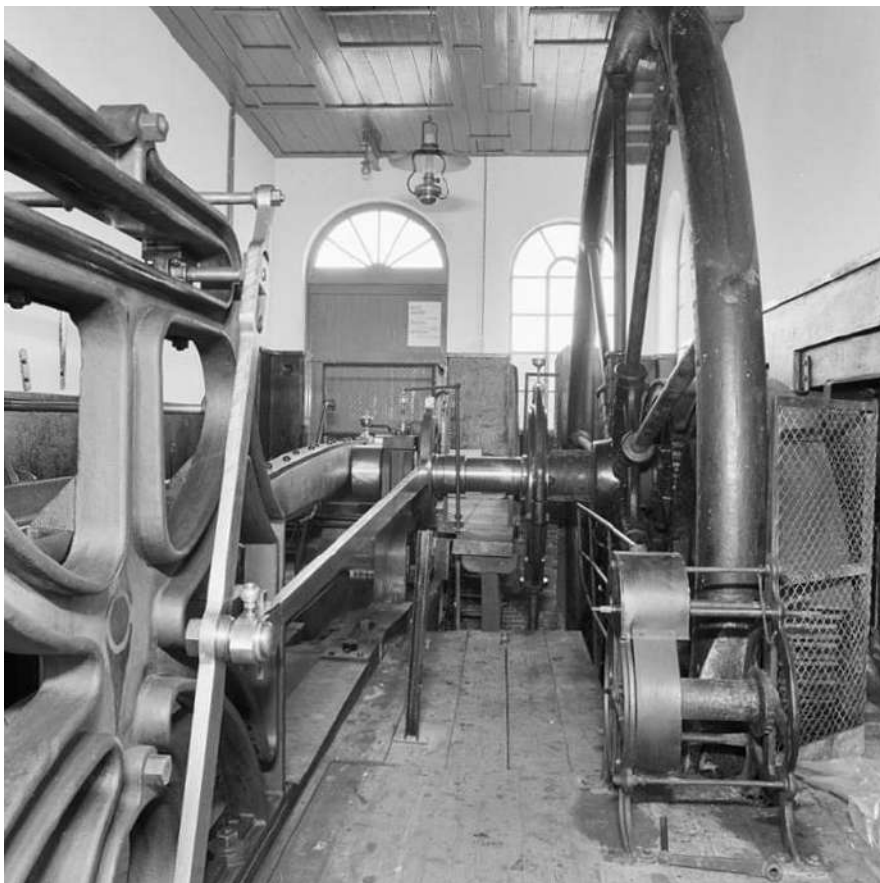
Voorbeelden van een ritsbeitel en schraapstalen voor het bewerken van metalen

- Vervolgens wordt het lager in het werk pas gemaakt. Hiertoe plaatst men eerst het onderlager met de voorbereikte schaal in de machine, en smeert het zichtbare deel van de ashals in met Pruisisch-blauw (blauwe kunstschildersverf). Door nu de machine een halve slag te tornen wordt het draagbeeld op het lager afgetekend. Na het uitnemen van het lager wordt het draagbeeld duidelijk en zal door het wegschrappen van de eventuele te hoge (blauwe) punten verbeterd moeten worden. Deze handeling herhaalt men net zolang tot het lager over de volle lengte en een groot deel van de breedte draagt. In totaal dient dit ongeveer 80 % te bedragen. Het schrappen dient in kruisslag te worden uitgevoerd zodat een egaal patroon ontstaat van minuscule verhogingen en verlagingen waartussen de olie wordt geperst, die de draaiende as draagt. Het pasmaken van het loopvlak van het bovenlager gebeurt op min of meer dezelfde wijze als dat van onderlager, met dit verschil dat de afdruk van het draagvlak niet wordt verkregen door de as te draaien maar door de lager kap te kantelen. Hierbij zijn de vullingen niet aangebracht. Als ook bij de boven kap een voldoende draagbeeld is verkregen wordt in de omtrek met consistentvet op drie plaatsen een looddraadje geplakt van 0,3 mm. Vervolgens wordt het lager met de bij het uitdraaien gebruikte vulling op het onderlager geplaatst en met de originele pasbouten vastgezet en aangehaald. De zachte looddraadjes worden als gevolg van het aandraaien van de moeren geplet. De dikte van de geplette draadjes is een maat voor de speling van het

lager en wordt bepaald met een micrometer nadat de boven kap is losgenomen. Al naar gelang het verschil tussen de gemeten en de gewenste speling dienen er vullingplaatjes te worden toegevoegd of weggelaten. Vervolgens wordt op dezelfde wijze als hier voor beschreven de speling gecontroleerd en desgewenst verder gecorrigeerd maar dan met behulp van schrapen. Na het bereiken van de juiste speling worden de indrukkingen van de looddraadjes door middel van schrapen verwijderd.

4.14.15 Vliegwiel

De tangentialkrachten op de kruk van een stoommachine ten gevolge van de stoomdruk in de cilinder op de zuiger, en die van de versnellingskrachten ten gevolge van de heen en weer gaande zware machinedelen zijn, verdeeld over de omwenteling van de kruk, niet even groot en hebben ook niet dezelfde richting. Dit maakt dat de machine onregelmatig loopt, wat stoten en (torsie)trillingen veroorzaakt. Met behulp van een zwaar vliegwiel op de krukas wordt deze onregelmatige gang tot acceptabele proporties gereduceerd. Het doel van een vliegwiel is dus een zodanige regelmatige gang te creëren als nodig is in relatie met de aard van het aan te drijven werktuig. Bij gemalen is dat een scheprad, een vijzel, of een zuiger- of waaierpomp. Daarnaast zorgt het vliegwiel ervoor dat het resulterende aandrijvende koppel minstens even groot is als het gevraagde koppel van het aan te drijven werktuig. Als dit niet het geval zou zijn zal de machine afslaan of niet op gang komen. Het vliegwiel vervult zodoende ook een belangrijke rol bij het opstarten, door de machine door haar dode punt en de compressie te helpen draaien.



Vliegwiel en torninrichting van het gemaal Mastenbroek

Met behulp van de bekende technische gegevens van het gemaal Mastenbroek wordt hierna een rekenvoorbeeld gegeven van het krachterspel dat optreedt in een stoommachine en wat dit betekent voor de versnellingen en vertragingen van de zuiger, de zuigerstang, de krukstang en de draaiende delen van de machine met het bijbehorende vliegwiel.

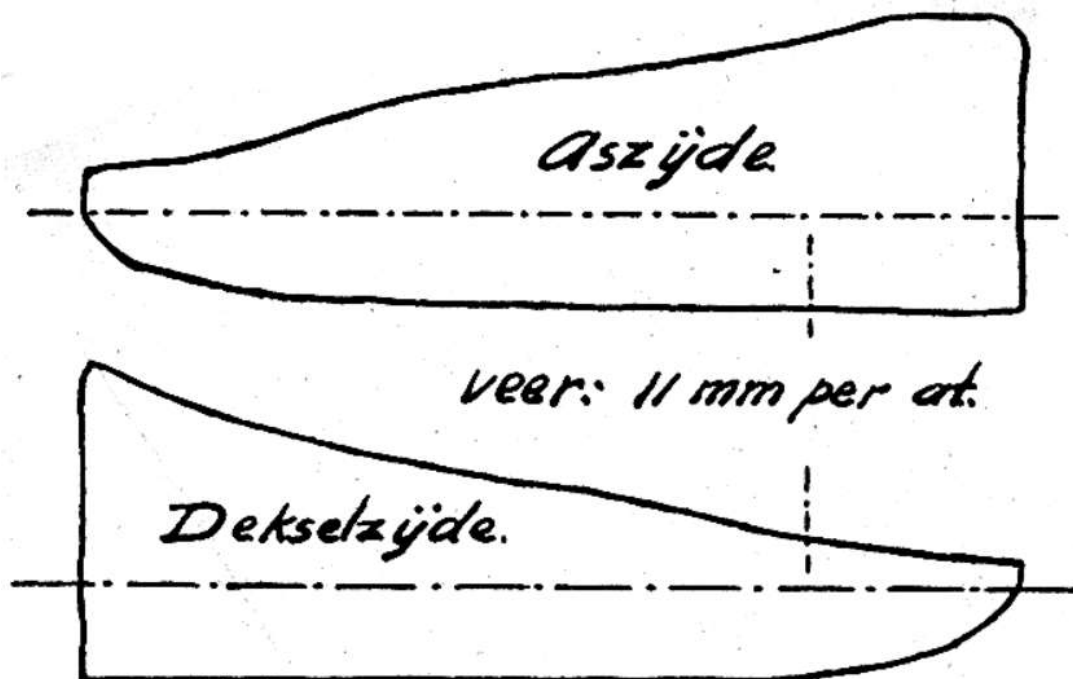
Machinegegevens

Van de stoommachine is geen constructietekening meer beschikbaar. Door opmeting en uit de originele bestekomschrijving van het gemaal zijn, voor zover deze zijn vermeld, de hoofdafmetingen van de installaties bepaald en bij de voorbeeldberekening gebruikt. Verder is gebruik gemaakt van de verhandeling uit De Ingenieur van 1940 opgesteld door professor Dresden over deze bijzondere stoommachine.

Stoommachine	
Fabricaat	Maatschappij de Atlas, Fabriek van Stoom en andere Werktuigen te Amsterdam
Bouwjaar	1856
Type	Dubbelwerkende 1-cilinder expansiestoommachine en condensatie met behulp van een injectie condensor. De stoom toe en afvoer vindt plaats met behulp van kleppen
Werkdruk	4 kg/cm ² (deze druk is in de praktijk nauwelijks de helft)
Stoomsoort	Verzadigde stoom met een temperatuur van ongeveer 152 °C
Nominaal vermogen	93 ipk (indicateur paardenkrachten) (68,5 kW)
Nominaal toerental	10 omw/min
Cilinderdiameter	736,6 mm (29")
Zuigerslag	2.438,4 mm
Zuigerstang diameter AZ	... mm
Zuigerstang diameter DZ	... mm

Samenvatting machinegegevens

Hieronder worden de indicateurdiagrammen afgebeeld die zijn overgenomen uit deze verhandeling. Het hiermee berekende vermogen van de stoommachine bedraagt 93 ipk bij 10 omw/min. Het diagram is genomen met een (spring)veer op de indicateur die bij elke atmosfeer een verticale verplaatsing van 11 mm van de schrijfstift laat optekenen. Uit opmeting van het diagram blijkt dat de druk in de cilinder aan het begin van de slag slechts ongeveer 1,8 kg/cm² is en derhalve niet de volle beschikbare keteldruk van 4 kg/cm² in de cilinder optreedt. De expansie van de stoom in de cilinder begint aan DZ (dekselzijde) nagenoeg bij het begin van de slag. Aan AZ (aszijde) bij ongeveer nadat de zuiger 10 % van de slag heeft afgelegd. Uit de geringe vulling of zelfs het ontbreken ervan alsmede de sterk gereduceerde stoomdruk, 1,8 kg/cm² in plaats van de beschikbare 4 kg/cm², kan worden afgeleid dat maar een fractie van het vermogenspotentieel van de stoommachine wordt gebruikt; met andere woorden dat dit aanmerkelijk te groot is voor haar doel.



Indicateur diagrammen (niet op schaal)

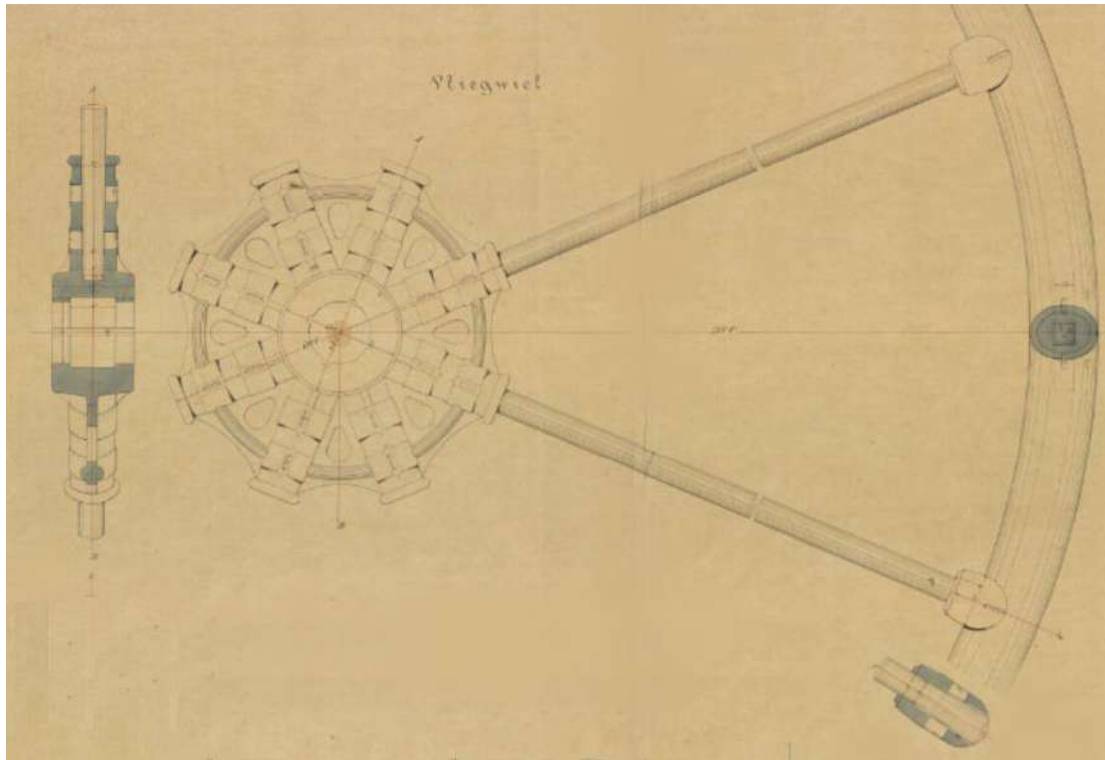
De absolute druk in de condensor, opgemeten uit het diagram, bedraagt ongeveer $0,2 \text{ kg/cm}^2$. De energie die in de stoommachine wordt opgewekt als gevolg van condensatie wordt weergegeven door het oppervlak van het diagram onder de streep-stippellijn. Uit het grote oppervlak hiervan in verhouding tot het totale oppervlak van het diagram kan worden afgeleid dat condensatie enorm bijdraagt aan de uiteindelijk geleverde energie en een slecht vacuüm een groter energieverbruik tot gevolg heeft.

Vliegwielgegevens

De naaf met daaraan de negen hulzen waarin de smeedijzeren spaken zijn bevestigd vormen één gietstuk. De negen glad bewerkte ronde smeedijzeren spaken zijn met twee dwarsspieën in de uitgeboorde hulzen vastgezet. De velling heeft een diameter van 7.620 mm. De ronde doorsnede van de velling heeft een diameter van 115 mm en is opgebouwd uit negen gegoten ijzeren delen die bijeen worden gehouden door ingelaten stukken vierkant en dwarsspieën. In het midden van elk vellingsegment is een bus aangegoten waar doorheen de spaken zijn gestoken. De velg is hiertoe ter plaatse van de spaak conisch uitgeboord en voorzien van een stootrand. De spaak is verder voorzien van een conisch gedeelte en een borst. Met behulp van een dwarsspie is de spaak in bevestigd. Het vliegwiel is met vier kopspieën op de machine-as bevestigd. De as diameter bedraagt ter plaatse van de naaf van het vliegwiel 292,2 mm. Een en ander samengebouwd zoals in de tekening op de volgende bladzijde is weergegeven.

Met aan zekerheid grenzende waarschijnlijkheid is het vliegwiel in onderdelen aangevoerd en ter plaatse samengesteld. De genoemde dwarsspieën werden na montage, om loswerken te voorkomen, (koud) geklonken.

Het complete vliegwiel weegt ongeveer 16.000 kg waarvan ongeveer 4.500 kg voor rekening komt van de naaf en de spaken.



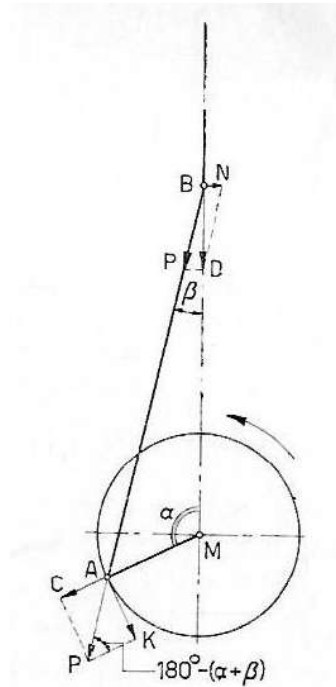
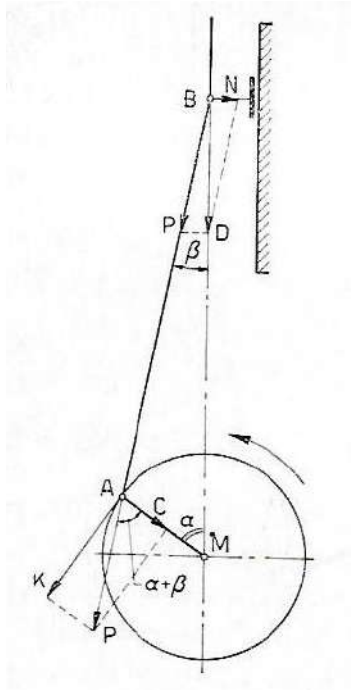
Vliegwielconstructie volgens Maatschappij De Atlas

Samenvatting vliegwielgegevens

Velg-diameter	7.620 mm
Velg-doorsnede	Ø 300 mm
Aantal spaken/diameter	9 stuks met een diameter van Ø 115 mm
As diameter	292 mm
Gewicht velg	11500 kg
Gewicht naaf en spaken	4500 kg
Gewicht totaal	16.000 kg
Massatraagheidsmoment	17.000 kgmsec ²

Omtreks- en leibaankrachten

In onderstaande figuur is schematisch het samenstelsel van de zuigerstang, het kruishoofd, de drijfstaaf en de kruk van een verticaal opgestelde zuigerstoommachine weergegeven, waarbij de kruk op een willekeurige hoek α uit de topstand is weergegeven. In dit schema, dat overigens ook geldt voor een horizontaal opgestelde machine zijn de verschillende krachten en de ontbondenen daarvan weergegeven en met een letter aangeduid.



Constructie van de omtrekkkracht

Met behulp van dit schema zijn van de stoommachine van het stoomgemaal Mastenbroek de omtrekkkrachten K met en zonder de versnellingskrachten berekend en op de uitgeslagen krukciikel uitgezet. Hiervoor zijn, zonder deze hier af te leiden, de hieronder volgende formules gebruikt. De drukken zijn door opmeten en verschaling afgeleid van de hiervoor gegeven indicateurdiagrammen van de desbetreffend machine.

Kracht D op de zuigerstang:

$$D = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot (p_1 - p_2) \text{ [kg]}$$

Hierin is:

d de zuigerdiameter in cm;

p₁ en p₂ de drukken boven en onder respectievelijk voor en achter de zuiger in kg/cm².

De kracht N op de leibaan:

$$N = \frac{R}{L} \cdot D \cdot \sin \alpha = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot \frac{R}{L} (p_1 - p_2) \sin \alpha \text{ [kg]}$$

Hierin is:

R de krukstraal in m

L de drijfstaanglengte in m

Kracht P op de krukstang

$$P = \frac{D}{\cos \beta} \text{ [kg]}$$

Omtrekkkracht K

$$K = D \cdot \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta} \text{ [kg]}$$

Traagheidskracht T als gevolg van de versnelling danwel vertraging

$$T = m \cdot a = \frac{G}{g} \cdot a = \frac{G}{g} \cdot \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2 R \left(\cos \alpha + \frac{R}{L} \cos 2\alpha \right) \text{ [kg]}$$

Vereenvoudigd omdat g (9,81) en π^2 (9,87) tegen elkaar wegvallen

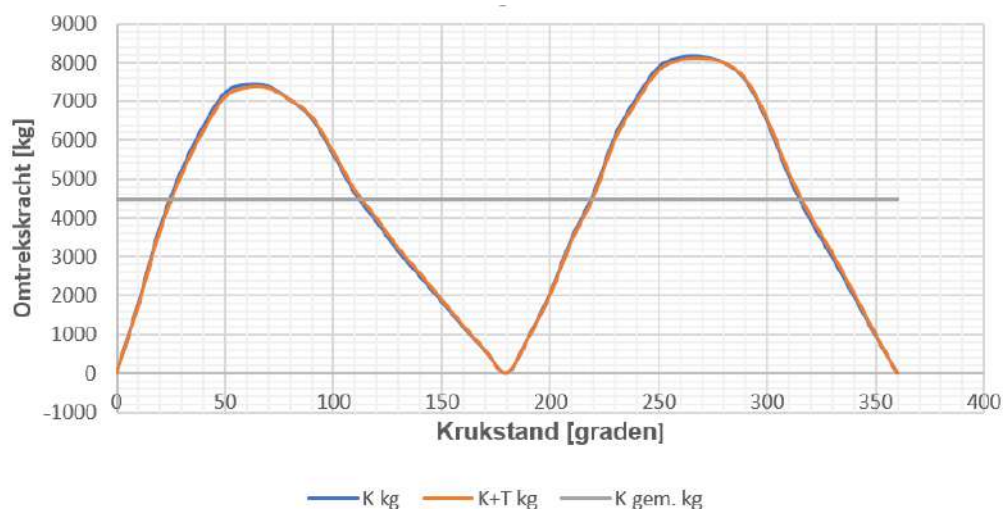
$$T = \frac{G \cdot n^2 \cdot R}{900} \left(\cos \alpha + \frac{R}{L} \cos 2\alpha \right) \text{ [kg]}$$

Hierin is:

G het gewicht van de heen en weer gaande delen

Door de massatraagheid T algebraïsch, dus met inachtnahme van de richting van de krachten, bij de stangkracht D op te tellen krijgt men D' waaruit de werkelijke omtrekskracht, hier K+T genoemd, kan worden berekend.

Uit de in de bijlage van deze leidraad weergegeven berekening en de hiervan gemaakte en hieronder weergegeven grafiek blijkt dat als gevolg van het lage toerental van de machine deze krachten nodig voor de versnelling en omgekeerd de vertraging nauwelijks van invloed zijn op de omtrekskracht. De blauwe en de oker kleurige lijn in onderstaande grafiek vallen daarom bijna samen.



Tangentiaalkrachten langs uitgeslagen krukcircle

In de figuur op de voorgaande bladzijde stelt het oppervlak, boven de grijze lijn van de gemiddelde omtrekkracht, het arbeidsoverschot voor. Dit overschot wordt in de vorm van arbeidsvermogen van beweging opgeslagen in het vliegwiel en afgestaan door dat vliegwiel aan de machine-as op het moment dat zich een tekort aandient. Dit laatste wordt voorgesteld door het gedeelte onder de grijze lijn tussen en naast de twee parabolen.

Zuigersnelheid

In de beide uiterste standen van de kruk staat de zuiger stil. Bij elke stand van de kruk en uiteraard ook de zuiger kan de snelheid berekend worden. Als de kruk van de stoommachine met een eenparige snelheid van 10 omw/min ronddraait en de drijfstang is oneindig lang dan is de snelheid c'_z van de zuiger zoals met de okerkleurige lijn is aangegeven. De hoogste snelheid, wordt dan bereikt bij de krukhoeken van 90 en 270 ° gerekend vanaf de dekselzijde van de stoommachine. Houdt men wel rekening met de eindige lengte van de drijfstang dan is de hoogste snelheid c_z iets groter en verschuift in de figuur ongeveer 10° naar links en zal bij 80 en 280 ° komen te liggen. Bij de berekening van de zuigersnelheden is gebruik gemaakt van de volgende formules.

De gemiddelde zuigersnelheid c_z :

$$c_z = \frac{2 \cdot S \cdot n}{60} = \frac{S \cdot n}{30} \text{ [m/sec]}$$

Hierin is:

S de zuigerslag in m

n het gemiddelde toerental in omw/min

De gemiddelde hoeksnelheid van de kruk ω :

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \text{ [rad/sec]}$$

De afgelegde weg z van de zuiger met een eindige drijfstang lengte is:

$$z = R(1 - \cos \alpha) + \frac{R^2}{2L} \cdot \sin^2 \alpha \text{ [m]}$$

Hierin is:

R de straal van de kruk in m

L de lengte van de drijfstang in m

Is de drijfstang (oneindig) lang dan kan de laatste term in de formule, de zogenoemde drijfstangfout verwaarloosd worden en verkrijgt men voor de afgelegde zuigerweg z' :

$$z' = R(1 - \cos \alpha) \text{ [m]}$$

Met behulp van bovenstaande formules kan de volgende formule voor de momentane snelheid langs de kruk of langs de zuigerweg worden afgeleid.

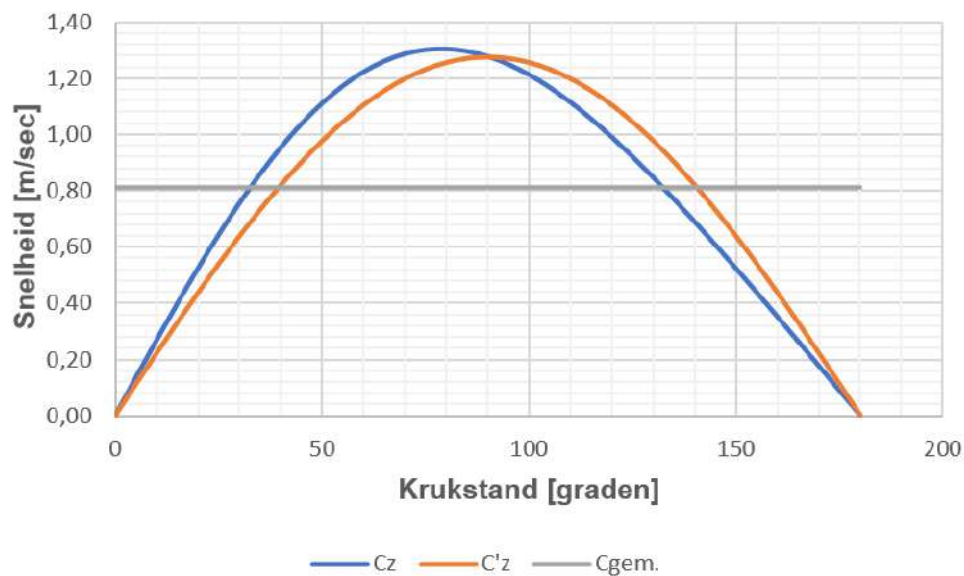
De snelheid c_z bij een eindige drijfstanlengte bedraagt dan:

$$c_z = \omega \cdot R \left(\sin \alpha + \frac{R}{2L} \cdot \sin 2\alpha \right) \text{ [m/sec]}$$

Wordt geen rekening gehouden met de drijfstanfout dan kan de momentane snelheid c'_z berekend worden met de volgende formule:

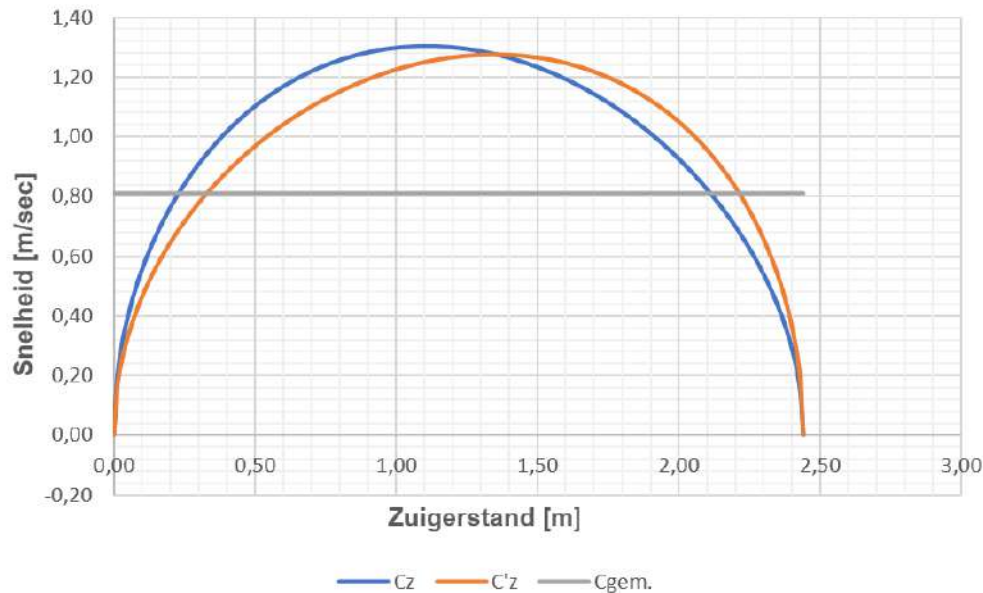
$$c'_z = \omega \cdot R \cdot \sin \alpha \text{ [m/sec]}$$

De snelheid bij een oneindige drijfstanlengte of wat men ook een verwaarloosbare drijfstanfout noemt:



Zuigersnelheid in relatie tot stand van de kruk

Zet men de momentane zuigersnelheid c_z en c'_z uit tegen de stand van de zuiger dus de slag, dan zien we dat de snelheidstoename en -afname het grootst is aan het begin en aan het einde van de slag.



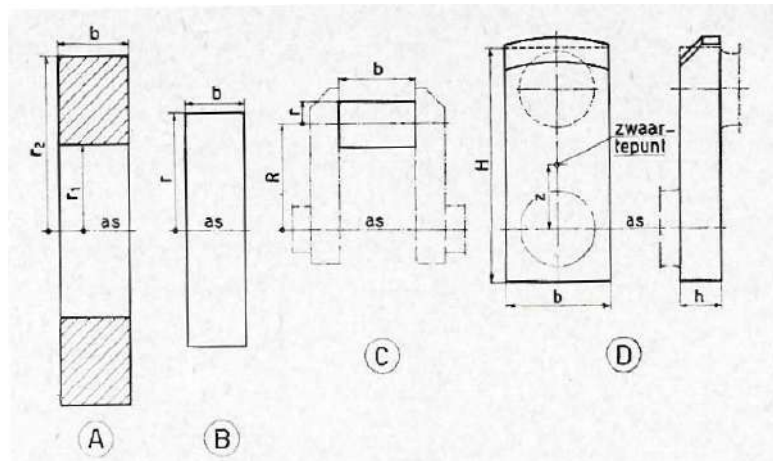
Zuigersnelheid in relatie tot slag

Uit de afbeelding hiervoor van de tangentiaal- of omtrekkracht en de krukstand blijkt dat dientengevolge het draaimoment dat de machine levert veranderlijk van grootte is. Zou nu het uitwendige draaimoment, dat door de machine moet worden overwonnen, hetzelfde verloop hebben, dan zou er op elk moment evenwicht zijn tussen beide momenten en zou de aandrijf-as eenparig ronddraaien. Dit gunstige theoretische geval doet zich in de praktijk niet voor. Het geleverde draaimoment zal afwisselend groter en kleiner zijn dan het uitwendige draaimoment. Het gevolg is, dat er hoekversnellingen en -vertragingen optreden die periodiek zijn en zich bij een dubbelwerkende stoommachine telkens twee keer per omwenteling herhalen. De belangrijkste taak van het vliegwiel is nu om de daaruit voortvloeiende variaties in hoeksnelheid binnen beperkte grenzen te houden. Door deze variaties in hoeksnelheid kan het vliegwiel arbeidsvermogen opnemen of afgeven.

Het vliegwiel is als gevolg van de veranderlijke draaimomenten van een machine steeds werkzaam, dus ook als de belasting (het gemiddelde draaimoment) van de machine constant is. Dit in tegenstelling met een reguleur (bij gemaal Mastenbroek niet aanwezig) die de taak heeft om de variaties in hoeksnelheid ten gevolge van de veranderlijke belasting te beperken. Bij plotselinge belastingveranderingen van de stoommachine zal het vliegwiel de taak van de reguleur ondersteunen, met het arbeidsvermogen dat in de vorm van kinetische of bewegingsenergie beschikbaar is. Het toerental van de machine zal daardoor minder snel veranderen zodat de reguleur tijd heeft het regelmechanisme van de stoomschuif of klep te verstellen zodat de stoom toevoer wordt aangepast aan de belasting. In sommige gevallen (niet bij het gemaal Mastenbroek) is het vliegwiel bovendien nodig om de machine door de compressie heen te helpen.

Vliegwiel

De eigenschap van het vliegwiel maar ook van de andere roterende delen van de stoommachine om kinetische energie op te nemen en af te staan wordt in de techniek uitgedrukt met de letter I het zogenoemde massatraagheidsmoment.



Maataanduiding roterende delen

Voor een vliegwiel, voorbeeld A, dat is te beschouwen als een ring met een rechthoekige of in het geval van gemaal Mastenbroek ronde doorsnede, die op een bepaalde afstand om een rechte as draait luidt de formule voor het massatraagheidsmoment I als volgt:

$$I = \frac{G_v}{2g} (r_2^2 + r_1^2) \text{ [kgmsec}^2\text{]}$$

Waarbij:

G_v = gewicht van de velg in kg

r_1 = straal van de binnendiameter in m

r_2 = straal van de buitendiameter in m

g = 9,81 de zwaartekracht in m/sec²

Voor een cilindrische schijf bijvoorbeeld een ashals of koppelflens, voorbeeld B, wordt de massatraagheid ten opzichte van de rotatiehartlijn:

$$I = \frac{G_s}{2g} r^2 \text{ [kgmsec}^2\text{]}$$

Waarbij G_s het gewicht van de schijf is in kg.

Het massatraagheidsmoment van een massieve krukpen, voorbeeld C, ten opzichte van de hartlijn is:

$$I = \frac{G_k}{2g} \left(R^2 + \frac{r^2}{2} \right) \text{ [kgmsec}^2\text{]}$$

Waarbij G_k het gewicht van de krukpen is in kg.

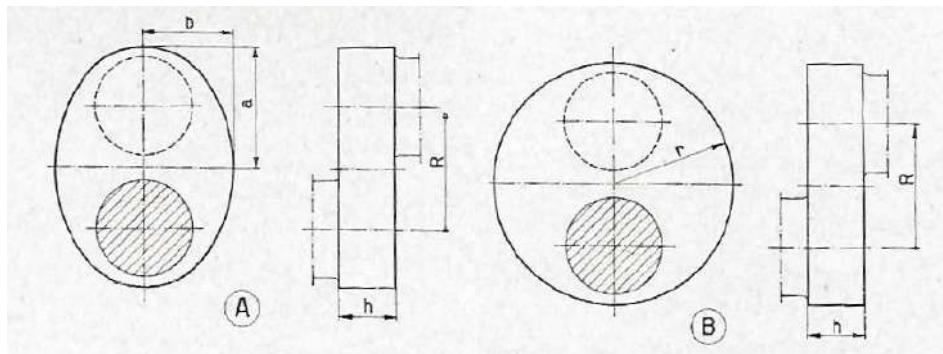
Het massatraagheidsmoment van een krukvang, voorbeeld D, in de vorm van een rechthoekig parallellepipedum ten opzichte van de hartlijn van de krukas is:

$$I = \frac{G_w}{2g} \left(z^2 + \frac{b^2 + H^2}{12} \right) \text{ [kgmsec}^2\text{]}$$

Waarbij:

G_w = gewicht van de krukvang in kg.

z = afstand van het zwaartepunt van de wang tot de hartlijn van de krukas in m.



Maataanduiding roterende delen

Voor de massatraagheid van een elliptische krukvang, voorbeeld A, kan worden geschreven:

$$I = \frac{G_w}{4g} (R^2 + a^2 + b^2) \text{ [kgmsec}^2\text{]}$$

Voor de massatraagheid van een cirkelvormige wang, voorbeeld B, luidt de formule:

$$I = \frac{G_w}{4g} (R^2 + 2r^2) \text{ [kgmsec}^2\text{]}$$

Met behulp van bovenstaande gegevens kan men de massatraagheid van de afzonderlijke roterende delen bepalen. Door deze bij elkaar op te tellen vindt men de totale massatraagheid. Voor het vliegwiel van het stoomgemaal Mastenbroek is een dergelijke berekening uitgevoerd en in de bijlage van deze leidraad opgenomen.

Omdat het massatraagheidsmoment toeneemt met het kwadraat van de straal waarop zich het gewicht bevindt zullen de zich dicht bij de as van rotatie bevindende gewichten nauwelijks bijdragen aan het traagheidsmoment. In de berekening wordt dit geïllustreerd bij de naaf en de spaken. Deze hebben nagenoeg hetzelfde gewicht, echter omdat de straal van de zwaartepuntcirkel van de naaf aanzienlijk kleiner is dan dat van de spaken is de bijdrage aan het massatraagheidsmoment verwaarloosbaar.

Voor vliegwiel, maar ook voor dynamoankers, enz., treft men in de vakliteratuur de uitdrukking GD^2 aan. Desgevraagd wordt deze waarde door de fabrikant van de machine berekend en

opgegeven. Het verband met het daarmee overeenkomende massatraagheidsmoment I is als volgt te bepalen. Zou het gehele gewicht van het vliegwiel of bijvoorbeeld het dynamoanker zich op een traagheidsstraal R bevinden, dan zou het massatraagheidsmoment zijn:

$$I = \frac{G}{g} R^2 \text{ [kgmsec}^2\text{]}$$

Omdat D de betekenis heeft van de dubbele traagheidsstraal dus:

$$R = \frac{D}{2} \text{ [m]}$$

Volgt hieruit:

$$I = \frac{GD^2}{4g} \text{ [kgmsec}^2\text{]}$$

Of:

$$GD^2 = I \cdot 4g \text{ [kgmsec}^2\text{]}$$

De dubbele traagheidstraal uit het voorbeeld bedraagt dus:

$$D = \sqrt{\frac{I \cdot 4g}{G}} \text{ [m]} \quad \text{of:} \quad D = \sqrt{\frac{17000 \times 4 \times 9,81}{16000}} = 6,45 \text{ [m]}$$

Men moet er op bedacht zijn dat de gevonden diameter die van de dubbele traagheidstraal is van het gehele vliegwiel en niet die van de velg van dit onderdeel.

Hiervoor is aangegeven dat gedurende het arbeidsproces in de stoommachine het arbeidsoverschot tijdelijk wordt opgeslagen in het vliegwiel om later weer te worden afgegeven. Als dit arbeidsoverschot bekend is kan hieruit het massatraagheidsmoment en vervolgens het gewicht en de afmetingen van het vliegwiel worden berekend. Omgekeerd, en dat is bij het stoomgemaal Mastenbroek het geval, kan met behulp van bekende gegevens van het massatraagheidsmoment het gemiddelde hoeksnelheid (toerental) en de maximale oneenparigheid van de machine het arbeidsoverschot A berekenen. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de volgende vergelijkingen.

Arbeidsoverschot:

$$A = I_m \cdot \omega_m^2 \cdot \delta = 17000 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 10}{60} \right)^2 \cdot 0,32 = 5960 \text{ [kgm]}$$

Hoeksnelheid:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \text{ [rad/sec]}$$

Gemiddelde hoeksnelheid:

$$\omega_m = \frac{\omega_{\max} + \omega_{\min}}{2} = \frac{\frac{2 \cdot \pi \cdot 11,6}{60} + \frac{2 \cdot \pi \cdot 8,4}{60}}{2} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 10}{60} \text{ [rad/sec]}$$

On-eenparigheidsgraad:

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_m} = \frac{\frac{2 \cdot \pi \cdot 11,6}{60} - \frac{2 \cdot \pi \cdot 8,4}{60}}{\frac{2 \cdot \pi \cdot 10}{60}} = 0,32 \text{ [zonder dimensie]}$$

Hierin is:

A = Arbeidsoverschot in kgm.

I_m = Massatraagheidsmoment van het vliegwiel in kgmsec².

ω_m² = Het kwadraat van de gemiddelde hoeksnelheid in rad²/sec².

δ = On-eenparigheidsgraad bepaald door de maximale en de minimale en gemiddelde hoeksnelheid

Uit bovenstaande beschrijving kan worden afgeleid dat de diameter van een vliegwielvelg kwadratisch bijdraagt aan de massatraagheid en dat daarom om gewicht te besparen in verhouding tot de afmetingen van de stoommachine zelf zeer grote vliegwielen worden aangetroffen bij de (oude) stoommachines van gemalen. Een vliegwiel dat een bepaalde massatraagheid moet hebben zal daarom lichter zijn naar mate men de diameter groter maakt. Echter ten gevolge van de door de centrifugaalkracht opgewekte materiaalspanningen is de maximale toelaatbare omtreksnelheid en daarmee de diameter beperkt. Deze bedraagt bij vliegwielen met spaken en vervaardigd van:

Gietijzer: 40 m/sec, dus als n wordt uitgedrukt in omwentelingen per minuut:

$$D_{\max} = \frac{40 \cdot 60}{n \cdot \pi} = \frac{765}{n} \text{ [m]}$$

Gietstaal: 75 m/sec, dus:

$$D_{\max} = \frac{75 \cdot 60}{n \cdot \pi} = \frac{1430}{n} \text{ [m]}$$

De hiervoor aangeduide middelpuntvliedende kracht of centrifugaalkracht K_c wordt berekend met de volgende formule.

$$K_c = \frac{G}{g} \cdot R \cdot \omega^2 = m \cdot R \cdot \omega^2 \text{ [kg]}$$

Of

$$K_c = \frac{m \cdot v^2}{R} \text{ [kg]}$$

Hierin is:

G het gewicht in kg

g de zwaarte kracht in m/sec²

m de totale massa van het lichaam in kg

R de voerstraal van het zwaartepunt in m

v de snelheid van het zwaartepunt in m/sec

Als gevolg van het lage toerental van de stoommachine uit het voorbeeld en de dientengevolge relatief lage hoeksnelheid wordt de hiervoor aangegeven norm meer dan ruimschoots overschreden en is er zelfs bij een exorbitante overschrijding van het toerental geen gevaar voor het zogenoemde exploderen van het vliegwiel.

4.14.16 Smeermiddelen

Algemeen

Een juist inzicht betreffende de eigenschappen van smeermiddelen, alsook de daaraan te stellen eisen, is voor de gebruiker van een stoomgemaal van groot belang. Men onderscheidt vaste, half-vaste en vloeibare smeermiddelen. Van grote betekenis zijn in het kader van deze leidraad de vloeibare smeermiddelen of smeeroliën voor cilindersmering.

Het doel van smeermiddelen is de wrijving tussen twee oppervlakken te verminderen. Tevens wordt in een groot aantal gevallen de door de wrijving opgewekte warmte zoveel als mogelijk afgevoerd. De meest ideale situatie is dat de twee oppervlakken elkaar zelf niet raken, maar gescheiden worden door een laagje (film) van de gebruikte olie of vet. In het smeermiddel zijn de delen, waaruit het bestaat, gemakkelijk ten opzichte van elkaar verschuifbaar. De daarbij optredende weerstand noemen we inwendige wrijving. Hoe dunner vloeibaar de gebruikte olie, des te kleiner is de inwendige wrijving. Dit is echter geen maatstaf voor een goede olie. De olie of ander smeermiddel moet namelijk ook aan de te smeren vlakken hechten. De adhesie zoals dat genoemd wordt moet zo groot zijn dat deze ook blijft bestaan bij de optredende drukken tussen de glijvlakken. In het algemeen kan men daarom de volgende eisen aan een smeermiddel stellen:

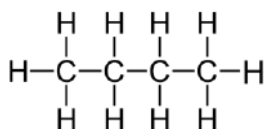
- Het klevend vermogen of adhesie tussen smeermiddel en oppervlak moet groot genoeg zijn om een voldoende sterke smeerfilm op te kunnen bouwen;
- Het klevend vermogen of cohesie van het smeermiddel moet zo gering als mogelijk zijn om de verliezen als gevolg van de inwendige wrijving te beperken;
- Het smeermiddel moet gekozen worden overeenkomstig de temperatuur waarbij het werkelijk smeren moet. Men moet hierbij letten op de mindere of meerdere vloeibaarheid (viscositeit) en de vlaktedruk.
- Het smeermiddel moet zoveel mogelijk onveranderlijk zijn tijdens gebruik

Met betrekking tot het toe te passen smeermiddel bij stoommachines wordt onderscheid gemaakt tussen de onderdelen die met de hete stoom in aanraking komen en de onderdelen die aan normale temperaturen worden bloot gesteld. De te gebruiken smeerolie voor de cilinders moet bestand zijn tegen de hoge temperaturen van de verschillende onderdelen en de aanwezigheid van water. Dat betekent dat de toegepaste smeerolie niet mag verbranden, niet te dun vloeibaar mag worden en bij hergebruik van het condensaat zich slechts in een bepaalde mate mag vermengen met water. Kortom de essentiële smeereigenschappen mogen niet verloren gaan. In het verleden maakte men gebruik van een mengsel van dierlijke-, plantaardige- en minerale oliën, beter bekend als compoundoliën. Dierlijke vetten, zoals talk gewonnen uit karkassen van dieren, vormen een uitstekende smeerfilm in de aanwezigheid van water. De onhebbelijkheid is dat ze emulgeren met het condensaat waardoor het moeilijker is ze hier weer aan te onttrekken hetgeen bij hergebruik van het condensaat van essentieel belang is. Tegenwoordig kunnen door toevoegingen of dopes aan minerale oliën de smeereigenschappen van compoundoliën worden geëvenaard. Moderne smeermiddelen voor de cilinders van stoommachines zijn bijna zonder uitzondering uit gedoopte minerale oliën samengesteld. De relatief koude machine-onderdelen worden met een andere soort minerale olie gesmeerd.

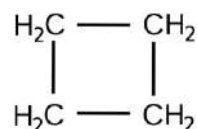
Minerale smeerolie

Minerale smeerolie wordt vervaardigd uit aardolie. Deze oliën zijn mengsels van koolwaterstoffen. Het betreft in hoofdzaak de alkanen ("paraffinen") met de structuurformule $C_n H_{2n+2}$, waarbij de atomen zich ketting-vormig tot moleculen verenigen, en cycloalkanen ("naftenen") met de structuurformule $C_n H_{2n}$, waarbij de atomen in het molecuul cyclisch zijn gebonden. Beide soorten verbindingen hebben 15 tot 40 koolstofatomen.

Van het gas Butaan wordt hieronder als voorbeeld zowel de kettingvormige als de cyclische molecuul-structuur weergegeven. Hierbij wordt opgemerkt dat hoe hoger het koolstofgehalte van de olie hoe hoger het soortelijk gewicht.



Molecuulstructuur Butaan



Molecuulstructuur Cyclobutaan

Niet alle ruwe aardoliën vormen overigens een geschikte grondstof voor de bereiding van een goede kwaliteit smeerolie. De aardolie uit Pennsylvania leent zich hier bijvoorbeeld beter voor dan die bijvoorbeeld uit Californië. De minerale smeeroliën moeten in alle gevallen na haar bereiding aan een grondige raffinage onderworpen worden. Zij bevatten, ook bij toepassing van het destillatieproces, nog een aantal onstabiele koolwaterstoffen, die aanleiding kunnen geven tot kwaliteitsvermindering door uitwendige oorzaken. Deze onstabiele bestanddelen worden tijdens het raffineren verwijderd met behulp van zwavelzuur, soda en water alsmede door filtratie. Te ver doorgevoerde raffinage kan echter ook schadelijk werken op de uiteindelijke kwaliteit van de olie, doordat er door dit proces ook waardevolle bestanddelen verwijderd worden en verloren gaan.

De smeeroliën worden naar gelang van de grondstof, bereid volgens de volgende twee verschillende processen:

- Bij het destillatieproces worden de oliën van verschillend kooktraject achtereenvolgens verkregen uit de ruwe grondstof. De destillatie moet geschieden bij relatief lage temperaturen, dus bij lage drukken of onder vacuüm, teneinde niet door te sterke verhitting de moleculen te beschadigen.
- Volgens het tweede proces worden eerst de lichte bestanddelen, gas en brandstoffen af gedestilleerd en vervolgens wordt uit het residu de smeerolie bereid

De uiteindelijk in de handel gebrachte smeerolie is in de regel een mengsel van beide soorten. Bij de bereiding van smeerolie ontstaat niet één enkel product, doch een groot aantal soorten met verschillende eigenschappen. Daarenboven verschillen de eigenschappen van de smeeroliën tussen de verschillende merken.

Het voordeel van de minerale olie boven de in het verleden toegepaste plantaardige- en dierlijke oliën is dat ze te leveren is voor veel hogere maar ook lagere temperaturen. Vervolgens wordt zij niet ranzig, zodat men geen last heeft van vetzuren die sommige metalen aantasten.

Plantaardige en dierlijke oliën

De plantaardige en dierlijke smeeroïlen bevatten, in tegenstelling tot de minerale, een groot aantal weinig stabiele bestanddelen. Zij zijn sterker onderhevig aan oxidatie, waarbij zich vetzuren vormen die blanke machinedelen doen roesten. De oxidatie wordt daarbij bevorderd door hoge drukken en temperaturen. Wordt de olie in geforceerde smeersystemen toegepast dan neemt het zuurgehalte toe, de kleur wordt donkerder, het soortelijk gewicht en de viscositeit stijgen en het smerend vermogen neemt af. Verder vormen plantaardige en dierlijke oliën gemakkelijk emulsies (verbindingen, waarbij de olie zich in zeer kleine deeltjes splitst en met de vloeistof vermengt) en scheiden zij zich daar moeilijk weer uit af. Men noemt dit ook wel verzeppen. Dit verzeppen wordt bevorderd door eventueel in het water voorkomende zouten, zuren of basen zoals bij stoominstallaties.

De oxidatie van de olie heeft niet alleen plaats tijdens het gebruik, maar ook gedurende de opslag in vaten en reservoirs heeft deze reactie plaats onder invloed van lucht, licht en vocht.

Tegenover deze nadelen van niet minerale olie staat een tweetal essentiële voordelen. Ten eerste is het smerend vermogen meestal zeer goed en in veel gevallen beter dan die van minerale olie. Ten tweede hechten plantaardige en dierlijke oliën zich beter dan minerale oliën aan natte oppervlakken. Men kan met betrekking tot dit fenomeen de proef op de som nemen door een nat metaaloppervlak met olie te bestrijken. Bij de minerale olie zal deze zich tot druppels samentrekken terwijl de plantaardige of dierlijke olie zich gelijkmatig over het oppervlak laat verdelen.

Teneinde voor bepaalde doeleinden de voordelen van beide olie soorten te combineren mengt men deze in bepaalde verhoudingen (compounderen) en verkrijgt men de zogenoemde compoundolie. Compound- oliën zijn bij uitstek voor zwaar belaste machinedelen, werkend in een vochtige omgeving en voor de smering van cilinders waarin verzadigde dampen voorkomen. Zij worden dus gebruikt voor de bewegende delen van de stoomwerktuigen zoals krukken, excentrieken en pakkingbussen, maar ook voor de inwendige cilindersmering. Hier is het vermogen tot emulsievorming juist een voordeel. Men neemt hier de nadelen van de plantaardige en dierlijke olie op de koop toe, waarbij het voor zich spreekt dat het aandeel niet minerale bestanddelen niet te groot mag zijn. Voor machinesmering bedraagt dit aandeel 5 a 7 %.

Onderzoek smeeroïle

Bij het onderzoek van de smeeroïlen in het laboratorium worden in hoofdzaak de methoden toegepast die voor een deel reeds bij de vloeibare brandstoffen zijn beschreven; deze zullen hier niet herhaald worden.

Soortelijk gewicht

Het soortelijk gewicht zegt weinig over de bruikbaarheid van de smeeroïle. Vroeger toen we over aanzienlijk minder olievelden beschikten gaf het enigszins een aanwijzing over de herkomst: oliën van 0,95 kg/dm³ kwamen uit Texas, van 0,93 kg/dm³ uit Californië en van 0,87 – 0,91 kg/dm³ uit Pennsylvania. Wel spreekt men in de praktijk over zware en lichte oliën, doch daarmee doelt men

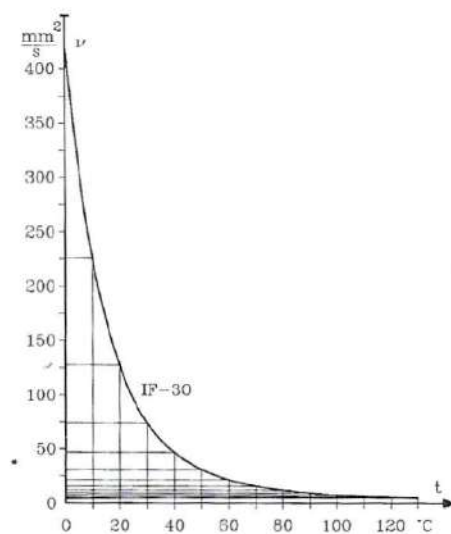
op de viscositeit en niet op het soortelijk gewicht. Met zware olie bedoelt men dik vloeibare, dus van hoge, en met lichte olie dun vloeibare dus van lage viscositeit.

Kleur

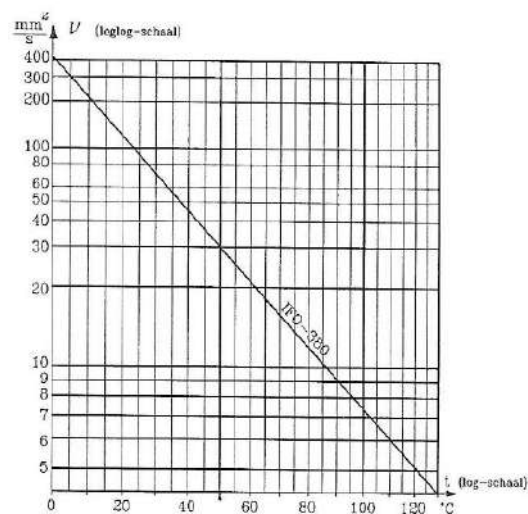
Ook de kleur van de olie zegt weinig of niets betreffende de kwaliteit van de smeerolie, hoewel men soms de gebruiker in folders "heldere goudgele olie en dergelijke" het tegengestelde wil doen geloven. Lichte smeeroliën zijn dikwijls geel van kleur terwijl de zwaardere roodbruin tot zwart kleuren. Sommige Amerikaanse smeeroliën vertonen een groene weerschijn of fluorescentie. Ook als gevolg van gebruik krijgt de olie een andere meestal donkerder kleur.

Viscositeit

Zeer bepalend is de bepaling van de viscositeit, en wel bij de verschillende temperaturen, dus het ontwerpen van de viscositeitskromme, aangezien daarvan in de eerste plaats afhangt, voor welkdoel de olie is te gebruiken.



Viscositeit uitgezet op lineaire assen



Viscositeit uitgezet op logaritmische assen

Als men van een smeerolie de viscositeit bij verschillende temperaturen uitzet in een lineair assenstelsel dan krijgt men een kromme lijn. Voor het bepalen van die kromme is een groot aantal zeer tijdrovende metingen nodig. Evenals bij veel andere natuurkundige verschijnselen blijkt bij het viscositeitsverloop een rechte lijn te ontstaan als men deze op een juiste logaritmische schaal uitzet. Er zijn dan in principe slechts twee metingen nodig om de rechte lijn te kunnen trekken en de tussenliggende waarden af te kunnen lezen. In Europa vermeldt men de viscositeit meestal in graden Engler bij 50 °C. In Amerika doet men dat voor lichte oliën bij 130 °F (~ 50 °C), voor zware oliën bij 210 °F (~ 99 °F), beide uitgedrukt in seconden Saybolt Universal.

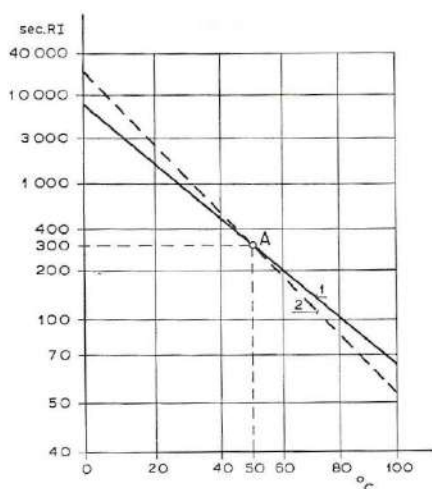
Hebben twee verschillende smeeroliën bij een bepaalde temperatuur dezelfde viscositeit, dan is het niet gezegd dat dit ook het geval zal zijn bij andere temperaturen. Voor het volledig beoordelen van de viscositeitseigenschappen dient men dus de hele viscositeitskromme of de V.I. viscositeitsindex

te beschouwen. Hoe de V.I. wordt bepaald wordt hierna bij de dopes of additieven nader uiteengezet.

Ontvlammingspunt

Smeeroliën met een zogenoemde asfaltbasis, dat wil zeggen bereid uit asfalt houdende ruwe oliën, hebben een hoger soortelijk gewicht en een lager ontvlammingspunt, alsmede een steilere

viscositeitskromme dan de oliën met een zogenoemde paraffinebasis, bereid uit paraffine houdende grondstoffen. De olie met de gestippelde lijn in de viscositeitsgrafiek bezit dus meer asfalt en minder paraffine bestanddelen dan die van de olie met de ononderbroken lijn.



Aan het ontvlampunt wordt door velen waarde gehecht met het oog op cilinders waarin hoge temperaturen heersen. Door anderen wordt hieraan minder aandacht geschonken, aangezien kleine hoeveelheden lichte koolwaterstoffen het ontvlammingspunt al sterk kunnen verlagen. In elk geval duidt een hoog vlampunt op een zorgvuldige raffinage.

Viscositeit van smeerolie (asfalt-/paraffinebasis)

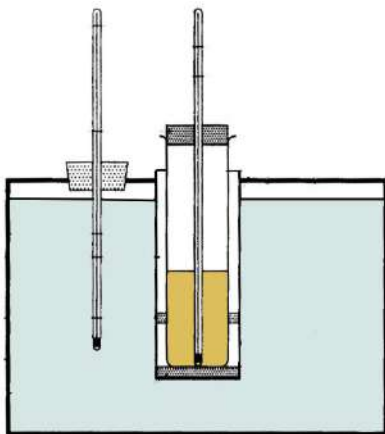
Stolpunt

Bij het afkoelen kunnen de paraffinen in de smeerolie kristallen vormen. Bij voortgaande afkoeling groeien deze kristallen aan en vormen een netwerk waartussen de resterende vloeistof als het ware gevangen zit. De vloeistof wordt troebel (troebelpunt), en tenslotte zo stijf (stolpunt) dat hij niet meer wil vloeien.

Het troebel- en stolpunt van een smeerolie is van belang bij gebruik in koelmachines en het gebruik van machines in koude luchtstroken en -weersomstandigheden. Bij museale gemalen doen zich, anders dan bij de opslag in aflooptanks en in de winterperiode bij het eventueel verpompen van oliën, deze situaties niet voor. Voor de bepaling van het troebel- en stolpunt wordt het hiernaast afgebeelde apparaat gebruikt. Een hoeveelheid van ongeveer 40 cc olie wordt in een grote reageerbuis gegoten en in de houder van een koelbad geplaatst.

De reageerbuis is van een thermometer voorzien. Elke 5 °F (3 °C) wordt de reageerbuis uit de houder gehaald en gecontroleerd. De temperatuur waarbij voor het eerst een troebeling wordt waargenomen is het troebelpunt of in het Engels: cloud point. Deze troebeling zal zich het eerst voordoen op de bodem van de reageerbuis omdat ze hier contact maakt met de houder en het omringende koudemiddel.

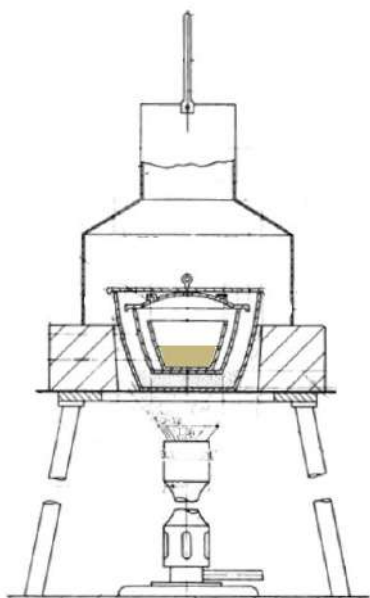
Bij voortgezette afkoeling wordt de reageerbuis of het meetglas telkens uit de houder gehaald en scheef gehouden. Zodra de vloeistof in de buis 5 seconden niet vervloeit bij het plat leggen, wordt de temperatuur genoteerd. Dit punt noemen we het stolpunt of in het Engels: pour point. Bij smeeroilie kan het stolpunt variëren van -45 tot $+4$ °C.



Toestel voor het bepalen van het stolpunt

Cokesgehalte

Het cokesgehalte van de smeeroilie wordt volgens de Amerikaanse standaardregels bepaald door 10 gram van de te onderzoeken olie af te wegen, in een platina of porseleinen kroes van voorgeschreven afmeting te brengen en die op haar beurt in een dubbelwandige ijzeren pot te



Toestel van Conradson

verhitten gedurende een half uur. De vluchtige koolwaterstoffen ontwijken en er blijft een droge koolmassa, de cokes, over. Het cokesrestant in de kroes wordt door nauwkeurig wegen bepaald en in procenten van het oorspronkelijke gewicht van het monster uitgedrukt. Behalve de hoeveelheid beoordeelt men ook de aard van de gevormde cokes: deze kan zijn hard, of los en vlokkelig. Het cokesgehalte wordt meestal bepaald met het toestel van Conradson zoals hiernaast is afgebeeld. Meestal is de koolstof in de smeeroilie een gevolg van het vermengen met verbrandingsresten bij verbrandingsmotoren. Door vervolgens in hetzelfde toestel de cokes te verbranden houdt men de niet brandbare delen over. Dit noemen we de asrest die bij gebruikte smeeroilie onder andere bestaat uit metaalslijpsel of andere ongewenste niet brandbare vervuilingen.

Zuurgehalte

Het zuurgehalte van smeerolie wordt langs scheikundige weg vastgesteld. Het moet zo laag mogelijk zijn om aantasting van machinedelen te voorkomen. Zuiver minerale oliën mogen praktisch geen zuren bevatten, hoewel sporen daarvan kunnen worden aangetroffen, afkomstig van het raffinageproces of van aardoliezuren in de oorspronkelijke grondstof. In plantaardige- en dierlijke- oliën daarentegen ontstaan gemakkelijk zuren door oxidatie van de onstabiele bestanddelen. Het zuurgehalte wordt in de regel aangeduid met het zogenoemde zuurgetal. Dit getal drukt uit hoeveel mg Kaliumhydroxide (KOH), nodig is om al het zuur in 1 g olie te neutraliseren. Bij de analyse van een gebruikte olie wordt dit getal vergeleken met die van de ongebruikte olie en is een maat voor het verversen van de olie dan wel verder gebruik. Bijvoorbeeld een smeerolie-circulatiesysteem waarbij zowel glij- als wentellagers en niet te zwaarbelaste tandwieloverbrengingen van olie worden voorzien, heeft een zuurgetal van 0,2 mg KOH/g.

Emulgerend vermogen

Het emulgerend vermogen is van belang bij onder andere de cilindersmeerolie van een stoommachine. Het onderzoek naar het emulgerende vermogen geschiedt op eenvoudige wijze door 100 cm³ olie met 100 cm³ gedestilleerd water in een 200 cm³ stopfles te gieten en enige tijd krachtig te schudden. Daarna laat men de fles rustig staan en noteert de tijd van afscheiding en of zich enige blijvende emulsie heeft gevormd. De Amerikaanse standaardregels schrijven hier strengere proeven voor. Daarbij wordt 40 cm³ olie met 40 cm³ van een voorgeschreven vloeistof, water met een zout- of soda oplossing, in een maatbeker samengebracht en met behulp van een snel draaiend roerwerk, dooreengeslagen. Hierna wordt de tijd van afscheiding en de eventuele mate van blijvende emulsie bepaald. De proeven worden genomen bij twee verschillende temperaturen, namelijk 130 en 180 °F.

Smerend vermogen

Voor het onderzoek naar de algemene smerende eigenschappen zijn toestellen uitgedacht waarmee de wrijvingsweerstand van gesmeerde oppervlakken bij bekende belastingen kan worden gemeten. Over het algemeen hecht men echter aan de uitkomsten van dergelijke proeven slechts betrekkelijk waarde, omdat ze de werkelijke toestand van de machine te gebrekkig nabootsen.

Dopes of additieven

Sinds jaren verbetert men kunstmatig de kwaliteit van smeerolie door toevoeging van bepaalde stoffen die zelf geen smeermiddel zijn. Als regel zijn dit organische zuren, welke meestal met het Engelse woord dope worden aangeduid. Tegenwoordig worden dergelijk toevoegingen, ter verbetering van de smeeroliekwaliteit, additieven genoemd.

Afhankelijk van de zeer uiteenlopende toepassingen van smeerolie zijn verschillende eigenschappen van belang. Zo zal een turbine-olie goed bestand moeten zijn tegen veroudering, die van een dieselmotor tegen de zure verbrandingsresten, bij de stoommachine worden hoge eisen gesteld aan het smerend vermogen in aanwezigheid van water terwijl bij een tandwiel overbrenging de smeefilmsterkte en het niet schuimen van belang is.

De voornaamste dopes die tegenwoordig bij smeeroliën gebruikt worden zijn:

- Anti-oxidanten

- Anti-corrosiedopes
- Oplosdopes (Detergents)
- Anti-schuimdopes
- Hechtingsdopes (Oiliness dopes)
- V.I.'s (Viscositeit improvers)
- E.P.-dopes (Extreme Pressure dopes)

Anti-oxidanten

Minerale oliën hebben van nature een lichte neiging om onder invloed van de zuurstof uit de lucht te oxideren. Dit noemt men het verouderen van de olie. De oxidatieproducten van de olie reageren zuur en kunnen daardoor de metalen waarmee ze in aanraking komen aantasten. Op een enkele uitzondering na neemt bij veroudering de viscositeit toe, de kleur wordt donkerder en er kunnen kleverige, harsachtige bezinksels worden gevormd. De snelheid waarmee een olie veroudert wordt voor een groot deel bepaald door de temperatuur tijdens het smeren en de opslag in de aflooptank. Als de temperatuur onder de 70 °C blijft is de oxidatie minimaal. De aanwezigheid van sommige metalen of combinaties daarvan kunnen de oxidatie versnellen. De diverse dopes uit de groep anti-oxidanten hebben als eigenschap gemeen dat ze de oxidatie door zuurstof verhinderen dan wel verminderen.

Anti-corrosiedopes

Corrosie in een smeeroliesysteem kan optreden door de aanwezigheid van zure bestanddelen. Deze kunnen afkomstig zijn van de oxidatie van de smeerolie in het systeem. Ze kunnen, bij dieselmotoren, ook gevormd zijn uit de zwavel in de verbrandingsproducten. In de scheikunde worden stoffen welke een zuur kunnen neutraliseren, base genoemd. Soda, dat ook gebruik wordt bij de raffinage van smeerolie, is een voorbeeld van een base. Als er gesproken wordt over een basische dope dan wordt een anti-corrosie dope bedoeld. In sommige gevallen kan corrosie veroorzaakt worden door water in de smeerolie. De meeste anti corrosie dopes vermengen zich met water, zodat het water geen kwaad meer kan. Als het water door bezinking of zoals bij hedendaagse smeersystemen door middel van centrifugeren verwijderd wordt gaat een deel van de dope verloren.

Oplosdopes

Bij dieselmotoren en trunkzuigermotoren in het bijzonder kunnen er onverbrande koolstofdeeltjes in de smeerolie terecht komen. Als er niets aan gedaan wordt zetten deze zich af op plaatsen waar de olie een lage snelheid heeft en bevorderen zij het aanbakken van de olie tegen hete machinedelen. Dit komt voornamelijk doordat de kooldeeltjes de neiging hebben samen te klonteren. Als gevolg hiervan kan ernstige vervuiling ontstaan, oliekanalen kunnen dichtslibben en filters kunnen er verstopt door raken. Evenals zeep vuildeeltjes kan losmaken, zo kan een oplosdope vuildeeltjes zwevend maken en houden zodat ze niet samenklonteren en bezinken. Met het verversen worden ook deze uiterst kleine deeltjes samen met de olie afgetapt. Bij een stoommachine zul je deze situatie echter niet makkelijk aantreffen.

Anti schuimdopes

In een groot aantal gevallen wordt de olie sterk geklutst of worden door een andere oorzaak bellen gevormd. Deze oliebellen knappen vroeg of laat. Duurt dit echter te lang, dan ontstaat er een schuimlaag welke de ruimte boven de olie opvult en verhindert dat deze bezinkt. Bij een druksmeersysteem zal dit uiteindelijk leiden tot uitval van de smeeroliepomp en dientengevolge van de smering. Bij een hydraulisch systeem zoals een reguleur zal dit de goede werking van de machine nadelig beïnvloeden. Voor al deze gevallen worden anti-schuimdopes aan de olie toegevoegd die er voor zorgen dat het schuim snel wordt afgebroken.

Hechtingsdopes

De mate waarin de smeerolie aan het te smeren oppervlak hecht werd vroeger wel het smerend vermogen genoemd. Deze hechting is vooral van belang in gevallen waar de smeerfilm verbroken dreigt te worden. Het heeft te maken met de adhesie tussen de olie en het metaal, maar ook met de cohesie van de oliemoleculen onderling. In het Engels heet dit begrip de oiliness. Hier voor is al aangegeven dat de smerende eigenschappen van plantaardige en dierlijke oliën beter zijn dan die van minerale oliesoorten maar een mindere oxidatie stabiliteit bezitten en er vaak gekozen wordt voor een goede mix tussen de goede en slechte eigenschappen van de twee. Een smeerolie op paraffine basis heeft een slechter hechtend vermogen dan een naftenische olie. Daar waar een goed hechtend vermogen een eis is, zoals bij de smering van de zuiger in een stoomcilinder wordt in de eerste plaats voor een naftenische olie gekozen. Met een oiliness dope kan tegenwoordig bijna elk gewenst hechtend vermogen verkregen worden, ook bij paraffinische oliesoorten.

Viscositeitsindex-verbeteraars

De viscositeit van smeerolie verandert met de temperatuur. Bij naftenische smeeroliën treedt dit verschijnsel sterker op dan bij paraffinische. Dit viscositeitsverloop van een smeerolie is van bijzonder belang bij machines die bij sterk wisselende temperaturen moeten werken. Bij stoommachine-installaties speelt dit viscositeitsverloop slechts een geringe rol omdat voordat een machine in werking wordt gesteld deze wordt voorverwarmd en daardoor min of meer op bedrijfstemperatuur is. Ook wordt in sommige gevallen de smeerolie van de krukpen- leibaan en de kruishoofdlagers voorverwarmd.

Het viscositeitsverloop is met behulp van dopes (improvers) te verbeteren. Het verloop legt men vast met een index: de zogenoemde viscositeit index.

Door middel van onderzoek wordt de viscositeit van eenzelfde olie bij verschillende temperaturen bepaald en de resultaten ervan in een viscositeitskromme vastgelegd. Het blijkt, dat de viscositeit van verschillende oliën niet even sterk toeneemt bij het stijgen van de temperatuur.

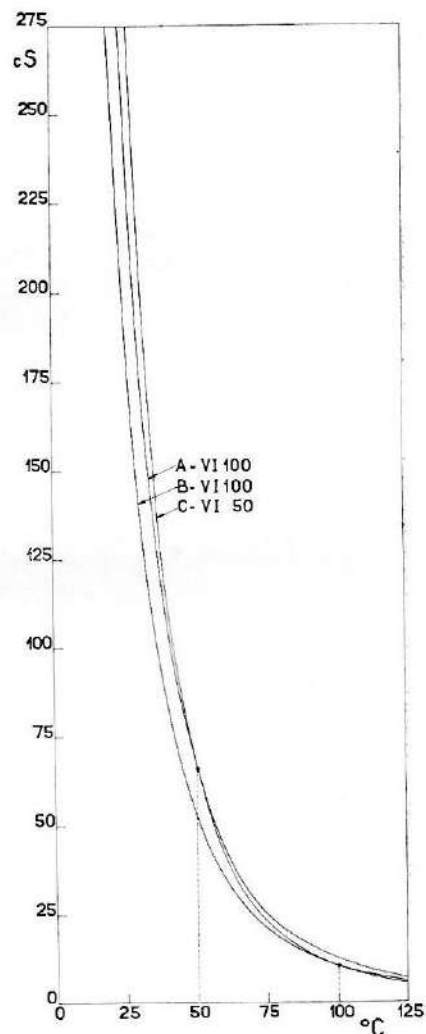
Om zonder een compleet diagram toch een indruk te verkrijgen van de temperatuursafhankelijkheid van de viscositeit van een smeerolie wordt gebruik gemaakt van de viscositeitsindex. Deze index wordt als volgt bepaald:

$$V. I. = \frac{L - U}{L - H} \cdot 100$$

Waarin:

V.I.	=	Viscositeitsindex
L	=	De viscositeit bij 100 °F van een olie met sterke temperatuursveranderlijkheid van de viscositeit (V.I. = 0)
H	=	De viscositeit bij 100 °F van een olie met een geringe temperatuursveranderlijkheid van de viscositeit (V.I. = 100)
U	=	De viscositeit bij 100 °F van de beschouwde olie.

Er is voor een aantal L- en H-oliën een standaard vastgelegd, die paarsgewijs bij 210 °F dezelfde viscositeit hebben. Voor elk geval wordt dan dat paar L- en H-olien als vergelijking genomen, dat bij



210 °F dezelfde viscositeit heeft als de beschouwde olie. Hierbij is 100 °F ~ 38 °C en 210 °F ~ 100 °C. Het uiteindelijke V.I. cijfer van de beschouwde olie is afhankelijk van de viscositeitseigenschappen van beide L- en H-oliën van de vergelijkingsgroep die men als standaard kiest. Omdat deze willekeurig gekozen zijn heeft het V.I. cijfer geen enkele fysische waarde. Voor de in het algemeen bij kamertemperatuur dik vloeibare stoomcilinder olie varieert de V.I. tussen de 85 en 105. Ging het V.I. cijfer aanvankelijk tot de waarde 100, tegenwoordig komen waarden tot 160 en meer voor door de toepassing van speciale V.I. improvers

Viscositeitskrommen

Extreme Pressure - dopes

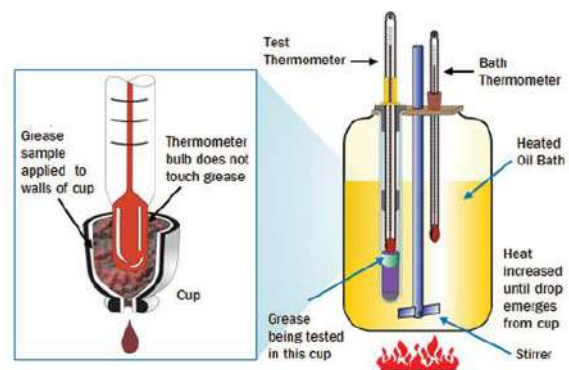
In gevallen waarin de smeermilieu verbroken of bijna verbroken wordt treedt metallisch contact op. Onder normale omstandigheden is dit het begin van vreten, waardoor beide oppervlakken steeds ruwer worden en er op zijn minst sterke slijtage optreedt. Een E.P. – dope (Extreme Pressure) kan hiervoor een oplossing bieden, doordat op die plaatsen waar het contact optreedt er een gladde beschermende laag op het glijvlak gevormd wordt. Ondanks het feit dat de smering dan eigenlijk niet tegen de extreme hoge belasting opgewassen is treedt er geen beschadiging op. Het verbreken van een smeermilieu treedt op bij te dunne smeermilieu, veranderende bewegingsrichting en schokken zoals die zich kunnen voordoen bij een kruishoofd van een stoommachine of de kruipennen van een trunkzuigermotor.

Smeervetten (samenstelling)

Smeervetten worden vervaardigd door een smeerolie op een bepaalde manier te mengen met een zogenoemde metaalzeep. Als er speciale eigenschappen vereist zijn worden er tegenwoordig hulpstoffen of dopes aan toegevoegd. Hoewel er tegenwoordig ook wel synthetische oliën toegepast worden is de olie in de meeste smeervetten van minerale oorsprong. Een metaalzeep is een verbinding tussen een metaal en een vetzuur. De zeep, huishoudzeep is een eenvoudig voorbeeld, wordt gemaakt door bijvoorbeeld kalkmelk of natronloog in warme toestand te verzeppen met plantaardige olie. Hoe meer kalk men neemt hoe stijver het uiteindelijke vet. De zeep vormt het skelet waar de olie in gevangen is. De zeep die voor smeervetten van belang zijn bevatten de elementen Calcium (Ca), Natrium (Na), Aluminium Al, Lithium (Li) of Lood (Pb). De eigenschappen van het vet worden voor een groot deel bepaald door de gebruikte zeep. Doordat bijvoorbeeld kalk niet oplost in water, is een vet op basis van een Calciumzeep goed waterbestendig. Door de verhouding zeep/olie in het vet te variëren kan een andere mate van stijfheid bereikt worden.

Smeervetten (druppelpunt)

Wanneer een vet verwarmd wordt laat het zeepskelet bij een bepaalde temperatuur de olie los. Bij verdere temperatuurverhoging vervloeit het vet tot het uiteindelijk helemaal vloeibaar wordt. Bij afkoeling stolt de zeep maar neemt niet vanzelf weer de oorspronkelijke structuur aan. Zodra het zeepskelet begint te smelten is het al minder geschikt voor zijn doel. We noemen dit het druppelpunt van het vet. Dit druppelpunt wordt bepaald met het hiernaast afgebeelde apparaat van Ubbelohde en is belangrijk te weten voor de beoogde toepassing. Het apparaat bevat een houder waarin een voorgeschreven hoeveelheid vet wordt gedaan. Onder in de houder zit een gat. Op nauwkeurig vastgestelde wijze worden de houder met thermometer en het zich daarin bevindende vet op de hiernaast geïllustreerde wijze verwarmd. De temperatuur waarbij zich voor het eerst vet uit de houder valt is het druppelpunt.



Meting van het druppelpunt

Als het vet het druppelpunt heeft bereikt is het voor verder gebruik ongeschikt. De bedrijfstemperatuur moet daar dus altijd onder blijven. Globaal gelden onderstaande waarden voor de volgende vetsoorten:

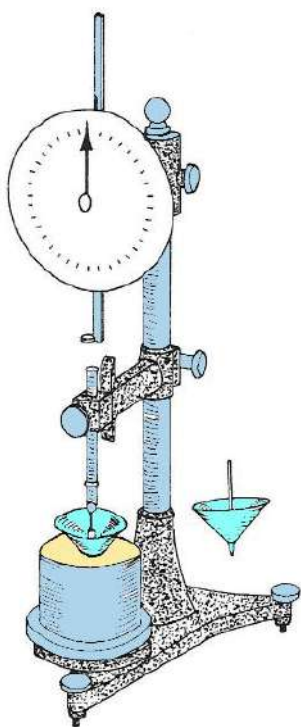
- Calciumzeepvetten 90 °C
- Natriumzeepvetten 150 °C
- Lithiumzeepvetten 180 °C
- Aluminiumzeepvetten 70 °C

Door fabrikanten wordt in de regel een bedrijfstemperatuur aanbevolen die tot wel 40 °C onder het vastgestelde druppelpunt ligt.

Smeervetten (penetratiegetal)

De stijfheid of consistentie van een smeervet is een belangrijke eigenschap. Hiervan hangt het af of een vet snel tussen de smeervlakken uitgeperst wordt, of het om het lager een beschermende laag vormt die vuildeeltjes tegenhoudt en of het in een vetspuit gebruikt kan worden.

De consistentie wordt gemeten met het hier na afgebeelde penetratie toestel volgens de ASTM (American Society for Testing Materials). Bij een gestandaardiseerde temperatuur van 25 °C wordt een kegelvormig lichaam van voorgeschreven afmeting en gewicht gedurende een tijd van 5 seconden op het glad gestreken oppervlak van een vet gezet en wordt vervolgens de indringing in tienden van millimeters gemeten.



Penetratietoestel (volgens ASTM)

NGLI-nummer	Penetratie in 0,1 mm
000	475 - 445
00	430 - 400
0	385 - 355
1	340 - 310
2	295 - 265
3	250 - 220
4	205 - 175
5	160 - 130
6	115 - 85

NGLI classificatie smeervetten

Door het NLGI (National Lubricating Grease Institute), eveneens uit Amerika, zijn de verschillende penetratie waarden in groepen ingedeeld en voorzien van een NLGI-nummer. Een en ander zoals hier voor is aangegeven. Uit deze classificatie blijkt dat een hoog nummer een stijf vet voorstelt.

						pag.	
Lithium				SHELL ALVANIA EP Vetten			17 / 18
Lithium				SHELL ALVANIA Vetten R			19
Calcium + grafiet				SHELL BARBATIA Vet 4			27
Speciale klei				SHELL DARINA Vet 2			54
Speciale klei				SHELL DARINA EP Vet 2			54
Speciale klei				SHELL DARINA Vet R2			54
Calcium				SHELL FDA 2			70
Lithium + MoS ₂ / grafiet				SHELL Heavy Duty Grease 221 (Light)			81
Petrolatum + grafiet				SHELL Kettingvet			193
Speciale klei				SHELL Kuggfett			86
Calcium				SHELL LIVONA Vet 3			88
Calcium				SHELL OSSAGOL V			124
Calcium				SHELL Pijpdraadsmeer			196
Calcium				SHELL RHODINA Vetten			126
Natrium				SHELL SIMNIA Vet O			138
Natrium				SHELL Tandwielvet H			146
Lithium				SHELL TIVELA Compound A			161
Calcium				SHELL UNEDO Vetten			173
Paraffinen				SHELL Base Coat			28
Calcium				SHELL Slip Coat			139
Verklaring van de tekens:					Tandwielkasten		
	Glijlagers				Tandwielen (niet gesloten omkasting)		
	Wentellagers				Bedrijfstemperatuur lager dan 120 °C		
	Wentellagers (niet snel draaiend)				Bedrijfstemperatuur hoger dan 120 °C (zie desbetreffende produktbeschrijvingen)		
	Zware belasting				Vochtbestendig		
	Stotende belasting				Goed bestand tegen water		
	Pakkingbussen				Goed beschermend tegen roesten		
	Transmissiekettingen				Zeer goed beschermend tegen roesten		
	Schroefdraad (pijpeinde)						

Oriëntatietabel Shell smeervetten

Vaste smeermiddelen

Behalve vloeibare- en half vloeibare smeermiddelen komen in gemalen ook vaste smeermiddelen voor. De bekendste hiervan zijn grafiet en molybdeensulfide. Grafiet, ook wel potlood genoemd, wordt meestal niet zo uit de groeven gebruikt, maar bereid in een elektrische oven: het zogenoemde

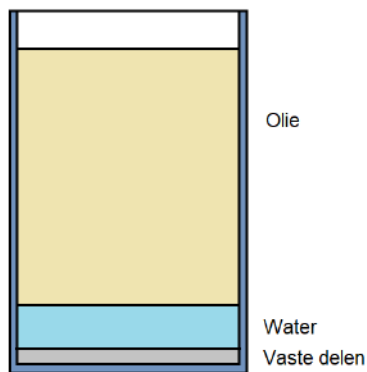
vlokgrafiet. Deze fijne vlokgrafiet wordt vermengd met smeerolie gebruikt voor het insmeren van wrijfvlakken van opengemaakte cilinders en stoomschuifkasten en om nieuwe of pasgemaakte zuiger- of stoomschuifstangen te laten inlopen. Grafiet is geen smeermiddel maar de uit zeer dunne plaatjes opgebouwde koolstofdeeltjes glijden bijna wrijvingsloos over elkaar en zijn in combinatie met olie een probaat middel tegen warmlopen van zuigers en stangen bij stoomwerktuigen. Men heeft meermalen ervaren dat bij dit middel, bestaande uit een mengsel van olie en colloïdaal opgelost grafiet, het grafiet de door het warmlopen ontstane oneffenheden opvult en de olie voor de smering zorgt. Grafiet vermengd met vet of dikke olie wordt vaak op de scheidingsvlakken van deksels en flenzen gesmeerd om deze bij reparatie of herstelwerkzaamheden gemakkelijk te kunnen losnemen. Om dezelfde redenen wordt de schroefdraad van bouten en draadeinden hiermee ingestreken.

Molybdeen-disulfide (MoS_2) is een anorganische verbinding van molybdeen en zwavel, die onder andere wordt toegepast in smeermiddelen. De stof komt voor als een grijs kristallijn poeder dat onoplosbaar is in water. Molybdeensulfide heeft een plaatachtige hexagonale kristalstructuur, waarvan de laagjes gemakkelijk langs elkaar glijden, min of meer vergelijkbaar met dat van het hiervoor aangegeven grafiet. In de natuur komt het voor als molybdeniet.

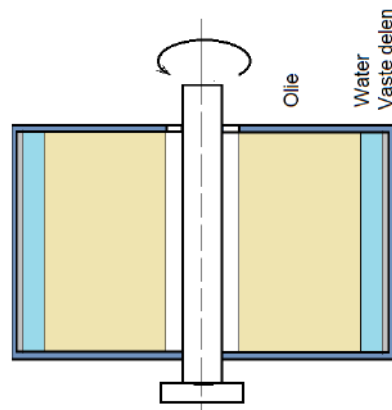
Het wordt vaak bijgemengd in minerale oliën en zorgt voor een betere smering en voorkomt schade aan te smeren onderdelen, die plotseling zonder smeerolie komen te staan. Molybdeen-sulfide wordt gebruikt als een fijn poederig, droog smeermiddel met een deeltjesgrootte van 1 tot 100 μm . In de jaren 40 van de twintigste eeuw werd het door de firma Dow Corning onder het merk Molykote verkocht. Ook nu worden andere smeermiddelen onder deze naam in de handel gebracht. Aan de lucht blootgesteld oxideert het bij 315 °C. In omgevingen zonder zuurstof kan het onder omstandigheden tot 1100 °C toegepast worden en is daarom een uitstekend smeermiddel voor diverse toepassingen bij oude stoommachine-installaties. Het wordt ook vaak bijgemengd, soms in combinatie met grafiet in vetten, die gebruikt worden voor het smeren van slecht toegankelijke delen, en als additief in nylon en teflon voor het verbeteren van de glij-eigenschappen van deze relatief moderne kunststoffen.

Reinigen van smeerolie (bezinking)

Hoe weinig het ook zal zijn, in smeerolie zeker als deze enige tijd gebruikt is, zullen zich altijd water of vaste verontreinigingen zoals metaalslijpsel bevinden. Deze ongewenste bestanddelen kunnen verwijderd worden door de olie op een warme plaats stil te laten staan waardoor de zwaardere bestanddelen onder invloed van de zwaarte kracht bezinken. Men krijgt dan een afscheiding zoals is getekend in de linker figuur hieronder.



Bezinking met behulp van zwaartekracht



Scheiding met behulp van centrifugaalkracht

De zwaartekracht oefent daarbij op ieder deeltje een kracht K uit volgens de formule:

$$K = m \cdot g \text{ [kgf]}$$

Waarin:

- m = de massa van het deeltje [kg]
- g = de versnelling van de zwaarte kracht [m/sec²].

De zwaardere deeltjes zullen zich door de lichtere olie omlaag verplaatsen. Bij deze verplaatsing ondervinden zij een belangrijke weerstand ten gevolge van de dik vloeibare olie. Dientengevolge is het bezinken bij dik vloeibare olie een langdurig proces dat door verwarming kan worden versneld. Smeerolie is altijd een kostbaar product geweest en de reden dat men deze opgezette tijden aftapte, liet bezinken en opnieuw gebruikte. Ook de slecht bezinkbare emulgeerbare stoomcilinderoliën werden bij de filterbak van het condensaat afgeroomd en na bezinking opnieuw gebruikt. Omdat men na bezinking niet te ver kan aftappen treden daarbij aanzienlijke verliezen op.

Reinigen smeerolie (centrifugereren)

Laat men de olie in een vat (centrifuge of separator) snel rondwentelen dan krijgt men de afscheiding volgens de rechterfiguur op de vorige bladzijde. De vaste bestanddelen vormen de buitenste ring, dan volgt het water en tenslotte de olie in de binnenste ring. De afscheiding vindt nu plaats volgens de centrifugaalkracht. De centrifugaalkracht oefent daarbij op ieder deeltje een kracht K uit volgens de formule:

$$K = m \cdot a \text{ [kgf]}$$

Waarin:

- m = de massa van het deeltje [kg]
- a = de versnelling van de centrifugaalkracht [m/sec²].

Hierbij is de centrifugaalversnelling:

$$a = \omega^2 \cdot r \text{ [m/sec}^2\text{]}$$

Waarin:

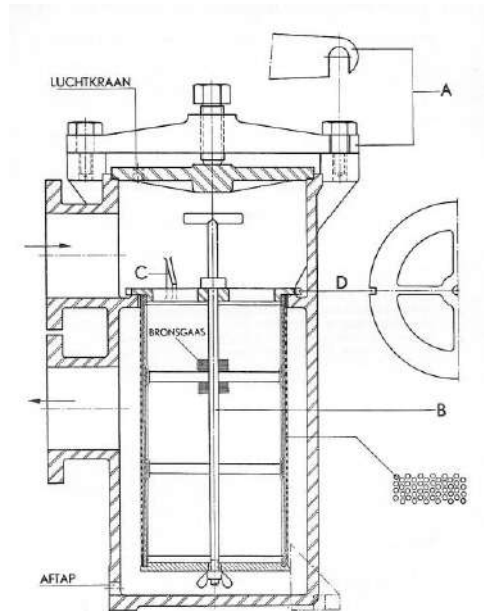
- ω = de hoeksnelheid van de trommel [rad./sec]
- r = de straal van de centrifuge trommel [m].

Uit het bovenstaande mag worden afgeleid dat de centrifugaalversnelling en daarmee ook de centrifugaal- kracht, recht evenredig is met de straal van de trommel en het kwadraat van de hoeksnelheid. Bij een trommel diameter van 300 mm en 600 omw/min betekent dit dat de kracht die de deeltjes doet afscheiden 6000 keer groter is dan in een bezinktank.

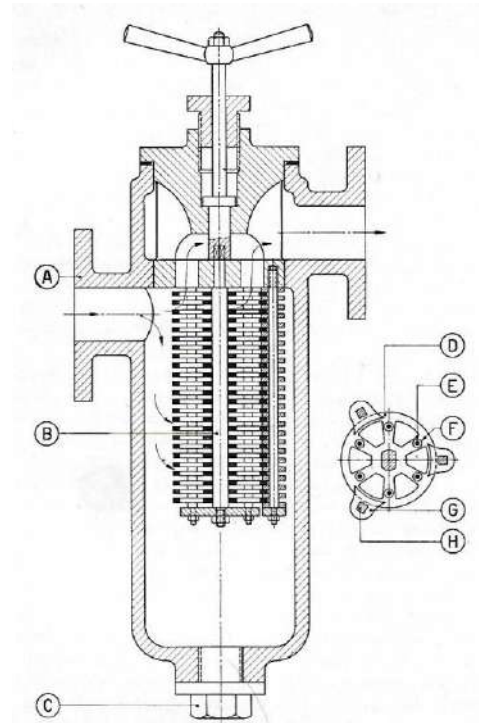
De uiteindelijke separator is zodanig ingericht dat in een continue proces de olie en het water gescheiden worden. Voor het verwijderen van de vaste stoffen moet de separator worden gestopt en losgenomen. De vaste delen moeten met een houten spatel worden los gestoken en handmatig verwijderd.

Reinigen van smeerolie (filtratie)

Een derde manier van oliereiniging is door middel van filters. Filters komen in verschillende uitvoeringen voor en worden al naar gelang de opstelling ten opzichte van de oliepomp onderscheiden in zuig- en persfilters. Het zuigfilter dient om grove verontreinigingen tegen te houden die de pomp kunnen beschadigen. Het persfilter is om kleine vaste verontreinigingen uit de olie te halen. Het meest eenvoudige filter is het korffilter. Het filter bestaat uit een plaatstalen, geperforeerde cilinder waar aan de binnenzijde brons-gaas is bevestigd. Het gaas van het zuigfilter heeft mazen van 0,6 – 1 mm en het persfilter 0,2 – 0,5 mm. Het geheel is ondergebracht in een gietijzeren huis, aan de bovenzijde afgesloten door een gekneveld deksel. Om het filtreren tijdens het schoonmaken door te kunnen laten gaan is het filter dubbel uitgevoerd en voorzien van afsluiters om het wisselen mogelijk te maken. Om te kunnen zien of het filter schoongemaakt moet worden is deze op zowel de aan- als de afvoerszijde voorzien van een manometer. Volgens de stromingsrichting wordt de korf in het filterhuis gedrukt. Om er zeker van te zijn dat het filter niet omhoog komt is deze voorzien van nokken C in het huis en gleuven D in de rand van de korf. Na het aanbrengen van het filter wordt deze verdraaid en voorkomen de nokken dat het filter op de een of andere manier wordt opgetild en er een kortsluitstroom ontstaat. Soms wordt het filter voorzien van een permanente magneet. Hiermee wordt het eventueel aanwezige metaalslijpsel opgevangen.



Korffilter



Autocleanfilter

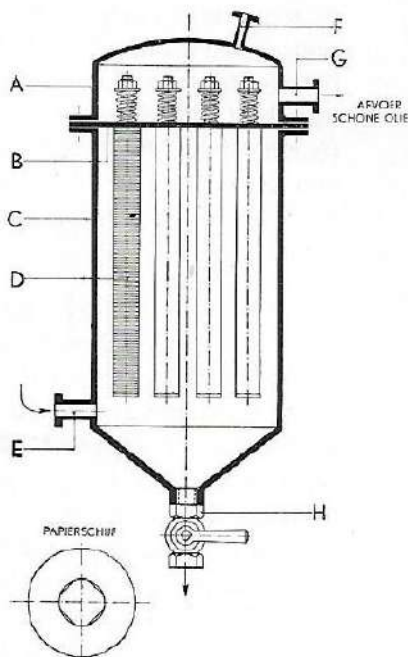
Autocleanfilter

Het nadeel van een korffilter is dat bij het schoonmaken de filters worden geopend, waarbij veel olie gemorst wordt. Een filter dat niet geregeld geopend hoeft te worden is het autocleanfilter. Het eigenlijke filter bestaat uit dunne metalen platen D op afstand gehouden door zeer dunne ringen E. De platen zijn op een stang met twee platte kanten geschoven. De platen hebben gaten zoals in de figuur is te zien waardoor de olie wordt afgevoerd. Het geheel wordt met 6 stangen bij elkaar gehouden. Op deze stangen bevinden zich ook de afstandsringen E met een dikte van 0,2 – 0,5 mm waardoor tussen de platen spleten gevormd worden. Het geheel is verdraaibaar in een gietijzeren huis ondergebracht. De olie wordt aan de buitenzijde van het filterelement aangevoerd. De vaste delen in de olie groter dan de spleetwijdte tussen de platen worden verhinderd naar binnen te stromen en verzamelen zich dus aan de buitenzijde van het element. Na verloop van tijd bouwt zich hier een laag op die meehelpt bij het filteren en ook kleinere delen afvangt. De gereinigde olie stijgt op door de openingen in de platen en wordt via de afvoertuit afgevoerd. Om het filtermateriaal af te kunnen voeren zijn de stangen H aangebracht met daarop mesjes die precies tussen de spleten vallen. Door nu het filter element 120° te draaien worden de vuildeeltjes van het filterelement afgeschraapt en vallen in de onderliggende ruimte. Door het filter buiten bedrijf te stellen kan na het uitschroeven van de prop aan de onderzijde het filtermateriaal verwijderd worden.

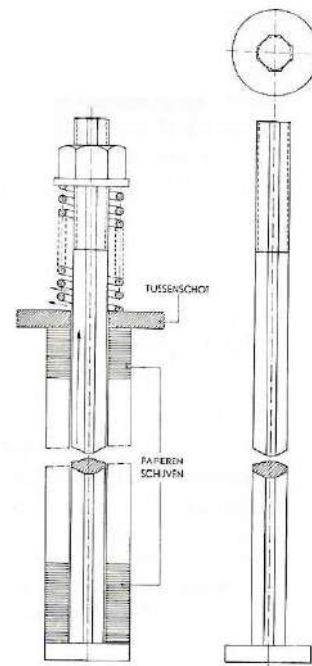
Streamline-filter

De onderstaande figuur geeft een filter weer dat bekend staat onder de naam "Streamline-filter". In plaats van metalen plaatjes worden schijfjes stevig papier gebruikt. Het filterhuis bestaat uit de

plaatstalen cilindervormige delen A en C, waartussen een schot B is bevestigd. Aan dit tussenschot is een aantal filterelementen gehangen. Deze elementen waarvan een doorsnede is getekend, hebben een vierkante doorsnede, zijn aan de onderzijde van een kraag voorzien en aan de bovenzijde van schroefdraad. Hierop worden papieren ringen geschoven. Deze ringen zijn van een bijzondere samenstelling en worden door middel van een veer en een moer onder een bepaalde druk samengeperst. Door de oneffenheden in de papierlagen blijft er altijd een ruimte bestaan welke kleiner is dan 5/100.000 mm.



Streamline-filter



Detail filterelement.

Door de tuit E wordt de te reinigen olie aangevoerd en door de papierlagen geperst. De vaste vuildeeltjes blijven op en gedeeltelijk ook tussen de papierlagen achter. De gereinigde olie stijgt langs de stang omhoog en wordt via de tuit G afgevoerd. Voor het reinigen van de filterelementen maakt men gebruik van perslucht onder een druk van 3 kg/cm² hiervoor is een speciale tuit F aangebracht. Het vuil wat zich aan de omtrek van de filterelementen verzameld heeft wordt met de perslucht weggeblazen en verzamelt zich in de zak van het filter waaruit het door middel van het openen van tapkraan H kan worden verwijderd.

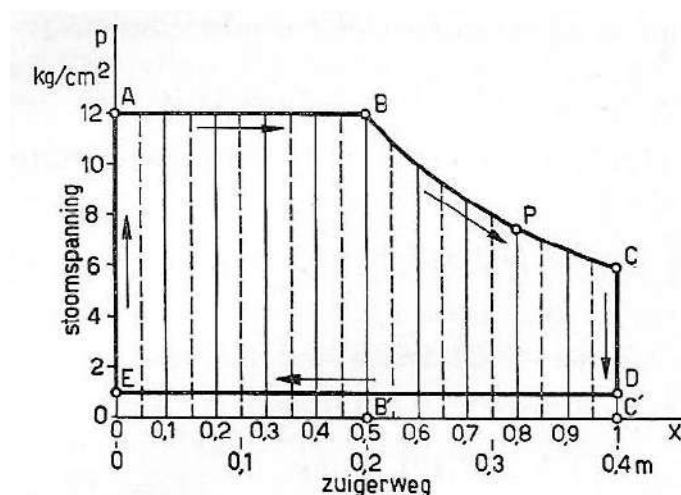
De uiterst kleine doortocht tussen de papierlaagjes zorgt voor een uitstekende afscheiding van zelfs de kleinste vaste deeltjes. De introductie van steeds verdergaande dopes, denk daarbij aan grafiet en molybdeen-disulfide, maakt dat dit filtertype niet altijd inzetbaar is omdat ze naast de vuildelen ook de additieven uit de smeerolie verwijdert en het smeermiddel minder of zelfs onbruikbaar maakt.

4.15 Arbeid en de bepaling ervan

Met behulp van een grafische voorstelling van het proces dat zich in een stoomcilinder afspeelt alsmede de tijd waarin dat proces zich afspeelt is de arbeid per tijdseenheid, dus het vermogen van een stoommachine te bepalen. Bij de bepaling ervan maken we gebruik van het indicateurdiagram, de afmetingen van de stoomcilinder en de zuigerstang alsmede de slag van de zuiger en het toerental van de machine tijdens het opnemen van het diagram. We noemen dit het geïndiceerde vermogen, wat wordt aangeduid met ipk. Als we de wrijvingsverliezen van de stoommachine uitdrukken in procenten van het geïndiceerde vermogen en van het geïndiceerde vermogen aftrekken dan krijgen we het vermogen wat aan de as van de stoommachine beschikbaar komt. Dit vermogen noemen we as-paardenkrachten, wat wordt aangeduid met apk.

4.15.1 Drukverloop in een stoomcilinder

Eerder in deze verhandeling zijn we nagegaan wat er met de stoom gebeurt, als hij in de cilinder wordt toegelaten en hebben we gezien dat een gedeeltelijke toelaat een gunstige werking heeft op de verrichte arbeid. Om dit nauwkeuriger te kunnen bekijken tekenen we een grafische voorstelling van de wijze waarop de druk in de cilinder gedurende een omwenteling verandert. Hiertoe zetten we in op de x-as de zuigerweg af. Is de zuigerslag bijvoorbeeld 0,4 meter en is de slag door een lengte van 1 dm weergegeven dan is de afstand van 0 – 1 de slaglengte op een schaal van 1 : 4. In punt O staat de zuiger aan dekselzijde. Bij het punt $x = 0,1$ heeft de zuiger $1/10$ deel van zijn slag afgelegd. In punt $x = 0,2$, $2/10$ deel van zijn slag enz. totdat de zuiger in punt $x = 1$ aan de as-zijde is aangekomen. In ieder deelpunt van x op de lijn O X richten we daarna een middelloodlijn op en geven die een lengte die evenredig is met de stoomdruk in de cilinder.



Theoretisch P - V diagram

Heerst in de cilinder met de zuiger aan de dekselzijde erboven een absolute druk van 12 kg/cm^2 dan kunnen we deze een lengte geven van 6 cm. Elke $1/2 \text{ cm}$ komt dus overeen met 1 kg/cm^2 .

Nemen we verder aan dat de stoom gedurende de helft van de slag wordt toegelaten dan zullen de punten 0,1 – 0,5 dezelfde lengte hebben. Verbinden we deze loodlijnen met elkaar dan krijgen we de horizontale toevoerlijn A – B. In B wordt de stoom afgesloten. De stoom die zich dan in de cilinder bevindt krijgt bij het verder bewegen van de zuiger een steeds groter volume en zal de druk afnemen. Deze drukafname vindt ongeveer omgekeerd evenredig aan de volumetoename plaats. Is de zuiger bijvoorbeeld in punt P aangekomen dan is de drukafname dus:

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 \text{ of } P_2 = P_1 \cdot \frac{V_1}{V_2} \text{ [kg/cm}^2\text{]}$$

$$P_2 = 12 \cdot \frac{0,5}{0,8} = 7,5 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$$

Als de zuiger aan dekselzijde is aangekomen dan vinden we op dezelfde manier een druk van:

$$P_2 = 12 \cdot \frac{0,5}{1,0} = 6 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$$

Op identieke wijze kunnen we op alle tussenliggende punten de druk berekenen en door een vloeiende lijn met elkaar verbinden; de expansielijn BC.

Aan het einde van de slag opent de stoomschuif de afvoer, waardoor de ruimte boven de zuiger in verbinding wordt gebracht met de afvoerleiding. Heerst in deze leiding een druk van bijvoorbeeld 1 kg/cm² dan zal de druk plotseling afnemen van punt C naar D. Blijft bij de daarna uitgaande slag van de zuiger de ruimte hierboven steeds in verbinding met de afvoerleiding, dan zal de druk boven de zuiger daarbij ook steeds 1 kg/cm² zijn; aangegeven door de lijn DE.

Is de zuiger teruggekomen aan de dekselzijde dan wordt de stoomtoevoer weer geopend en zal de druk weer toenemen van 1 tot 12 kg/cm², voorgesteld door de lijn EA.

De lijn ABCDEA, die het verloop van de stoomdruk in de cilinder aangeeft gedurende een omwenteling van de kruk noemt men een diagram. Het is een theoretisch diagram, omdat het werkelijke verloop door allerlei nader aan te geven oorzaken anders verloopt.

Van A naar B staat hier op de zuiger een druk van 12 kg/cm². Vermenigvuldigen wij deze druk met het oppervlak van de zuiger in cm², dan vinden we de kracht in kg die de stoom op de zuiger uitoefent bij de verplaatsing van A naar B. Is het zuigeroppervlak bijvoorbeeld 300 cm², dan is de kracht 12 x 300 = 3600 kg.

Bij deze beweging heeft de stoom arbeid verricht, waarvan we de grootte in kgm kunnen berekenen door de kracht in kg te vermenigvuldigen met de afgelegde weg in m. De zuigerslag is zoals hiervoor aangegeven 0,4 m, dus is de afgelegde weg bij 50 % vulling 0,2 m en derhalve de arbeid van de stoom voordat de expansie begint:

$$12 \cdot 300 \cdot 0,2 = 720 \text{ [kgm]}$$

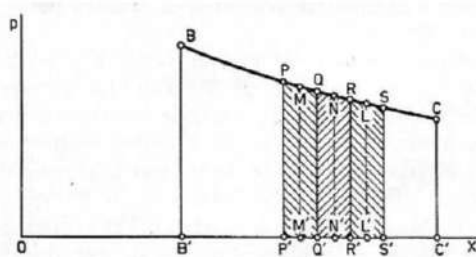
De hoogte OA van dit gedeelte van het diagram is evenredig met de kracht op de zuiger, de lengte OB' is evenredig met de door de zuiger afgelegde weg. Het product van deze kracht en weg geeft zoals we hier voor zagen de arbeid weer. Het product van de lijnlengtes van OA en OB' levert het

oppervlak van de rechthoek OAB B'. Hieruit volgt dat dit oppervlak in een of andere schaal een maat is voor de verrichte arbeid.

Voorbij B neemt de stoomdruk voortdurend af, dus ook de kracht op de zuiger en de geleverde arbeid.

Detaileren we dit deel van het diagram dan kunnen we opmerken dat de afgelegde weg wordt voorgesteld door de lijn B'C'. Het zuigeroppervlak is nog steeds 300 cm². De kracht op de zuiger neemt echter voortdurend af, omdat de stoomdruk afneemt van een waarde BB' tot CC'. De thans verrichte arbeid zullen we dus vinden door het zuigeroppervlak te vermenigvuldigen met de afgelegde weg B'C' en met een stoomdruk die ligt tussen BB' en CC', die we de gemiddelde druk noemen.

Beschouwen we hierbij een klein gedeelte P''Q'' van de expansielijn dan zal de hoogte van de lijn MM' bij benadering de gemiddelde druk in deze strook voorstellen. Hoe kleiner we het stuk PQ



nemen des te nauwkeuriger zal de gemiddelde druk overeenstemmen met MM'. De gemiddelde druk tijdens de gehele expansie vinden we door de gemiddelde druk van alle deelstukje bij elkaar op te tellen en te delen door het aantal deeltjes.

Arbeid tijdens de expansie

Het bepalen van de gemiddelde druk tijdens de expansie in de hiervoor gegeven figuur doen we dus door het oppervlak BCC'B'' te verdelen in een aantal even brede verticale stroken, in deze stroken de middelloodlijn op te richten en hiervan de lengte op te meten. Bij de aangenomen drukschaal vinden we gemiddelde druk van elk strookje. In de op schaal getekende figuur zijn 5 stroken getekend die in de aangenomen schaal drukken geven van 10,9; 9,2; 8,0; 7,1; en 6,3 kg/cm². De gemiddelde druk is dus:

$$p_m = \frac{(10,9 + 9,2 + 8,0 + 7,1 + 6,3)}{5} = 8,3 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$$

De tijdens de expansie verrichte arbeid:

$$8,3 \cdot 300 \cdot 0,2 = 498 \text{ [kgm]}$$

De naar het deksel bewegende zuiger moet zich bewegen tegen een stoomdruk van 1 kg/cm² in. Hiervoor is arbeid nodig die moet worden geleverd door de in beweging zijnde machine zelf, bijvoorbeeld door het vliegwiel. Deze negatieve arbeid, voorgesteld door het oppervlak van de rechthoek OEDC', moet worden afgetrokken van de positieve arbeid van de stoom. De grootte ervan wordt weer bepaald door het product van kracht en weg, dat is hier:

$$1 \cdot 300 \cdot 0,4 = 120 \text{ [kgm]}$$

Per omwenteling van de kruk verkrijgen we bij dit voorbeeld dus aan arbeid:

$$720 + 498 - 120 = 1098 \text{ [kgm]}$$

We kunnen deze arbeid ook vinden door alleen het diagram ABCDE in 10 stroken te verdelen en op de zelfde wijze als bij de expansie is aangegeven de gemiddelde druk van het hele diagram te bepalen. Deze gemiddelde druk blijkt 9,15 kg/cm² te zijn, zodat we voor de arbeid vinden:

$$9,15 \cdot 300 \cdot 0,4 = 1098 \text{ [kgm]}$$

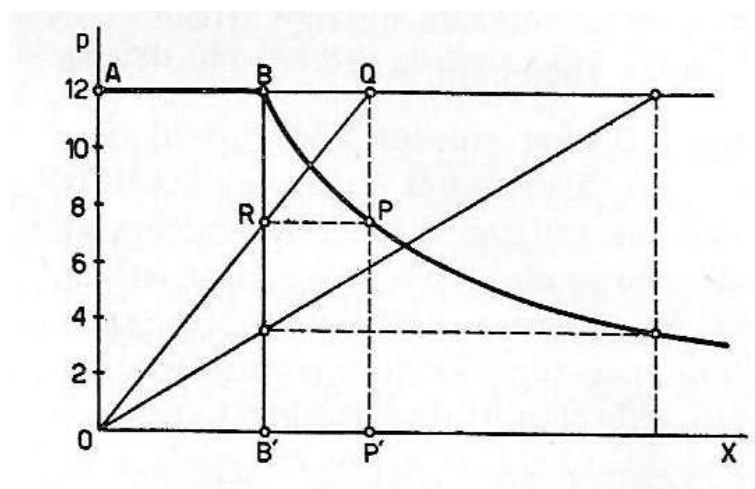
Deze waarde hadden we ook al gevonden door de afzonderlijke hoeveelheden arbeid te berekenen en bij elkaar op te tellen.

Constructie expansielijn

De stoomdruk tijdens de expansie hebben we in het voorgaande voorbeeld gevonden door berekening. De expansielijn kan echter ook door constructie worden gevonden zoals hierna wordt aangegeven. Met deze methode kan met behulp van een indicator diagram bij benadering de schadelijke ruimte van de onderhavige stoommachine worden bepaald.

Stel dat hier de expansie weer begint bij B, dus als de zuiger vanuit de positie O in B' is gekomen. De afstand OB' is een maat voor de grootte van het aanwezige stoomvolume. Is daarna de zuiger in P' gekomen dan is ook thans weer de afstand OP' een maat voor het nieuwe stoomvolume.

De stoomdruk, die in B' gelijk was aan BB' is nu geworden PP'. De vraag is dus hoe we P hebben gevonden. Dit doen we als volgt: we verlengen de lijn AB naar rechts en in het aangenomen punt P' waarvoor we de druk PP' willen bepalen, richten we een loodlijn op die het verlengde van AB in Q snijdt.



Constructie expansielijn

Daarna trekken we de lijn OQ die de lijn BB' in R snijdt. Een horizontale lijn door R snijdt QP' in P het gevraagde punt van de expansielijn. Dit zal zo zijn als in de punten B en P de stoomdrukken omgekeerd evenredig zijn met de bijbehorende volumes, dus bestaat de volgende evenredigheid:

$$BB' : PP' = OP' : OB'$$

Dat dit bij deze constructie juist is, blijkt als we de gelijkvormige driehoeken OQP' en ORB' hierin betrekken en voor deze evenredigheid schrijven:

$$QP' : RB' = OP' : OB'$$

Met het gegeven van één punt kunnen we op deze wijze een groot aantal punten van de expansielijn construeren.

4.15.2 Expansie en expansievoud

Eerder hebben we aangetoond dat het voordeliger is om een machine te laten werken met expansie, dan met volle toelaat. Met een getallenvoorbeeld, en de hiernavolgende figuur, wordt dit hier nogmaals toegelicht.

We beschouwen hiertoe weer de cilinder van de stoommachine uit de vorige paragraaf met een zuigeroppervlak van 300 cm² en een slag van 0,4 m. Verder nemen we aan dat de cilinder met een constante toevoerdruk van 12 kg/cm en een constante afvoerdruk van 1 kg/cm² absoluut werkt. Het diagram van het drukverloop wordt voorgesteld door de rechthoek ABCDE. De per omwenteling geleverde arbeid is weer het product van het zuigeroppervlak en de gemiddeld druk en de slag.

$$300 \cdot 11 \cdot 0,4 = 1320 \text{ [kgm]}$$

Het slagvolume, uitgedrukt in m³, van de zuiger is gelijk aan het oppervalk van de zuiger maal de slag of te wel:

$$0,03 \cdot 0,4 = 0,012 \text{ [m}^3\text{]}$$

Verzadigde stoom met een druk van 12 kg/cm² heeft volgens de stoomtabel een volumieke massa van 0,166 m³/kg, wat wil zeggen dat 0,166 m³ stoom 1 kg weegt. De cilinderinhoud aan stoom weegt dus:

$$\frac{0,012}{0,166} = 0,0723 \text{ [kg]}$$

Dit gewicht levert een arbeid van 1320 kgm, dus zal 1 kg van deze stoom onder de beschouwde omstandigheden een arbeid leveren van:

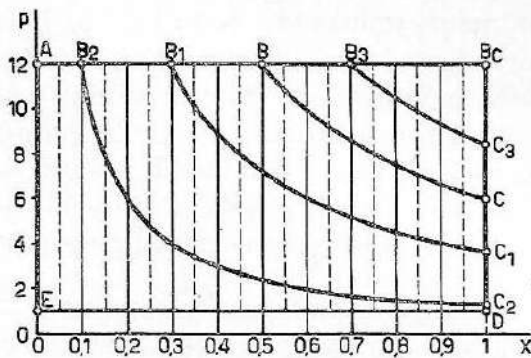
$$\frac{1320}{0,0732} = 18260 \text{ [kgm/kg]}$$

Beschouwen we vervolgens het eerder uitgewerkte geval van deze machine waarbij de stoomtoevoer op 50% van de slag wordt afgesloten dus het diagram ABCDE. Per omwenteling werd hier de helft van de stoom bij volle toelaat toegevoerd dus 0,0362 kg. Deze leverde een arbeid zo rekenden we eerder uit een arbeid van 1098 kgm. Dus geeft 1 kg stoom in deze situatie een arbeid van:

$$\frac{1089}{0,0362} = 30340 \text{ [kgm/kg]}$$

Dit is een belangrijke toename van de per kg stoom geleverde arbeid. Op identieke wijze kan voor een aantal vullingen in dit voor beeld de geleverde arbeid per kg stoom worden berekend. Uit deze berekeningen blijkt telkens weer, wat we al eerder hebben gezegd dat het verkleinen van de vulling minder arbeid oplevert maar wel een aanzienlijk betere benutting van de toegevoerde energie in de vorm van stoom onder druk en hoge temperatuur laat zien.

In de hier onder afgebeelde figuur is dit in beeld gebracht. Uit deze figuur is direct af te lezen hoeveel arbeid bij de verschillende vullingen uit ons voorbeeld per kg stoom wordt geleverd. Bij een 10 %



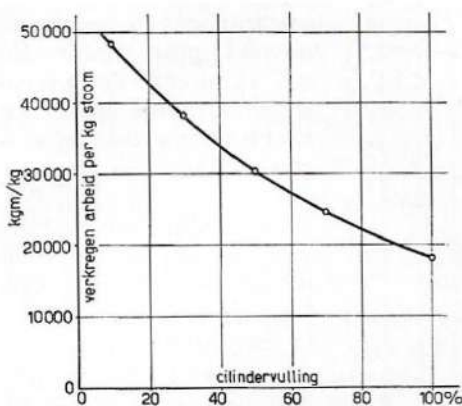
vulling wordt 48400 kgm/kg arbeid geleverd. Dit betekent ten opzichte van de geleverde arbeid bij 100 % vulling, waar 18260 kgm/kg wordt geleverd, een toename van 165 %.

$$\frac{48400 - 18260}{18260} \cdot 100 = 165 [\%]$$

Vulling / expansie

Alhoewel we hier een theoretisch geval hebben beschouwd en de werkelijkheid minder gunstig is zien we direct het grote voordeel van een kleine vulling, dat wil zeggen van een grote expansie. Bij de verhandeling over begincondensatie en naverdamping hebben we gezien dat we de cilindervulling uit praktische overwegingen niet onbeperkt klein kunnen maken. Wil men toch met een grote expansie werken dan moeten we, zoals we eerder hebben aangetoond, de expansie over

meerdere cilinders verdelen. Maakt men de cilindervulling kleiner dan is de expansie van de stoom groter. Om de grootte van de expansie door een getal te kunnen aangeven gebruiken we de term expansievoud. Hieronder verstaan we de verhouding van het eindvolume van de stoom tot het beginvolume van de stoom bij de expansie. We duiden het expansievoud aan met de letter a. Dus:



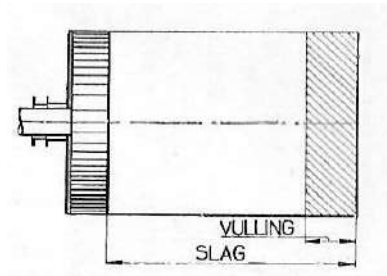
$$a = \frac{\text{eindvolume van destoom}}{\text{begin volume stoom}}$$

Arbeid/cilindervulling

Met behulp van de vulling en de slag van de zuiger in de op de volgende bladzijde gegeven figuur wordt het expansievoud nog eens in beeld gebracht.

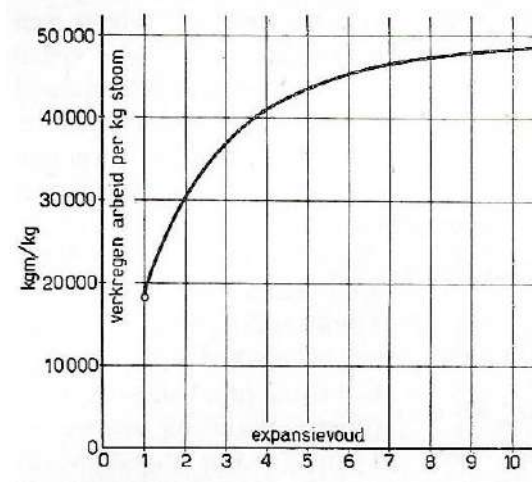
Het in de cilinder gearceerde gedeelte wordt met stoom gevuld en de verhouding van de zuigerslag tot de met stoomtoevoer doorlopen weg is dus het expansievoud. Hebben we dus een vulling van bijvoorbeeld 20% dan wordt tijdens de expansie het volume 5 keer zo groot, zodat het expansievoud $a = 5$. Blijkbaar vinden we a door 100 % te delen door de vulling uitgedrukt in procenten.

In bovenstaande figuur hebben we grafisch aangegeven hoeveel arbeid wij bij ons voorbeeld kregen voor de verschillende vullingen van 10 - 100 % .



Slag / vulling

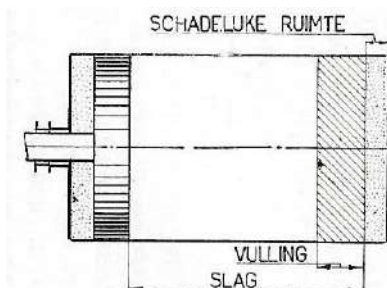
Maken we nu weer een grafiek van de uit 1 kg stoom verkregen arbeid uit het zelfde voorbeeld, maar waarbij wij op de horizontale as de het expansievoud afzetten dan krijgen we de hier onder weergegeven figuur. Hieruit blijkt ook weer dat meer arbeid wordt verkregen uit 1 kg stoom naarmate



de het expansievoud groter is. Uit de figuur kunnen we ook opmaken dat de toename van de verkregen arbeid steeds kleiner wordt naarmate het expansievoud toeneemt. Bij een expansievoud groter dan 10 neemt de verrichte arbeid nauwelijks nog toe met een aangroeiend expansievoud. De definitie, die we hiervoor van het expansievoud hebben gegeven, namelijk de verhouding van de zuigerslag tot het gedeelte van de slag dat met stoomtoevoer wordt doorlopen is niet geheel juist omdat we geen rekening hebben gehouden met de onvermijdelijke schadelijke ruimte.

Arbeid / expansievoud

Volgens de hierna volgende figuur is het beginvolume niet alleen het gearceerde gedeelte maar moet hierbij het volume van de schadelijke ruimte worden opgeteld. Ook bij het eindvolume moet

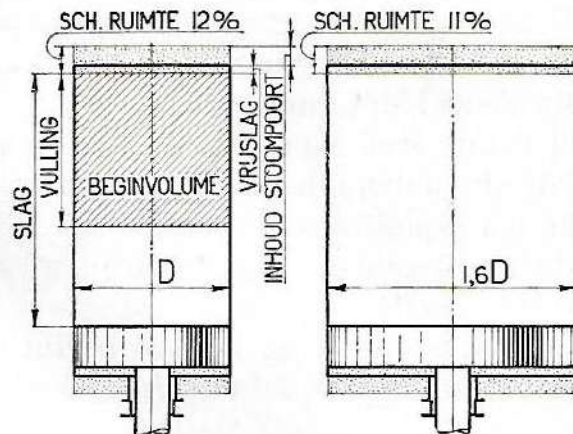


de schadelijke ruimte worden opgeteld. Hebben we bijvoorbeeld een cilinder met een vulling van 20 % van de slag en een schadelijke ruimte van 10 % van het slagvolume dan is het expansievoud geen 5 zoals we hiervoor hebben bepaald maar zal dat dalen naar ongeveer 3,7.

Slag / vulling / schadelijke ruimte

Ook bij een meervoudige expansiemachine zoals de bij gemalen veel toegepaste compoundmachine spreken we van een expansievoud.

Verstaan we er weer onder de verhouding van het eindvolume tot het beginvolume van de stoom, dan kunnen we zeggen dat het eindvolume wordt gevormd door het slagvolume van de lage drukcilinder.



Als we voor de hiernaast afgebeelde verticaal opgestelde compoundmachine in de plaats voor de zuigerdiameter verhouding 1:1.8 nemen en een vulling toepassen van 50 % dan krijgen we een expansievoud van:

$$a = \frac{\frac{\pi}{4} 1,8 D^2 (1,00 + 0,11) S}{\frac{\pi}{4} D^2 (0,50 + 0,12) S} = \frac{3,60}{0,62} = 5,8$$

Ook in dit geval wordt het expansievoud dus kleiner als gevolg van de schadelijke ruimte, alleen is het verschil niet zo groot

als bijvoorbeeld bij de één-cilindermachine met haar gunstige zeer kleine vulling. We hebben bij de bepaling van het expansievoud geen rekening gehouden met de compressie van de stoom in de schadelijke ruimte aan het einde van de afvoer. Daardoor bevindt zich aan het begin van de toevoer in de schadelijke ruimte reeds stoom van vrij hoge druk, zodat dus niet eerst de gehele schadelijke ruimte opgevuld hoeft te worden. Het beginvolume is in werkelijkheid dus iets kleiner dan de toevoer en de schadelijke ruimte. Ook de afvoer is kleiner omdat deze al begint voordat de zuiger in zijn uiterste stand is aangekomen, zodat de expansie korter duurt. Als eindvolume dient dus het cilindervolume aan het eind van de expansie te worden genomen.

Als voorbeeld dient de volgende compoundmachine waarbij de toe- en afvoer geschiedt door kleppen en dus de kanalen gescheiden zijn en men dus minder last heeft van begincondensatie en naverdamping zoals bij schuivenmachines.

- Verhouding cilindermiddellijnen 1 : 2,1
- Vulling H.D. cilinder 25 %
- Schadelijke ruimte H.D. cilinder 11 %
- Schadelijke ruimte L.D. cilinder 8 %
- Begin afvoer L.D. cilinder 93 %

$$a = \frac{\frac{\pi}{4} 2,1 D^2 (0,93 + 0,08) S}{\frac{\pi}{4} D^2 (0,25 + 0,11) S} = \frac{2,1^2 \cdot 1,01}{0,36} = 12,4$$

Voorgaand rekenvoorbeeld laat een zeer gunstig expansievoud zien en is voor veel stoommachine fabrikanten reden geweest machines met kleppen te construeren die vervolgens ook in bemalingsinstallaties zijn toegepast. In de paragraaf over stoomverdeling wordt hier nader op in gegaan.

4.15.3 Compressie en compressievoud

Zoals eerder is opgemerkt laten we een stoommachine niet alleen met expansie maar ook met compressie werken. Dit laatste om aan het einde van de slag de bewegende delen op te vangen en het omkeren van de bewegingsrichting van de zware massa van de zuiger c.a. geleidelijk te doen verlopen. De compressie heeft zoals we hier voor hebben aangegeven ook als doel de schadelijke ruimte met stoom te vullen en op druk te brengen. Als dit niet gebeurt moet, als de zuiger nagenoeg stil staat, eerst deze ruimte opgevuld worden met verse stoom die geen arbeid verricht en dus als verlies moet worden aangemerkt. Daarnaast heeft de compressie nog het voordeel, dat tijdens het samendrukken van de stoom in de schadelijke ruimte de temperatuur oploopt. Het temperatuurverschil van de verse stoom en die in de schadelijke ruimte is dus geringer. Met andere woorden de begincondensatie wordt minder, wat een gunstige invloed heeft op het stoomverbruik van de machine.

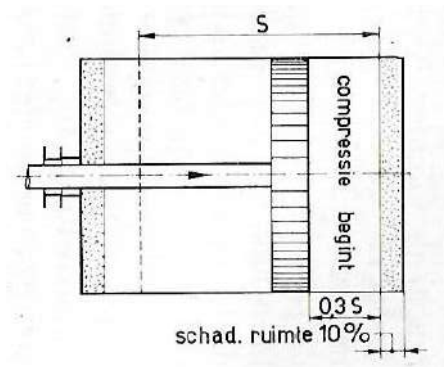
Tegenover deze drie voordelen staat als nadeel, dat voor de compressie arbeid nodig is die wordt onttrokken aan wat de stoom levert bij de werkende slag.. Hoe meer de compressie-einddruk de toevoerdruk nadert, des te minder verse stoom behoeft in de schadelijke ruimte te worden toegelaten en des te kleiner is de begincondensatie. De toe te voeren compressiearbeid wordt evenwel steeds groter en de vraag is wat hier het zwaarst zal wegen. Men kan zeggen dat in het algemeen gesproken, de toestand het gunstigst is, als de compressie van de stoom in de schadelijke ruimte wat sterker is dan de expansie in de cilinder.

Om de mate van compressie in een getal uit te drukken voeren we, analoog aan expansievoud, het begrip compressievoud in. Onder het compressievoud c verstaan we de verhouding van het totale volume dat bij het begin van de compressie aanwezig is tot het volume van de schadelijke ruimte.

$$c = \frac{\text{stoomvolume bij begin compressie}}{\text{stoomvolume schadelijke ruimte}}$$

Is de schadelijke ruimte, zoals op de hierbij gegeven figuur is aangegeven, 10 % van het slagvolume en begint de compressie op 30 % voor het einde van de zuigerslag dan is het beginvolume 40 % van het slagvolume.

Bijgevolg is het compressievoud:



$$c = \frac{\frac{\pi}{4} D^2 (0,30 + 0,10) S}{\frac{\pi}{4} D^2 (0,10) S} = \frac{0,4}{0,1} = 4$$

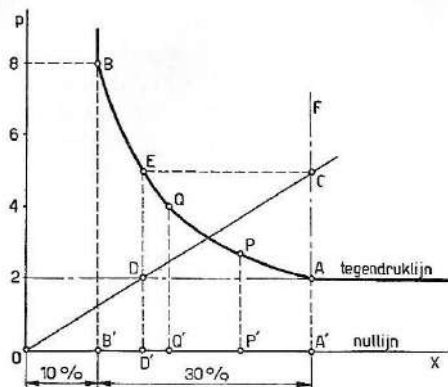
Als de expansie bij dit voorbeeld bij 25 % van de zuigerslag begint dan is het expansievoud:

$$a = \frac{\frac{\pi}{4} D^2 (1,00 + 0,10) S}{\frac{\pi}{4} D^2 (0,25 + 0,10) S} = \frac{1,10}{0,35} = 3,1$$

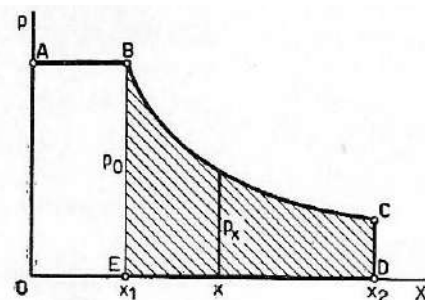
Schadelijke ruimte en compressie

We zien dat het compressievoud inderdaad groter is dan het expansievoud.

de hiernaast afgebeelde konstruktiemethode, ten opzicht van de eerder gegeven uitleg, is dat nu ook de schadelijke ruimte in rekening wordt gebracht. Bij de behandeling van het theoretisch diagram wordt een voorbeeld gegeven hoe in één diagram zowel de expansie- als de compressielyn grafisch kan worden geconstrueerd.



Aan de hand van een globale berekening zal voor een gegeven geval nagegaan worden welke invloed compressie heeft op het stoomverbruik van de machine. Daartoe kiezen we hetzelfde voorbeeld wat we in de voorgaande paragrafen ook hebben beschouwd: namelijk een cilinder met een zuigeroppervlak van 300 cm^2 , en een slag van $0,4 \text{ m}$. Begindruk van de stoom p_1 en een tegendruk p_1 van 2 kg/cm^2 absoluut. Verder nemen we aan dat de schadelijke ruimte 10% is van het slagvolume, de vulling b 30% is, en dat er geen voorafvoer is. We kunnen aan de hand van deze gegevens onderstaande figuur construeren, waarbij aangenomen wordt dat de compressie bij een willekeurig punt E op de afvoerlijn begint. Zoals we hier voor hebben aangegeven drukken we de compressie uit in procenten van de slag, hier voorgesteld door het lijnstuk x . De gemiddelde druk kunnen we berekenen door het diagram te verdelen in rechthoeken en hyperbolische segmenten en daarvan het oppervalk te bepalen, deze bij elkaar op te tellen of, als er sprake is van negatieve arbeid, af te trekken en deze som door de lengte van het diagram te delen.



Hyperbolisch segment B C D E

$$\text{segment BCDE} = p_1 x_1 \cdot \ln. \frac{x_1}{x_2}$$

385/578

de schadelijke ruimte nog een volume stoom met een druk p aanwezig. Comprimeren we dit volume tot een druk $p_1 = 12 \text{ kg/cm}^2$, dat is de druk waaronder de verse stoom wordt toegelaten, dan zal het volume nu worden voorgesteld door het lijn stuk GK waarbij K op het verlengde van de compressielijn ligt. De toelaat kan dus worden voorgesteld door het lijnstuk KB.

Zonder dit hier af te leiden kan het lijnstuk KB worden voorgesteld door de volgende betrekking:

$$\frac{0,46 - 0,002 x}{3} \text{ [m]}$$

Het zuiger oppervlak is 300 cm^2 dan wel $0,03 \text{ m}^2$. Per omwenteling moet dus een stoomvolume worden toegelaten van:

$$\frac{0,46 - 0,002 x}{3} \cdot 0,03 = 0,0046 - 0,000 02x \text{ [m}^3\text{]}$$

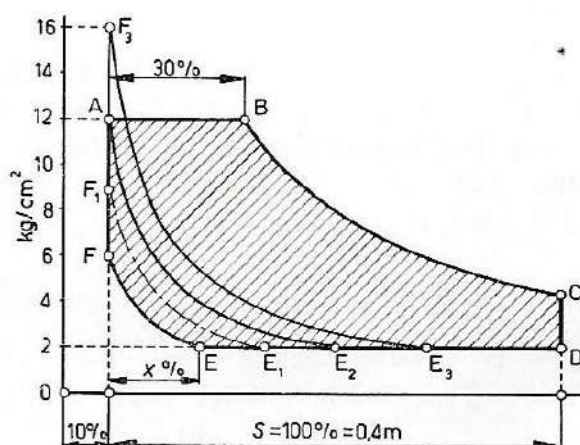
Volgens de stoomtabel heeft 1 kg verzadigde stoom van 12 kg/cm^2 een volume van $0,1664 \text{ m}^3$. Zodat de toegelaten stoom een gewicht heeft van:

$$\frac{0,0046 - 0,000 02 x}{0,16643} = \frac{230 - x}{8320} \text{ [kg]}$$

In deze formule zien we dat ook het nodige stoomgewicht steeds kleiner wordt, naarmate we de compressie steeds groter maken. Laten we x tussen dezelfde grenzen veranderen als bij de geleverde arbeid A , dan vinden we in de 4^e kolom het bij behorende stoomgewicht G .

Door de arbeid per omwenteling van de machine A te delen door het daarvoor benodigde gewicht aan stoom G krijgen we de arbeid per kg stoom, een waarde waarmee gemakkelijk inzicht wordt verkregen in de efficiëntie van compressie. Deze waarden zijn in de rechter kolom van de hier na volgende tabel weergegeven.

x %	c	A kgm	G kg	A/G kgm/kg
0	1	774	0,0276	28 000
10	2	765	0,0264	28 960
20	3	743	0,0252	29 470
30	4	713	0,0240	29 700
40	5	677	0,0228	29 680
50	6	636	0,0216	29 440
60	7	591	0,0204	28 980
70	8	543	0,0192	28 270



Compressie/arbeid per kg stoom

Door de eerder gedeeltelijk afgeleide formules voor arbeid en stoomgewicht samen te voegen kan men in één keer de verichte arbeid per kg stoom arbeid berekenen. Deze formule luidt:

$$\frac{A}{G} = \frac{774 + 2,4 x - 24 (1 + 0,1x) \cdot \ln(1 + 0,1x)}{230 - x} \cdot 8320 \text{ [kgm/kg]}$$

Of vereenvoudigd:

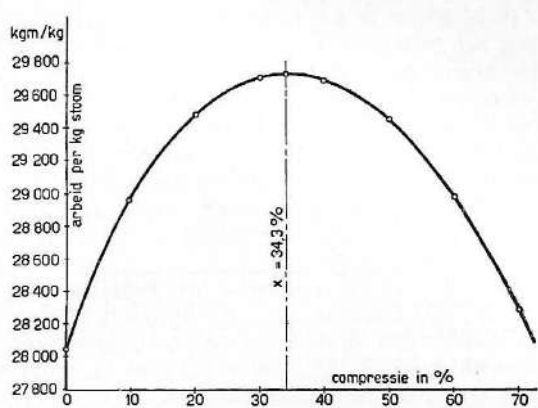
$$\frac{A}{G} = \frac{322,5 + x - (10 + x) \cdot \ln(1 + 0,1x)}{230 - x} \cdot 19968 \text{ [kgm/kg]}$$

Uit de berekeningen volgt dat arbeid per kilogram stoom bij een steeds groter compressievoud eerst toeneemt, vervolgens een maximum bereikt en daarna weer afneemt. Door een berekening die hier niet wordt gegeven kan men vinden dat het maximum zal worden bereikt als de compressie bij 34,3 % van de slag begint. De arbeid per kg stoom is voor die situatie 29720 kgm/kg. De arbeid van de stoom die wordt geleverd in de meest ongunstige situatie, dus zonder compressie, is 28000 kgm/kg. In procenten uitgedrukt betekent dit een arbeids winst van :

$$\frac{1720}{28000} \cdot 100 \cong 6 \%$$

Let wel deze arbeidswinst geldt voor een cilindervulling van 30%. Zou men de cilindervulling groter hebben gemaakt dan 30% dan is de arbeidswinst nog minder. Arbeidswinst is dan ook niet de voornaamste reden om compressie toe te passen.

De in deze paragraaf gegeven theoretische beschouwingen en berekeningen dienen met een praktisch oog te worden bekeken, want een van de belangrijkste invloeden op de grootte van het stoomverbruik, de begincondensatie, is hierbij niet in aanmerking genomen. In werkelijkheid zullen

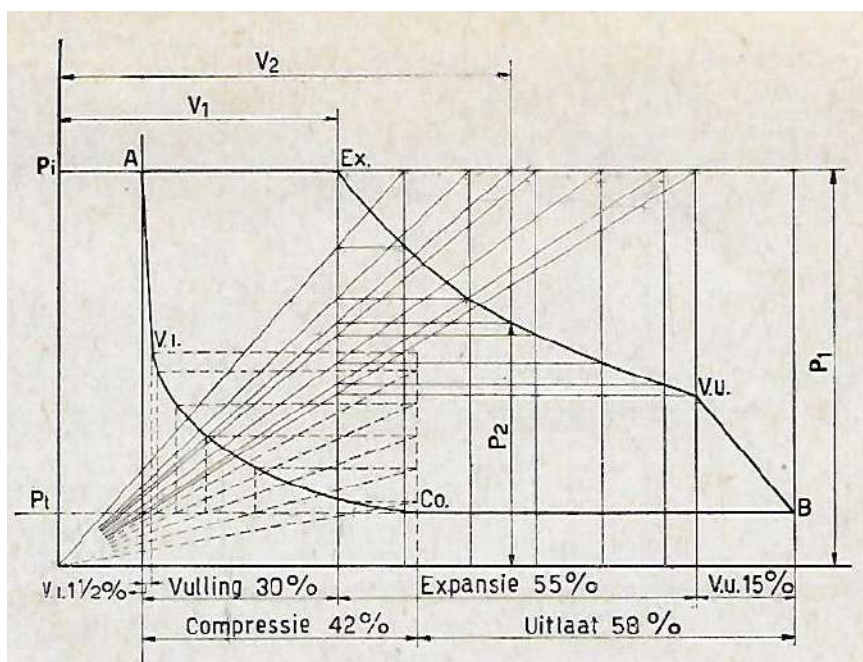


Invloed van compressie op geleverde arbeid

de waarden in de hiervoor gegeven tabel lager liggen. Toch zijn deze theoretische beschouwingen van groot belang, alleen al om te doorgronden, dat de compressie, als middel om de bewegende delen op te vangen, geen noodzakelijk kwaad is, doch, indien op het juiste tijdstip begonnen zelfs een winst aan arbeid oplevert. Daarbij is nog niet eens meegenomen dat tijdens de compressie de temperatuur in de schadelijke ruimte oploopt zodat de begincondensatie van de binnentredende stoom vermindert.

4.15.4 Theoretisch P-V diagram

Wanneer de stoomverdeling van de machine bekend is kan het theoretisch druk–volume diagram worden geconstrueerd. Een en ander is weergegeven in onderstaande figuur. Om de expansie- en de compressie- lijn te kunnen construeren moet de schadelijke ruimte uitgedrukt in procenten van het slagvolume bekend zijn. Bij dit voorbeeld is deze op 12 % gesteld en als 12 mm uitgezet. Het slagvolume is dan 100 mm. We nemen nu een drukschaal aan en tekenen twee horizontale lijnen die de absolute inlaatdruk P_i en de absolute tegendruk P_t voorstellen. De stoomverdeling zetten we onder het diagram uit.



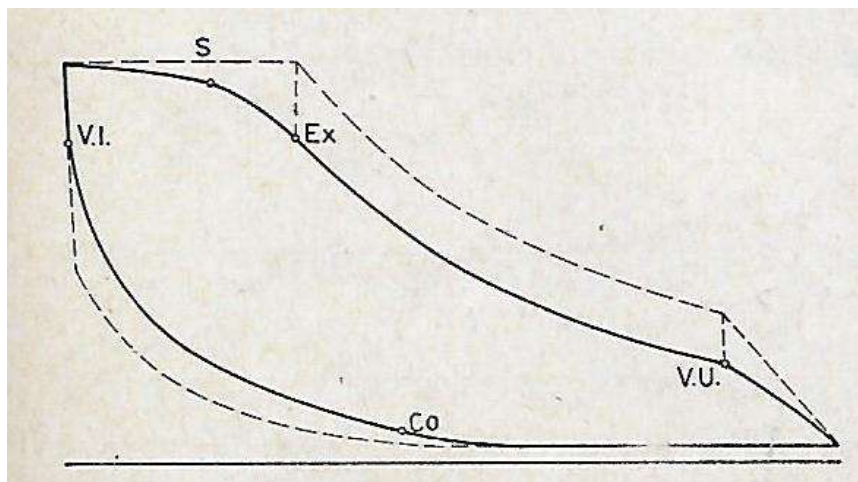
Theoretisch P–V diagram expansiemachine

We beginnen het diagram te tekenen met de zuiger in zijn uiterste stand, dat is punt A. Gedurende de gehele toelaat is de druk gelijk aan die bij het begin van de toelaat dus P_i . Dan begint bij Ex de expansie van de stoom tot aan punt Vu de vooruitlaat. De expansie wordt verondersteld geheel volgens de wet van Boyle te verlopen dus $P \times V = \text{constant}$. Deze kromme is op de volgende wijze te construeren. Het punt Vu verbinden we met een rechte lijn met punt B. De afvoerlijn loopt van punt B tot het begin van de compressie, punt Co. De compressielijn kan vervolgens op dezelfde wijze als de expansielijn worden geconstrueerd. De compressielijn eindigt bij de voorinlaat Vi. Vanuit dit punt kan een rechte lijn worden getekend naar punt A. Deze lijn stelt de drukverhoging voor die door verdere compressie en toevoer van stoom met keteldruk wordt veroorzaakt. Hiermee is het theoretische diagram compleet. Zoals we eerder hebben aangetoond stelt het diagram de door de stoom verrichte arbeid voor.

4.15.5 Indicateurdiagram

Om het werkelijke drukverloop in de cilinder te weten, maakt men gebruik van een indicator toestel. Dit toestel wordt op de cilinder van de te onderzoeken cilinder aangesloten en tekent het drukverloop tijdens de slag op een stukje papier. Het diagram wat op deze manier is verkregen noemt men een indicator- diagram. Met behulp van dit diagram kan het vermogen van de machine worden bepaald maar soms nog belangrijker; de afstelling van de machine.

Beschouwen we het hier onder afgebeelde werkelijke diagram met het geconstrueerde diagram, dan blijken daar belangrijke verschillen tussen te bestaan.

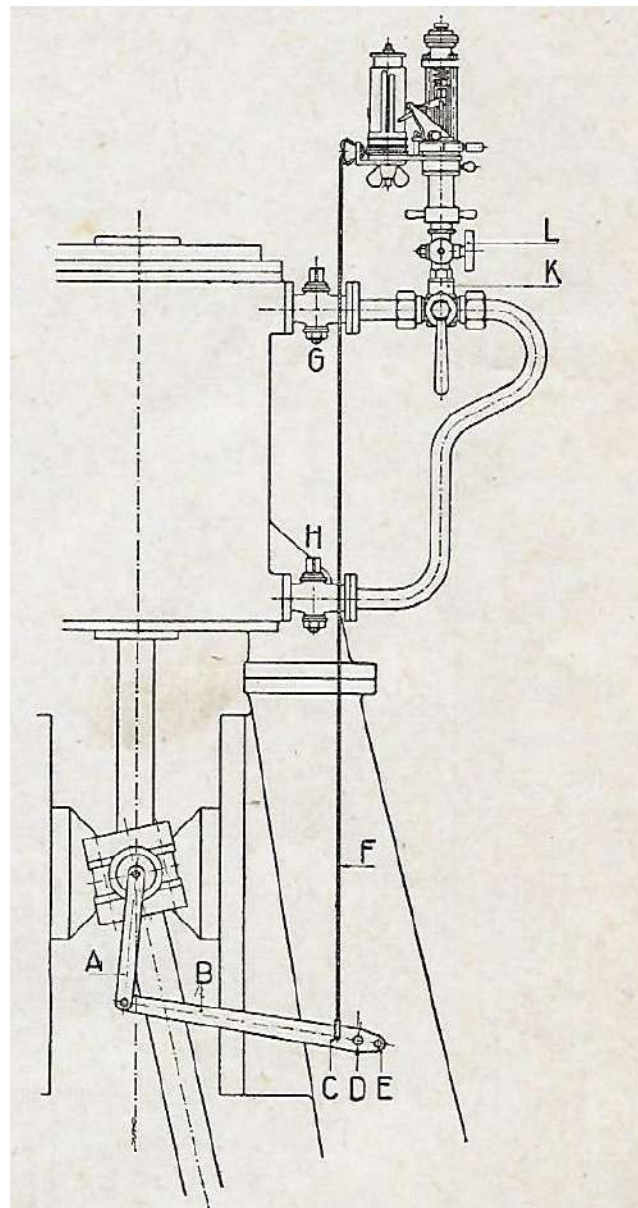


Indicateur diagram, getrokken: werkelijk, gestippeld: theoretisch.

Gedurende de inlaat is de druk niet constant: hij neemt eerst langzaam maar naar het einde toe steeds sneller af. Dit wordt veroorzaakt door het drukverlies over de niet meer volledig geopende schuif c.q. de stoompoort en de snelle toename van de zuigersnelheid en derhalve de cilinderinhoud. De stoom kan door de steeds nauwer wordende spleet van de schuif niet snel genoeg toestromen om de druk bij het snel toenemende volume van de cilinder constant te houden. Het gevolg is dat de expansie bij een beduidend lagere druk begint. De werkelijke expansielijn valt nu in zijn geheel beneden de theoretische. Nemen we aan dat de uitlaatdruk in beide gevallen gelijk is dan vallen de uitlaatlijnen praktisch samen. Doordat ook de uitlaat wordt gesmoord zal de werkelijke compressie zich eerder inzetten. De uitlaatlijn buigt zich dan een stuk voor het daadwerkelijke sluiten bij Co naar boven af. Het oppervlak van het werkelijke indicatordiagram is als gevolg van de hiervoor genoemde oorzaken kleiner dan die van de theoretische.

391/578

De schrijfstift geeft bijgevolg op het indicateurpapier in verticale richting de drukverandering, en in horizontale zin de verplaatsing van de zuiger in de cilinder weer. Het indicateurpapier wordt in de vorm van een boekje in de handel gebracht. Bij het toestel is altijd een aantal verschillende veren gevoegd om het voor verschillende cilinderdrukken te kunnen gebruiken. Alle veren zijn gemerkt met een getal dat aangeeft hoeveel mm de schrijfstift uitwijkt bij een druktoeneming van 1 kg/cm^2 . Bijvoorbeeld $1 \text{ kg/cm}^2 = 12 \text{ mm}$ voor de LD cilinder. Bij het meten aan de HD cilinder gebruikt men dus een sterkere veer en zal de schaal bijvoorbeeld $1 \text{ kg/cm}^2 = 4 \text{ mm}$ zijn.



Indicateuropstelling verticale stoommachine

4.15.7 Het nemen van diagrammen

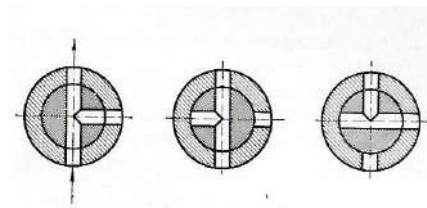
Indicateurs zijn fijn mechanische en betrekkelijk tere instrumenten en worden als zij niet worden gebruikt in een erbij behorende kist opgeborgen. In deze kist, waarvan hier onder een voorbeeld, bevinden zich de benodigde veren, schaalliniaaltjes, koord, smeerolie voor het zuigertje en een sleutel waarmee de indicator op de indicatorkraan van de machine kan worden vastgezet.



Kist met Indicatorstoestel en drukveren

Voor het nemen van een diagram schroeft men het indicatorstoestel op de speciale driewegkraan. Deze in de stoomcilinder geschroefde kraan is voorzien van een knelfitting die past bij het indicatorstoestel. Nadat de het toestel op de kraan is bevestigd geeft men het koord de juiste lengte en wel zodanig dat het diagram ongeveer in het midden van het papier op cilinder komt.

Vervolgens zet men de kraan in de stand zoals in de linker figuur hier onder is aangegeven. De stoom uit de cilinder komt nu in de indicator en ontwijkt door het zijkanaaltje. Daarmee wordt de indicator verwarmd en kan het eventueel gevormde condensaat ontwijken. Is alles goed voorverwarmd dan zet men het papier op de trommel, pikt het haakje van het indicatorkoord in en



draait men de kraan een halve slag zodat de indicator alleen verbonden is met de cilinder. Vervolgens drukt men gedurende een omwenteling met behulp van het op de bovenstaande linker foto zichtbare rode knopje de schrijfstift tegen het papier. Men verkrijgt dan het gewenste diagram.

Standen van de indicatorkraan

Houdt men de schrijfstift te lang op het papier dan wordt de lijn van het diagram te dik en is het diagram onbruikbaar.

Hierna draait men de indicatorkraan een kwart slag en drukt men de schrijfstift op de hiervoor aangegeven wijze opnieuw tegen het papier. Aldus verkrijgt men de atmosferische lijn. Deze lijn zal bij de diagrammen van de HD-cilinder onder het diagram liggen. Bij de LD-cilinder zal hij door de afbeelding lopen. Tijdens het nemen van het diagram moet het toerental van de machine worden bepaald hetzij door de aflezing van de tachometer dan wel als deze ontbreekt gedurende een minuut

het aantal slagen te tellen, of met een handtachometer te bepalen. Vervolgens kan men het koord uitpikken en het indicatordiagram van de trommel nemen. Het diagram zal bijvoorbeeld een gedaante hebben zoals op de volgende bladzijde vergroot is afgebeeld. De lijnen van de diagrammen vervagen op de duur en zijn daarom hand- matig met potlood overgetrokken.

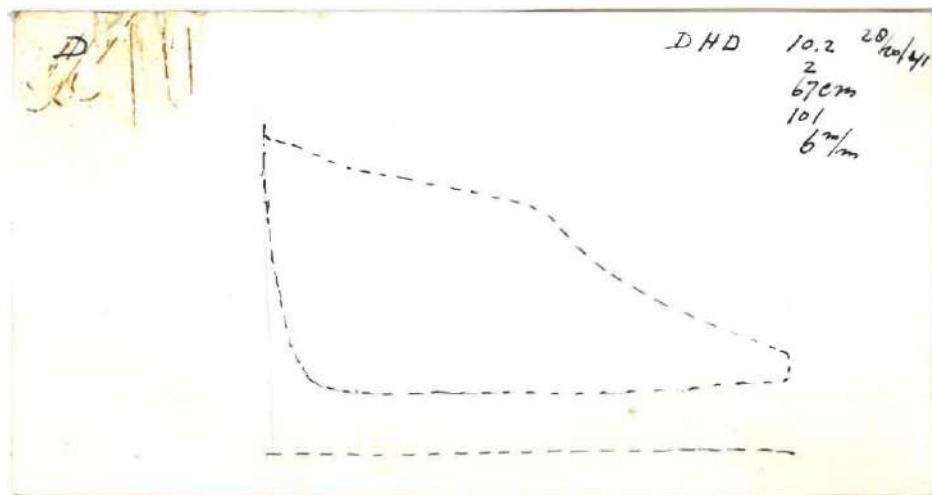


Diagram van de HD cilinder aan dekselzijde van een tandem compound machine (Ir. D.F. Woudagemaal)

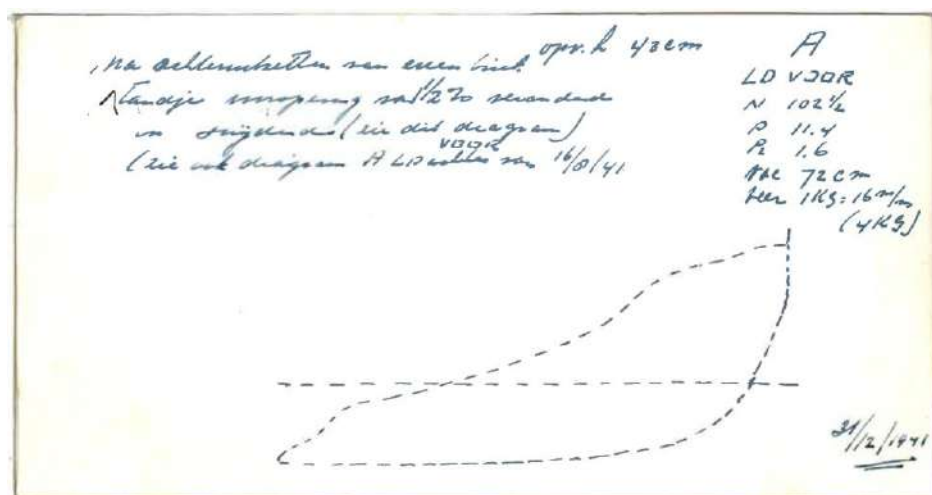


Diagram van de LD cilinder aan dekselzijde van een tandem compound machine (Ir. D.F. Woudagemaal)

Onmiddellijk na het nemen van het diagram schrijft men de volgende gegevens op; deze heeft men nodig om het prestaties van de stoommachine te beoordelen dan wel om het vermogen te berekenen.

- Dag en datum.
- Machine waarvan het diagram is genomen.
- Cilinder en welke zijde van de cilinder, bijvoorbeeld HD-cilinder DZ (Hoge Druk cilinder, Deksel Zijde) of LD-cilinder AZ (Lage Druk cilinder, As Zijde).
- Aantal omwentelingen van de machine.

- Aanwijzingen van (ketel) druk en vacuümmeters.
- Mogelijke verdere bijzonderheden die van invloed kunnen zijn op het diagram.

Moet men diagrammen nemen van een meercilindermachine dan is het handig over meerdere indicatoren te beschikken dan wel om de diagrammen zo snel als mogelijk na elkaar te nemen.

4.15.8 Berekenen van het machinevermogen

Hier voor hebben we verklaard dat het oppervlak van een indicator-diagram een maat is voor het vermogen van de stoommachine. Verder is aangegeven dat door middel van het bepalen van de gemiddelde druk uit een diagram het vermogen is te berekenen. Als we dus de gemiddelde druk p_m in kg/cm^2 hebben bepaald uit een diagram en we vermenigvuldigen deze met het zuigeroppervlak O in cm^2 , dan zullen we de gemiddelde kracht K vinden gedurende een omwenteling van de kruk. Is verder de zuigerslag S in m , dan vinden we voor de arbeid per omwenteling:

$$A = K \cdot S = p_m \cdot O \cdot S \text{ [kgm/omw.]}$$

Maakt de kruk n omw/min dan is bijgevolg de arbeid per minuut:

$$A = p_m \cdot O \cdot S \cdot n \text{ [kgm/min]}$$

Onder het vermogen verstaan we de arbeid per tijdseenheid. Nemen we als tijdseenheid de seconde dan is het vermogen

$$A = \frac{p_m \cdot O \cdot S \cdot n}{60} \text{ [kgm/sec]}$$

Voor de eenheid van vermogen N nemen we hier de paardenkracht, afgekort pk , waarbij een pk overeenkomt met 75 kgm/sec .

$$N = \frac{p_m \cdot O \cdot S \cdot n}{60 \cdot 75} \text{ [pk]}$$

Deze formule geeft het vermogen aan één kant van de zuiger. Stoommachines zijn meestal dubbelwerkend en is het werkzame zuiger oppervlak verschillend als gevolg van het al of niet aanwezig zijn van een zuigerstang. Voor elke kant van de zuiger moet dus het vermogen worden bepaald en dient daarbij rekening te worden gehouden met het werkzame zuigeroppervlak.

Omdat de gemiddelde druk (p_m) en ook het vermogen (N) met behulp van een indicator worden bepaald noemt men het met behulp van voorgaande formule bepaalde vermogen het indicatorvermogen uitgedrukt in indicator paardenkrachten (ipk).

Voor een bepaalde cilinder zijn de grootheden O en S constant dus ook de breuk:

$$\frac{O \cdot S}{60 \cdot 75} = \frac{O \cdot S}{4500}$$

We noemen dit de factor A die stamt uit de tijd van de rekenliniaal waarmee uitgebreid en tijdrovend rekenwerk zoveel als mogelijk werd vermeden. Eenmaal goed uitgerekend hoefde je de vermenigvuldiging niet steeds opnieuw te maken bij het bepalen van het indicatorvermogen van een machine. Tegenwoordig zal gebruik worden gemaakt van de rekenmachines of de computer.

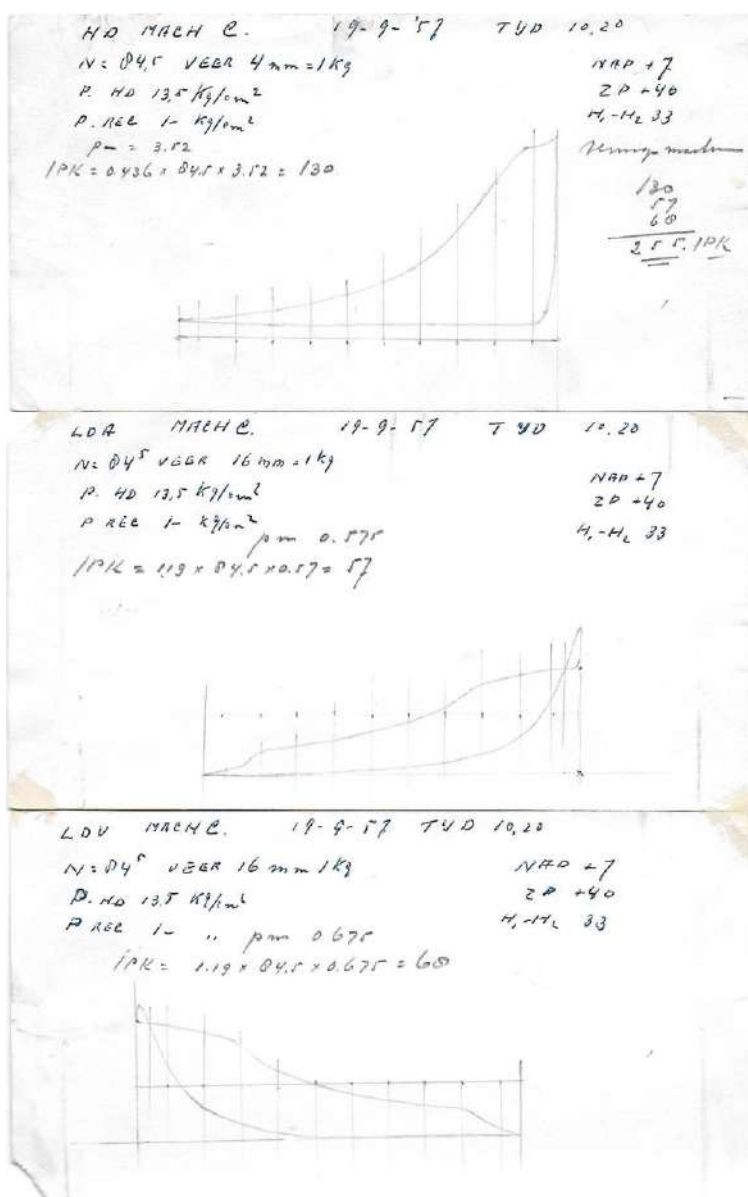
$$\text{Factor } A = \frac{O \cdot S}{4500}$$

Bijgevolg kan de formule voor het bepalen van het indicatorvermogen als volgt worden geschreven:

$$N = \text{factor } A \cdot p_m \cdot n$$

De factor A hoeft men slechts met de gemiddelde druk en het toerental te vermenigvuldigen om het vermogen van de betreffende cilinder te verkrijgen.

Hieronder worden de diagrammen weergegeven van de tandem compound stoommachine nummer C van het ir D.F. Woudagemaal in Lemmer. De diagrammen zijn genomen in 1957. De factor A voor de lagedruk cilinder aan as-zijde en de deksel-zijde is 1,19 en die van de veel kleinere hoge druk cilinder aan deksel-zijde is 0,436.



Indicateurdiagrammen Jaffa tandem compound stoommachine

De dienstdoende machinist heeft indertijd de atmosferische lijn gebruikt om het diagram in 10 gelijk stukken te verdelen. Opmerkelijk is de lus in het diagram van de LD cilinder. Het oppervlakte van deze lus moet als negatieve arbeid worden beschouwd en dus van de positieve arbeid worden afgetrokken. Met de hier gevolgde rekenmethode gebeurt dit niet en is de uitkomst onjuist. Bij de behandeling van het bepalen van de gemiddelde druk en de interpretatie van de diagrammen wordt hierop nader ingegaan.

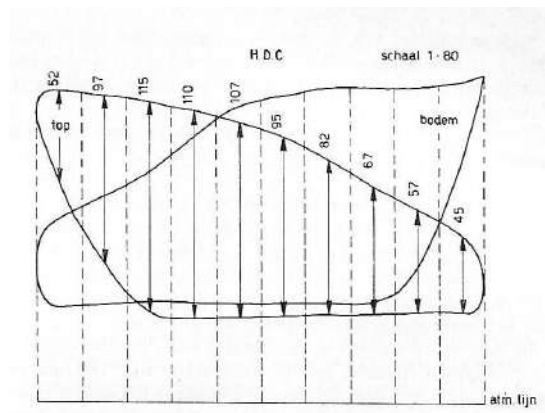
Bepalen gemiddelde druk

De gemiddelde druk van een diagram kan men op twee manieren bepalen. De oudste en in het verleden veel toegepaste methode is de grafische methode. Bij de andere en meest simpele methode wordt gebruik gemaakt van een planimeter, een instrument waarmee je het oppervlak van een willekeurige figuur kunt bepalen.

Grafische methode

Eerder zagen we al dat de gemiddelde druk bepaald kan worden door het diagram in een aantal, bijvoorbeeld tien, gelijke stukjes te verdelen, hiervan de gemiddelde druk te bepalen door de hoogte van de middelloodlijnen op te meten, die bij elkaar op te tellen en vervolgens te delen door tien.

We bevestigen bij deze methode het diagram op een vel tekenpapier dat op een tekenplank of een andere vlakke ondergrond is gespannen.

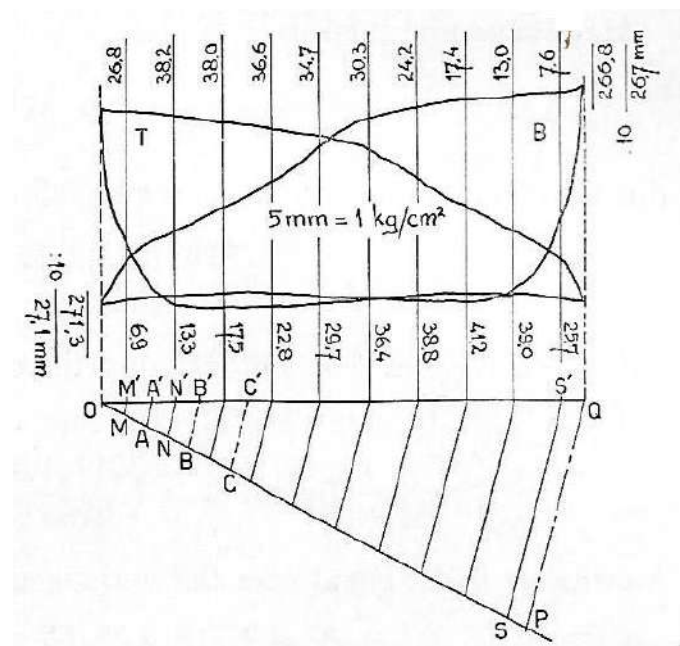


Het verdelen in tien gelijke stukken doen we door met behulp van tekenhaken eerst de begin- en eindverticaal te trekken en door het snijpunt met de atmosferische lijn een lijn in willekeurige richting te trekken. Een en ander zoals in de tekening op de volgende bladzijde is weergegeven. Op deze lijn passen we met de tekenpasser 10 gelijke stukken af. Vervolgens trekken we de lijn PQ en verdelen we de 10 stukjes precies in tweeën.

Rekenkundig bepaling gemiddelde druk

Deze punten worden met behulp van een stel tekendriehoeken evenwijdig aan de lijn PQ verbonden met de atmosferische lijn. Door de aldus gevonden punten op de atmosferische lijn worden vervolgens loodlijnen opgericht. Dit zijn de zogenoemde middelloodlijnen van het in tien verdeelde diagram. We meten vervolgens de lengte van alle middelloodlijnen tussen de onderkant en de bovenkant van het diagram en schrijven die bij in het diagram. De rij getallen tellen we bij elkaar op en delen deze eerst door 10 en vervolgens door de veerschaal. De aldus gevonden waarde is de gemiddelde druk. Als er bij de indicator een veerschaallatje aanwezig is dan kan de druk bij de desbetreffende verdeling worden gezet en hoeft na optelling de gevonden waarde alleen nog maar door 10 gedeeld te worden om de gemiddelde druk te vinden. Een andere methode is om met een steekpasser de totale druk te bepalen. Het doortrekken van de middelloodlijn helpt

hierbij om nauwkeurig te werken. De uiteindelijke lengte tussen de benen van de passer is de som van de gemiddelde drukken en dient evenals hier voor is aangegeven nog door 10 en de veerschaal gedeeld te worden om de gemiddelde druk te krijgen.



Grafische bepaling gemiddelde druk

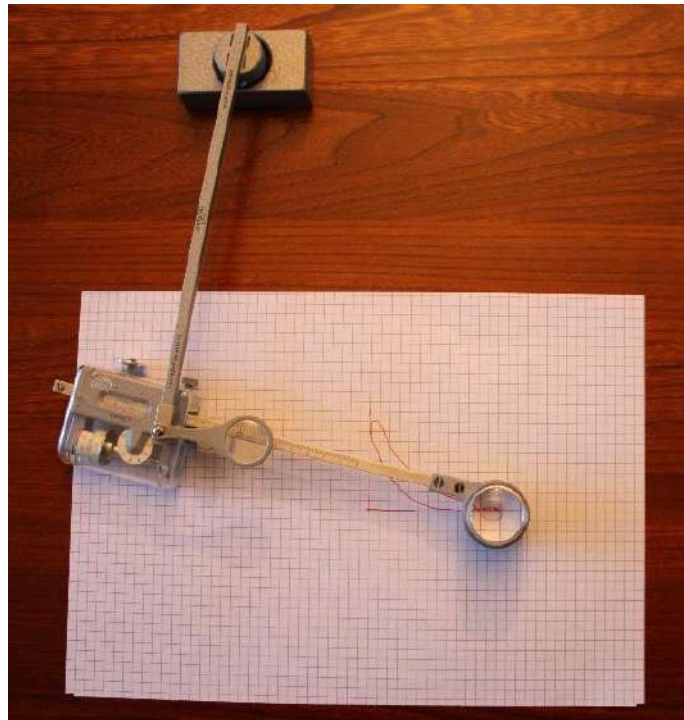
Een iets minder nauwkeurige methode is de lengte van het diagram op te meten en de plaats van de tien middelloodlijnen rekenkundig te bepalen. Ook kun je op stevig tekenpapier een dummy maken waar de verdeling op staat aangegeven en deze verdeling op het uit te werken diagram overnemen.

Planimetrische methode

Een planimeter is een meetinstrument waarmee de oppervlakte van een gebied op bijvoorbeeld een kaart kan worden bepaald door met een stift de omtrek van het gebied af te tasten. De werking berust op de stelling van Green die een verband legt tussen een oppervlakte-integraal en de kringintegraal over de contour van het oppervlak. Een planimeter is in feite een integrator die de kringintegraal bepaalt en daarmee ook de oppervlakte. Planimeters zijn er in verschillende uitvoeringen. In alle gevallen is er een meetarm waarvan één uiteinde is voorzien van een meetstift of van kruisdraden met een loep waarmee de omtrek van het te meten oppervlak wordt afgetast. Het andere uiteinde, de "elleboog", is scharnierend en kan bij de lineaire uitvoering bewegen langs een vaste lijn. Bij de polaire uitvoering zoals hiernaast is afgebeeld is de elleboog verbonden met een andere arm, de draaiarm, waarvan het andere uiteinde een vast draaipunt, de pool, vormt. Aan de meetarm is een meetwiel met telwerk bevestigd waarvan de as evenwijdig is aan de arm, zodat het wielje alleen kan draaien in de richting loodrecht op de arm. Het wielje meet de totale verplaatsing van de arm in de richting loodrecht op de arm.

Als het in de richting van de arm wordt verplaatst, staat het stil. De totale verplaatsing is een maat voor de oppervlakte in ons geval die van het diagram.

De elleboog is voorzien van een schaalverdeling zodat de gemeten waarden direct in juiste vierkante millimeters kan worden afgelezen. De instelling van de schaal kan men eenvoudig controleren door bijvoorbeeld een getekend vierkant van 10 x 10 cm of een cirkel met een straal van 5,64 cm met de loop af te tasten. Het verdient aanbeveling het diagram op een groot vel tekenpapier te plakken en dit op een gladde ondergrond te spannen. De tastloop is voorzien van een kleine cirkelvormige lens die bij het aftasten op de lijn van het diagram gehouden moet worden. Met de loop moet de volledige contour worden afgetast, te beginnen bij een willekeurig punt van het diagram. Hierbij wordt de pool zodanig geplaatst dat de elleboog zoveel mogelijk haaks op de beweegbare arm staat.



Planimeter voor bepaling diagramoppervlak

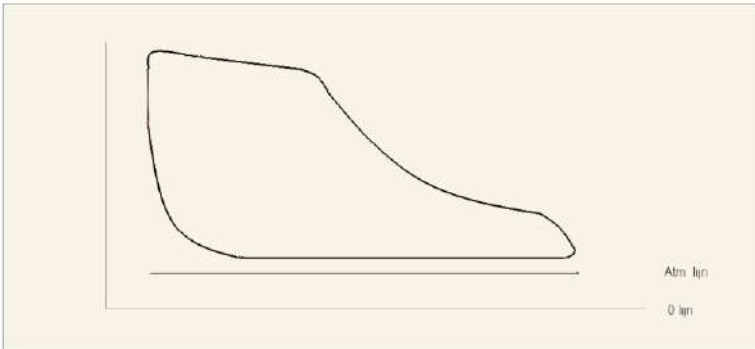
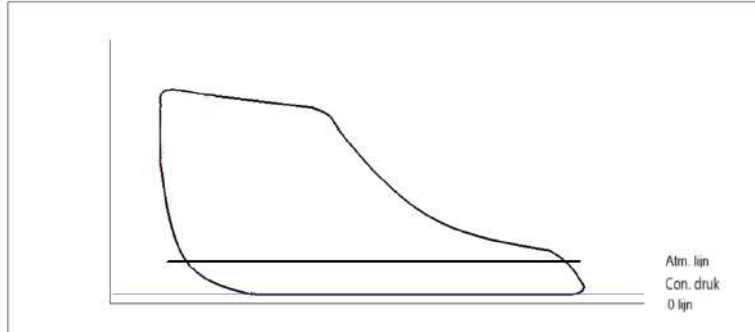
Met een planimeter wordt automatisch het oppervlak van eventuele negatieve arbeid van de positieve arbeid afgetrokken.

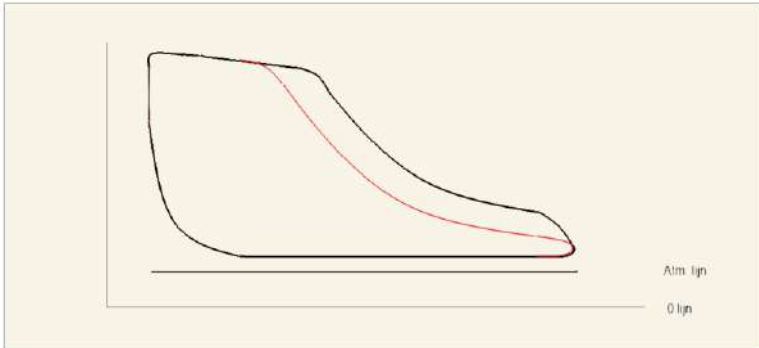
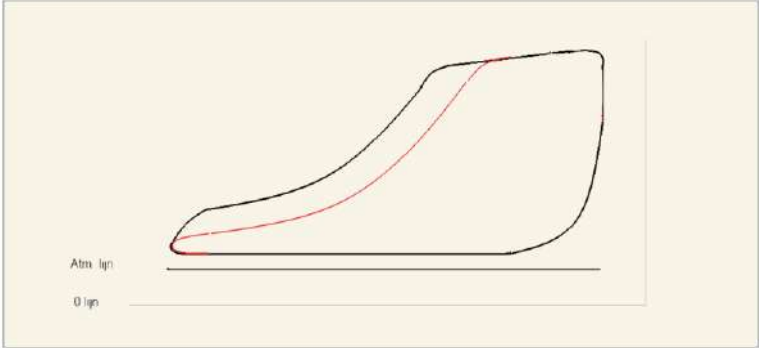
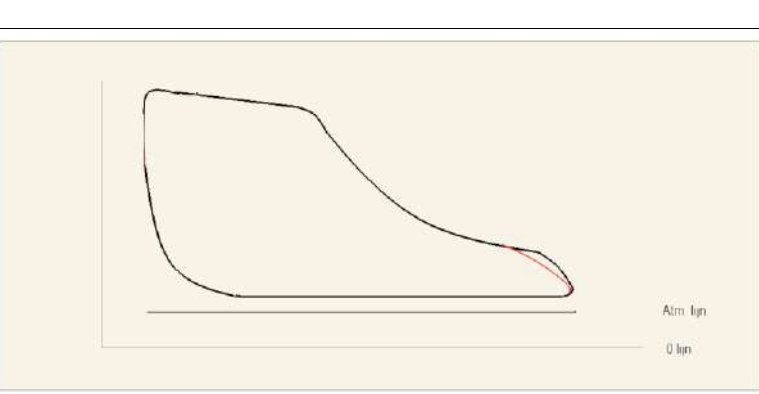
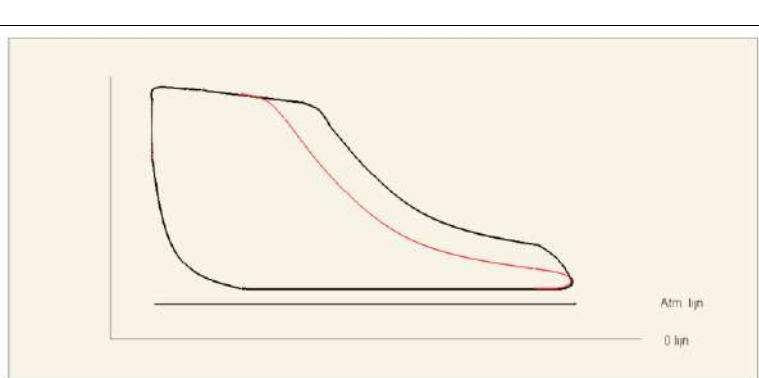
Door het diagram drie keer achter elkaar te planimetreren en van de verkregen waarden het gemiddelde te nemen verkrijgt men een uiterst nauwkeurige waarde van het oppervlak, en na deling door de lengte van het diagram, van de gemiddelde druk.

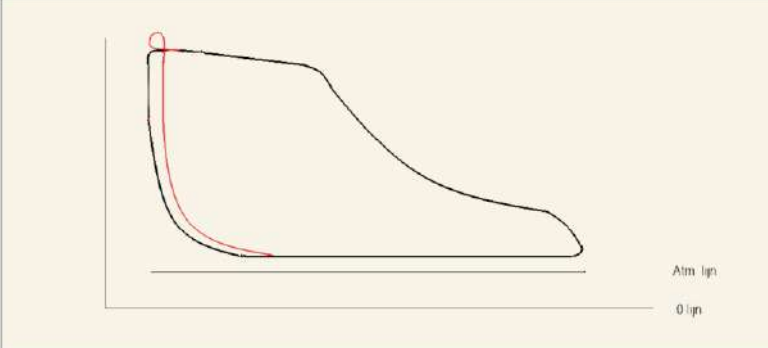
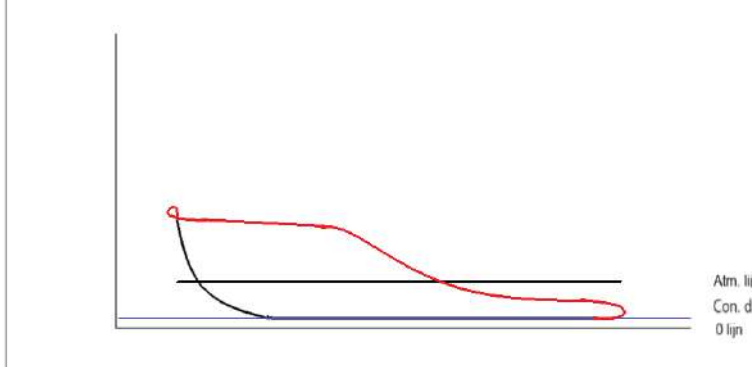
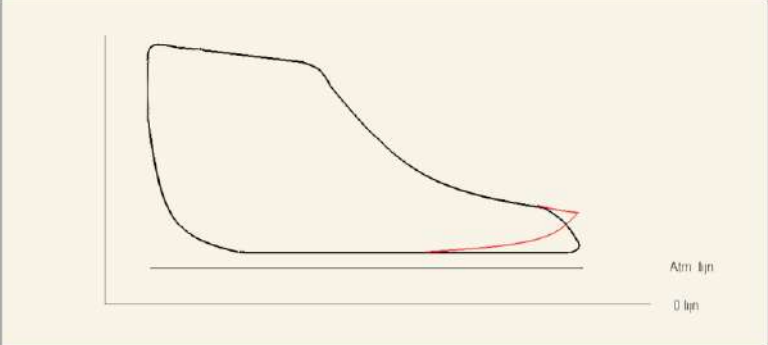
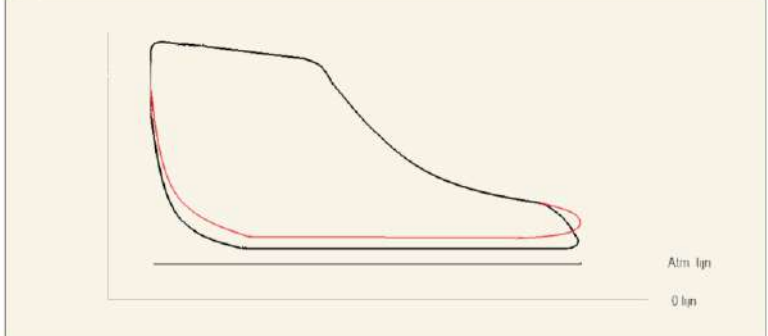
4.15.9 Interpretatie diagrammen

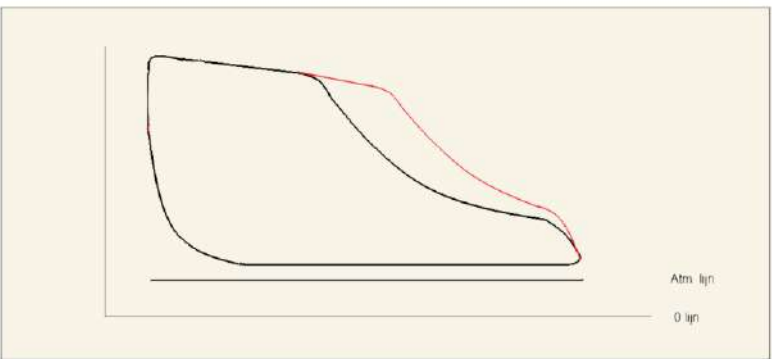
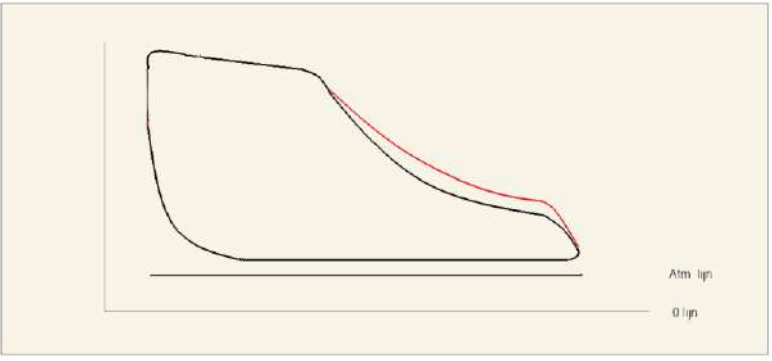
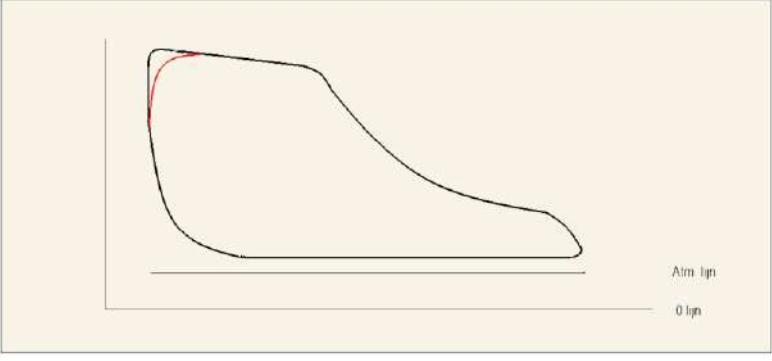
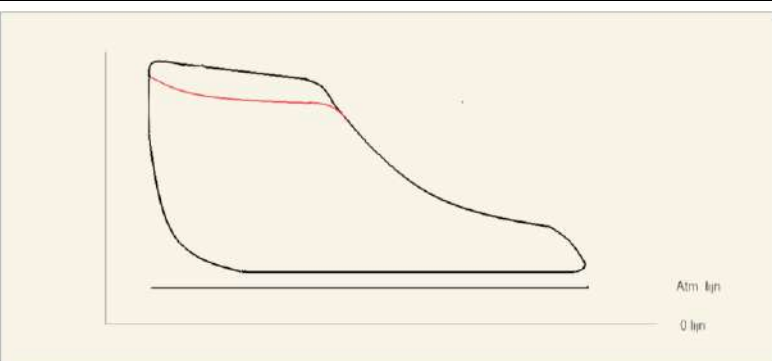
Hier voor is aangegeven dat met behulp van een indicatordiagram het vermogen van de stoommachine kan worden bepaald. Dit is overigens niet de enige en belangrijkste informatie die met een diagram over de machine kan worden verkregen. Van de in het diagram weergegeven stoomdrukken in de cilinder bij elke stand van de zuiger kunnen die van de kruk en het excentriek worden afgeleid en vergeleken met de afstelgegevens. Met deze gegevens uit het diagram kan daarmee ook de juiste afstelling van de machine worden afgeleid en vervolgens door verstelling eventueel verbeterd. Vooral na een revisie van de stoommachine is dat van belang.

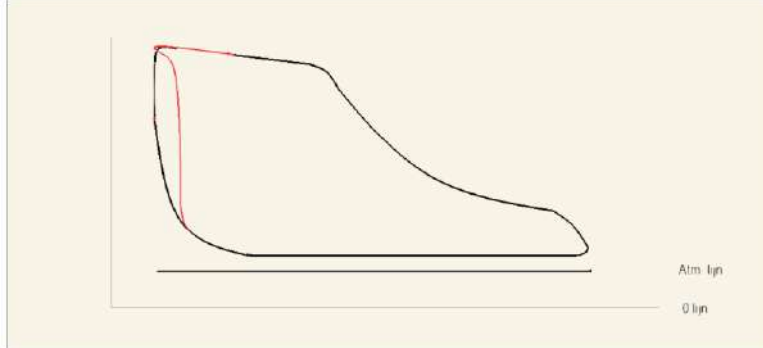
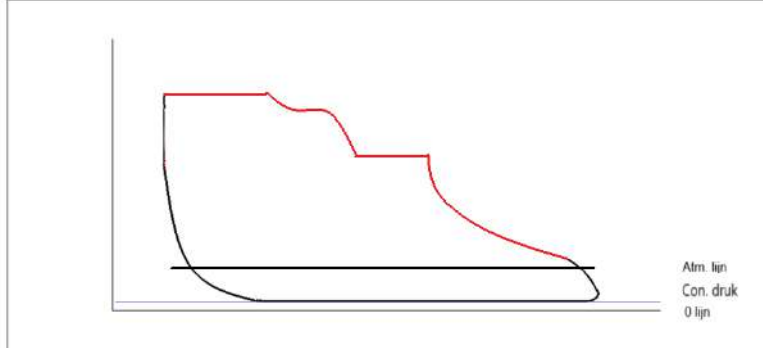
Hierna wordt een en ander voor een aantal situaties, aan de hand van foute voorbeelddiagrammen, uitgelegd. De rode lijnen geven de afwijkingen weer ten opzichte van een geïdealiseerd theoretisch diagram voor een bepaalde belastings- situatie van de HD cilinder van een compound expansiemachine. Door de atmosferische lijn door het diagram iets boven de basis te denken krijgt men de situatie voor het LD gedeelte van een machine.

	Basis diagram H.D. cilinder compound machine.
	Basis diagram L.D. cilinder compound machine.

	Vershil in vulling tussen deksel en krukzijde van de cilinder; het gevolg een ongelijke gang en hoog stoomverbruik.
	Vershil in vulling tussen deksel en krukzijde van de cilinder; het gevolg een ongelijke gang en hoog stoomverbruik
	Vervroegde stoomuitlaat; merkbaar door voortijdig afvallen van de expansielijn
	Vershil in vermogen als gevolg van een gewijzigde vulling

	De stoomuitlaat stopt te vroeg waardoor de compressie te vroeg wordt ingezet. Het lusje betekent negatieve arbeid.
	Diagram van de LD cilinder waarbij de druk in de receiver als gevolg van lage belasting, lager is dan de compressie druk
	De uitlaat begint te laat waardoor aan het begin van de uitlaat een te grote tegendruk ontstaat.
	De tegendruk lijn ligt te hoog; b.v. door een te geringe stoomafname van de LD cilinder cq te hoge condensordruk.

	Ver doorgezette vulling van de machine; Kan wijzen op overbelasting van de machine.
	Lekkende schuif. De expansie verloopt niet adiabatisch
	De toevoer van de stoom geschiedt te laat. De zuiger is al begonnen aan de arbeidsslag voor de keteldruk wordt bereikt. De hiervoor benodigde energie moet door het vliegwiel worden opgebracht
	Gesmoorde toevoer van de stoom, bijvoorbeeld om het toeren te regelen.

	De instroming van de stoom begint te vroeg. De machine zal sterk worden afgeremd.
	Defect indicator-toestel

Naast de hier boven toegelichte afstellingsfouten en afwijkende belastings-situaties van de machine die uit het diagram kunnen worden afgelezen treden ook fouten als gevolg van de minder goede conditie van het indicator toestel. Meestal openbaren die fouten zich in de vorm van een onregelmatig golvende of hoekige lijn op het diagram. Ook kan de veer onder bepaalde omstandigheden gaan trillen. Het diagram vertoont dan een regelmatig golvende lijn. De indicator werkt dan goed maar het diagram is onbruikbaar. Een andere belasting of toerental zal dan uitkomst moeten bieden. Dit fenomeen treedt vooral op bij de slappere veren die nodig zijn voor de meting aan de LD cilinders.

Receiver

Bij compound stoommachines wordt de afgewerkte stoom uit de HD cilinder naar de LD cilinder geleid. Omdat de afvoer van de stoom uit de HD cilinder niet precies samenvalt met de aanvoer in de LD cilinder wordt deze kortstondig opgeslagen in een tussenruimte. Deze ruimte bestaat meestal uit een ruim bemeten leiding. Deze ruimte noemt men een receiver (reservoir of tank).

4.16 Condensorinstallaties

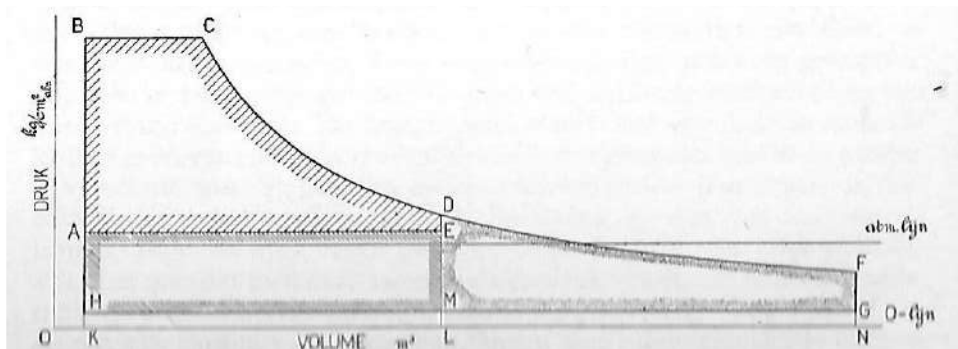
4.16.1 Vacuüm

De afgewerkte stoom, afgekort aangeduid met AS, van de hoofdstoommachine en soms ook die van de met behulp van stoom aangedreven hulpwerktuigen wordt naar een condensorinstallatie afgevoerd waar ze wordt verdicht tot water. Dit warme condensaat wordt teruggevoerd naar de ketel waardoor het rendement van de installatie verbetert. Daarenboven is het condensaat onthard en ontlucht. De condensor heeft echter nog een tweede belangrijke functie, namelijk het creëren van een vacuüm of lage tegendruk bij de lagedrukcilinder van de stoommachine. Het volume van een bepaalde gewichtshoeveelheid afgewerkte stoom is groot en neemt in de condensor een grote ruimte in. Wordt deze stoom echter tot water verdicht, dan is dit volume gering.

Bij een stoommachine waar expansie en condensatie wordt toegepast heeft 1 kg afgewerkte stoom een volume van ongeveer 7,8 m³ oftewel 7800 dm³ terwijl het hieruit ontstane water slechts een volume heeft van 1 dm³. Is de stoom in een condensor overgegaan tot water, dan ontstaat hierin een ledige ruimte en dus een lage druk. Helemaal ledig is die ruimte niet want er bevindt zich hierin ook waterdamp van de in de condensor heersende druk en bovendien lucht die door allerlei oorzaken in het stoomcircuit is gekomen. Blijft de afgewerkte stoom toestromen dan zal na verloop van tijd de druk weer toenemen.

Maakt men de pomp die het condensaat uit de condensor zuigt flink groot dan zal niet alleen het gevormde water worden afgevoerd maar ook de waterdamp en de lucht, die zich in de condensor bevinden. Dit heeft tot gevolg dat in de condensor een druk ontstaat die ver onder die van de atmosfeer ligt. We spreken dan over een luchtledig of vacuüm wat in het verleden vaak werd aangeduid met ijdel.

De pomp die zowel het water als de damp en de lucht uit de condensor afvoert noemen we een natte luchtpomp. Bij grote installaties zoals bij zeegaande schepen werden deze functies gescheiden en paste men voor het verwijderen van de lucht en de waterdamp vaak een ejecteur toe. Bij de meeste stoommachines bij gemalen is de natte luchtpomp rechtstreeks gekoppeld aan de krukas of de verlengde zuigerstang van de machine, er zijn echter ook voorbeelden dat de natte luchtpomp door een aparte stoommachine wordt aangedreven. Aan die stoommachine zijn dan meerdere andere functies gekoppeld zoals bijvoorbeeld een smeeroliepomp voor de druksmering van de leibaan, de kruk en de hoofdaslagers.



P - V diagram met condensatie

Als gevolg van de in de condensor gecreëerde lagere tegendruk wordt per kg stoom aanmerkelijk meer energie geleverd. Een stoommachine met condensatie zal voor het leveren van een zekere hoeveelheid arbeid minder stoom verbruiken; met andere woorden ze werkt economischer dan de machine zonder condensatie.

In de figuur op de voorgaande bladzijde is deze arbeidswinst met behulp van een druk - volume diagram van het proces in een stoomwerktuig, aanschouwelijk gemaakt.

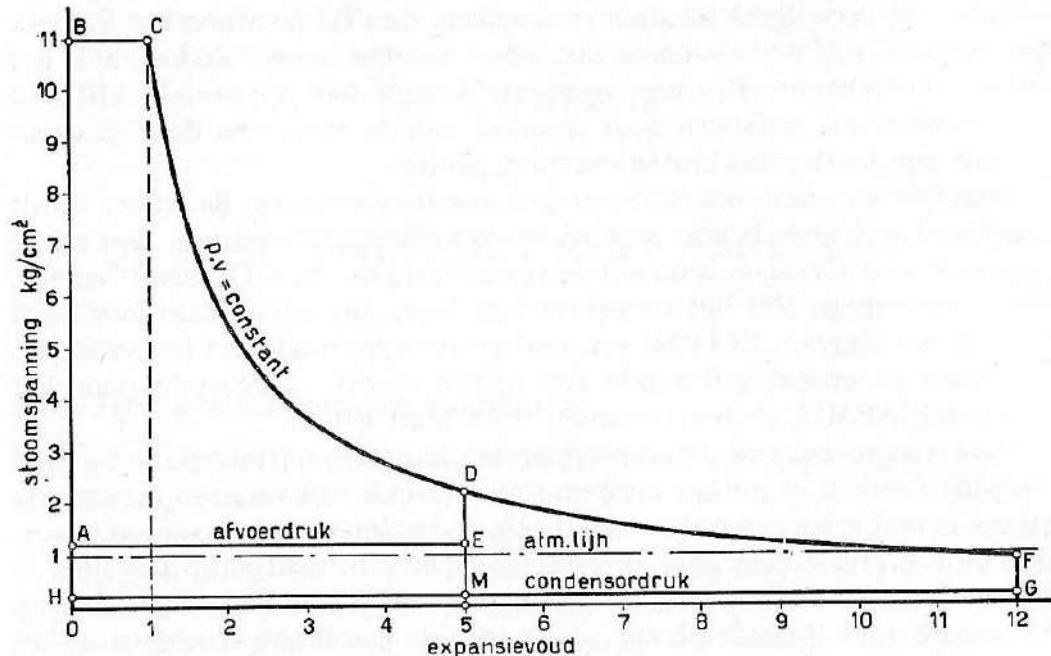
Stel dat we aan een 1-cilinder stoommachine stoom toevoeren met een druk BK en dat de vulling BC bedraagt. In C begint de expansie van de stoom. Laten we de stoom in de buitenlucht ontsnappen dan zal de druk iets hoger moeten zijn dan die van de atmosfeer. De waarde hiervan wordt weergegeven door DL. Laten we vervolgens de stoom ontwijken dan zal de afvoerlijn EA van het diagram iets boven de atmosferische lijn liggen. Zodoende wordt het theoretische diagram weergegeven door het oppervlak ABCDE. De verliezen die ontstaan door smoring en door de compressie van de stoom zijn hier buiten de berekening gelaten.

Voorziet men deze machine van een condensor waarin de stoom wordt afgevoerd en de begindruk en de vulling gelijk blijven, dan zal de expansie weer eindigen bij de absolute druklijn DL. De tegendruklijn MH ligt nu beduidend lager dan eerst. Het aldus verkregen diagram BCDMH heeft een aanmerkelijk groter oppervlak dan het voorgaande. De winst in arbeid gedurende het proces wordt voorgesteld door het oppervlak AEMH. Hiervoor is geen extra stoom nodig.

Deze vergroting van het diagramoppervlak kan niet allemaal als winst worden geboekt want het temperatuurverschil tussen verse stoom en afgewerkte stoom is nu groter geworden zodat ook de begincondensatie en de naverdamping groter zijn. Bovendien moet een natte luchtpomp het vacuüm in de condensor onderhouden; waarvoor ook een hoeveelheid energie moet worden ingezet.

De energiewinst zal nog veel groter worden als men bij gelijke cilindervulling de zuigerslag laat toenemen dat wil zeggen de expansie verder voortzet, bijvoorbeeld tot de absolute druklijn FN. Hierdoor wordt het diagramoppervlak BCFGH.

Teneinde na te gaan wat we uitgedrukt in getalwaarden op de hier voor aangegeven wijze aan energiewinst kunnen bereiken dient de hier na op schaal getekende figuur.



P - V diagram met condensatie

We nemen hierbij aan dat de begindruk 11 kg/cm^2 is en dat de vulling $BC = 1$ deel van de expansie is. Nemen we verder aan dat de expansie verloopt volgens $P \times V = \text{constant}$, en kiezen we eerst een vijfvoudige expansie dan wordt het eindvolume het vijfvoud van BC . De druk is hierbij volgens de wet van Boyle gedaald tot $2,2 \text{ kg/cm}^2$. We beschouwen nu eerst de situatie waarbij de afgewerkte stoom naar de buitenlucht wordt afgevoerd waarbij de tegendruk $1,2 \text{ kg/cm}^2$ is dan krijgen we het diagram $ABCDE$. Bepalen we vervolgens op de later aangegeven wijze hiervan de gemiddelde druk p_m dan vinden we hiervoor $4,54 \text{ kg/cm}^2$.

Het volume wordt bepaald door het oppervlak van de zuiger en de afgelegde weg. Omdat het zuigeroppervlak niet verandert tijdens het proces kan voor de verrichte arbeid A , maar dan in verhouding, worden gesteld:

$$A = \text{volumevergroting} \times \text{gemiddelde druk}$$

De verrichte arbeid is dan:

$$A = 5 \cdot 4,54 = 22,70 \text{ [Dimensieloos]}$$

Voeren we in tweede instantie de stoom af naar een condensor waar een absolute druk wordt gehandhaafd van $0,2 \text{ kg/cm}^2$ dan krijgen we het diagram $HBCDM$, waarbij de afvoerlijn EM 1 kg/cm^2 lager ligt dan bij afvoer naar de buitenlucht. De gemiddelde druk p_m is dus dit bedrag groter dus $5,54 \text{ kg/cm}^2$.

De verrichte arbeid wordt dan:

$$A = 5 \cdot 5,54 = 27,70 \text{ [Dimensieloos]}$$

Uitgedrukt in procenten is de theoretische arbeidswinst:

$$\frac{27,70 - 22,70}{22,70} \cdot 100 = 22 \%$$

Deze winst wordt bereikt met dezelfde hoeveelheid stoom. Als we daarentegen de stoom niet het vijfvoudige maar bijvoorbeeld tot het twaalfvoudige van het beginvolume laten expanderen dan krijgen we het diagram HBCFG. De gemiddelde druk hiervan p_m is $2,99 \text{ kg/cm}^2$.

$$A = 12 \cdot 2,99 = 35,88 \text{ [Dimensieloos]}$$

De arbeidswinst is voor deze situatie:

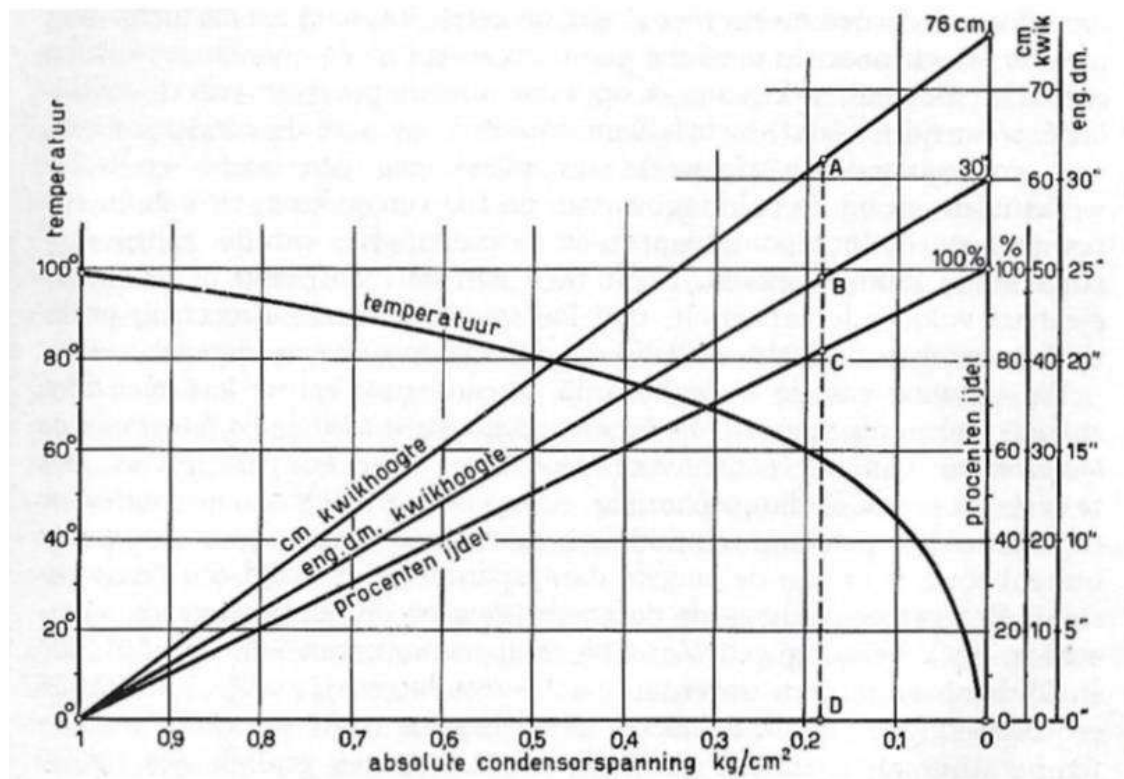
$$\frac{35,88 - 22,70}{22,70} \cdot 100 = 58 \%$$

Na deze uiteenzetting spreekt het voor zich dat de voor de opvoerwerktuigen toegepaste stoomaandrijvingen bij poldergemalen gebruik maakten van expansie en uitgerust waren met een condensor.

4.16.2 Condensordruk

De druk van stoom gaven we in het verleden een enkele keer aan in atmosfeer (atm), dat is de druk die overeenkomt met de ons omringende luchtdruk op zee niveau. Gewoonlijk en daarom ook in deze verhandelingen werd de druk uitgedrukt in kg/cm^2 . In de Angelsaksische landen gebruikte men ponden per vierkante duim (lb/sq in), waarbij $1\text{kg/cm}^2 = 14,223 \text{ lb/sq in}$ of psi. Verder moet er onderscheid worden gemaakt in absolute druk en overdruk. Eerst genoemde druk moet men rekenen vanaf het absolute nulpunt. De manometer van een stoomketel geeft de overdruk aan ten opzichte van die van de atmosfeer op zeeniveau. Staat de meter op nul dan is bijgevolg de druk in de ruimte waar de meter op aangesloten is 1 atm. absoluut. De druk van 1 atm. Is iets groter dan 1 kg/cm^2 namelijk $1,033 \text{ kg/cm}^2$. De stoomtabel maar ook het Mollierdiagram geeft de verschillende waarden weer ten opzichte van de absolute druk. Bij het opzoeken van de verschillende waarden in een stoomtabel moet je hiermee rekening houden en dus altijd 1 kg/cm^2 bij de afgelezen waarde van de manometer optellen.

Bij stoomwerktuigen hebben we ook te maken met drukken die lager zijn dan de atmosferische druk zoals bijvoorbeeld in de condensor. In het verleden werd die druk gemeten met behulp van een kwikbarometer. De hoogte van de kwikkolom gaf dan de onderdruk weer in de condensor. Om de absolute druk te krijgen moest van de afgelezen waarde van 76 cm kwik kolom, de gemiddelde atmosferische druk, worden afgetrokken.



Betrekking tussen schaalverdeling ijdelmeters

Wijst dus de kwikmanometer op de condensor bijvoorbeeld 61 cm kwikkolom aan dan is de absolute druk $76 - 61 = 15$ cm kwikkolom wat overeenkomt met:

$$\frac{(76 - 61)}{76} \cdot 1 = 0,2 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$$

Meestal wordt voor de vacuümmeter een metaalmanometer met een Bourdon buis gebruikt met een schaalverdeling in cm kwik.

Bij in Engeland geproduceerde installaties geeft men het vacuüm of ijdel gewoonlijk aan in Engelse duimen, aangeduid met (") kwik kolom waarbij 30" overeenkomt met 1 kg/cm². Wijst hier de manometer bijvoorbeeld 24" aan dan komt dat overeen met een absolute druk van:

$$\frac{(30 - 24)}{30} \cdot 1 = 0,2 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$$

Een derde wijze van verdeling van de schaal bij een vacuümmeter is in procenten. Staat bij een dergelijk meetinstrument de wijzer op 80 % dan vertegenwoordigt dit een absolute druk van:

$$\frac{(100 - 80)}{100} \cdot 1 = 0,2 \text{ [kg/cm}^2\text{]}$$

Uit het bovenstaande kan worden afgeleid dat hoe hoger de afgelezen waarde in cm of inches kwik dan wel procenten, des te lager de absolute druk in de condensor en de tegendruk achter de zuiger in de cilinder van de stoommachine is.

Overigens is de absolute druk in de condensor de som van twee drukken, namelijk die van de aanwezige waterdamp plus de meegevoerde lucht en eventuele andere niet bij de heersende temperatuur condenseerbare gassen. De lucht maar ook de waterdamp wordt tijdens bedrijf voortdurend weggezogen met behulp van een pomp of ejecteur. Geeft men aan de luchtpomp of ejecteur voldoende capaciteit dan kan men onder normale omstandigheden alle lucht uit de condensor verwijderen.

De druk van de waterdamp kan men echter niet zo laag maken als men wil omdat deze uitsluitend afhangt van de temperatuur van het condensaat. Hoe lager deze temperatuur des te geringer de dampspanning, wat wordt weergegeven met de gebogen temperatuurlijn in bovenstaande grafiek. De in de grafiek aangegeven waarden, waarbij de druk geenszins lineair verloopt met de temperatuur, kan men ook aflezen in de stoomtabel bij de tabel voor verzadigde waterdamp.

Wijst de condensor een druk aan van 24" dan komt dat overeen met een absolute druk van $30" - 24" = 6"$ oftewel een druk van $6/30 \times 1 = 0,2$ kg/cm². De waterdamp heeft dan bij een temperatuur van het condensaat van bijvoorbeeld 52 °C, een druk van 0,13 kg/cm². De spanning van de dan aanwezige lucht c.q. gassen is dan $0,2 - 0,13 = 0,07$ kg/cm².

4.16.3 Inrichting van condensors

De condensor zoals we hier voor hebben gezien dient voor het condenseren van de afgewerkte stoom en het verlagen van de tegendruk van de stoommachine. Er zijn twee soorten condensors te onderscheiden namelijk.

1. de injectie- of mengcondensor
2. de oppervlakte condensor

Beide types zijn of worden nog steeds bij door stoommachines aangedreven opvoerwerktuigen in gemalen toegepast.

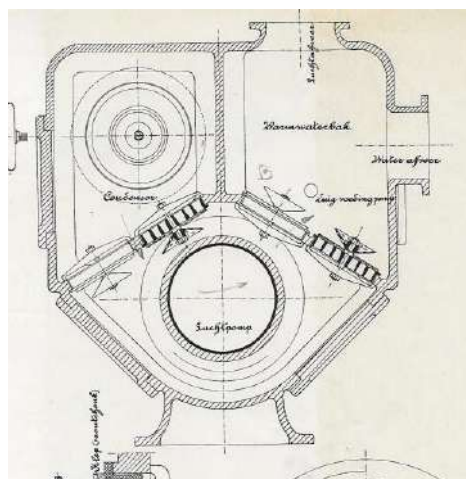
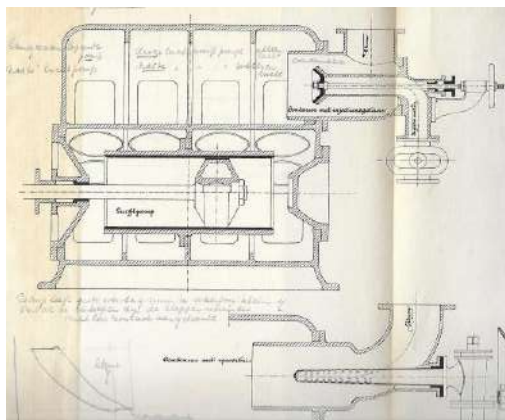
4.16.4 Injectie of mengcondensors

In de injectiecondensor, die te beschouwen is als een kleine gesloten ruimte of vat, wordt de afgewerkte stoom door een gordijn van koude waterdruppels gevoerd. De stoom condenseert en valt samen met het koelwater onder in de gesloten ruimte. De lucht en eventuele andere gassen die samen met de afgewerkte stoom worden aangevoerd condenseren niet en moeten om het vacuüm te kunnen onderhouden uit de condensor worden gepompt. Dit doet men met de luchtpomp. Meestal is de luchtpomp zodanig ingericht dat deze ook het mengsel van condensaat en injectiewater, het zogenoemde wees, uit de condensor pompt. We noemen deze pomp een natte luchtpomp. Een deel van het wees (een verbastering van het Engelse "waste water") wordt teruggevoerd naar de stoomketel. Het spreekt voor zich dat dit type condensors alleen kan worden toegepast als het koelwater, meestal polderwater, geen zout bevat zoals veelal het geval is bij op zee uitslaande gemalen.

Voor condensorinstallaties is een aantal verschillende natte luchtpompen ontwikkeld. Deze zuigerpompen worden, afhankelijk van de plaats van opstelling, direct door zuigerstang beweging van de stoommachine aangedreven, dan wel via een excentriek dat op de krukas van de machine is gemonteerd. De aandrijving van de natte luchtpomp, in het verlengde van de zuigerstang of met een excentriek, bepaalt in hoge mate de verdere inrichting van de injectiecondensor. De verschillende voor gemalen meest toegepaste principes zullen hierna nader worden besproken.

Condensor met door een zuigerstang aangedreven natte luchtpomp

Zoals hier voor is aangegeven worden de lucht en het condensaat tegelijk uit de condensor gezogen door een pomp die in de regel door de machine zelf wordt aangedreven. In onderstaande figuur is een doorsnede gegeven van een horizontaal, in het verlengde van de machine, opgestelde natte luchtpomp met geïntegreerde condensor. De condensor kan bij deze uitvoering zowel met een sproeibuis als met een sproeiklep worden uitgevoerd.

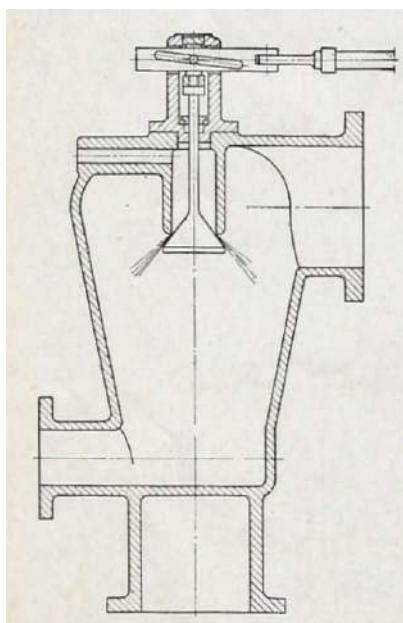


Doorsnede natte-luchtpomp met injectie-condensor

De metalen klepplaatjes kunnen vervuilen door vaste stoffen in voornamelijk het circulatiewater. Ook kunnen de plaatjes krom trekken en moeten dan op een dikke en vlakke glasplaat met behulp van schuurpasta weer worden vlak geslepen of vervangen. Reserve plaatjes zijn niet doorboord en moeten voor het vervangen in het juiste patroon van gaten worden voorzien.

Condensor met door excentriek aangedreven natte luchtpompen

In onderstaande figuur is een doorsnede gegeven van de meestal onder de stoommachine opgestelde injectiecondensor met sproeiklep. De condensor is met een voetflens op de keldervloer van het gemaal bevestigd. Direct naast de kegelvormige condensor is de natte luchtpomp opgesteld. De zuig van deze pomp is verbonden met de afvoer links onderin de condensor. In de condensor heerst een onderdruk waardoor via de sproeiklep en de dunne leiding links bovenin,



koelwater wordt aangezogen. De rechts boven aangevoerde afgewerkte stoom passeert het koude watergordijn en condenseert. De hoeveelheid injectiewater wordt geregeld door de sproeiklep meer of minder open te zetten. Hier gebeurt dit door een op afstand bedienbaar schuifbewegingsmechanisme. De hoeveelheid injectiewater is afhankelijk van de temperatuur van het water en de belasting van de stoommachine. De stoomtoevoer naar de condensor moet tijdens het opstarten van de machine juist voldoende zijn om de machine te laten draaien. Bij een te grote vulling van de machine komt er te veel stoom in de condensor, de stoom expandeert onvoldoende en zorgt, doordat niet alle stoom condenseert, voor opwarming van de condensor. Het gevolg is dat het vacuüm te laag wordt en er onvoldoende injectiewater wordt aangetrokken waardoor het vacuüm nog verder afneemt.

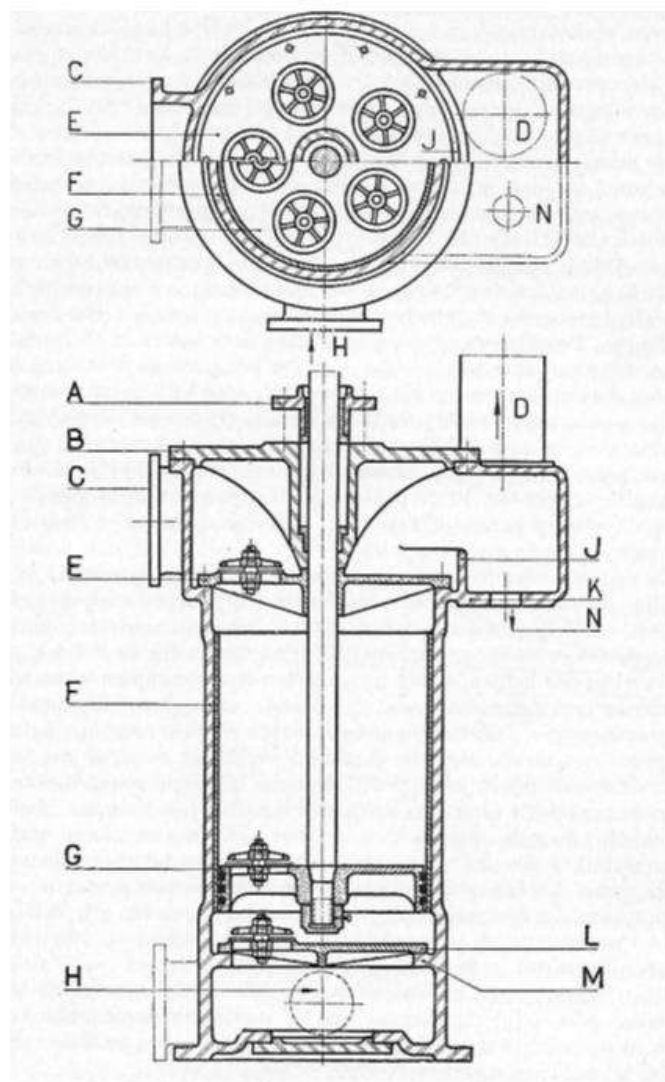
Injectiecondensor

De stoommachine moet dan worden gestopt en kan pas weer worden opgestart als de natte luchtpomp, de condensor en de afvoerleiding van de stoommachine weer zijn afgekoeld. Het opwarmen dan wel afkoelen kan men tegengaan respectievelijk bespoedigen door natte doeken over de condensor te leggen. Het injectiewater wordt uit de toevoertocht van het gemaal gehaald en moet doorgaans een aantal meters worden opgezogen. In sommige gevallen wordt daarom bij het opstarten van dit soort installaties gebruik gemaakt van een hoog geplaatste koelwatertank. Het injectiewater stroomt dan onder vrij-verval toe.

Uitvoering en werking luchtpomp met enkele kleppen

De op de volgende bladzijde afgebeelde vertikaal opgestelde natte luchtpomp wordt via een excentriek of balansarm op de hoofdstoommachine aangedreven. De pomp heeft drie stel kleppen, namelijk voet- zuiger- en topkleppen.

Het gegoten ijzeren pomplichaam is met een vlakke flens tegen de machinefundatie gebout of met een voetflens op de vloer onder de machine vastgezet. De cilinder is voorzien van een bronzen voering. Onder en boven de cilinder is respectievelijk het raam voor de voet- en de topkleppen aangebracht. De ramen bevatten elk vijf vlakke kleppen die van rubber zijn gemaakt. De zuiger is van brons gemaakt en bevat eveneens vijf kleppen. Verdeeld over de hoogte zijn hier drie zuigerveren aangebracht. De zuigerstang wordt via een lange bus door het deksel van de pomp gevoerd. De bus is van een diepe pakkingkamer voorzien en sluit aan op het bovenste kleppenraam. De ruimte onder het voetkleppen-raam is verbonden met de condensor. De voet van de pomp staat iets lager dan de bodem van de condensor zodat het condensaat onder vrij-verval de condensor in stroomt.

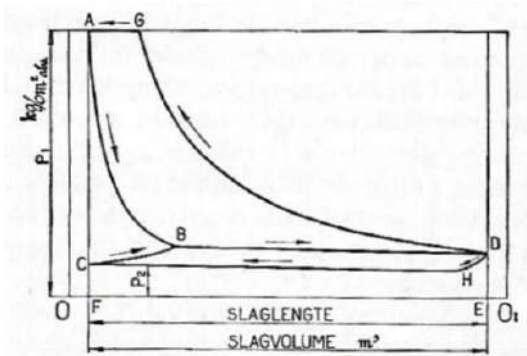


Natte vertikaal opgestelde luchtpomp met drie stel kleppen

Gaat de zuiger omhoog dan ontstaat hier een onderdruk zodat de voetkleppen lichten en het lucht-, damp- en watermengsel onder de zuiger stroomt. Bij dalende zuiger stroomt dit mengsel door de zuigerkleppen naar de cilinderruimte boven de zuiger, en bij de daarop volgende opwaartse slag van de zuiger wordt het mengsel weggeperst naar de ruimte boven het topkleppenraam. Het wees wordt gespuist of naar behoefte afgevoerd naar de warmwaterbak om opnieuw te worden gebruikt in de stoomketel.

De lucht en de waterdamp ontwijken via een ruime leiding naar een geschikte plaats in de buitenlucht. De pomp is enkelwerkend en kan alleen worden toegepast bij stoommachines met een matig toerental.

Op de onderstaande figuur is te zien welke druk- en volume veranderingen in de pomp plaatsvinden. De onderste smalle strook stelt het volume en het drukverloop tussen het onderste kleppen-raam



en de zuiger voor terwijl het bovenste gedeelte het verloop hiervan boven de zuiger weergeeft. Het oppervlak van de afzonderlijke twee diagramdelen zijn een maat voor de verrichte pomparbeid boven- en onder de zuiger. Dit betekent dat de pomparbeid boven de zuiger aanmerkelijk groter is dan die onder de zuiger.

Druk- en volumeverloop in natte luchtpomp met kleppen

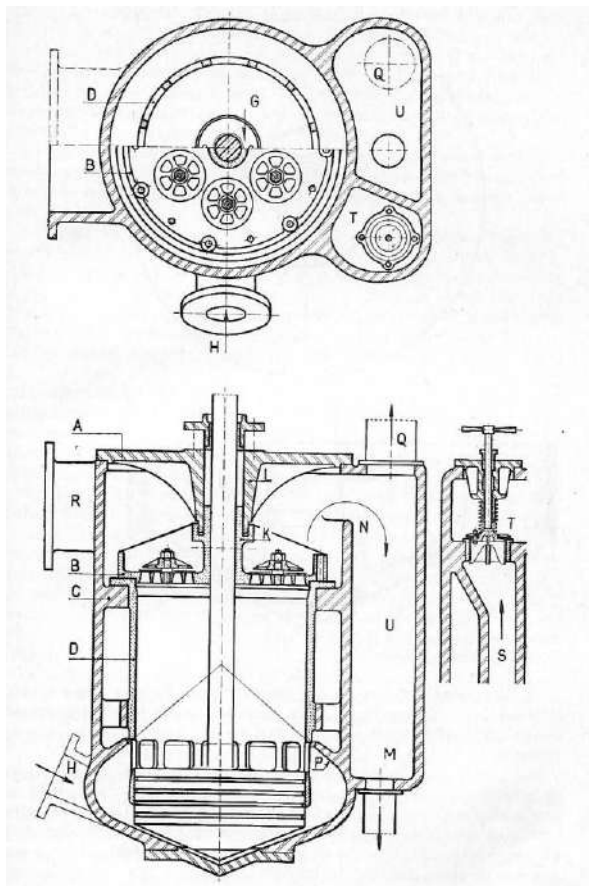
Uitvoering en werking luchtpomp met poorten en kleppen

In de onderstaande figuur is de veel toegepaste en aanzienlijk minder complexe Edwards-luchtpomp afgebeeld. Ook deze natte luchtpomp is direct tegen de condensor aangebouwd en wordt met behulp van een excentriek-drijfslagmechanisme of balansarm aangedreven.

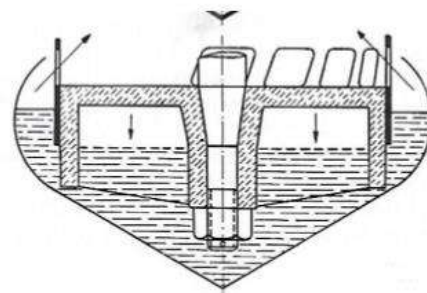
Het gietijzeren pomplichaam is voorzien van een bronzen pompcilinder. Onderin de cilinder is in de omtrek een aantal poorten gemaakt. Door deze poorten wordt de wees, damp en lucht aangevoerd. In de cilinder bevindt zich een gevoerde gietijzeren zuiger. De met geringe speling passende pompzuiger heeft geen zuigerveren maar een aantal zogenoemde labirynth groeven die voor de afdichting maar ook voor de smering zorgdragen. De op de volgende bladzijde afgebeelde pomp heeft, evenals de hier voor besproken pomp met kleppen in de zuiger, een zuigerstang. Sommige fabrikanten voorzien de zuiger niet van een stang maar van een ruime geleidebuis ook wel trunk genoemd. De drijfslag is dan in het bovenste deel van de zuiger vastgemaakt. Een en ander is vergelijkbaar met een trunkzuigermotor.

Op de cilinder ligt het zogeheten kleppenrooster waarin een aantal kleppen is aangebracht die voor de afvoer van de wees en de gassen zorgdragen. De afvoer van de pomp ligt hoger dan het kleppenrooster waardoor er altijd een laag water op blijft staan en waardoor er geen lucht naar de ruimte boven de zuiger kan lekken. Het kleppen-rooster is voorzien van een geleiding voor de bronzen zuigertrunk. De kleppen zijn gemaakt van een goede niet al te stugge natuurrubber soort waarbij moet worden aangetekend dat de temperatuur van de wees niet boven de 55 °C mag komen.

De zuiger is een gesloten zuiger. Vaak is de onderkant open; een zogenaamde open zuiger. Hiermee wordt de klap die een dichte zuiger bij de neergaande slag op het water veroorzaakt voor een groot deel geelimineerd.



Edwards- luchtpomp



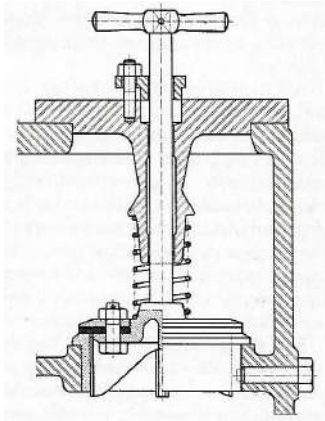
Zuiger luchtpomp

De met lucht gevulde holle ruimte werkt als een soort luchthelm. Bij de gesloten-zuiger tracht men het- zelfde effect te bereiken met de scherpe punt aan de zuiger. Gaat de zuiger naar beneden dan drukt deze de wees weg. Door de gebogen vorm van het onderste gedeelte van het pomplichaam wordt dit naar de poorten in de voering geleid en komt boven de zuiger. Bij het omhoog gaan van de zuiger worden de poorten door de zuiger afgesloten waarna de wees via de perskleppen in de weesleiding stroomt.

De pomp is enkelwerkend omdat alleen tijdens de opgaande slag een mengsel van condensaat en lucht wordt verplaatst.

De aanvoerruimte van de pomp is voorzien van een ontlastklep met een slappe veer, de zogenaamde Schelde klep. Als bij het starten, er is dan nog geen of onvoldoende vacuum, de druk

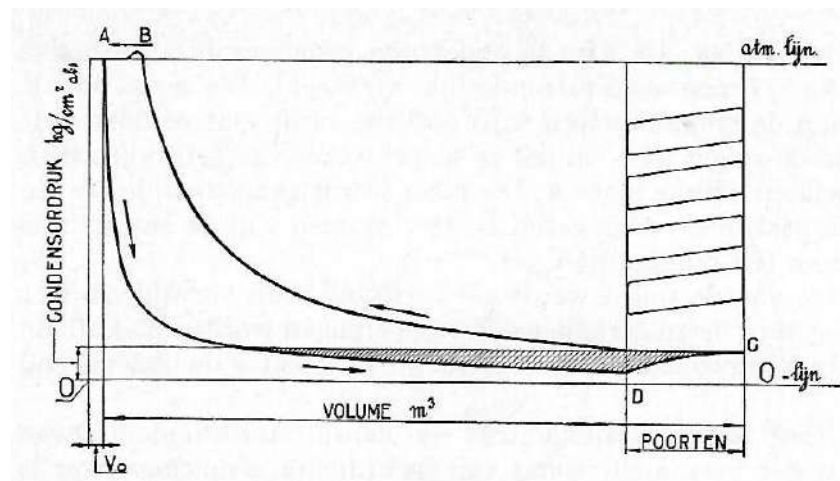
in de zuigruimte van de pomp bij de neergaande slag te hoog wordt, zal via de ontlastklep de wees worden afgevoerd naar de persruimte boven het kleppenrooster.



Verder is deze natte luchtpomp, als deze een open-zuiger heeft, voorzien van een zogenoemd snuifklepje waarmee lucht onder de als luchthelm werkende holle zuiger wordt toegelaten om te voorkomen dat deze gaat bonken. Door het openen van het snuifklepje zal het vacuüm iets teruglopen.

Scheldeklep

Op de hier na volgende figuur is te zien welke druk- en volumeveranderingen in een Edward natte luchtpomp plaatsvinden. De natte luchtpomp is slechts gedurende het gearceerde gedeelte van de slag werkzaam voor het afzuigen van de lucht, dus slechts een gedeelte van de slag.

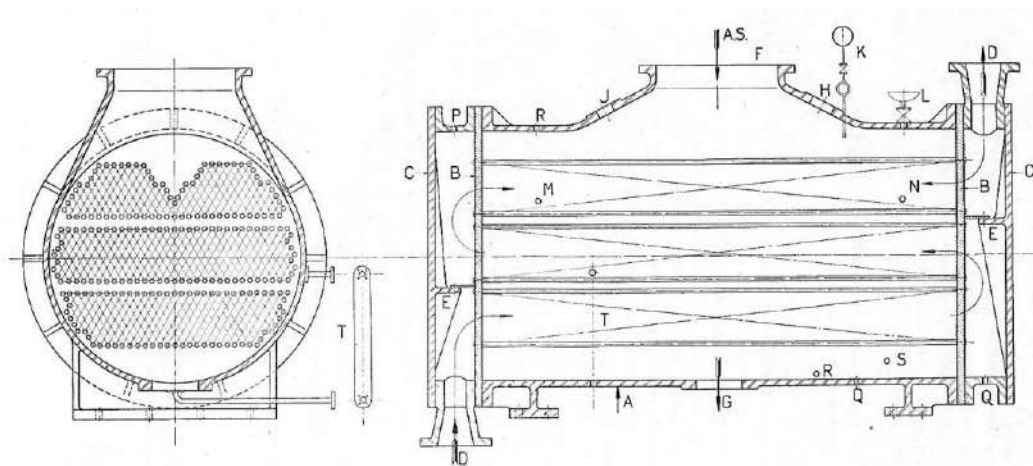


Druk en volumeverloop in natte luchtpomp met kleppen en poorten

Hoe geringer het vacuüm is des te groter zal het werkzame gedeelte van de slag zijn. We noemen dit de vullingsgraad. Bij een pas gestarte machine zal de lijn van de condensordruk steeds verder dalen en het gearceerde gedeelte steeds korter worden en de vulling dus kleiner. De vullingsgraad zal een constante grootte bereiken, en het vacuüm dus een constante hoogte, zodra de pomp zoveel lucht verwijdert als er door voortdurend lekken toetreedt in de condensor.

4.16.5 Oppervlaktecondensor

Bij de oppervlakte condensor, die te beschouwen is als een gesloten vat, wordt de afgewerkte stoom langs de buitenkant van een groot aantal kleine pijpjes gevoerd. Door deze pijpjes stroomt koelwater dat er voor zorgt dat de stoom condenseert zonder dat het hiermee in aanraking komt. Ook bij dit type condensor wordt het condensaat met een natte luchtpomp uit het vat verwijderd. In de hieronder afgebeelde figuur is een dergelijke condensor afgebeeld waarvan hierna de volgende algemene beschrijving volgt.



Condensor met drievoudige circulatie

Het middenstuk van de condensor noemen we de romp. Deze romp is vanwege de nogal ingewikkelde vorm en het aantal uitsteeksels, maar ook de goede weerstand tegen corrosie, gemaakt van gietijzer. Sinds het midden van de 20 eeuw kom je ook gelaste stalen condensers tegen. De doorsnede is rond, ovaal of ook wel vierkant. Uitwendig is de romp voorzien van de nodige verstijvingsribben om het imploderen hiervan te voorkomen.

De romp is aan de voor- en achterzijde afgesloten door een zogenoemde pijpplaat waar in een bepaald patroon de condensorpijpen zijn geplaatst. De pijpen zijn gemaakt van een speciale koperlegering. Om te voorkomen dat de pijpplaten worden aangetast als gevolg van galvanische corrosie worden deze van het- zelfde materiaal als de pijpen gemaakt.

Over de pijpplaten heen zijn gegoten deksels of ook wel waterkasten geplaatst. Aan de binnenkant van de deksels zijn keerschotten geplaatst die er voor zorgen dat het koelwater de pijpen enige keren doorstroomt. Bij de afgebeelde condensor gebeurt dit drie keer, maar er zijn ook condensors waar het koelwater vier keer of slechts twee keer door de pijpenbundels stroomt.

De keerschotten lopen vaak niet door tot aan de pijpplaat maar laten een ruimte open die opgevuld wordt met een vervangbare plaat of een gegoten constructie met naar binnen gerichte randen zoals in de tekening op de volgende bladzijde is weergegeven.

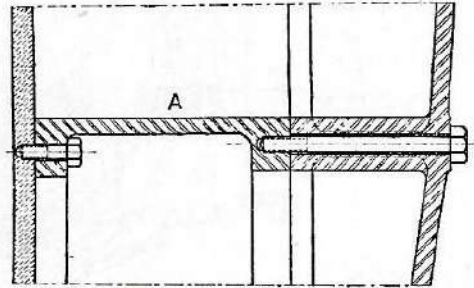
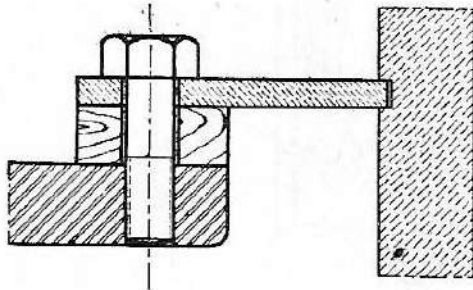
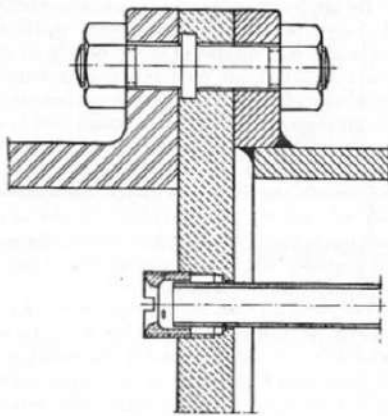


Fig. 42. Keerschotten in circulatieruimte.

Op het moment dat de keerschotten zodanig zijn aangetast dat ze vervangen moeten worden kan dit zonder dat het hele deksel moet worden vernieuwd.

Indien de pijpplaten kleiner zijn dan de diameter van de dekselflenzen worden deze met tapeinden of tap-bouten aan de romp bevestigd. Meer gebruikelijk is de hierna afgebeelde constructie waarbij de draadeinden en of tapbouten buiten de natte ruimte blijven en zodoende niet worden aangetast. Hierbij wordt de pijpplaat ingeklemd tussen de flens van de romp en het deksel of de waterkast. Men neemt hiervoor zogenoemde borstbouten waarmee eerst de pijpplaat wordt vastgezet en

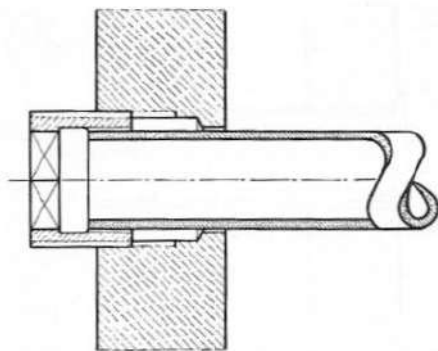


vervolgens het deksel. Tussen beide vlakken brengt men geklopte menie of loodwit aan als pakking. Het deksel moeten op gezette tijden voor onderhoud en schoonmaak werkzaamheden verwijderd kunnen worden, wat met deze constructie goed mogelijk is. Het deksel is daartoe van een hysoog voorzien terwijl op de romp een soort davit is bevestigd waarmee het losgenomen deksel naar buiten kan worden gezwaaid. Tussen het deksel en de pijpplaat wordt een vervangbare meestal hard rubberen plaatpakking aangebracht. Voor het aanbrengen van de pakking wordt de pijpplaat met loodwit bestreken zodat deze blijft kleven, terwijl het deksel met een grafietpasta wordt bestreken zodat deze bij het losnemen makkelijk loslaat.

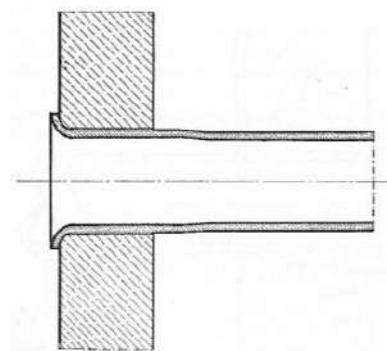
Pijpplaatverbinding aan romp

De condensorpijpen hebben gewoonlijk een uitwendige diameter van 19 mm (3 / 4 ") en een wanddikte van 1 mm. Hier voor is aangegeven dat ze zijn gemaakt van een koperlegering om corrosie tegen te gaan. Bovendien geleidt koper de warmte beter dan ijzer. Als materiaal gebruikt men messing, in de volksmond vaak aangeduid met geel koper, met een samenstelling van 70 % koper (Cu) en 30 % zink (Zn), waarbij de pijpjes bovendien in- en uitwendig worden vertind. Ook is men in de loop der tijd andere legeringen gaan gebruiken die nog beter bestand zijn tegen corrosie zoals Aluminium-messing met een samenstelling van 76 % koper (Cu), 20 % zink (Zn), 2 % aluminium (Al), 1 % tin (Sn) en 1 % nikkel (Ni). Ook Cupronikkel, een legering die is samengesteld uit 70 % koper (Cu), 30 % nikkel (Ni) is een veel toegepast materiaal voor de vervaardiging van de pijpplaten en pijpen bij condensors.

De pijpjes moeten lucht- en waterdicht in de pijpplaten worden bevestigd. Daarnaast moeten ze ook spanningsvrij kunnen uitzetten. Voor het bevestigen bestaan verschillende methodes. Een gebruikelijke werkwijze is dat men op de plaats waar de condensorpijp door de pijpplaat steekt een van schroefdraad voorziene pakkingkamer maakt, een en ander zoals in de hierna getoonde linker figuur is aangegeven.



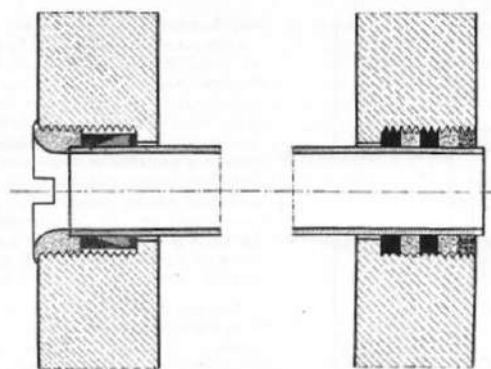
Pijpverbinding met pakkingkamer



Gerolde pijpverbinding

De kamer wordt opgevuld met bijvoorbeeld gevlochten katoenkoord en aangedrukt met een wartel. Deze wartel is voorzien van een vierkant of een sleufje waarmee met behulp van een passende sleutel of schroevendraaier de wartel in de kamer wordt gedraaid en zodoende de pakking aandrukt. Een andere methode, en in geval van rechte pijpen altijd gecombineerd met de hier voor aangeduide, is om de condensorpijp in de pijpplaat te rollen. De gaten in de pijpplaat zijn dan voorzien van zeer fijne schroefdraad of speciale groeven voor een goede afdichting. Aan de zijde waar het koelwater binnentreedt wordt de pijp getrompt of wordt een trompetvormige wartel toegepast. Om eventueel ontwijkende lucht bij de in- of uitrede van de condensorpijp te kunnen laten ontwijken zijn de wartels voorzien van kleine gaatjes.

Een andere na de Tweede Wereldoorlog toegepaste bevestigingsmethode is die van de Amerikaan John Crane. Deze methode is hieronder afgebeeld. Beide pijpplaten zijn voorzien van pakkingkamers met schroefdraad. Aan de inlaatzijde, de linker afbeelding, is het pijpje geklemd tussen twee conische ringen van witmetaal die worden aangedrukt door de gestroomlijnde wartel. Vooraf heeft men in de pakkingkamer een fiber grondring gelegd. Bij het aanbrengen van de witmetalen ringen ligt het einde van de condensorpijp tegen de wartelmoer.

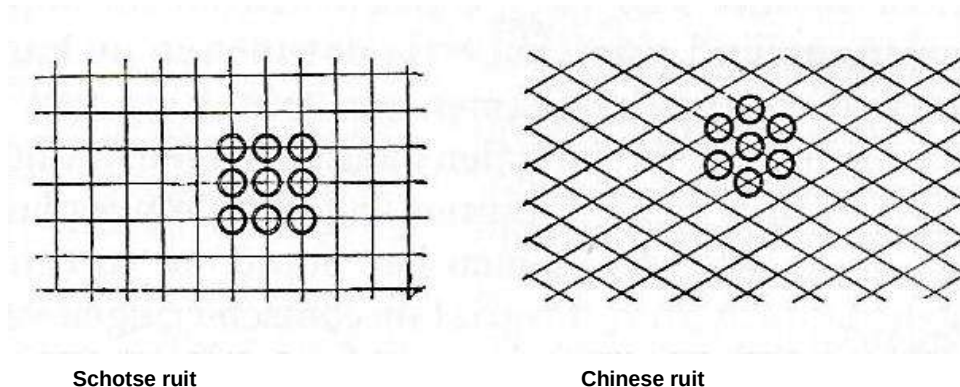


Pijpverbinding van John Crane

Door het inschroeven van de wartel wordt de pijp naar binnen geschoven en de kamer volledig opgevuld. Er kan zich hier geen lucht ophopen en de wartel aantasten.

Aan de uitlaatzijde, de rechter afbeelding, heeft men beurtelings ringen van fiber en witmetaal gelegd. Deze ringen worden vastgestampt met een soort holpijp. De omtrek van de relatief zachte ringen dringt daardoor in de schroefdraad zodat ze niet kunnen loswerken. De uiteinden van de pijpjes steken enkele millimeters buiten de pijpplaat uit. We zien hier dat de pijpen gemakkelijk door de pakking heen en weer kunnen schuiven bij uitzetten of krimpen.

Men kan de condensorpijpen op twee verschillende manieren rangschikken. In staande en in liggende rijen, de zogenoemde Schotse ruit; of schuin tegenover elkaar, de zogenoemde Chinese ruit.



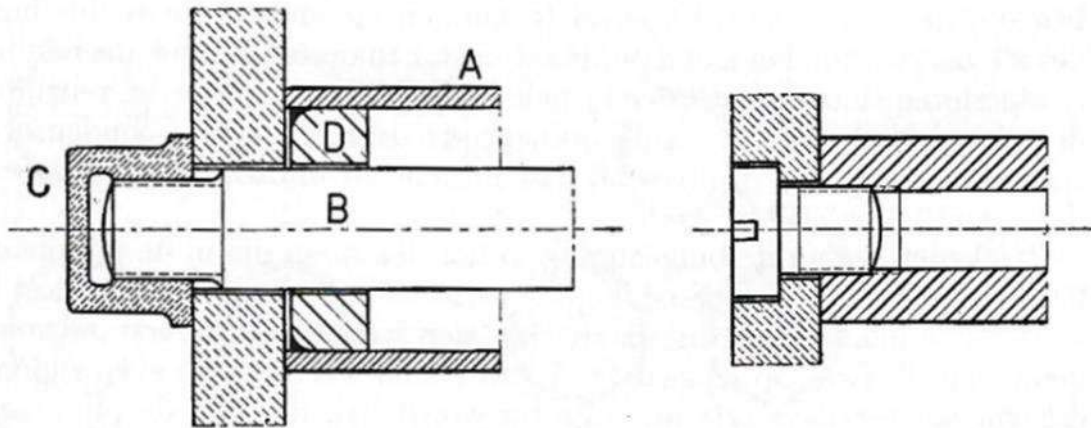
Schotse ruit

Chinese ruit

We zien uit deze afbeeldingen dat het pijppatroon van de Schotse ruit minder weerstand zal bieden aan de afgewerkte stoom, doordat de openingen tussen de pijpen in elkaars verlengde liggen. Deze rangschikking past men toe voor pijpenbundels die het eerst met de stoom in aanraking komen dus boven in de condensor. Onder in de condensor, een deel van de stoom is dan inmiddels gecondenseerd en in volume afgenomen, past men de Chinese ruit toe.

De Chinese ruit biedt de mogelijkheid om in een gegeven pijpplaat oppervlak ongeveer 15 % meer pijpjes te plaatsen dan bij de Schotse ruit. De condensor kan daardoor kleiner worden.

De vlakke pijpplaten van een condensor worden aan een grote uitwendige druk onderworpen, in de eerste plaats omdat in de condensor een hoge onderdruk heerst en verder omdat het circulatiewater aan de andere zijde een overdruk uitoefent. Daarom brengt men soms een aantal steunbouten aan tussen het deksel en de pijpplaat. Ook treft men in een condensor langssteunen aan tussen de pijpplaten. Deze steunen worden uiteraard op druk belast en zijn meestal van staal gemaakt. De op knik belaste steunen zijn of van een dikwandige pijp dan wel van een grotere dunwandige pijp met aan de einden een ingelaste prop gemaakt. Deze twee veel toegepaste uitvoeringsvormen worden hieronder afgebeeld. Onder de moer of de bout, hier niet aangegeven, wordt meestal een gegloeide zacht-koperen ring gelegd waarmee een goede afdichting wordt verkregen.



Langssteunen in condensor

In de hier voor gegeven figuur van de condensor komt het koude circulatiewater binnen door de onderste pijpenbundels, en wordt afgevoerd via de bovenste. De afgewerkte stoom daarentegen stroomt van boven naar beneden dus in tegengestelde richting. Daarom spreken we van tegenstroom. Zou het koude water aan de bovenkant binnen komen en aan de onderzijde naar buiten gaan dan zouden stoom en koelwater dezelfde stromingsrichting hebben en spreken we van meestroom. Bij oppervlaktecondensors laat men altijd stoom en circulatiewater in tegenstroom lopen. En wel om de volgende reden. Als we meestroom zouden toepassen dan zou de warme stoom het eerst in aanraking komen met het koudste pijpoppervlak. Waterdamp en lucht gaan nu verder omlaag en passeren daarbij pijpen met een steeds warmer oppervlak. Wil het onderste gedeelte van het afkoelend oppervlak nog dienst doen dan zal er veel circulatiewater nodig zijn om een voldoende groot temperatuurverschil voor de condensatie te handhaven.

Gebruiken we daarentegen tegenstroom dan zal het koelwater de condensor kunnen verlaten met een temperatuur die maar weinig boven die van de afgewerkte stoom hoeft te liggen. Het circulatiewater kan dus een grotere temperatuurverhoging ondergaan: met andere woorden er is minder koelwater nodig dan bij meestroom. Bovendien neemt de temperatuur van de lucht van boven naar onder steeds verder af. Hierbij neemt de dichtheid toe zodat de lucht gemakkelijker is te verwijderen.

Behalve dat de condensor de afgewerkte stoom van de hoofdstoommachine verwerkt kunnen ook andere werktuigen, zoals bijvoorbeeld de door stoom aangedreven ketelvoedingswaterpomp, op de condensor worden aangesloten.

4.16.6 Condensor gebruik en onderhoud

Naast het peilglas op de condensor, waarmee het niveau van het condensaat in de condensor wordt aangegeven, treft men boven op de condensor een aansluiting aan voor de vacuümmeter en de zogenoemde sodakraan. Deze kraan is voorzien van een trechter waarin we een soda-oplossing of loog kunnen gieten, die in de condensor komt zodra de kraan wordt geopend. Deze soda-oplossing of loog dient ervoor om de met smeerolieresten verontreinigde condensorpijpjes uitwendig schoon te maken. Olie, we zagen dat ook bij de behandeling van de stoomketels, belemmert de warmte doorgang. Bij dit reinigen stelt men de condensor buiten bedrijf, laat men het waterniveau in de condensor oplopen en laat men verse stoom in de condensor toe voor verwarming. De pijpenbundels maar ook de romp en de pijpplaten worden met behulp van de warme stoom als het ware uitgekookt waarbij de soda het vet oplost. Na de uitkooksessie dient het waswater in warme toestand gecontroleerd te worden afgevoerd. Het verdient aanbeveling om de condensor nadien nog een paar keer na te spoelen met warm water. Het reinigen verloopt echter niet altijd even succesvol. Voor een grondige reiniging dienen de pijpjes een voor een er uit te worden genomen wat, naar zich laat aanzien, een zeer tijdrovende bezigheid is vanwege het grote aantal pijpen, en in het geval van gerolde pijpen niet eens mogelijk is zonder deze te vervangen. Het schoonmaken van de binnenkant van de pijpjes gebeurt met een groot formaat pijpenrager aan een lange enigszins flexibele steel. De harde ronde borsteltjes trekt men handmatig heen en weer door de pijpjes. Ook dit is een tijdrovende bezigheid.

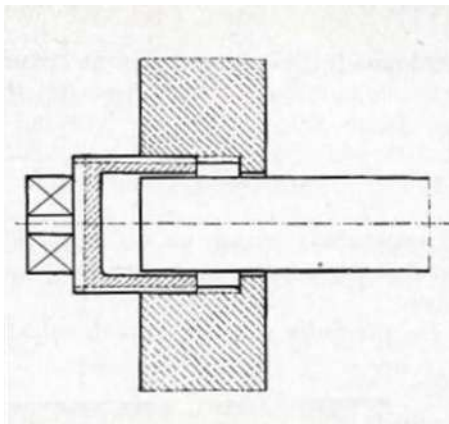


Pijpenrager

De belangrijkste problemen die zich kunnen voordoen bij een oppervlaktecondensor zijn lekkende pijpen of pijpverbindingen. Men spreekt dan van een lekke condensor. Lekkage ontstaat door aantasting van het pijpmateriaal of de pijpverbindingen en/of door verouderd pakkingmateriaal. Ook gerolde verbindingen kunnen het na verloop van tijd laten afweten. Er wordt dan koelwater naar binnen gezogen dat er voor zorgt dat er steeds minder nieuw ketelwater aan het systeem toegevoegd hoeft te worden. Bij het verergeren van de lekkage of bij spontane breuk valt het vacuüm weg. Indien het wegvallen van het vacuüm niet tijdig wordt opgemerkt treden met oorverdovend lawaai de veiligheidskleppen op de stoommachine in werking. Ook zal in dat geval de machineruimte vollopen met stoom en is het zaak de machine onmiddellijk te stoppen.

Indien de condensor met brak- of zout water gekoeld wordt kan men een lekkage opsporen door het condensaat te bemonsteren en het zoutgehalte vast te stellen door er zilvernitraat in te druppelen. Ontstaat er een witte neerslag dan is het water zout en is er sprake van lekkage.

Bij het vaststellen van een lekke condensor moet men allereerst de plaats van de lekkage bepalen. Hier voor moeten beide condensordeksels worden weggenomen zodat de pijpplaten met daarin de pijpverbindingen kunnen worden bekeken. Gezorgd moet worden dat deze platen goed droog zijn. Dit kunnen we bevorderen door een weinig stoom in de lege condensor toe te laten. Vervolgens worden, voor zover mogelijk, alle openingen op de stoomruimte afgesloten en de condensor tot een zo hoog mogelijk niveau opgevuld met schoon water. Het lek in de pijp of de pijpverbinding zal



spoedig zichtbaar worden doordat de verbinding en de pijpplaat ter plaatse vochtig worden. Is het lek ontstaan door een aangetaste pijp dan kan deze vervangen worden. Is er geen reserve pijp dan kan men het mankement oplossen door aan beide zijden een houten prop in desbetreffende pijp te slaan of, en dat verdient de voorkeur, deze te voorzien van een dichte dop. Een en ander zoals hiernaast is afgebeeld.

Dichte dop voor het afstoppen

Lekt een pijpverbinding in de pijpplaat, dan kan de verbinding, afhankelijk van de soort, opnieuw verpakt of nagerold worden. Soms kan volstaan worden met alleen de wartel iets aan te draaien. Indien meerdere pijpverbindingen dezelfde kwaal vertonen is het raadzaam om uit voorzorg alle verbindingen vaster te zetten of na te rollen.

In het verleden werden kleine lekkages bij oppervlaktecondensoren opgeheven door tijdens bedrijf zaagsel aan het circulatiewater toe te voegen. Het zaagsel werd dan door het vacuüm in het lek gezogen, zwol op, en dichtte het lek. Het spreekt voor zich dat dit een noodmaatregel is om de daadwerkelijk reparatie uit te kunnen stellen. Het in het lek gedrongen zaagsel is overigens een goede indicator voor de plaats van de lek(ken) op het moment dat men tot reparatie overgaat.

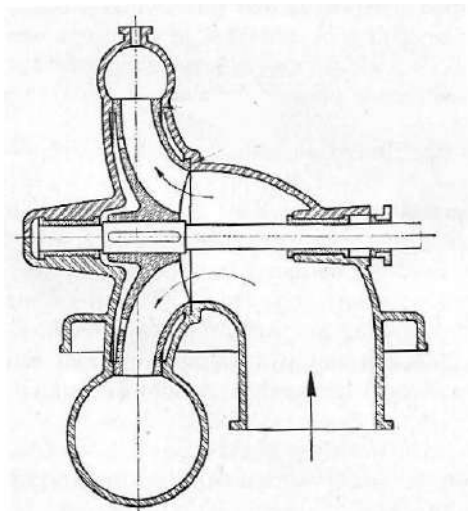
4.16.7 Condensor circulatiewaterpomp

De condensor circulatiewaterpomp dient om het koelwater voor de condensor aan te zuigen en door de pijpenbundels van de condensor te persen en vervolgens weer af te voeren. Men onderscheidt hiervoor twee soorten pompen, namelijk zuigerpompen en waaierpompen. De hoeveelheid water die de pompen moeten kunnen opbrengen is afhankelijk van de soort stoom die wordt gebruikt en het nominale vermogen van de stoommachine(s) die op de condensor is aangesloten. Voor het debiet van deze circulatiepompen geldt de volgende vuistregel:

Soort stoomwerktuig	Hoeveelheid koelwater in kg/apkh
Expansie machine met verzadigde stoom	200 - 250
Expansie machine met oververhitte stoom	150 - 200

Een oppervlakte-condensorinstallatie die is gekoppeld aan twee stoommachines met een vermogen van elk 450 apk (as-paardenkracht) en werkt met oververhitte stoom heeft, omgerekend, een circulatiepomp nodig met een debiet van 2,25 – 3,00 m³/min.

Voor zover is na te gaan is bij stoomgemalen alleen bij het relatief jonge ir. D.F. Woudagemaal te Lemmer, oppervlaktecondensatie toegepast. Bij dit gemaal zorgt een aparte kleine stoommachine voor de aandrijving van een centrifugaalwaaierpomp. De meestal door de hoofdstoommachine aangedreven zuigerpomp als condensorcirculatiewaterpomp blijft in deze leidraad buiten beschouwing.

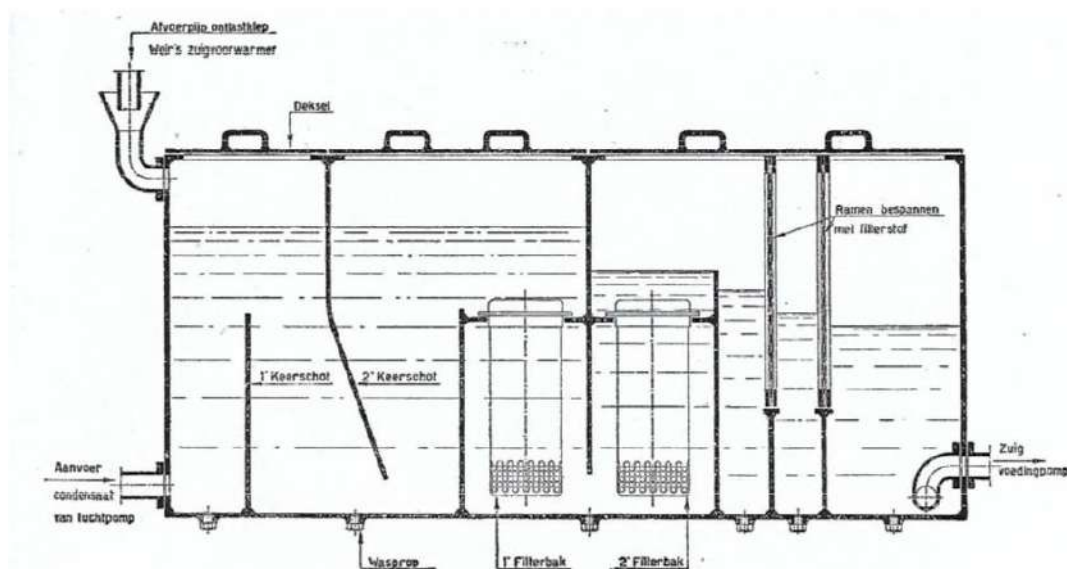


Bij het Woudagemaal is indertijd gekozen voor een ééNZijdig aanzuigende centrifugaalwaaierpomp. De ruimte tussen de bladen van de waaier is gering en de reden dat de pomp niet zonder meer het polderwater kan verpompen zonder te verstoppem. De aanzienlijk minder verstoppingsgevoelige schroefwaaierpompen zoals wij die nu zouden toepassen waren net uitgevonden en daardoor nog niet beschikbaar voor dit doel. Het werkingsprincipe van deze zogenoemde stromingspompen wordt nader uiteengezet bij de behandeling van de opvoerwerktuigen. Hierna wordt uiteengezet hoe het verstoppem van dit soort pompen bij gemalen wordt voorkomen.

EéNZijdig aanzuigende centrifugaalwaaierpomp

4.16.8 Behandeling wees en condensaat

Het condensaat en een deel van de wees, dus het mengsel van condensaat en injectiewater, wordt aangewend als ketelvoedingwater. In beide soorten water zitten oliesporen van de cilindersmering die verwijderd moeten worden voordat het water naar de ketel wordt gevoerd. Olie belemmert immers in ernstige mate de warmtedoorgang in een stoomketel en kan daardoor tot ernstige schade leiden. Voordat het condensaat in de ketel wordt gepompt wordt het aan flotatie en filtratie onderworpen al of niet gepaard gaand met de toevoeging van chemicaliën. Voor stoomketels tot een druk van 14 kg/cm² is de meest eenvoudige en doorgaans voldoende effectieve manier van olie verwijdering uit het condensaat om het condensaat via een zogenoemde open olieafscheider of warmwaterbak te leiden.



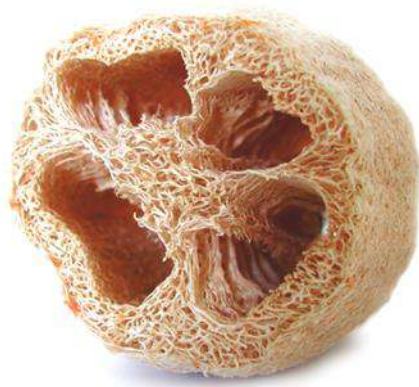
Olieafscheider/warmwaterbak

In de uit een aantal secties opgebouwde stalen bak zoals hier boven is afgebeeld wordt het condensaat links onderaan aangevoerd en door het eerste keerschot gedwongen op te stijgen. De grotere oliedruppels krijgen daardoor een opwaartse stromingsrichting zodat ze mede door het verschil in specifieke massa naar de oppervlakte worden gedreven. Deze druppels verzamelen zich als drijfslaag in het eerste compartiment die van tijd tot tijd moet worden afgeschept. Lange tijd werd na bezinking in een apart vat en filtratie deze olie opnieuw gebruikt. Tegenwoordig wordt deze afvalolie bij stookolie gevoegd en verstoekt. Het tweede keerschot dwingt de condensaatstroom, die zich ver genoeg onder het wateroppervlak over het eerste keerschot heen buigt, omlaag. De olie die zich in de tweede sectie aan het oppervlak verzamelt wordt eveneens van tijd tot tijd afgeschept. Vervolgens moet het condensaat door de eerste eigenlijke filterbak omlaag en door de tweede omhoog stromen. In deze bakken met een olie opnemende stof worden de grotere oliedruppels grotendeels uit de vloeistofstroom afgescheiden. Ten slotte passeert het condensaat twee ramen die bespannen zijn met fijn weefsel van jute of kokosvezel waarin ook de kleinere

oliedeeltjes achterblijven. Het vrijwel van alle olie deeltjes ontdane condensaat stroomt nu in het laatste compartiment van waaruit het door de ketelvoedingwaterpomp wordt aangezogen..

Van de filterbakken met rechthoekige doorsnede zijn het deksel en een deel van de onderkant geperforeerd, zodat het water een lange weg moet afleggen door het filtermateriaal waarmee de bakken zijn gevuld. Veelal gebruikte men als filtermateriaal cokes met een stukgrootte van 50 mm. Cokes is poreus en neemt gemakkelijk de oliedeeltjes op. Een nadeel is dat de oliedeeltjes alleen aan de oppervlakte worden opgenomen waardoor het filtermateriaal snel verzadigd raakt. De cokes is moeilijk te reinigen en wordt daarom vervangen door nieuwe cokes terwijl de met olie verzadigde cokes samen met de steenkool in de ketel wordt verstoekt. Een ander veel toegepast filtermateriaal in de open olieafscheider /warmwaterbak is het zogeheten Luffa spons.

Dit zijn de vezelige skeletten van op land groeiende planten met een zeer groot oppervlak waaraan de oliedeeltjes zich gemakkelijk hechten. Deze komkommer- vormige skeletten zijn gemakkelijk te reinigen en weer bruikbaar te maken door ze in een sterke soda oplossing uit te koken.



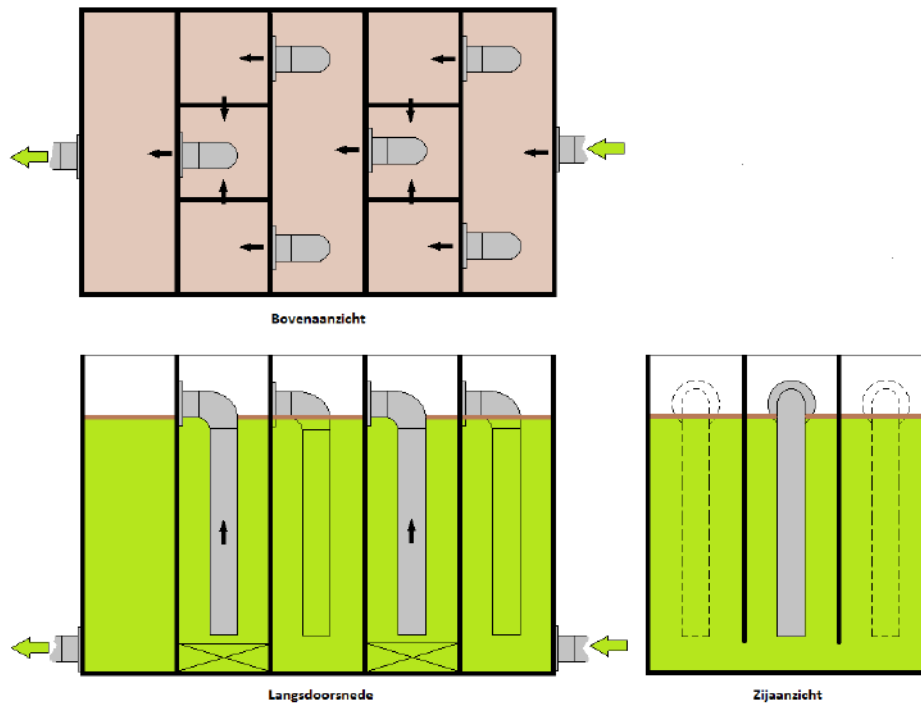
De filterdoeken maakt men, naast jute of kokosvezel, ook wel van badhanddoekenstof. Om het uitzakken of scheuren te voorkomen worden de doeken tussen metaalgaas geklemd in het filterraam opgehangen. Als de filterdoeken vervuild raken dan bemerkt men dat aan het niveauverschil over het filterraam. Ook de doeken kunnen in warm sodawater worden gereinigd.

Doorsnede Luffaspons

Een andere min of meer vergelijkbare methode is die waar de flotatie gescheiden van de filtratie wordt uitgevoerd. Deze methode is begin 20^e eeuw ontstaan uit de noodzaak voor gezuiverd ketelwater voor ketels met hogere werkdrukken.

Ook bij dit gescheiden systeem vindt de olie-afscheiding van de grote oliedruppels plaats met behulp van flotatie. In simpele bewoordingen er wordt gebruik gemaakt van de eigenschap dat olie op water drijft. Dit is niet zo eenvoudig als het lijkt omdat de stoomcilinderolie voor een goede smering een emulsie vormt met water; het uiteindelijke condensaat. Zuiver condensaat ziet er dan ook uit als sterk met water verdunde melk.

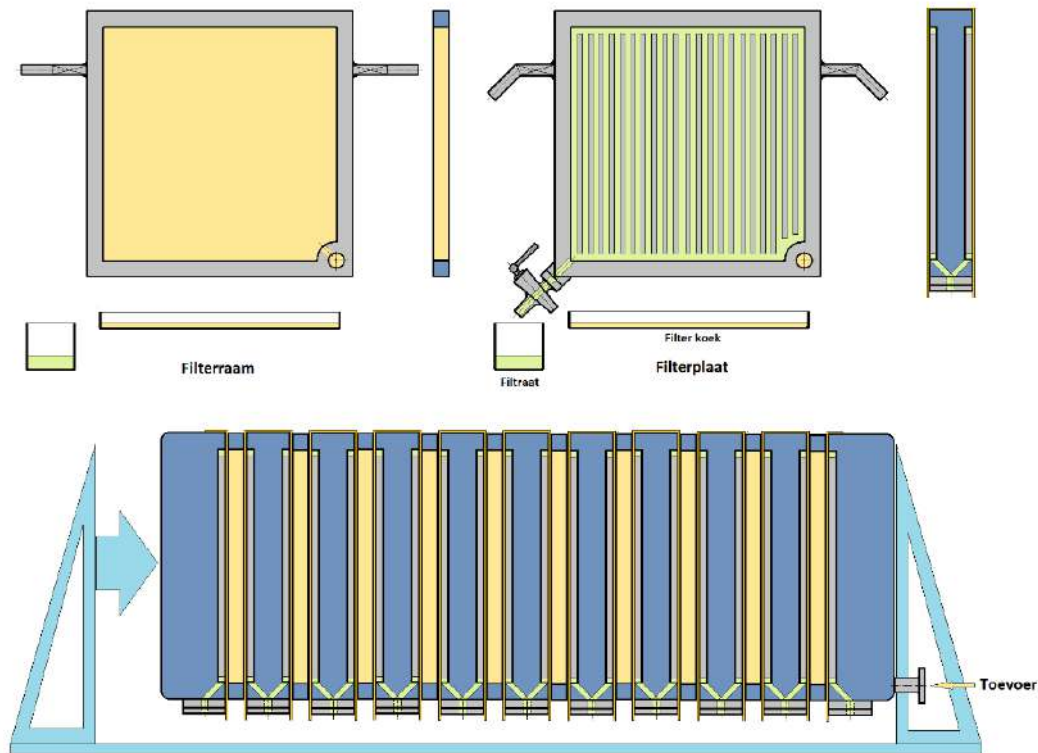
De olie-afscheider bestaat uit een aantal na elkaar geschakelde bakken waarin het olie-watarmengsel tot rust komt en de olie zich afscheidt. De drijf laag wordt evenals bij het hier voor besproken systeem afgeroomd en in de vuilolietank opgeslagen.



Flotatie-inrichting/olieafscheider

Niet alle olie wordt op deze wijze afgescheiden. De laatste druppels worden in een filterpers, of doekenfilter verwijderd. De afscheiding in de filterpers wordt bevorderd door in het laatste compartiment van de olie-afscheider aan het condensaat Aluminiumsulfaat $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ -in de volksmond aluinaarde genoemd- en Natriumbicarbonaat (NaHCO_3) -beter bekend als soda- toe te voegen. Deze twee chemicaliën vormen het zogenoemde aluminiumhydroxide, een vlokmiddel dat op het filterdoek een koek vormt en de laatste oliesporen opvangt. Het condensaat wordt met behulp van een aparte pomp via een standpijp naar de kamerfilterpers of het doekenfilter gevoerd voor de nabehandeling. Er staat dus een constante druk op het filter. Het eventuele tekort aan ketelvoedingswater wordt in de olie-afscheider aangevuld met polderwater en dus ook in het filter na behandeld en van vaste bestanddelen ontdaan.

Een (kamer)filterpers of doekenfilter zoals hierna schematisch is weergegeven, bestaat uit een aantal parallel geschakelde gefigureerde gietijzeren platen en ramen. De platen zijn van holle ruimtes voorzien om het filtraat af te kunnen voeren. Tussen elke twee ramen is een filterdoek aangebracht. Aan één zijde van het doek wordt in het met vlokmiddel aangelengde condensaat aangevoerd. Aan de andere zijde van het doek wordt via de kanaaltjes in de plaat het filtraat afgevoerd.



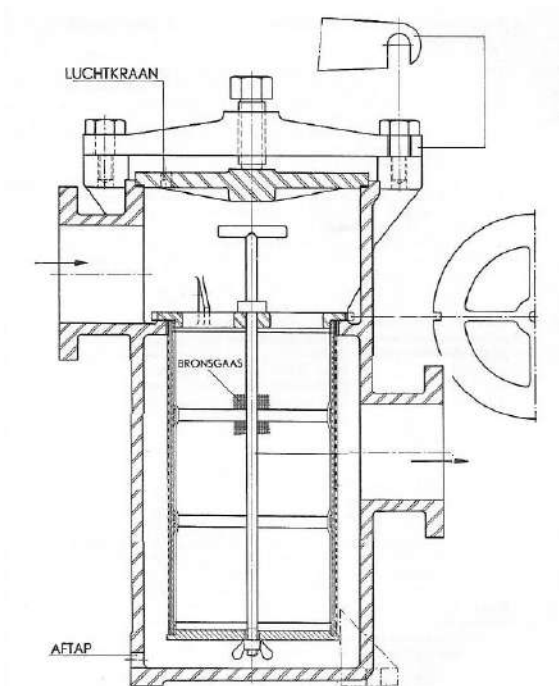
Kamerfilterpersers/doekenfilter

Eventuele olieresten en verontreinigingen blijven op het doek achter en vormen na verloop van tijd een dikke koek. Je kunt de werking enigszins vergelijken met een koffiefilter waarbij het koffiedik de verontreinigingen voorstelt. De filterdoeken worden na gebruik gewassen en opnieuw gebruikt.

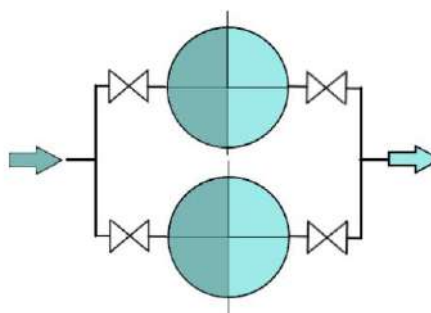
Het overtollige weeswater bij injectiecondensoren, waar dus ook olieresten in voor komen, werd en wordt nog steeds via het oppervlaktewater bij het gemaal afgevoerd. Hetzelfde gebeurt met het smeervet of olie van de pakkingbus en de glijlagers van de gemaalpompen. In sommige gevallen worden biologisch beter afbreekbare smeermiddelen toegepast.

4.16.9 Behandeling injectie- en circulatiewater

Het injectiewater bij de mengcondensor maar ook het circulatiewater bij de oppervlaktecondensor wordt gehaald uit de toevoertocht naar het gemaal. Dit water is verontreinigd met plantenresten en andere vaste stoffen. Om verstopping van het systeem te voorkomen maar ook voor de goede werking van de natte-lucht- of weespompen moeten deze vaste stoffen er uitgehaald worden.

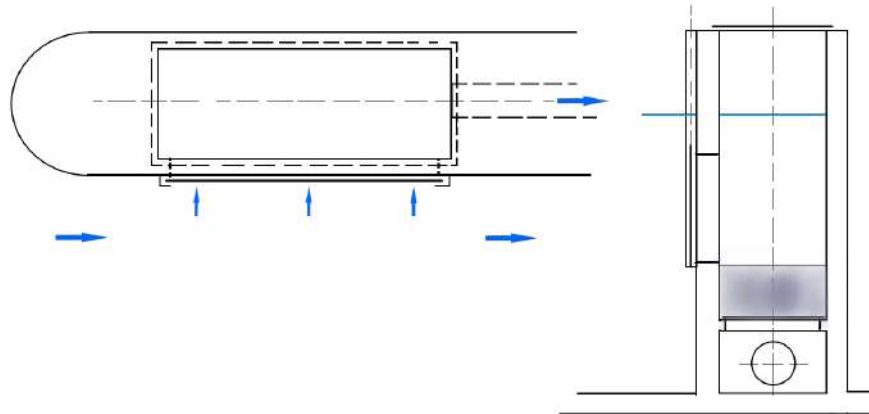


Korffilter



Filterconfiguratie (duplex)

Bij niet al te grote waterhoeveelheden kan worden volstaan met een in duplo uitgevoerd korf-filter in de zuigleiding van de circulatiepomp of het injectiesysteem. Als één filter element vervuild is kan door middel van kranen of afsluiters overgeschakeld worden op het andere filter. Het vervuilde filter kan dan schoon worden gemaakt en opnieuw worden gebruikt. Er is dus steeds een filter in bedrijf. Bij een grote aanvoer van vuil, bijvoorbeeld in de vorm van eendenkroos, kan een dergelijk systeem gemakkelijk tot snelle verstoppingsproblemen leiden van het filter zelf. Dit is reden dat gemalen soms uitgerust werden met, vaak in de pijlers van de toestroomkokers ingebouwde, cokesfilters.



Bovenaanzicht en doorsnede cokesfilter in bouwkundige constructie

De watersnelheid door het filter wordt laag gehouden door deze een groot oppervlak te geven. Ook het te verpompen polderwater wat langs de inlaat van het filter stroomt zorgt er voor dat vaste verontreinigingen van het filterraam worden gespoeld. Het filter zelf bestaat uit een ophaalbare metalen plaat met gaten. Deze plaat sluit aan op een onderwater gelegen uitsparing in de pijler naar de filterkelder. Deze kelder is voorzien van een verhoogde vloer die is afgedekt met een geperforeerde plaat waarop een dikke laag los gestorte cokes ligt.

Van de cokes liggen de meest grove stukken onderop en naar boven toe de steeds fijnere stukken. Een en ander zoals ook een zandfilter wordt ingericht. De ruimte onder de vloer sluit aan op de zuigbuis van de circulatiepomp. Boven op het filter is een luik geplaatst om schoonmaak werkzaamheden aan het filter uit te kunnen voeren. Door de plaat met gaten er uit te halen en te vervangen door een dichte plaat kan men de kelder droog zetten, schoonmaken en/of de cokes vervangen.

4.17 Overbrenging

In een groot aantal gevallen komt het vereiste toerental en het daarbij behorende gevraagde koppel van het (opvoer)werktuig niet overeen met dat van het aandrijfwerktuig. Ook moet het aangedreven werktuig gekoppeld worden aan het aandrijfwerktuig en wel op een zodanige wijze dat er enige bewegingsvrijheid is om uitlijnfouten, slijtage van lagers en ongelijke uitzetting van machinedelen op te kunnen vangen. In die situaties moet gebruik gemaakt worden van wat we in de techniek een directe- of een indirecte- overbrenging noemen. Onder de directe overbrengingen, voorzover toegepast bij stoomgemalen, worden de vaste en flexibele koppelingen geschaard. Bij de vaste overbrenging vindt alleen overdracht van het koppel plaats. Onder de indirecte overbrenging kunnen we de kamraderen, riem- snaar- en tandwieloverbrengingen scharen. Bij dit soort overbrengingen wordt niet alleen het koppel overgebracht maar worden ook vaak de draairichting en het toerental en daarmee het koppel veranderd. Ook biedt de indirecte aandrijving de mogelijkheid om de gedreven as onder een andere hoek te plaatsen dan die van het aandrijfwerktuig. Indirecte overbrengingen die we bij stoomgemalen tegenkomen zijn vaak kopieën uit de overbekende wind-watmolens die vaak uit houten kamwielen bestonden.

Het vermogen P dat door een as moet worden overgebracht is:

$$P = \frac{m \cdot \omega}{75} [\text{pk}]$$

Of anders geschreven:

$$P = \frac{m \cdot \frac{2\pi n}{60}}{75} = \frac{m \cdot \pi \cdot n}{30.75} [\text{pk}]$$

Hierin is m het koppel in kg.m en ω de hoeksnelheid van de rotatie-as in radialen per seconde. Uit het bovenstaande kan worden afgeleid dat bij het veranderen van het toerental n het koppel omgekeerd evenredig verandert met het toerental. Dit zie je terug in de afmetingen van de assen en de lagers van de overbrenging; de relatief snel draaiende krukas van de stoommachine is dunner dan de zeer langzaam draaiende aandrijf-as van het schepad.

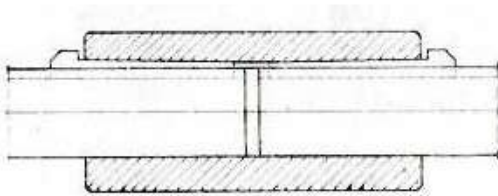
4.17.1 Directe overbrenging

Koppelingen dienen tot verbinding van assen onderling of met machines, werktuigen, of machine-onderdelen, die ononderbroken of zo nu en dan met de as moeten meedraaien.

Als een vaste verbinding tot stand gebracht moet worden, gebruikt men een vaste koppeling. Moet de koppeling een beweging van de ene as ten opzichte van de andere as mogelijk maken, bijvoorbeeld wegens lengte verandering door uitzetting dan wel krimp of in radiale zin als gevolg van uitlijnfouten dan brengt men een beweegbare of flexibele koppeling aan. Een verbinding die stoten in grotere of geringere mate dempt noemt men een elastische koppeling. Een elastische koppeling is tevens beweegbaar. Kan de verbinding alleen bij stilstand ingeschakeld worden dan wel gedurende de beweging worden verbroken dan wordt een klauw- of uitklink-koppeling toegepast. Wanneer de verbinding op elk willekeurig moment in- of uitgeschakeld moet kunnen worden dan gebruikt men een inklink- wrijvings- of frictiekoppeling.

Mofkoppelbus

De mofkoppelbus zoals hier afgebeeld munt uit door haar eenvoud en wordt toegepast daar waar het ontkoppelen niet vaak aan de orde is. Zij heeft het nadeel dat bij het opspieën de assen krom getrokken kunnen worden en eventuele kogellagers beschadigd kunnen raken. Verder moeten de asdelen precies in elkaars verlengde liggen en met gelijke maattoleranties nauwkeurig zijn afgewerkt. Bij het aanbrengen en losnemen moeten deze minimaal een halve koppel bus lengte

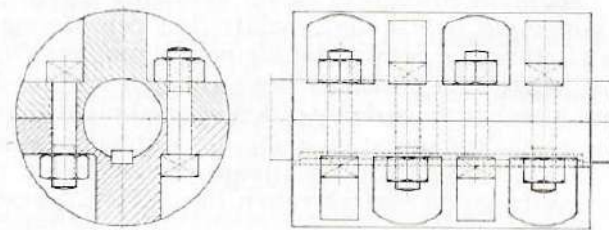


over de as kunnen worden verschoven. Het materiaal van de bus is gegoten ijzer of staal. Als gevolg van de twee spieën valt het zwaartepunt niet in het hart van de as, dit is de reden dat een dergelijke koppeling wegens de daardoor veroorzaakte onbalans niet bij assen met een hoog toerental mogen worden toegepast.

Mofkoppelbus

Klemkoppelbus met bouten

Een veel toegepaste koppeling bij een stoominstallatie is die met een klemkoppelbus met bouten. Deze bus is gemakkelijk demonteerbaar waardoor reparaties aan afzonderlijke delen van de machine eenvoudig kunnen worden uitgevoerd. Om de twee helften goed tegen de as te kunnen klemmen wordt de diameter van de boring iets kleiner genomen dan die van de as zodat de helften



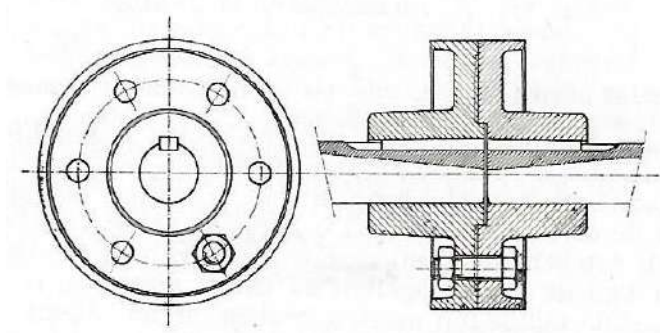
ook zijdelings goed klemmen en de wrijvingskracht nodig voor het overbrengen van het koppel, tussen koppeling en as toeneemt. Soms, meestal als er schokkende belastingen worden verwacht, zijn hiertoe de twee asdelen en de bus voorzien van een spie.

Klemkoppelbus met bouten

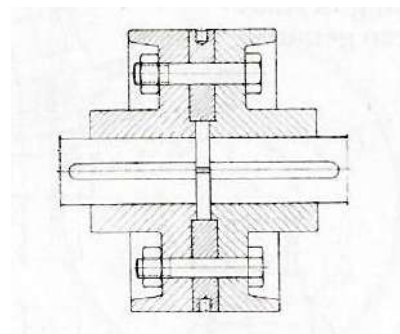
De koppeling is dan niet geschikt voor het overbrengen van een van richting veranderend moment. Een bezwaar van de klemkoppelbussen is dat de assen nauwkeurig dezelfde diameter moeten hebben, anders klemt de bus om het dikste aseind terwijl die bij het dunste deel los blijft zitten. Deze bussen worden overwegend van gietijzer gemaakt.

Flenskoppelbus

Een flenskoppelbus wordt overwegend toegepast bij zwaar belaste assen. De flenskoppelbus wordt zowel van gietijzer als van staal gemaakt. De koppeling-helften worden op de aseinden gespieëd, geperst of gekrompen. Het spreekt voor zich dat deze methode om assen te koppelen alleen kan worden toegepast bij lagers die zijn te delen.



Flenskoppelbus

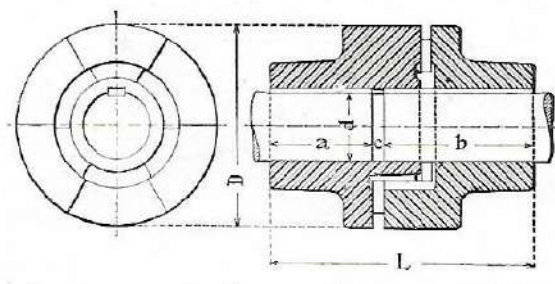


Flenskoppelbus met centreerschijf

Een verhoging op de ene koppelschijf, de zogenoemde prent, en een uitsparing in de andere zorgt voor de centrering van de beide koppeling-helften en van de daarmee verbonden aseinden. Soms wordt aan beide koppeling-helften een prent gedraaid en past men een aparte centreerschijf toe. De koppeling-helften worden met pasbouten, waarvoor geruimde gaten in de flenzen zijn aangebracht, aan elkaar gezet.

Expansiekoppeling

Om de lengteverandering van assen ten gevolge van temperatuur verandering op te nemen past men de zogenoemde expansie koppeling toe. Door gegoten ijzeren schijven met klauwen wordt de



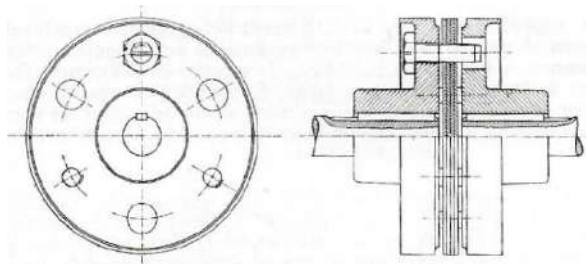
Expansie koppeling

rotatiebeweging van de as overgebracht, waarbij voldoende speling in axiale richting mogelijk is. De assen worden onderling gecentreerd doordat het ene aseind glijdend in de andere koppeling-helft past of door een afzonderlijke stalen centreerring waarvoor een uitsparing in de koppeling is aangebracht. De koppeling-helften worden met spieën op de as bevestigd.

Elastische koppeling

Elastische koppelingen gebruikt men als de stoten in de belasting, die in het drijfwerk kunnen voorkomen, zich niet mogen voortplanten. De koppeling dempt de stoot en de eventuele (torsie)trilling gedeeltelijk. In het bijzonder worden dergelijke koppelingen gebruikt om assen met elektromotoren of dynamo's te verbinden. Bij stoominstallaties op gemalen tref je ze bijvoorbeeld aan bij elektrisch gedreven vacuümpompen, ketel- voedingswaterpompen, suppletiewaterpompen en dergelijke. Met elastische koppelingen kunnen tevens geringe uitlijnfouten worden opgevangen.

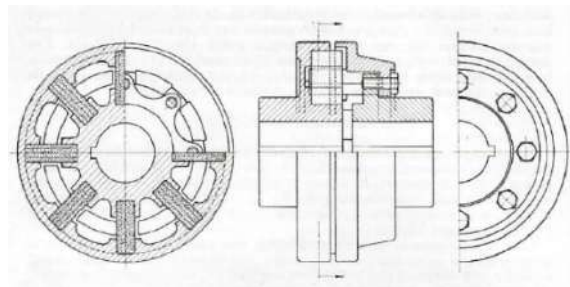
Hier onder wordt een leren schijven koppeling getoond voor een relatief klein over te brengen moment. De koppeling heeft twee naven met flenzen. Door elke flens zijn drie of meer pennen geschroefd. Beurtelings grijpen de pennen van de ene en de andere koppeling-helft in de gaten van de leren schijven, die tussen de flenzen zijn aangebracht. Door de elasticiteit van het leer wordt de energie van het stoten gedeeltelijk opgenomen. De koppeling is ook flexibel waardoor de assen een kleine hoek met elkaar mogen maken en de hartlijnen hiervan niet precies tegenover elkaar hoeven te liggen. Hierbij dient opgemerkt te worden dat uitlijnfouten tot extra slijtage van de leren schijven, trilling en geluidsontwikkeling leiden en daarom tot een minimum beperkt moeten blijven.



Tegenwoordig, anders dan voorheen, staan moderne middelen ons ter beschikking zoals meetklokjes en laser om tot op honderdsten van millimeters nauwkeurig uit te lijnen. Voorheen gebeurde dat met een stalen rij, voelermaten en veel vakmanschap en was desondanks enige flexibiliteit in de overbrenging gewenst.

Lerenschijvenkoppeling

Bij de hieronder afgebeelde Eupex-koppeling drukken de nokken van de koppeling-helften tegen uit elastisch materiaal samengestelde pakketten, welke hierdoor worden ingedrukt en gebogen. De pakketten bestaan uit rubber of leer. De elasticiteit van de verbinding kan gewijzigd worden door



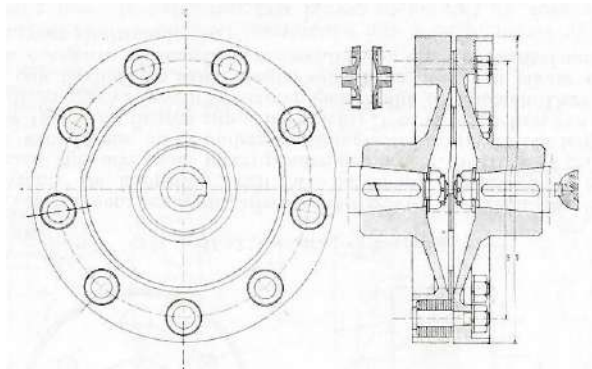
een hardere of zachtere rubbersoort of ander leer toe te passen. De assen hebben een axiale bewegingsvrijheid en kunnen bovendien binnen bepaalde marges uitlijnfouten opvangen. Evenals de leren schijven koppeling isoleert ook dit type koppeling de elektrische machine van die van het aangedreven werktuig.

Eupex-koppeling

Eupex is de naam die de sinds begin 1900 in Bocholt, Duitsland, gevestigde tandwielkastenfabriek Flender aan een breed scala aan flexibele koppelingen geeft.

Andere versies van de Eupex-koppeling hebben geen platte elastische pakketjes maar evenals de hierna behandelde leren hulzen-koppeling, ronde rubberen hulzen, die over en weer met borstbouts aan de koppeling-helften zijn bevestigd. De koppelingen zijn gemaakt van gietijzer.

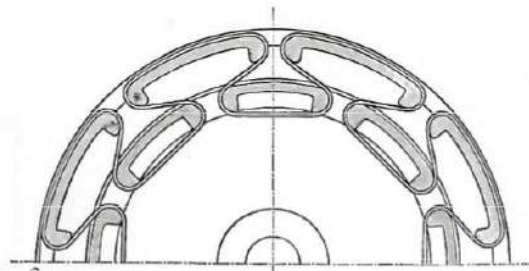
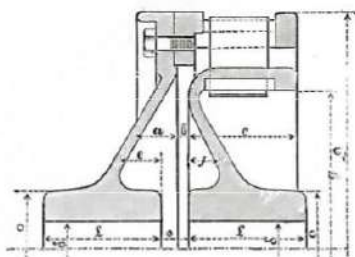
Bij de hier onder afgebeelde leren hulzen koppeling wordt het moment overgebracht door



borstbouts of pennen, die door leren kussens zijn omringd. De tot een huls opeen gestapelde leren ringen zijn weinig elastisch. Rubber hulzen zijn elastischer echter, tenzij gemaakt van synthetisch rubber, minder goed bestand tegen oliën en brandstoffen. Ook deze koppeling kan enige uitlijnfouten opvangen en is niet geleidend.

Leren-hulzen koppeling

Hier onder staat een koppeling afgebeeld die is uitgerust met een leren band. De koppeling bestaat uit twee schijven, elk met ten opzichte van elkaar verschoven nokken waaromheen een leren band is gespannen. Het leer bij deze koppeling wordt op trek belast wat de gewenste elastische werking veroorzaakt. Als gevolg van de relatief kleine doorsnede van de riem kunnen met deze koppeling geen grote koppels worden overgebracht. Ook deze koppeling isoleert de elektrische machine van het aangedreven werktuig en kan uitlijnfouten opvangen.

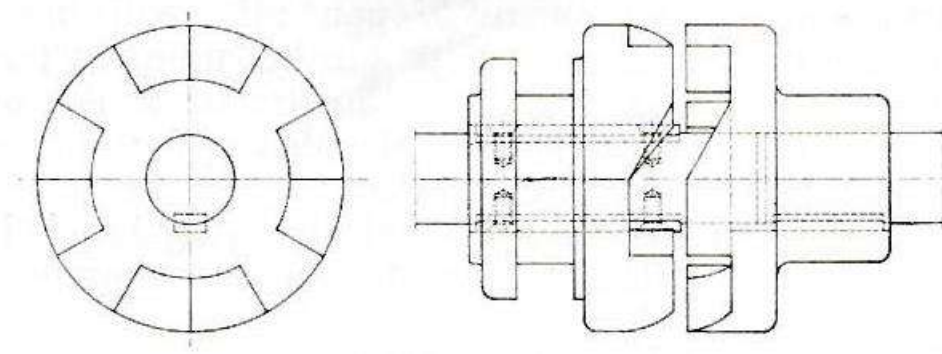


Bandkoppeling (Patent Zodel-Voith)

Uitklink koppeling

Uitklink koppelingen kunnen gedurende het bedrijf worden ontkoppeld doch slechts worden ingeschakeld als de assen een zeer geringe snelheid ten opzichte van elkaar hebben. De eenvoudigste uitklink koppeling is de klauwkoppeling. Ze vertoont enige overeenkomst met de expansiekoppeling. De koppeling-helft op de drijvende as is vast opgespied. De koppeling-helft op de gedreven as is verschuifbaar langs inlegspieën door middel van een hefboom met een vork die in een rondgaande groef met rechthoekige doorsnede grijpt. Om het inschakelen bij stilstaande as

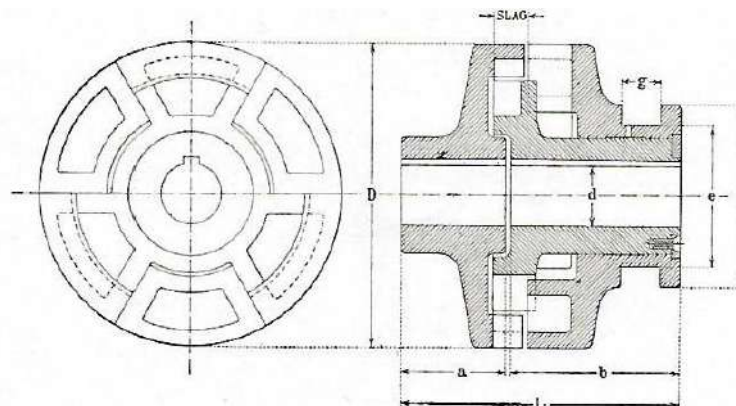
te vergemakkelijken zijn de beide helften van klauwen voorzien. De klauwen of tanden hebben radiale drukvlakken maar schuine ruggen. Dit betekent dat deze koppeling slechts geschikt is voor één draairichting, namelijk die waarin het wringend moment werkt.



Klauwkoppeling

Bij volle belasting is een grote kracht nodig om deze koppeling uit te schakelen omdat er door de geringe afstand van de drukvlakken van de klauwen en de inlegspieën tot het hart van de as grote omtreks- en wrijvingskrachten ontstaan. De axiale ontkoppelingskracht moet door de lagers van de assen kunnen worden opgenomen. De inlegspieën slijten bij het ontkoppelen sterk, waardoor ruimte ontstaat die tot gevolg kan hebben dat deze kantelen. Om deze reden wordt de verschuifbare klauw van twee tegenover elkaar liggende spieën voorzien of worden getande assen toegepast.

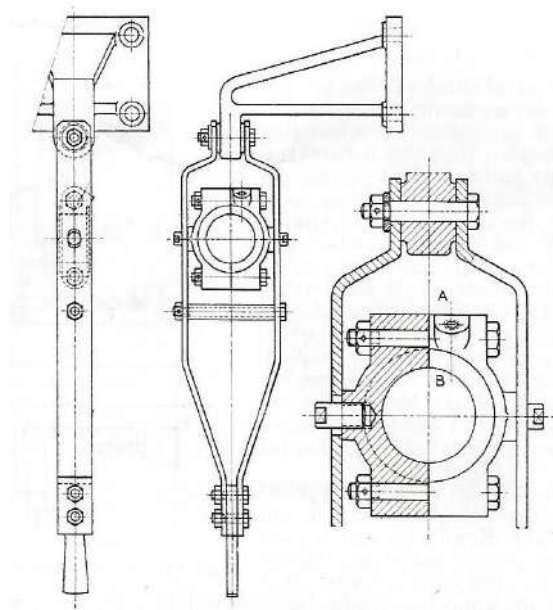
Bij de hier onder afgebeelde Hildebrandt-koppeling is een groot aantal van de bezwaren van de klauwkoppeling opgeheven. De koppeling bestaat uit drie delen. Hiervan zijn twee delen; schijven elk op een aseind gespied. Deze schijven zijn van uitsteeksels voorzien: de linker schijf aan de buitenomtrek de rechter aan de binnenomtrek. Tussen deze uitsteeksels kunnen de uitsteeksels van de derde, verschuifbare schijf worden geschoven zodat het koppel wordt overgebracht. Bij deze constructie zijn voor het verschuifbare gedeelte geen spieën meer nodig, terwijl de uitschakelkracht kleiner is door de grotere afstand van de drukvlakken tot het hart van de as.



Hildebrandt-koppeling

Schakelmechanisme

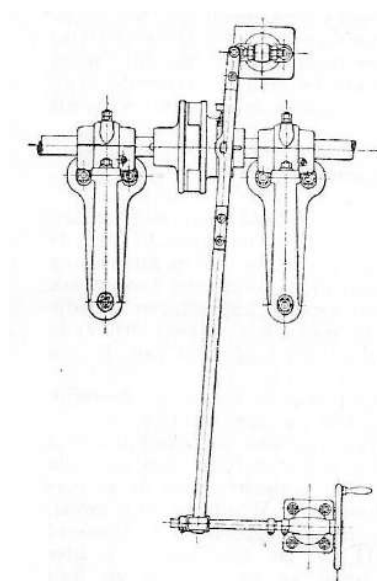
Voor het in werking zetten van de hiervoor besproken inlinkkoppeling voor niet al te grote koppels is een hefboom constructie voldoende. Een en ander zoals hier onder is afgebeeld.



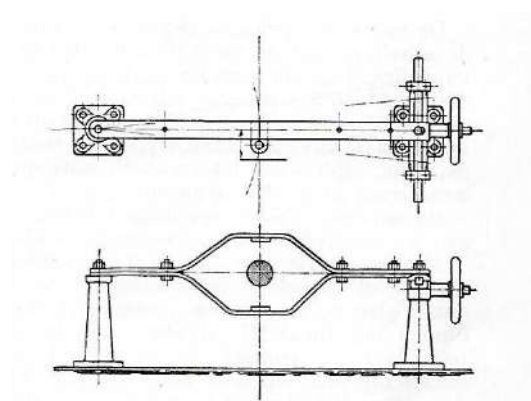
De hefboom bestaat uit een gietijzeren of plaatstalen hefboom met aan het ene eind het handvat en aan het andere eind een vast draaipunt. Daartussen is een uit twee delen bestaande sleepring gemonteerd die in de groef van de koppeling past. Door ovale gaten in de hefboom en pennen aan de sleepring verstelt eerstgenoemde de sleepring en daarmee de koppeling-helft. Op de sleepring is een smeerpot aangebracht. Soms wordt op de hefboom een zekering in de vorm van een pen aangebracht om te voorkomen dat door trillen de koppeling zichzelf in- of uit werking stelt. In beide posities mogen geen axiale krachten door de sleepring op de koppeling worden uitgeoefend.

Handbediend schakelmechanisme

Treden bij het in- of uitschakelen grote krachten op dan verstelt men de hefboom met een schroefspindel of een rondsel met tandheugel. In de afbeelding hier onder zien we aan de linkerzijde een voorbeeld van een schroefspindel schakelinrichting en aan de rechterzijde een met een rondsel en een tandheugel.



Schakelhefboom bewogen door schroef



Schakelhefboom bewogen door rondsel en heugel

De schakelhefboom met de schroefspindel kan zelf-remmend worden uitgevoerd; die met het rondsel en de tandheugel moet worden vastgezet in de gewenste positie.

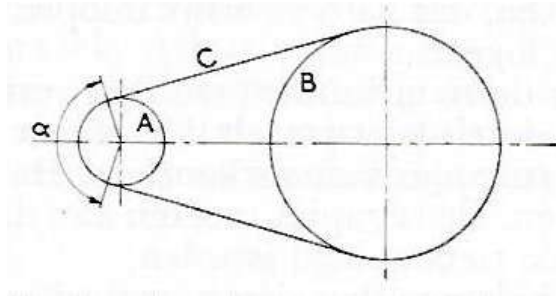
Inklink- of wrijvingskoppeling

Een stilstaande as mag slechts geleidelijk door een draaiende as in beweging worden gebracht. Het plotseling tot stand brengen van de verbinding zou tot breuk van de assen of de koppeling zelf kunnen leiden. Verder zijn er op het moment van inschakelen zeer grote koppels nodig die door de drijvende machine moeten worden opgebracht en niet tot stilstand hiervan mag leiden. Daarom zijn inklinkkoppelingen meestal wrijvings- of frictiekoppelingen. Anders dan bij dieselgemalen zijn van de stoomgemalen in Nederland geen voorbeelden bekend waarbij gebruik werd of nog wordt gemaakt van dit soort koppelingen; daarom blijven ze in deze leidraad buiten beschouwing.

4.17.2 De indirecte overbrenging

Riemoverbrenging

De overbrenging van de draaiende beweging tussen assen kan geschieden door middel van wielen en een verbindend orgaan. Dat orgaan kan een riem, snaar of ketting zijn. Gelijktijdig met het overbrengen kan, door wielen te kiezen van verschillende diameter, het toerental en daarmee ook

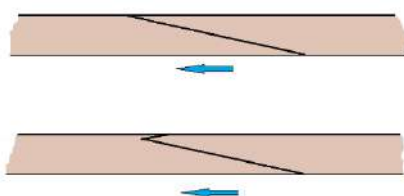


het koppel worden gewijzigd en in sommige gevallen ook de draairichting. Bij dit soort overbrengingen liggen de hartlijnen van de assen op enige afstand van elkaar en kan de onderlinge opstellingshoek van de assen verschillen; bijvoorbeeld haaks op elkaar.

Overbrenging door wielen en overbrengingsorgaan

Bij de riemoverbrenging maakt men gebruik van drijfriemen die gemaakt zijn van runderleer. Ossenleer is hiervoor het meest geschikt alhoewel ook het minder homogene koeleer wordt toegepast. Het leer van de ruggengraat, het kernleer, is het meest geschikt. Zo'n huid is daar op een strook van ca 200 mm breedte ongeveer 5 mm dik; naar de zijden neemt de dikte, gemeten in gelooide toestand, toe tot 8-9 mm. De maximale breedte van een drijfriem is 500 – 600 mm, bij uitzondering 1000 mm. Bredere riemoverbrengingen maakt men door meerdere riemen naast elkaar te leggen. Men kan ook om een groter koppel over te brengen twee riemen met de vleeszijde op elkaar leggen. We noemen dit een dubbele riem. Deze zijn minder buigzaam dan enkele riemen en maken een grotere riemschijfdiameter noodzakelijk. Riemen gemaakt van zogenoemd chroomleer zijn buigzamer en beter bestand tegen vocht, warmte en chemische invloeden dan riemen uit leer, dat op de gewone wijze is gelooid. Chroomleer wordt verkregen door de huid te looien met synthetische stoffen op basis van chroom, zoals natrium- en kaliumbichromaat, in plaats van het natuurproduct looizuur of gallotannine gewonnen uit de schors van de Eik of de Sequoia.

De verschillende stukken, met een lengte van 1,2 – 1,5 m, van een gewone leren riem worden door lijmen aan elkaar verbonden. Hiertoe wordt de riem over een lengte van 15 – 25 keer de dikte van de riem, schuin afgewerkt zodat er ter plaatse van de las geen verdikking van de riem ontstaat. Bij het afschuinen en opleggen van een gelijmde riem moet er op gelet worden, in verband met de



looprichting, dat de laspunten niet worden losgestoten. De binnenkant van de riem moet dus naar het spitse deel aflopen. Als de riem aan beide zijden wordt opgelegd, zoals meestal het geval is bij spanrollen, dan moet de las worden uitgevoerd zoals bij de onderste afbeelding in de figuur hiernaast is aangegeven.

Riemplas voor één- en tweezijdige oplegging

Als lijm gebruikt men houtlijm met Venetiaanse terpentijn en een beetje azijn. Voor riemen in vochtige ruimten gebruikt men de thermoplast celluloid, opgelost in ijsazijn dat stolt bij 17 °C of aceton. Na het aanbrengen van de lijm worden de delen samengeperst. De sterkte van de las

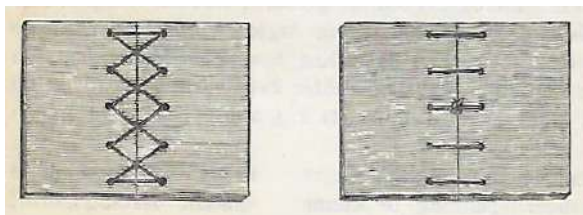
bedraagt 70 – 80 % van de volle riem. Vaak worden voor grotere zekerheid de delen vervolgens nog verbonden met speciale riempjes van varkensleer. Deze riempjes worden gevlochten door met een holpijp of een hete naald aangebrachte gaatjes in de beide riemeinden.

Nieuwe riemen worden in de fabriek ten minste één of meerdere dagen door aangehangen gewichten of een speciale rekmaschine opgerekt met een belasting van twee- tot driemaal de te verwachten riemspanning. Ook worden hiervoor speciale inlopmachines gebruikt. De riem krijgt hierdoor een blijvende verlenging van 4- 5 % en hoeft dus later minder nagespannen of ingekort te worden.

Meestal laat men de vleeszijde van de huid op de schijf lopen. Uit proeven is echter gebleken dat de haarzijde na verloop van tijd een betere grip op de gladde schijf geeft.

Als de riem niet in zijn geheel kan worden opgelegd, omdat deze moet worden ingekort of bij breuk, dan worden op locatie de riemeinden met elkaar verbonden. Hiervoor worden de volgende technieken toegepast:

- Door middel van lijmen op de wijze zoals hier voor beschreven. Het verlijmen van de las, met name het uitharden van de lijm, duurt lang en vereist goede materialenkennis en vakmanschap van degene die de las moet maken. Voor een noodreparatie bij riembreuk is dit geen voor de hand liggende optie en zal moeten worden uitgeweken naar een van de volgende mogelijkheden.
- Door naaien met riempjes van varkensleer. Het is daarbij wenselijk de riemeinden zoals hier voor is aangegeven af te schuinen, vervolgens de gaatjes aan te brengen en de delen met een zogenoemde kruissteek aan elkaar vast te naaien. De gekruiste steek komt aan de zijde van de riemschijf terwijl de rechte steek waar de bindriem dubbel ligt en de knoop van de beide einden van de bindriem is gemaakt, aan de buitenkant of de haarzijde van de drijfriem wordt



gelegd. In sommige gevallen, bijvoorbeeld als er onvoldoende riemlengte beschikbaar is, worden de riemeinden ook stomp tegen elkaar gelegd en op dezelfde wijze vastgenaaid.

Genaaide riemverbinding

- Door krammen, haken, scharnieren en dergelijke voor noodreparaties en als de drijfriem vaak moet worden ingekort. Hiervan is de methode met krammen een van de meest toegepaste en het eenvoudigst uit te voeren. In de handel zijn hiervoor op stevig karton bevestigde stroken met krammen te verkrijgen. De krammen hebben om en om een verschillende lengte om de



riem zo min mogelijk te verzwakken. De strook krammen ter breedte van de riem wordt voor het aanbrengen op de kopse zijde voorzien van een stalen naald en met een hamer of een speciaal hiervoor gemaakt nietapparaat in de stomp afgesneden einden van de drijfriem gedreven. Door de openingen die na het verwijderen van de naald aan de koppen van de krammen ontstaan wordt een pees van kattendarm, tegenwoordig kunststof, gestoken. De verbinding is tamelijk stug, verzwakt de riem en veroorzaakt stoten en daardoor hinderlijk geluid bij het passeren van de desbetreffende riemschijven.

Kramverbinding bij platte drijfriem

Bij machines met een hoog toerental worden uitsluitend gelijmde en eindloze riemen toegepaste omdat andere methoden de riem minder buigzaam maken, waardoor naast hinderlijk geluid schadelijke stoten optreden. De levensduur en de goede werking van een leren riem worden beïnvloed door de vochtigheid van de lucht waarin hij gebruikt wordt. Daarom heeft men riemen samengesteld uit rubber, balata of latex, linnen, katoen, hennep, haar en zelfs zijde.

Bij gemalen toegepaste soorten hiervan zijn de rubber- en balatariemen. Deze riemen bestaan uit lagen katoenweefsel met daar tussen rubber of aanverwante rubber producten die tot doel hebben het verschuiven van de katoenlagen te verhinderen. Ze zijn uitermate geschikt voor vochtige ruimtes maar zijn niet bestand tegen olie of sommige olieproducten.

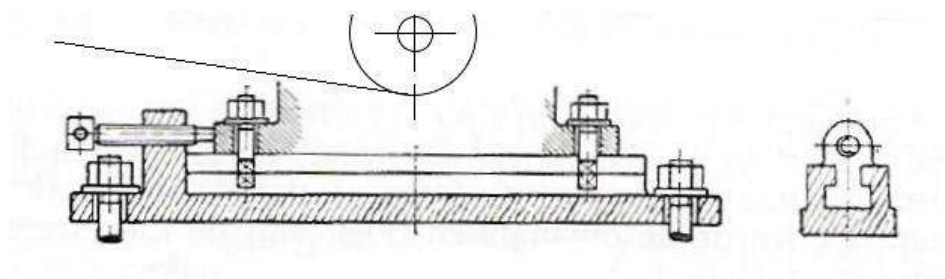
Riembedrijf

De drijvende schijf bij riembedrijf neemt de riem mee, en deze neemt op zijn beurt de gedreven schijf mee door de wrijving tussen riem en schijf. Deze wrijving ontstaat door de spanningen, die in de beide riemgedeelten optreden.

De riemsnelheid van het getrokken part is iets, ten hoogste 1%, kleiner dan het trekkende part: dit verschijnsel noemen we riemslip. Daardoor is de omtreksnelheid van de gedreven schijf ten hoogste 1 % kleiner dan die van de drijvende schijf. Deze slip openbaart zich in de vorm van warmteontwikkeling en mag dus niet te veel zijn.

De spankracht die noodzakelijk is voor het overbrengen van het koppel wordt bij een horizontale oplegging teweeg gebracht door het gewicht van de riem zelf en door deze bij het opleggen te rekken dan wel gebruik te maken van een spanslede of gewicht belaste spanrollen.

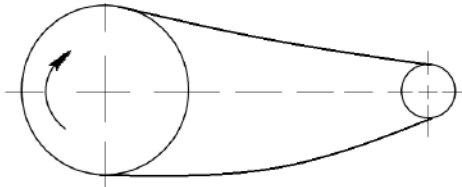
De riem moet ongeveer 1,5 % van de lengte korter gemaakt worden dan de lengte na het opleggen zal bedragen. Riemen boven de 100 mm worden daarom na het opleggen in het werk met behulp van een riemspanner opgerekt waarna de riemeinden verbonden worden. Iedere riem rekt in het bedrijf en vooral een nieuwe riem moet daarom herhaaldelijk worden ingekort, behalve wanneer spansledes kunnen worden toegepast. Het inkorten van de riem is een tijdrovend werk wat men wel eens ten koste van de levensduur van de riem en de lagers trachtte te omzeilen door de riem verder op te rekken dan noodzakelijk en zodoende het interval tussen de inkortmomenten te verlengen. Wanneer men gebruik maakt van een spanslede dan wordt het aandrijfwerktuig op een slede bevestigd. De slede bestaat uit twee evenwijdig aan elkaar op een fundatieplaat bevestigde rails. Het aandrijfwerktuig, in het hier onder gegeven voorbeeld een elektromotor, is met hamerkop bouten op deze rails vastgebouwd. Het aandrijfwerktuig wordt met twee aan de fundatieplaat bevestigde schroefogen en de daarbij behorende stelschroeven net zo lang veresteld tot de juiste riemspanning is bereikt. Na het stellen worden de hamerkop bouten aangehaald.



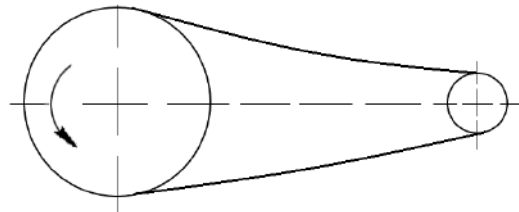
Spanslede

De hartlijn van de schijf op het aandrijfwerktuig moet parallel lopen aan die van de schijf van het aangedreven werktuig om te voorkomen dat de riem van de schijf loopt. Bij het stellen maakt men daarom gebruik van een stalen rij die men tegen de kop van de aandrijfschijf legt. De rij moet dan in het verlengde liggen van de denkbeeldige lijn die de kop van de aangedreven schijf raakt. Men kan bij het richten ook een andere methode volgen, namelijk door gebruik te maken van een metselkoord of een pianosnaar. Het strak over de koppen van de twee schijven getrokken koord of snaar moet de randen hiervan overal net raken.

De aangelegde rekspanning zal het best voldoen bij horizontale riemen: het riemgewicht werkt dan mee om zoveel als mogelijk de riem in contact te houden met de riemschijf. Hierbij moet men de draairichting zo kiezen dat het trekkende part onder komt te liggen. De door de riem op de riemschijven omvatte hoek is, zoals hierna is geïllustreerd, het grootst.



Losse part onder

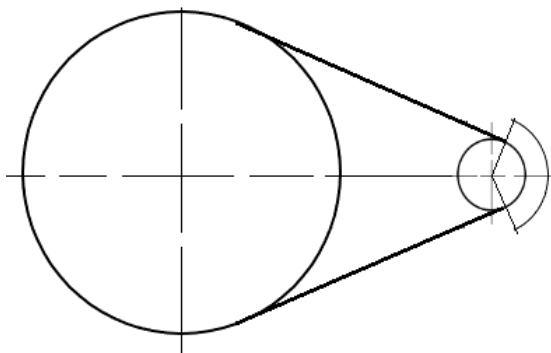


Losse part boven

Bij een grote overbrengingsverhouding i wordt de omvatte hoek op de kleine schijf klein, vooral als de riem kort is dat wil zeggen als de assen dicht bij elkaar liggen. Men gaat daarom in de praktijk niet boven een $i = 2$ tot 3 . In ieder geval moet de $i < 5$ zijn.

Voor de minimum hartafstand H neemt men bij horizontaal geplaatste riemen:

$$H = D_1 + D_2 + 2 \text{ [m]}$$



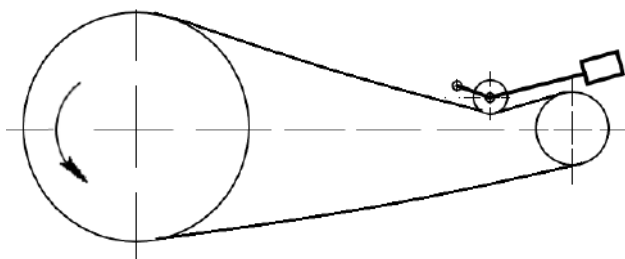
Voor verticaal geplaatste riemen is deze afstand

$$H = D_1 + D_2 + 3 \dots 4 \text{ [m]}$$

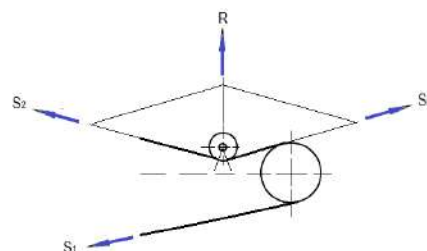
De maximum waarde voor H is 5 m voor riemen tot een breedte van 100 mm, bij bredere riemen ongeveer 10 m. Wordt H te groot dan gaan de riemen slaan of klapperen, vooral als de belasting schommelt.

Grote overbrengingsverhouding en kleine schijfafstand

Een veel toegepaste methode voor het spannen van de riem is deze te voorzien van een zogeheten spanrol in het losse part. De omspannen boog, dus het contactvlak, neemt hierbij toe terwijl de riem steeds op dezelfde spanning wordt gehouden. De riem heeft iets meer te lijden van de tegengestelde en sterke doorbuiging.



Spanrol met gewichtsbelaste hefboom



Het gewicht G dat nodig is voor het spannen van de riem vinden we met behulp van de kracht S_2 in het afgaande part van de riem en het nominaal over te brengen vermogen van de aandrijving. Zonder dit hier verder af te leiden bestaat de volgende relatie tussen de door het aandrijfwerktuig op de riemschijf uitgeoefende omtrekkracht K en de krachten in het trekkende part S_1 en in het losse part S_2 .

De omtrekkracht leiden we als volgt af uit het nominale vermogen N van het aandrijfwerktuig, het toerental n van de machine en de middellijn D van de aandrijschijf.

$$P = \frac{K \cdot v}{75} \text{ [pk]}$$

Hierin is v de omtreksnelheid:

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \text{ [m/s]}$$

De twee vergelijkingen samengevoegd geeft:

$$K = \frac{75 \cdot 60 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot n} \text{ [pk]}$$

Verder bestaat de volgende relatie tussen de omtrekkracht K en de krachten S_1 en S_2 , respectievelijk het trekkende en het losse part:

$$K = S_1 - S_2 \text{ [kg]}$$

En voor de riemkracht verhouding tussen de twee parten:

$$\frac{S_1}{S_2} = e^{f \cdot \alpha}$$

Hierin is e de natuurlijke logaritme met het grondtal 2,71827, f de wrijvingscoëfficiënt die voor een leren riem op 0,28 wordt gehouden en α de door de riem omspannen boog van de aandrijschijf uitgedrukt in radialen.

Neemt men als voorbeeld een half omspannen cirkelboog dus $\alpha = \pi$ radialen en $f = 0.28$ dan wordt de krachtverhouding:

$$\frac{S_1}{S_2} = 2,7828^{0,28 \times 3,14} = 2,408$$

In de praktijk rekent men meestal met 2.

Uit het voorgaande volgt:

$$S_1 = \frac{e^{f \cdot \alpha}}{e^{f \cdot \alpha} - 1} K$$

En:

$$S_2 = \frac{1}{e^{f \cdot \alpha} - 1} K$$

De in het voorbeeld van de gewicht belaste spanrol bedraagt de factor $e^{f \cdot \alpha}$ 2,78, waarbij is gerekend met een omspanhoek α van 210° , en een wrijvingscoëfficiënt f van 0,28.

Heeft de aandrijving uit dit voorbeeld een vermogen van 30 pk, een toerental van 970 omw/min en een aandrijfschijf met een diameter van 250 mm dan komt op de aandrijfschijf een omtrekkkracht 178 kg te staan. Dat betekent dat de riemkracht S_2 in het losse part 100 en de resultante R van de hierdoor op de spanrol uitgeoefende krachten 53 kg bedraagt. De hefboom reduceert deze kracht met ruim 25 % zodat met ongeveer een gewicht van 14 kg de juiste riemspanning kan worden gegenereerd.

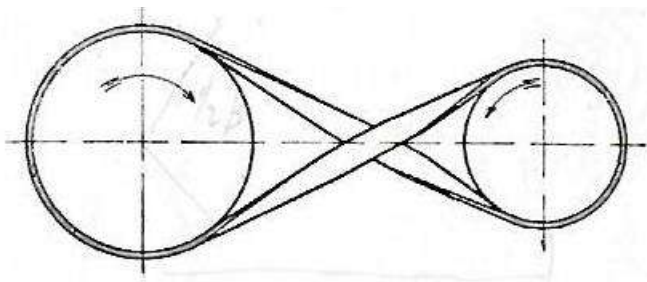
In de stilstaande riem zullen krachten S_0 moeten optreden die bij benadering kunnen worden gelijkgesteld aan het gemiddelde van de krachten in de beide riemparten als de riem in bedrijf is dus:

$$S_0 = \frac{S_1 + S_2}{2} \text{ [kg]}$$

In het voorbeeld met de spanrol is S_1 , 278 kg en S_2 , 100 kg . Dit betekent bij stilstaande riem een kracht S_0 van 189 kg.

Men maakt de kleinste schijf indien mogelijk $D \geq (50 \dots 60) \cdot \delta$, als δ de dikte van de riem voorstelt. Kleinere riemschijven doen de riem sterker buigen waardoor hij sneller slijt. De wrijvingscoëfficiënt tussen de riem en de schijf wordt sterk verhoogd als de riem van tijd tot tijd wordt schoongemaakt en vervolgens ingevet wordt met een mengsel van 90 % ricinusolie (wonderolie) en 10 % rundertalk of in plaats daarvan 2 delen traan en 1 deel talk. Hars, dat wel eens gebruikt wordt tegen slippen, is uit den boze omdat het de riem hard en minder buigzaam maakt waardoor deze sneller breekt.

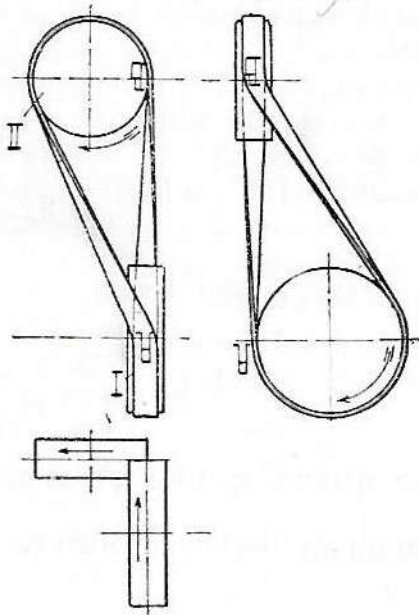
Bij open riemen wentelen de schijven in dezelfde richting. Moeten zij in tegengestelde richting draaien , dan wordt de riem gekruist. Beide riemgedeelten wrijven hierbij over en langs elkaar, zodat de riem sneller slijt dan een open riem.



Gekruiste riem

Een voordeel van een gekruiste riemoverbrenging is dat de omspannen boog, de hoek α , aanmerkelijk groter is dan bij de open riem.

Wanneer de schijven niet in hetzelfde vlak liggen wordt de riem half gekruist. Bij het ontwerp van een dergelijke riemenloop geldt de voorwaarde dat het aflopende riemgedeelte van een schijf zich in het vlak moet bevinden van de schijf waar het moet oplopen. Hieruit volgt dat het aflopen moet geschieden in een punt van de snijlijn van de vlakken die men door de riemschijven loodrecht op de assen kan aanbrengen. Uit het bovenstaande volgt tevens dat een transmissie met half gekruiste



riem slechts voor één draairichting geschikt is.

Wegens de door verdraaiing veroorzaakte ongelijkmatige spanning in de riem moeten de schijven iets naar buiten worden verschoven. Bij de drijvende en de gedreven schijf is dat respectievelijk $(0,5 \dots 0,6) \cdot b$ en $(0,1 \dots 0,2) \cdot b$, als b de riem-breedte is.

In werkelijkheid verdraait de riem zich niet om de hartlijn maar om de kortste zijde. Verder mag de aflopende riem geen grotere hoek maken dan 25 graden met de verticaal of horizontaal al naar gelang de opstelling van de transmissie.

Bij half gekruiste overbrengingen neemt men de gedreven schijf 30 % en de drijvende schijf 20 % breder dan gewoonlijk.

De afstand van de assen voor half gekruiste riemoverbrengingen $\geq 4 D$, als D de diameter is van de drijvende schijf.

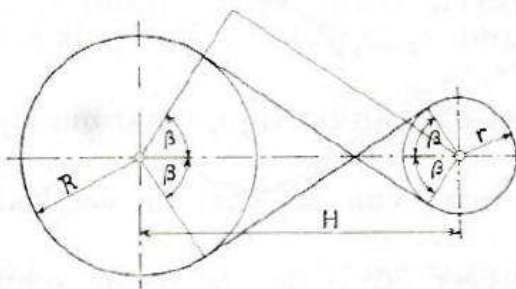
Halfgekruiste riem

De riemlengte L voor een gekruiste riem kan men aan de hand van de hartafstand H van de assen en de diameters R en r van de schijven als volgt nauwkeurig berekenen:

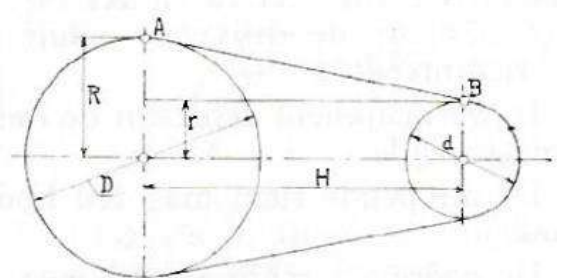
$$L = 2 \cdot (H \cdot \sin \beta + (R + r) \cdot (\pi - \beta)) \text{ [m]}$$

Hierbij wordt hoek β bepaald door:

$$\cos \beta = \frac{R + r}{H}$$



Schema voor bepalen riemlengte gekruiste riem

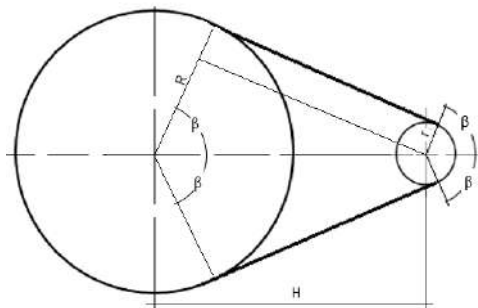


Schema voor bepalen riemlengte open riem

Een overeenkomstige berekening voor een open riemoverbrenging met niet al te grote verschillen tussen de drijvende en de gedreven schijf luidt:

$$L \approx \pi \cdot (R + r) + 2 \cdot \sqrt{H^2 + (R + r)^2} \quad [\text{m}]$$

Als de diameters van de schijven wel veel verschillen kan de riemlengte met een van de gekruiste riem afgeleide formule nauwkeurig worden berekend. Voor deze open riemoverbrenging luidt de formule:



$$L = 2 \cdot (H \cdot \sin \beta + R \cdot (\pi - \beta) + r \cdot \beta) \quad [\text{m}]$$

Hierbij wordt hoek β bepaald door:

$$\cos \beta = \frac{R - r}{H}$$

Open riemoverbrenging

De hoek β wordt niet in booggraden uitgedrukt maar in radialen, met als geheugensteun dat 360° overeenkomt met 2π radialen, een halve cirkel 180° is dus π radialen. Bij het bestellen van een nieuwe riem kan men overigens ook de lengte van de oude riem opmeten of bij het ontbreken daarvan een dunne lijn over de overbrenging spannen en deze na afwikkeling opmeten. In alle gevallen moet men, zoals eerder aangegeven in verband met de rek, de nieuwe riem ongeveer 1,5 % korter maken. De op te meten lengte geldt aan de buitenkant van de riem.

De riem wordt berekend op de grootste spanning die er in voorkomt. Dit is in het trekkende part met een trekkracht:

$$S_1 = \frac{e^{f \cdot \alpha}}{e^{f \cdot \alpha} - 1} K$$

Deze trekkracht veroorzaakt een trekspanning:

$$\sigma_s = \frac{e^{f \cdot \alpha}}{e^{f \cdot \alpha} - 1} \cdot \frac{K}{F}$$

Hierbij is F het oppervlak van de riemdoorsnede:

$$F = b \cdot \delta$$

Bij de afleiding hiervan is geen rekening gehouden met de centrifugaalkracht die op de riem werkt die bij dikke riemen en hoge riemsnelheden beduidend van invloed is op de spanning in de riem. Ten slotte moet rekening worden gehouden met de buiging die de riem ondergaat bij het oplopen op de schijf. Een en ander resulteert er in dat voor drijfriemen een maximale snelheid van 35 m/s

en al naar gelang de kwaliteit van het leer een maximale trekspanning in de riem van 25 ... 30 kg/cm² wordt aangehouden. De riemdikte wordt door de huiddikte van het rund bepaald en bedraagt over het algemeen 5 mm.

In de praktijk wordt de riembreedte berekend uit de nuttige omtrekkracht p die een riem met een breedte van 1 cm bij een bepaalde snelheid en een bepaalde schijfmiddellijn kan overbrengen.

Dus:

$$b = \frac{K}{p}$$

Om veel tamelijk complex rekenwerk te omzeilen is voor een groot aantal riembedrijf-situaties een tabel samengesteld waarmee snel de vereiste riembreedte kan worden vastgesteld. Deze tabel geldt voor een horizontaal opgelegde riem van 5 mm dik met het trekkende part onder en een omspannen boog α van de kleinste riemschijf D van 160 °.

	D mm	Riemsnelheid v in m/s				
		3	5	10	20	30
Enkele riem	100	3,0	4,0	4,3	4,0	2,4
	200	5,0	6,0	6,6	7,0	5,4
	300	6,0	6,5	7,4	7,6	6,4
	400	6,5	7,0	7,8	8,0	6,9
	500	6,7	7,2	8,0	8,4	7,2
	600	7,0	7,3	8,2	8,5	7,4
	750	7,2	7,5	8,4	8,7	7,6
	1000	7,3	7,6	8,6	8,8	7,8
	1500	7,5	7,8	8,7	9,0	8,0
Dubbele riem	400	11,4	12,0	13,3	13,4	10,8
	500	12,2	12,9	14,3	14,5	12,0
	600	12,7	13,5	14,9	15,2	12,8
	750	13,2	14,9	15,5	16,0	13,6
	1000	13,7	14,5	16,1	16,7	14,4
	1500	14,2	15,0	16,7	17,3	15,2
	2000	14,5	15,3	16,9	17,7	15,6

Nuttige omtrekkracht tabel (p = kg/cm)

De aandrijving bij de berekening van het spanrolgewicht heeft een vermogen van 30 pk, een toerental van 970 omw/min, een aandrijfschijf met een diameter van 250 mm en een omtrekkracht van 178 kg. De berekende riemsnelheid is 12,7 m/s. Met behulp van interpolatie kan uit de tabel worden afgeleid dat de nuttige omtrekkracht 7,1 kg is.

De drijfriembreedte bedraagt dan:

$$b = \frac{K}{p} = \frac{178}{7,1} = 25 \text{ [cm]}$$

Boven een riemsnelheid van 35 m/s loopt de riem gevaar ten gevolge van de centrifugaal kracht van de schijf af te lopen. Hele lage riemsnelheden, lager dan $v = 5 \text{ m/s}$, worden eveneens afgeraden. Voor een leren riem moet ook het aantal buigingen w dat de riem per seconde over de schijf moet maken beperkt blijven tot 3...5. Het aantal buigingen berekent men bij een twee-schijven opstelling als volgt:

$$w = \frac{2 \cdot v}{L}$$

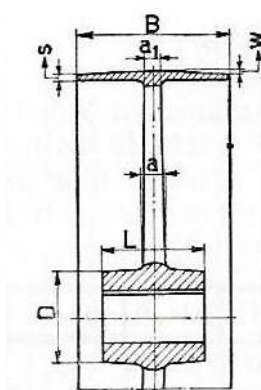
Voor rubber-, balata- en katoenen riemen kan men voor de nuttige omtrekkracht p , 2,5...3,5 kg/cm rekenen. De riemen bestaan uit 4...8 lagen.

Riemschijven

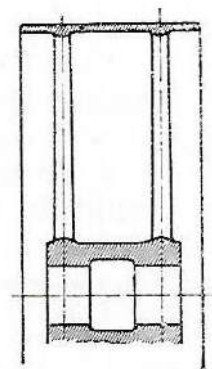
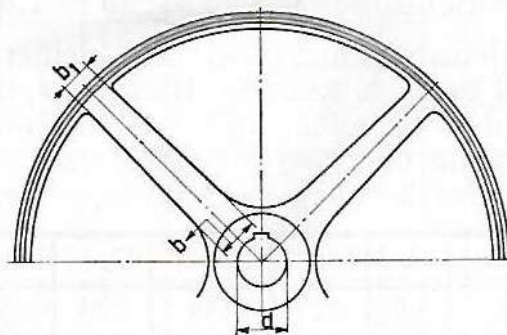
Riemschijven worden vervaardigd uit gegoten ijzer, staal en hout. Houten riemschijven zijn lichter en goedkoper dan gietijzeren en worden daarom veel toegepast. Stalen riemschijven vinden voornamelijk toepassing bij grote riemsnelheden.

Bij open overbrengingen neemt men de breedte van de schijf $B \approx 1,1 \cdot b + 10 \text{ mm}$. Bij gekruiste en half- gekruiste overbrengingen neemt men $B = 1,4 \cdot b + 10 \text{ mm}$ tot $B = 2 \cdot b \text{ mm}$.

De gietijzeren riemschijf bestaat uit een velg en een naaf waartussen een enkele- of dubbele rij spaken. De spaken worden recht gemaakt. Men beweert dat de voorheen gebruikelijke dubbel gebogen spaakvorm het riemschijfgewicht vergroot, zonder de gietspanningen te voorkomen of de schijf sterker te maken. De spaken hebben voor de sterkte een elliptische doorsnede waarvan de lange as in de draairichting ligt.



Ongedeelde gegoten ijzeren riemschijf

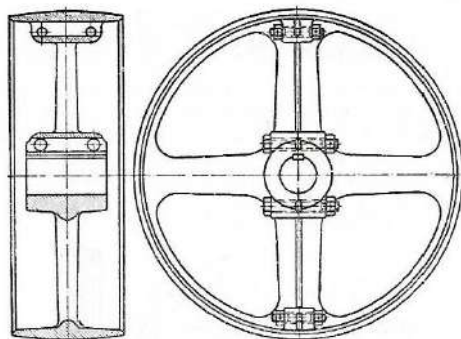


Schijf met dubbele rij spaken

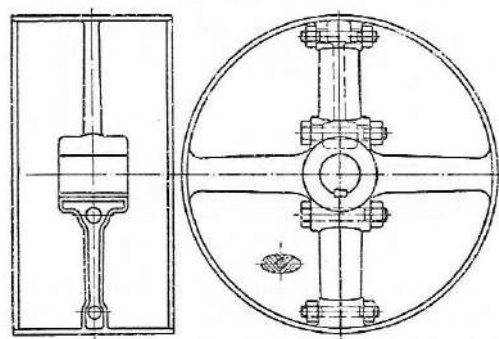
Bij open riemen moet het loopvlak van de gedreven riem bol zijn. Aanbevolen wordt bij dubbele riemen en ook bij een riemsnelheid groter dan 25 m/s, de drijvende schijf ook bol te maken.

De welving is 1 mm voor een riembreedte onder de 100 mm, daar boven wordt circa 1% van de riembreedte aangehouden. Alle andere schijven maakt men vlak (cilindrisch). De riem zoekt steeds het hoogste punt van de schijf, zodat eventuele kleine uitlijnfouten niet tot het scheeflopen of tot het aflopen van de riem leiden. Het bol maken van de schijf leidt tot een plaatselijk iets grotere spanning in de riem.

Riemschijven uit twee delen worden na het gieten gekloofd, De raakvlakken van de helften worden vlak bewerkt waarna de helften met bouten weer aan elkaar worden verbonden en vervolgens bewerkt. De deling vindt bij voorkeur plaats over twee tegenover elkaar liggende spaken en niet in de velg.



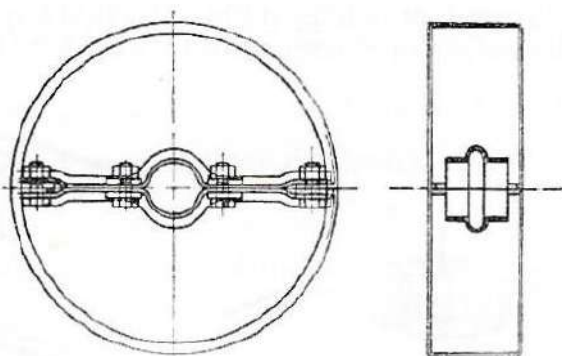
Tweedelige gietijzeren riemschijf



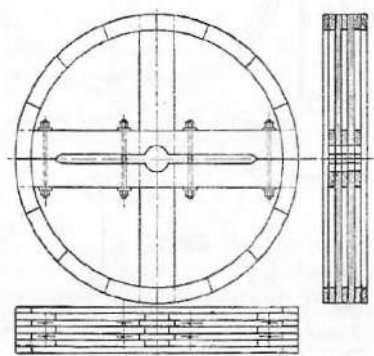
Tweedelige riemschijf

De naaf en het loopvlak worden bij voorkeur in één bewerkingsgang bewerkt zodat het loopvlak van de schijf zuiver centrisc h ligt ten opzichte van de naaf. Na het bewerken wordt de schijf gebalanceerd.

De linker figuur hieronder laat een stalen schijf zien uit geperste plaat met een gietijzeren bus als naaf. Dergelijke stalen schijven worden ook samengesteld uit stalen buizen. De constructie wordt dan gelast.



Geperst stalen riemschijf



Tweedelige houten riemschijf

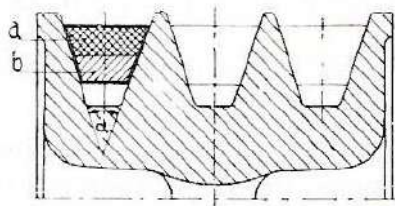
De velling van een houten riemschijf wordt uit segmenten opgebouwd om te beletten dat het hout krom trekt. Daartussen worden de spaken bevestigd.

De riemschijven worden gemaakt van beukenhout, dat onder stoomdruk geweekt en vervolgens in de juiste vorm geperst wordt. De segmenten worden verlijmd, en na het afwerken van de constructie en het zuiver afdraaien van het loopvlak vernist om vocht opneming te voorkomen. Tweedelige houten riemschijven, zoals hierboven weergegeven, kunnen door de verbindings-bouten, bij een niet te grote omtrekkracht voldoende vast op de as geklemd worden. Grotere schijven en schijven uit één stuk vereisen spieën.

Snaar- en kettingoverbrenging

Ter vervanging van de over het algemeen dure leren riemen bij grote vermogens gebruikte men bij grote hartafstanden soms hennep en katoen touwen. Ook werd voor dit doel staaldraad gebruikt. Hierbij zijn altijd grote schijven nodig vanwege de dikte van de touwen en/of de staaldraden. Alhoewel men slijtage van deze touwen en kabels door het bekleden van de schijven trachtte te voorkomen is deze groot. Dit type overbrenging is weinig bekend bij stoominstallaties van gemalen.

Snaren met V-vormige doorsnede worden gebruikt om in ongunstige gevallen, zoals een kleine hartafstand, een grote overbrengingsverhouding of beide, toch nog met een kleine voorspanning uit



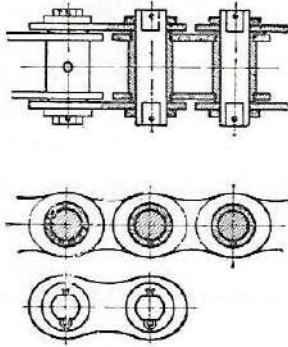
te komen zonder te veel slip te krijgen. Alhoewel er al in de 19^e eeuw sporadisch leren v-snaar overbrengingen werden toegepast vond de ontwikkeling van deze soort overbrenging hoofdzakelijk plaats na het stoomtijdperk. In deze leidraad zal daarom hieraan verder geen aandacht geschonken worden.

V-snaar met de vorm van de groeven

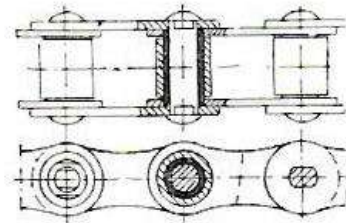
Overbrenging met behulp van kettingen kan onder zeer uiteenlopende omstandigheden toepassing vinden. Zij zijn in het bijzonder geschikt bij kleine hartafstanden van de wielassen. Kettingen zijn slipvrij en vereisen daarom geen voorspanning zodat de assen en de kussenblokken geen extra belasting ondergaan. Voor smering van de ketting en bescherming tegen aanraken en vervuiling door stof moet de ketting worden afgeschermd.

Als transmissie-ketting komt in hoofdzaak de rollenketting in aanmerking. Het is niet bekend of deze soort overbrenging ook is toegepast bij stoomgemalen bij de aandrijving van de opvoerwerktuigen; zij is wel bij apparaten van deze installaties zoals verstelinrichtingen of afsluiter bediening toegepast.

De rollenketting is ontwikkeld uit de busketting, die uit stalen bouten of tappen is samengesteld. Om de grote vlaktedrukken tussen de bout en de binnenste schalm te ontgaan, zet men de binnenste schalmen op een afzonderlijke stalen bus. Hierdoor wordt het draagvlak aanzienlijk vergroot en de slijtage verminderd. De buitenste schalmen kunnen niet draaien om de pennen. Gaatjes in de bussen dienen voor de toevoer van het smeermiddel. Een even aantal schalmen kunnen tot een ketting zonder eind worden verbonden.



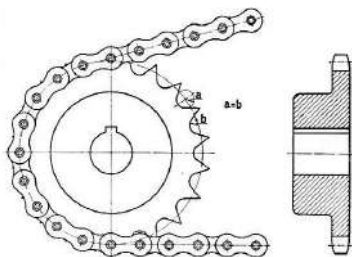
Busketting



Rollenketting

De rollerketting onderscheidt zich alleen van de busketting doordat over de bussen gehard stalen rollen zijn geschoven om de wrijving tegen de tanden van het kettingwiel te verminderen. Deze kettingen worden ook voor twee, drie en vier rijen tanden vervaardigd.

In bedrijf zal de ketting langzamerhand rekken. Door slijtage komt er speling in de scharnieren, waardoor de steek van de belaste ketting groter wordt. De ketting komt dan op een steekcirkel met een grotere straal te liggen. De vorm van de tanden moet dit mogelijk maken. De figuur hiernaast

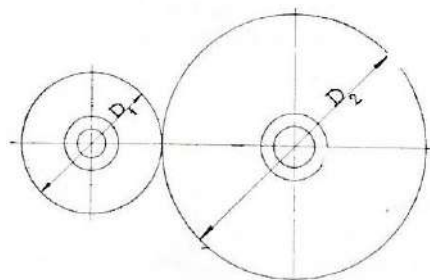


Kettingwiel voor rollerketting

geeft de vorm van de tanden weer, puntig met nagenoeg rechte flanken. De straal van de tandkuilen is gelijk aan die van de rollen. . Bij het rekken van de ketting zal deze steeds verder naar buiten op de tanden lopen. In het aller- uiterste geval schampt deze over de toppen. Een kettingverbinding moet zo zijn ingericht dat de ketting kan worden nagespannen, we kennen dit van onze fietsketting. Als deze constructie niet mogelijk is wordt gebruik gemaakt van een spanwiel.

Tandwieloverbrenging

De overbrenging van de draaiende beweging tussen assen kan geschieden door middel van kam- of tandwielen als verbindend orgaan, De oudste vorm die we hiervan kennen bij stoomgemalen is



het met houten tanden bezette kamwiel. Door tandwielen te kiezen van verschillende diameter is het toerental en daarmee ook het koppel te wijzigen. In alle gevallen kan men de draairichting wijzigen en liggen de drijvende as en de gedreven as op enige afstand van elkaar. Deze afstand is anders dan bijvoorbeeld bij riemaandrijving beperkt en wordt bepaald door de grootte van de wielen.

Overbrenging door twee wielen

Door het toepassen van haakse tandwielen kan elk gewenst verschil in de onderlinge opstellingshoek van de assen worden bereikt; bijvoorbeeld zoals die voorkomt bij een vijzelinstallatie die onder een hoek van 30° met de horizontaal staat opgesteld.

Bij de tandwielen grijpt het ene wiel met zijn tanden in de overeenkomstige openingen van het andere wiel. Het drijvende- en het gedreven wiel hebben daarom gelijke snelheid in de bewegingsrichting. Wanneer de beweging in de richting van de omtrek geschiedt, zijn dus de omtreksnelheden van de wielen gelijk behalve bij schroef- en hypoïd vertande wielen alsmede bij wormen en wormwielen.

Als D_1 en D_2 de middellijnen van de wielen voorstellen dan geldt:

$$v_1 = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n_1}{60} = v_2 = \frac{\pi \cdot D_2 \cdot n_2}{60} \quad [\text{m/s}]$$

Dus:

$$D_1 \cdot n_1 = D_2 \cdot n_2$$

Of in de vorm van evenredigheid waarbij r de stralen van de respectievelijke wielen zijn:

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{D_2}{D_1} = \frac{r_2}{r_1}$$

Het verhoudingsgetal i noemen we het transmissiecijfer dat de verhouding weergeeft tussen de toerentallen van de drijvende- en de gedreven- as.

Voor de hoeksnelheid ω , de hoek, uitgedrukt in radialen per seconde en het koppel M geldt hetzelfde verhoudingsgetal. zodat we ook kunnen schrijven:

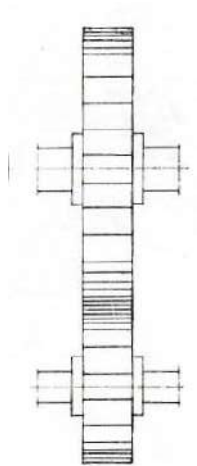
$$i = \frac{M_1}{M_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{D_2}{D_1} = \frac{r_2}{r_1}$$

Indeling van de tandwielen

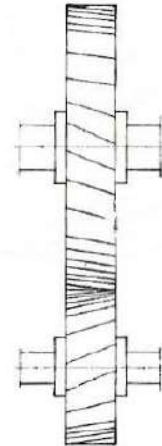
Hierbij onderscheidt men vier gevallen naar de stand die de assen ten opzichte van elkaar innemen.

- De assen liggen evenwijdig aan elkaar (rechte tandwielen)

De grondvorm van deze wielen zijn twee elkaar volgens een beschrijvende lijn rakende cilinders. De tanden kunnen evenwijdig zijn aan de beschrijvende lijnen ervan of er een hoek mee maken met een schuine vertanding.



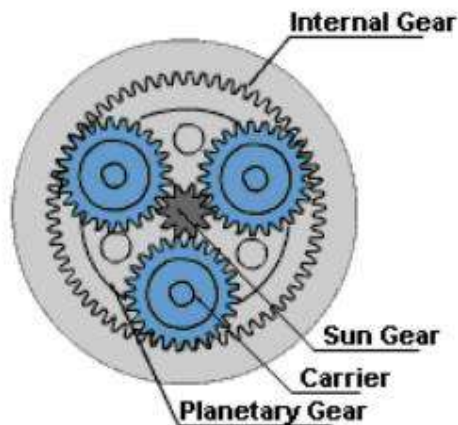
Rechte tandwieloverbrenging met rechte vertanding



Rechte tandwieloverbrenging met schuine vertanding

- De assen liggen in het verlengde van elkaar (rechte tandwielen)

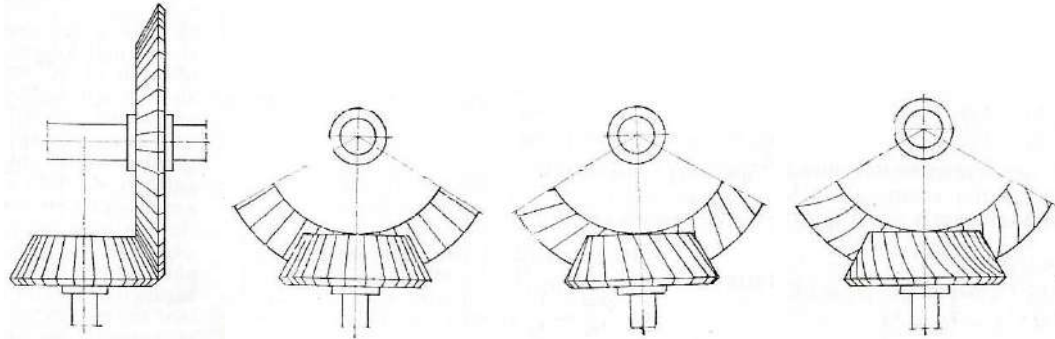
De grondvorm van deze wielen is gelijk aan die met de rechte vertanding, echter de overbrenging vindt in meerdere stappen plaats waardoor de tandwielen zodanig kunnen worden gerangschikt dat de in- en uitgaande- as in elkaars verlengde geplaatst kunnen worden.



Planetaire tandwieloverbrenging

- De assen snijden elkaar (conische tandwielen)

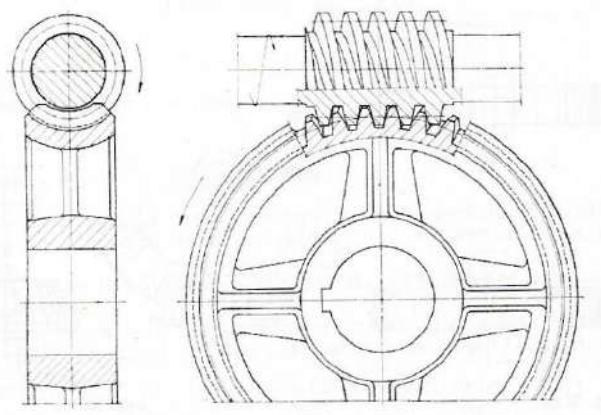
De grondvorm is twee elkaar volgens een beschrijvende lijn rakende kegels met een gemeenschappelijke top. De tanden kunnen recht zijn, dat wil zeggen de beschrijvende lijnen van de tanden snijden elkaar in de top, en scheef of gebogen op de kegelwielen zijn aangebracht.



Conische tandwieloverbrenging met rechte- schuine- en gebogen vertanding

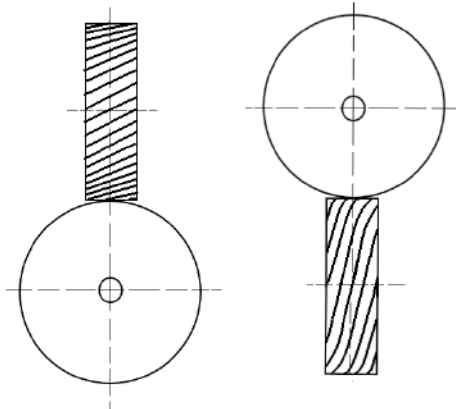
- De assen kruisen elkaar (schroefwielen)

Alhoewel er wel sprake is van vertanding spreekt men bij dit soort overbrengingen meestal over schroefwielen en worm - wormwiel overbrenging.

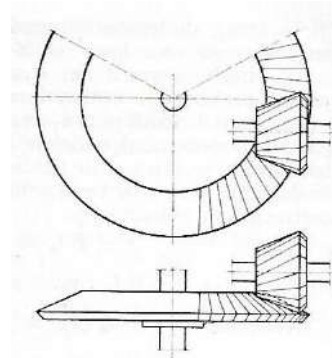


Worm - wormwiel overbrenging

De worm- wormwiel overbrenging wordt veel toegepast waar een grote overbrengverhouding gewenst is zoals bijvoorbeeld bij de aandrijving van een smeertoestel of bij de handbediening van de rookkleppen bij een stoomketel. Het handwiel is dan op de worm-as bevestigd en het wormwiel is verbonden met de as van de rookklep. De zware klep kan dan met een geringe krachtsinspanning worden versteld.



Schroefwiel overbrenging



Hypoïd overbrenging

De hier voor afgebeelde en relatief moderne schroefwielen en hypoïd vertande overbrengingen zal men bij de installaties van stoomgemalen niet aantreffen.

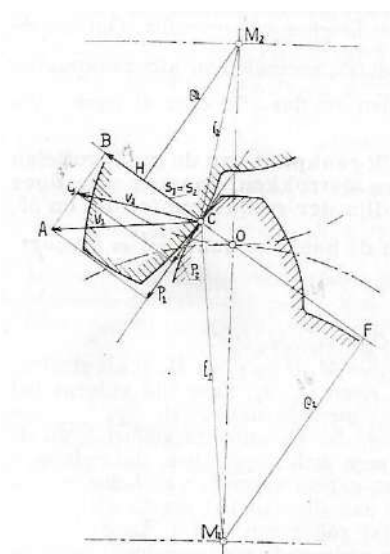
Grondbeginsel tandconstructie

Bij een goede tandconstructie moet er voor gezorgd worden dat de overbrenging gelijkmatig dat wil zeggen zonder schokken plaats heeft. De verhouding van de hoeksnelheden van het ene en het andere wiel moet steeds gelijk zijn. Of anders geschreven:

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \text{constant}$$

Houdt men deze eis in het oog dan kan men het grondbeginsel afleiden. Met behulp van de hiernaast afgebeelde figuur kan worden aangetoond dat de zijden van de gelijkvormige driehoek

M_1O en M_2O zich verhouden als loodlijnen op de uit M_1 en M_2 op de gemeenschappelijke normaal van de tandprofielen dus ook als ω_1 en ω_2 .



$$i = \frac{M_2 O}{M_1 O} = \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{\omega_1}{\omega_2}$$

De loodlijnen, in elk raakpunt van de tandprofielen op de gemeenschappelijke raaklijnen getrokken, moeten alle door het hetzelfde punt O van de verbindinglijn van de middelpunten M_1 en M_2 gaan.

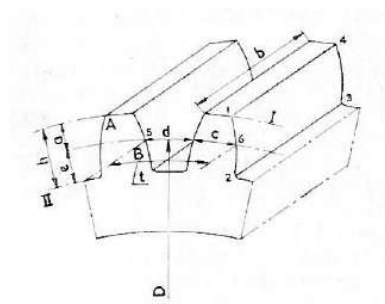
Op twee samenwerkende wielen kan men altijd twee elkaar rakende cirkels met gelijke omtreksnelheid bepalen. Die noemen we de steek- cirkels. De verhouding van hun stralen bepaalt het overbrengingsgetal I. Hun raakpunt is de pool O.

Grondbeginsel van de tandconstructie

Uit de ongelijkheid van p_1 en p_2 , de ontbondenen van de omtreksnelheden v_1 en v_2 richting de raaklijn, volgt dat de tanden langs elkaar glijden met een relatieve snelheid van $p_1 - p_2$. Hierdoor ontstaat wrijving en warmteontwikkeling. Raken de tanden elkaar in punt O dan is $v_1 = v_2$ en $s_1 = s_2$ en dus ook $p_1 = p_2 = 0$. Op dit punt treedt rolling van de tandprofielen op en is er sprake van rolwrijving.

Benamingen

Uit het voorgaande kan worden afgeleid dat de tanden van een tandwiel een bepaalde vorm moeten hebben om aan een aantal eisen te kunnen voldoen. De uiteindelijke vorm is een compromis tussen een aantal hierna nader toegelichte mogelijkheden. In de loop van de ontwikkeling van het maken van tandwielen heeft men benamingen bedacht en zijn tandprofielen gestandaardiseerd zodat uitwisselbaarheid bij vervanging gewaarborgd is.



Tand benamingen

In onderstaande tabel zijn de namen die bij de letters in de voorgaande figuur horen, nader aangegeven.

A	Tandkop	e	Voethoogte
B	Tandvoet	h	Tandhoogte
Cirkel I	Kopcirkel	b	Tandbreedte (velgbreedte)
Cirkel II	Voetcirkel	c	Tanddikte (op steekcirkel gemeten)
a	Kophoogte	d	Kuilwijdte (op steekcirkel gemeten)

Benaming bij de tanden van tandwielen

Het vlak 1 2 3 4 in de figuur noemen we het werkend vlak of tandflank en de boog 1 2 het tandprofiel. De boog 5 6 op de steekcirkel = tanddikte + kuilwijdte en noemen we de steek, aangeduid met t . Is het aantal tanden van een wiel z , dan is:

$$O_{stc} = \pi \cdot D = z \cdot t \text{ [mm]}$$

Of:

$$t = \pi \cdot \frac{D}{z} \text{ [mm]}$$

Bij de fabricage van tanden geeft men de steek aan in een veelvoud van π en noemt men de volgende verhouding de modulus of modul of ook wel moduul.

$$m = \frac{t}{\pi} = \frac{D}{z} [\text{mm}]$$

Hieruit volgt:

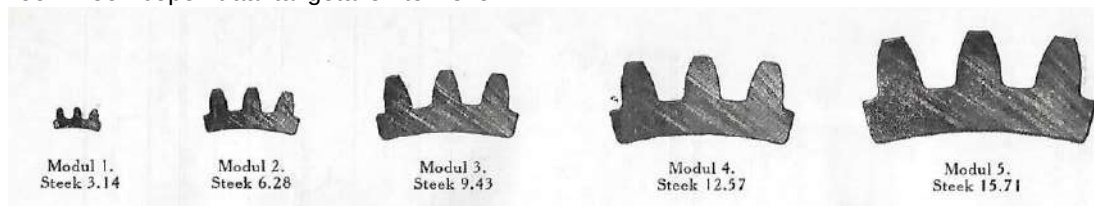
$$t = m \cdot \pi. [\text{mm}]$$

En:

$$D = m \cdot z [\text{mm}]$$

Hierbij is z een geheel getal en m een geheel of meetbaar getal.

Het aantal voor de vervaardiging van tandwielen benodigde gereedschappen beperkt men door voor m een beperkt aantal getallen te kiezen.



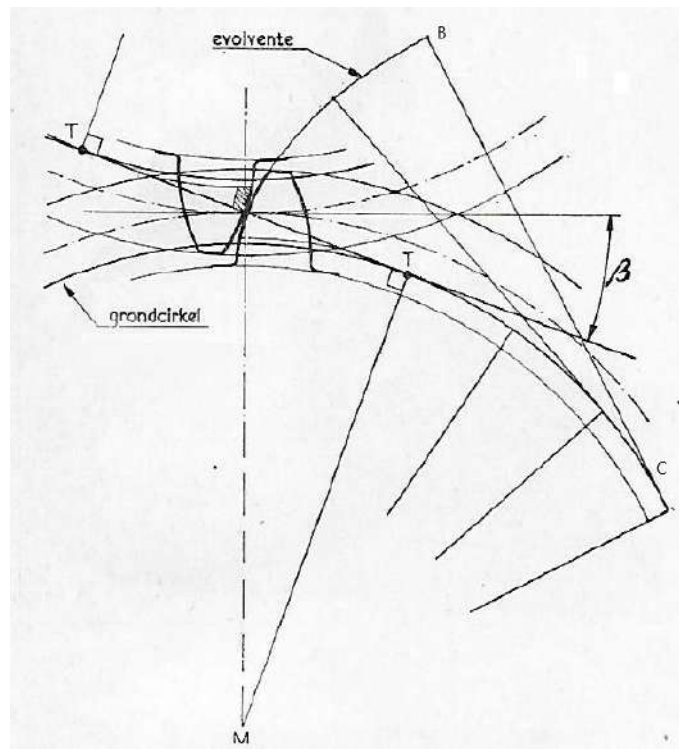
Voorbeeld van de modules 1 t/m 5

Tandprofielen

Men kan als tandprofiel van de op elkaar ingrijpende wielen een willekeurige kromme aannemen, en daarvan die van het andere wiel afleiden.

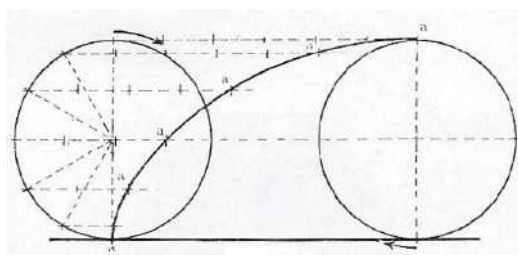
In de praktijk beperkt men zich tot evolventen of, voor bijzondere doeleinden, van cycloïden. Een evolvente is de baan, die een punt van de raaklijn aan een cirkel beschrijft als men de raaklijn over de cirkel laat rollen.

De evolvente ontstaat als een strak gespannen draad, die op de cirkel, de grondcirkel, is gewonden, daarvan afwikkelt. Trekt men vanuit een punt B van de evolvente een raaklijn BC aan de grondcirkel, dan kan men dat als een klein deel van de evolvente beschouwen.

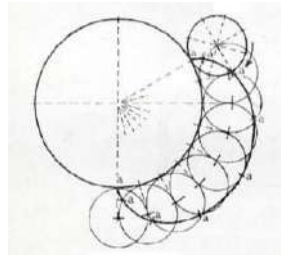


Evolvente

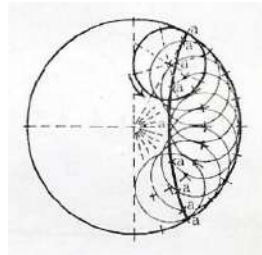
Bij de cycloïde-tandconstructie worden de tandprofielen gevormd door zogenoemde cycloïden. Men onderscheidt de gewone cycloïde waarbij de kromme beschreven wordt door een punt van een cirkel, die afrolt op een rechte lijn en de epicycloïde (epi = boven) waarbij de kromme ontstaat door het afrollen van een cirkel op een andere cirkel. Dan is er ook nog de hypocycloïde waarbij de kromme ontstaat door het afrollen van een punt van een cirkel binnen een andere cirkel.



Cycloïde



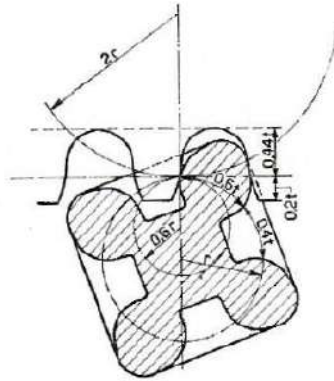
Epicycloïde



Hypocycloïde

Cycloïde tandprofielen worden vaak toegepast bij rondsels in combinatie met een tandheugel zoals hierna afgebeeld. Het tandprofiel van de heugel, dat verkregen wordt door de beide rolcirkels op de steekcirkel te rollen, bestaat uit twee gewone cycloïden. Door de tandvoet lager dan normaal te maken wordt de tand minder verzwakt, terwijl de verkorting van de ingrijping die dientengevolge zou ontstaan, wordt vermeden door de tandkop hoger te maken dan normaal. Opdat de voet en de kop dik genoeg worden, moet de tanddikte groter dan normaal worden genomen.

Het afgebeelde rondsel op hier onder is gemaakt door de tandkuilen uit een vierkant stuk staal te frezen. De tanden worden daardoor behalve aan de voet ook aan de zijkanten gesteund.

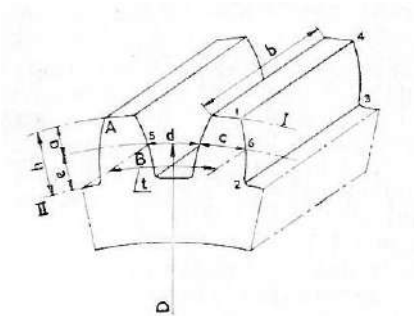


Cycloïde vertand rondsel met heugel

Bepaling van de afmetingen van de tanden.

Onbewerkte tanden

De tandwielen bij oude stoomgemalen zoals bijvoorbeeld voor een schep rad aandrijving zijn vaak gemaakt van gietijzer. De tanden ervan werden behoudens het ontbramen en het weghakken en of vijlen van oneffenheden niet bewerkt. Niet zelden werkten deze gietijzeren wielen of rondsels samen met wielen met houten tanden. Wielen met onbewerkte tanden hebben daarom andere afmetingen en hebben grotere maattoleranties nodig dan die waarvan de tanden nauwkeurig machinaal zijn bewerkt.



Tand benamingen

Voor de kophoogte a wordt aangehouden:

$$a \approx m \approx 0,3 (c + d) \approx 0,3t \text{ [mm]}$$

Voor de voethoogte e van de tand van het andere wiel rekt men met:

$$e \approx (1,15 \dots 1,2) \cdot m \text{ [mm]}$$

Of:

$$e \approx 0,4 t \text{ [mm]}$$

De twee samenwerkende wielen hebben natuurlijk dezelfde steek = t. Zijn beide wielen uit hetzelfde materiaal gemaakt dan zijn de tand-dikten c meestal gelijk, evenals de kuilwijdte d.

Men maakt de speling in tangentiële richting van circa 2/40 van de steek t dan wordt de tanddikte c en de kuilwijdte d op de steekcirkel:

$$c = \frac{19}{40} t \text{ [mm]} \text{ en } d = \frac{21}{40} t \text{ [mm]}$$

Bij houten tanden, die met gegoten ijzeren tanden samenwerken, wat vaak het geval is, laat men een geringere speling toe, namelijk van circa 1/40 van de steek t en maakt men de tanddikte en de kuilwijdte op de steekcirkel voor de houten tanden:

$$c = \frac{23}{40} t \text{ [mm]} \text{ en } d = \frac{17}{40} t \text{ [mm]}$$

De tanddikte en de kuilwijdte voor de dunnere gietijzeren tanden die met de houten tanden samenwerken bedragen dan:

$$c = \frac{16}{40} t \text{ [mm]} \text{ en } d = \frac{24}{40} t \text{ [mm]}$$

Hier zien we dat vanwege de sterkte de houten tanden ongeveer 44% dikker worden gehouden dan de samenwerkende gietijzeren tanden.

Bewerkte tanden

Praktisch gezien komen voor bewerkte tanden slechts evolvente-profielen in aanmerking, omdat alleen deze op eenvoudige wijze gemaakt kunnen worden. In Nederland worden bij de fabricage van machinaal bewerkte tandwielen de volgende afmetingen gehanteerd.

Kophoogte	a	a = m
Voethoogte	e	e = (1,15...1,2) · m, gemiddeld 1½ x m
Tandhoogte	h	h = e + a = 2½ x m

Voor een wiel met 60 tanden, m = 8 mm, wordt dan de kophoogte 8 mm, de voethoogte 1½ x 8 = 9,3 mm, en de tandhoogte of de tandkuil-diepte 2½ x 8 = 17,3 mm.

De steekdiameter van dit wiel = 60 x 8 = 480 mm, de voetcirkeldiameter 480 – (2 · 9,3) = 461,4 en de kopcirkeldiameter 480 + (2 · 8) = 496 mm.

Transmissiecijfer

Het transmissie cijfer i (overbrengingsverhouding of drijfwerkverhouding) is beperkt doordat anders de wielen een te grote middellijn krijgen. Bij een enkele overbrenging kan men gaan tot een i ≈ 25. Bij een dubbele overbrenging in een tandwielkast gaat men niet verder dan i ≤ 5...8 per overbrenging. Boven i ≈ 10 wordt splitsing in twee enkele overbrengingen goedkoper.

Bij stoomgemalen zien we in de regel voor de relatief langzaam draaiende (oude) opvoerwerktuigen zoals een scheprad of vijzel een dubbele overbrenging toegepast. Drijft de stoommachine een

stromingspomp aan, bijvoorbeeld een centrifugaalpomp, dan is deze meestal direct hieraan gekoppeld.

Voor niet bewerkte tanden en voor minder nauwkeurig gesneden tanden, zoals ze bijvoorbeeld met alleen een profielfrees of steekbeitel op de steekbank ontstaan, moet voor het goed inlopen het transmissiecijfer een geheel getal of een eenvoudige breuk zijn.

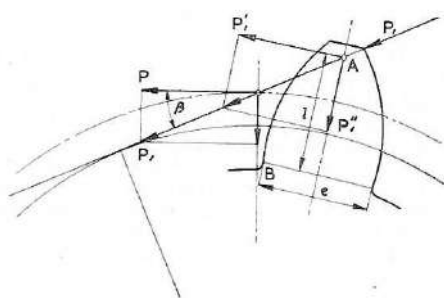
Bijvoorbeeld:

$$i = \frac{2}{1}; \frac{3}{1}; \frac{4}{1}; \frac{3}{2}; \frac{5}{2}; \frac{7}{2} \text{ enz.}$$

Overbrengingen als bijvoorbeeld 20 op 99 tanden worden gebruikt bij periodieke veranderlijkheid van de tanddruk, om een gelijkmatige slijtage van het rondsel te bewerkstelligen. Een voorbeeld hiervan is de aandrijving van een plunjerpomp.

Tandbelasting

Voor de berekening van de tandwielen gaat men uit van de omtrekkracht P kg op de steekcirkel. Deze kracht is af te leiden uit het koppel dat het wiel moet overbrengen.



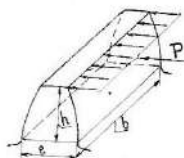
$$M = P \cdot r \text{ [kgcm]}$$

Als het over te brengen vermogen N pk en het aantal omwentelingen per minuut n gegeven zijn dan vindt men de omtrekskracht uit:

$$P \cdot r = 71620 \cdot \frac{N}{n} \text{ [kgcm]}$$

Tandkrachten

De omtrekkracht P belast de tand zo dat hij gebogen wordt en de tandflanken worden ingedrukt. De buigspanning in de voet van de tand zal het grootst zijn wanneer de top van het tegenwerkende profiel in ingrijping is, waarbij we aannemen dat slechts één tand de gehele tand-druk moet opnemen.



Laten we de kracht P aangrijpen in punt A van de tand dan kan deze ontbonden worden in P_1' , loodrecht op de hartlijn en P_1'' er langs. De kracht P_1' veroorzaakt hier een buigend moment met l als arm. De kracht P_1'' veroorzaakt een gelijkmatig over de voet verdeelde drukspanning.

Tand op buiging belast

Uit de sterkteleer weten we dat het weerstandsmoment tegen buiging van een rechthoekige doorsnede met een hoogte e en een breedte b is:

$$I = \frac{1}{6} \cdot e^2 \cdot b \text{ [cm}^3\text{]}$$

Er heerst in die tandvoet een buigspanning:

$$\sigma_b = \frac{P'_1 \cdot l}{\frac{1}{6} \cdot e^2 \cdot b} \text{ [kg/cm}^2\text{]}$$

En een drukspanning:

$$\sigma_d = \frac{P''_1}{e \cdot b} \text{ [kg/cm}^2\text{]}$$

De grootste totale spanning die in de tand optreedt, is een drukspanning bij de tandvoet in B en bestaat uit:

$$\sigma_{d \max} = \sigma_b + \sigma_d \text{ [kg/cm}^2\text{]}$$

De grootste trekspanning die ontstaat is:

$$\sigma_{t \max} = \sigma_b - \sigma_d \text{ [kg/cm}^2\text{]}$$

De afrondingen bij de voet van een tand zijn dus zeer wenselijk om de kerfwerking te verminderen. De waarden e en l van de tand zijn evenredig met de steek t . Zij hangen uiteindelijk af van het aantal tanden, het gebruikte moduul en natuurlijk van de omtrekkracht P .

Teneinde een benaderde waarde te vinden voor de spanning in de tanden gebruiken we de hier voor gegeven figuur met de omtrekkracht P aangrijpend in de top van de tand, loodrecht op de hartlijn ervan.

Met een gemiddelde waarde voor $h \approx 0,7 \cdot t$ en $e \approx 0,55 \cdot t$ wordt de buigspanning in de tand:

$$\sigma_b = \frac{P \cdot h}{\frac{1}{6} \cdot e^2 \cdot b} = \frac{P \cdot 0,7 t \cdot 6}{0,55^2 \cdot t^2 \cdot b} = \frac{14 \cdot P}{b \cdot t} \text{ [kg/cm}^2\text{]}$$

Of de omtrekkracht:

$$P = \frac{\sigma_b}{14} \cdot b \cdot t \text{ [kg]}$$

Omdat de spanningen gedurende het bedrijf telkens van nul tot maximum aangroeien kan men slechts een deel van de beproefde spanning van het voor het tandwiel toe te passen materiaal gebruiken. In onderstaande tabel wordt hiervan een overzicht gegeven. Hier bovenop worden er bij het berekenen van de sterkte van de tanden van het wiel nog een aantal veiligheidsfactoren in acht genomen die voornamelijk te maken hebben met het soort bedrijf, de belasting en de bewerking

van de tanden. Het verminderen van de toelaatbare spanning heeft ook tot doel dat de tanden minder snel slijten.

Materiaal:	$\bar{\sigma}$ kg/cm ² :	$\frac{\bar{\sigma}}{14}$ kg/cm ² :
gietijzer Gij. 18	400	28
„ Gij. 22	490	34
gietstaal Stg. 52	900	60
fosforbrons	750	50
vloeistaal St. 50	1000	70
„ St. 60	1100	85
„ St. 70	1400	100
gelegeerd (Si-Mn) staal .	1400...1800	100...130
„ , a. d. oppervlakte		
gehard staal	1000...2200	70...150
wit- of hagebeukenhout .	200	14
ruwe-huid, kunsthars enz.	300...400*)	

Toelaatbare materiaalspanningen tandwielen

Uit bovenstaande tabel voor de toelaatbare materiaalspanning voor het tandmateriaal van tandwielen kan worden afgeleid dat de minste soort gietijzer nog steeds twee keer sterker is dan het beukenhout waar de tanden of kammen van de kamwielen van worden gemaakt. Door toepassing van gelegeerde staalsoorten en oppervlakte harding alsmede het naslijpen van de tandprofielen zijn tegenwoordig nog hogere belastingen toegestaan dan hier boven in de tabel worden aangegeven.

Materiaal en constructie van de tandenwielen

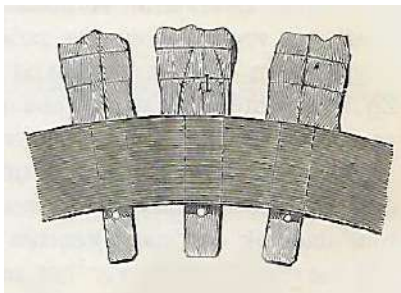
Wielen voor de overbrenging van kracht en snelheden bij gemalen werden in het verleden vaak samengesteld uit gietijzeren rondsels die samen liepen met meestal gietijzeren wielen met houten tanden. Soms, overgenomen uit de molenbouw, was het wiel ook van hout. De spaken van deze wielen zij nagenoeg plat omdat ze tussen de uitstekende pennen van de tanden moeten passen. De tanden bij brede wielen maakt men soms uit twee delen. De ruwe vorm van de tand moet tenminste 20...25 % groter zijn dan die van de uiteindelijk afgewerkte tand. De reden daarvoor is dat de vierkante gaten in de gietijzeren tandkrans waarin de houten tanden bevestigd worden niet altijd nauwkeurig gegoten zijn en de hartlijn hiervan niet nauwkeurig overeen komt met die van de op de steek te plaatsen houten tanden, ergo de tandvorm buiten het ruw gevormde hout valt.

Is men genoodzaakt vers hout te verwerken, dan dienen de ruw besneden stukken vier tot vijf uur in kokend water gelegd te worden. Dit water dient men een aantal keren te verversen om de extractiestoffen die het hout doen krimpen en bederven te verwijderen. De aldus uitgeloopte houtblokken worden vervolgens enige weken op een warme en droge plaats gelegd voor ze verder kunnen worden bewerkt. De tanden zijn van dezelfde kwaliteit als langdurig natuurlijk gedroogd hout.



Voorbeeld van tandwiel met houten tanden (Gemaal Hertog Reijnout)

Wanneer de tanden of kammen niet goed droog zijn of maar juist in de openingen van de tandkrans passen raken ze los. Een lapmiddel is dan de tanden er uit te nemen en de ruimte met schrijfpapier of dun karton op te vullen bij het opnieuw indrijven. Bij het indrijven moet men waken voor het springen van de gietijzeren krans. Wanneer alle kammen zijn aangebracht, worden de steekcirkel en de topcirkel erop afgetekend door het rad te draaien langs een vast punt. Vervolgens wordt de



Ruw bewerkte houten tanden

steekcirkel verdeeld en wordt aan beide zijden de tandvorm afgetekend. De leverancier van het rad dient hiervoor een tekening en een plaatstalen mal te leveren. De mal omvat minstens drie kammen en wordt bij het aftekenen steeds een kam opgeschoven om er zeker van te zijn dat de steek steeds klopt. Nadat de flanken ten ruwste zijn bewerkt en de pennen voor het vasthouden van de kammen in de krans zijn afgetekend worden de kammen eruit geslagen, genummerd en vervolgens afgewerkt.

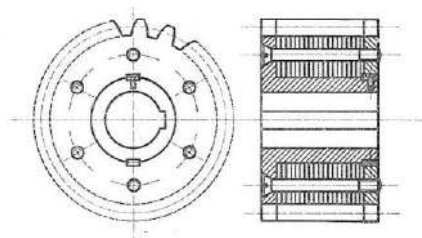
Na het afwerken en voordat ze weer worden aangebracht en geborgd worden de kammen tegen vochtinwerking verduurzaamd. Een geschikt middel om de kammen te verduurzamen is ze in hete lijnolie te leggen tot ze hiermee verzadigd zijn. De tanden worden gesmeerd met bijenwas, lijnolie of grafiet. De tanden hebben een evolvente vorm.

Geheel uit metaal vervaardigde wielen voor kleine krachten en snelheden worden gemaakt van gegoten ijzer. Dit is goedkoop, gemakkelijk te maken en heeft goede loopeigenschappen in combinatie met rondsels van staal of brons. Voor het overbrengen van grote krachten en snelheden past men gietstalen wielen toe of wielen uit al dan niet gelegeerd staal. Worden stalen wielen groter dan ongeveer 400 mm dan wordt de velg waarin de tanden zijn gesneden op een gietijzeren wiellichaam gekrompen.

Dergelijke wielen met nauwkeurig bewerkte tanden moeten goed gesmeerd worden en zijn daarom in een kast ondergebracht. Rondsels moeten altijd van een beter materiaal zijn dan de wielen

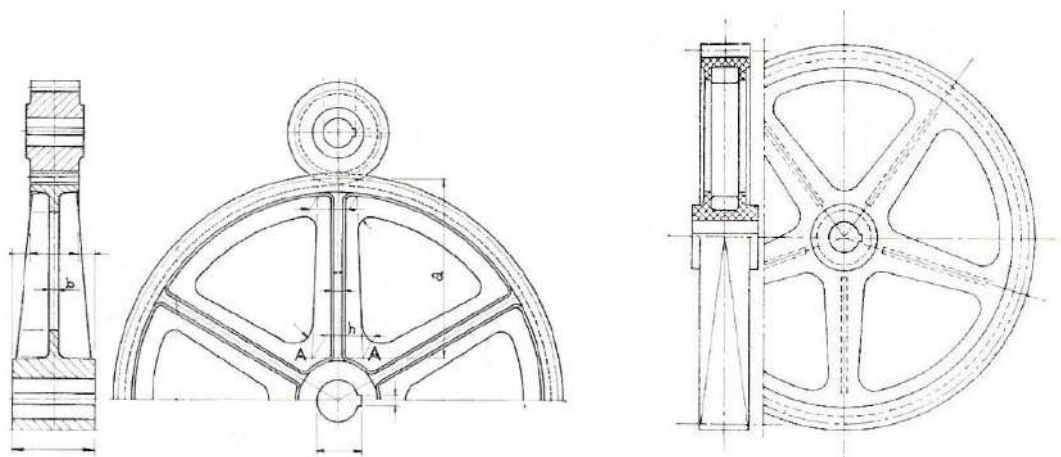
waarmee ze samenwerken omdat deze door het grotere aantal aangrijpingen per tijdseenheid meer slijten. Bronzen rondsels voldoen in dit opzicht zeer goed.

Om geluidloze overbrengingen te maken past men soms rondsels toe die gemaakt zijn uit geluiddempende materialen. Zij bestaan uit katoenweefsel, geïmpregneerd met synthetische hars en onder druk samengeperst.



Rondsel uit geluiddempend materiaal

Gegoten wielen hebben spaken of zijn schijfvormig. De velling heeft ten minste een dikte $s = 1,7 \cdot m$ mm. Bij spaakwielen wordt de velg versterkt door een of twee ruggen, ieder ongeveer $2 \cdot m$ mm dik. De asdikte, dat is de boring d_b van de wielnaaf, wordt bepaald door de omstandigheden, zoals bijvoorbeeld een sterk wisselende belasting, van de krachtoverbrenging. De naaflengte neemt men $l = (1,5 \dots 2) \cdot d_b$ mm. De naaf-middellijn voor gegoten ijzer $d_n = 1,8 d_b + 15$ mm.



Wiel met kruisvormige spaken

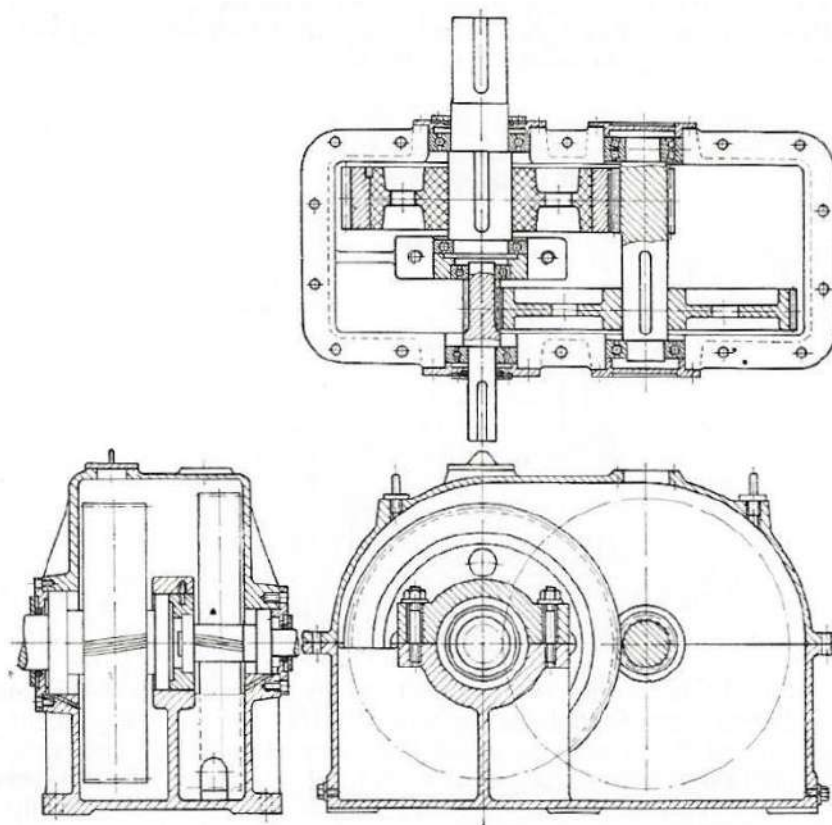
Wiel met H-vormige spaken

Grote wielen worden met behulp van een inleg- of kopsple met de as verbonden. Om het wiel gemakkelijk te kunnen monteren wordt de as ter plaatse van de verbinding dikker gehouden. Spaken of armen van grote wielen hebben een kruis- of T-vormige doorsnede. Voor brede wielen is de H-vormige doorsnede in gebruik.

De wielen zijn meestal open opgesteld en worden alleen tegen aanraking afgeschermd. De tanden van de wielen worden meestal met een grafiet vetsoort gesmeerd dat tijdens bedrijf op de afgaande kant met een kwast (bokkenpoot) wordt aangebracht.

Op de volgende bladzijde staat een tandwielkast afgebeeld met een tweekraps overbrenging. Hierbij is het gegoten grote wiel op de uitgaande as voorzien van een opgekrompen velg. De tanden in het eveneens gegoten grote wiel van de eerste trap zijn zonder tussenkomst van een aparte velg direct in het materiaal gesneden. Omdat het rondsel een gering aantal tanden heeft zijn deze direct in de naaf dan wel het as- materiaal gefreesd. De wielen en het rondsel zijn schuin vertand. De schuinite van de tanden is tegengesteld waardoor de hierdoor veroorzaakte axiaal krachten elkaar opheffen en de lagers niet extra belasten.

De getoonde kast wordt tot een bepaald niveau met smeeroilie gevuld. De wielen die door dit oliebad draaien zorgen voor de toevoer van de olie naar de tanden bij het ingrijp-punt van de wielen en de wentellagers. We noemen dit spatsmering.

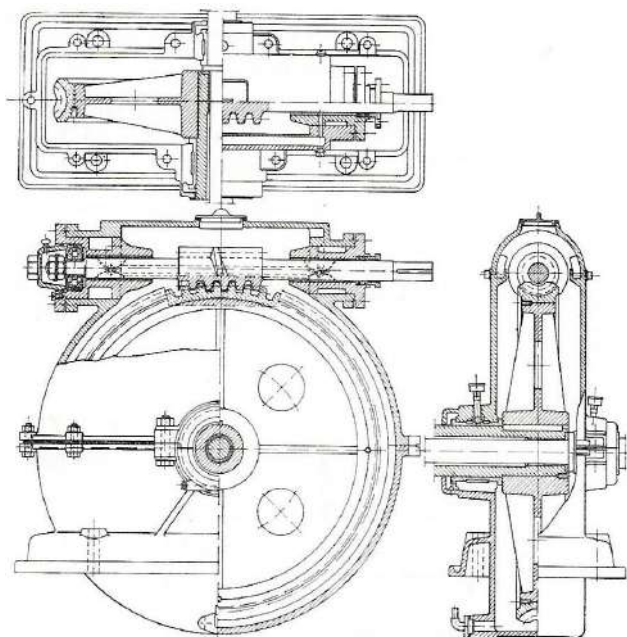


Co-axiale tandwielkast

Soms zijn daartoe gootjes aangebracht om er zeker van te zijn dat alle onderdelen van voldoende olie worden voorzien. Indien de kasten op een hellend vlak worden opgesteld wordt druksmering toegepast of men voorziet de lagers van vetnippels.

Bij druksmering wordt meestal, aan de ingaande as, een tandwielpompje gekoppeld dat de olie uit de kast zuigt en met vertakte leidingen naar de verschillende te smeren onderdelen voert. Boven elke tandwieloverbrenging wordt dan een sproeibuis aangebracht, die de olie over de breedte van het wiel verdeelt. Een deel van de over te brengen energie wordt als gevolg van onvermijdelijke wrijving in warmte omgezet. Als deze warmte niet of onvoldoende via de kast naar de omgeving kan worden afgevoerd moet de smeerolie gekoeld worden. Veelal wordt hiertoe bij gemalen een roodkoperen koelspiraal in de tandwielkast aangebracht en wordt een klein deel van het verpompte polderwater gebruikt als koelmedium. In geval van druksmering paste men met het zelfde doel ook wel pijpenkoelers toe.

Hier onder staat een worm-wormwielkast afgebeeld. In het algemeen dient een wormoverbrenging tot het verlagen van het toerental maar nog meer om met een kleine kracht een groot koppel te kunnen ontwikkelen zoals bijvoorbeeld bij een torninrichting van een stoommachine, het bewegen van de zware rookschuiven bij een stoomketel of bij een eenvoudige handtakel. De wormen worden in de regel van staal gemaakt, en soms aan de oppervlakte gehard en geslepen. Het wormwiel heeft meestal een spakenkruis of binnenschijf van gegoten ijzer of -staal en een wormkrans van fosfor- of aluminium-brons. De overbrenging wordt meestal gemonteerd in een gesloten gietijzeren kast. De wormen worden uitgevoerd met één-, twee- en drievoudige spoed. Afhankelijk van de spoed en het aantal gangen is de overbrenging zelf remmend wat vooral voor overbrengingen die worden toegepast bij verstelinrichtingen of takels belangrijk is. De gesloten wormkast wordt tot een bepaald niveau gevuld met smeerolie of een dun soort smeervet. Het rendement van dit soort overbrengingen is relatief laag waardoor er vooral bij continu bedrijf veel warmte wordt ontwikkeld en de kast gekoeld moet worden. Vaak wordt daartoe de kast aan de buitenkant van koelribben voorzien en de sneldraaiende wormas van een ventilator.



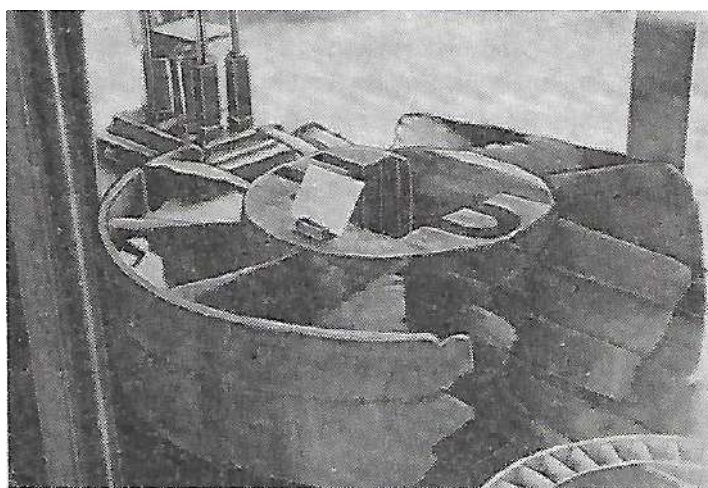
Worm-wormwielkast

4.18 Opvoerwerktuigen

Bij bemalingsinstallaties gebruiken we vaak de aanduiding opvoerwerktuig als we een scheprad, vijzel, zuigerpomp of een pomp met waaier bedoelen. Opvoerwerktuig is een archaïsch maar nog steeds gangbaar begrip dat we in de Nederlandse taal ook al gebruikten voor het windwatermolen tijdperk dat in de 13^e eeuw begon met door windmolens aangedreven schepraderen als opvoerwerktuig. Deze zogenoemde poldermolens waren afgeleid van de graanmolens die al langer bestonden en waarin het koren werd gemalen. De naam "gemalen" voor onze bemalingsinrichtingen is waarschijnlijk hiervan overgenomen.

Het scheprad is naar alle waarschijnlijkheid een vinding van de Soemerieërs die dit werktuig al 6000 jaar geleden gebruikten in Mesopotamië, het huidige Irak om langs de rivier de Eufraat hun hoger gelegen akkers te bevoeien. De uitvinding van de vijzel, weliswaar niet in de huidige vorm, maar als een om een as gewonden spiraal vormige schroef in een buis, wordt toegeschreven aan de Griek Archimedes van Seracuse. Archimedes leefde ruim 2000 jaar geleden. Het is dan ook niet zonder reden dat in de Engelse taal dit werktuig de schroef van Archimedes wordt genoemd.

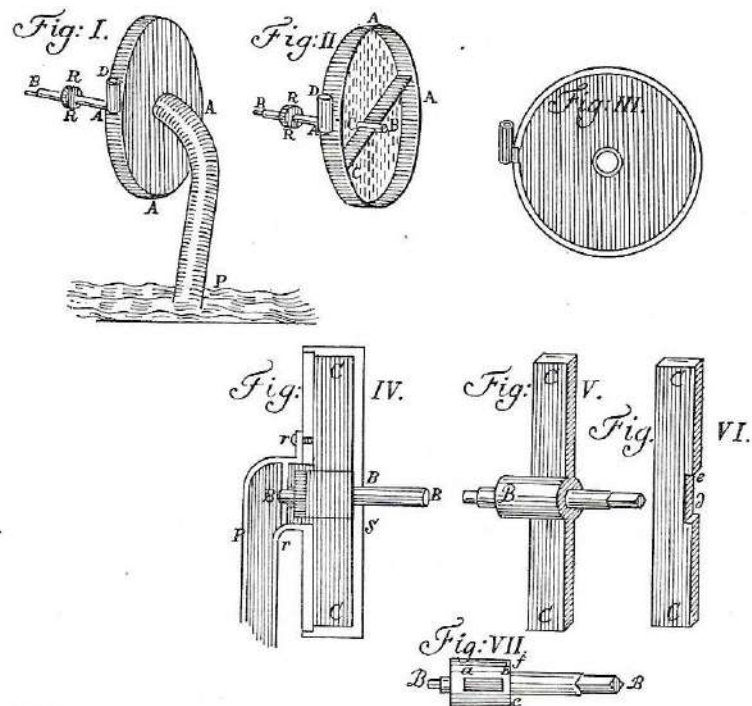
Het principe van de stromingspomp dateert uit de 5^e eeuw. De hierbij getoonde afbeelding is van een in 1772 bij een oude kopermijn in Portugal gevonden uit hout samengestelde centrifugaalpomp met dubbel gekromde schoepen. De pomp op de foto van de in het Parijse Musée du Conservatoire National des Arts et Métiers opgeslagen restanten zouden we met de wetenschap en kennis van nu een schroef- of axiaalwaaierpomp noemen. Dit soort pompen die in Nederland voor polderbemaling pas aan het begin van de 20^e eeuw succesvol werden toegepast heten Woodspompen maar werden in het verleden vaak ook met vijzelpompen aangeduid. De Amerikaan Woods was de ontwikkelaar van dit al 1500 jaar bestaand pompconcept dat veel heeft betekend voor het open rioolstelsel en de ontwatering van New Orleans in de Mississippi-delta en later ook hier te lande.



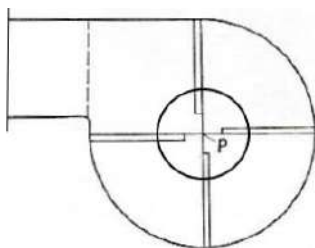
Schroefwaaierpomp 5^e eeuw (kopermijn São Domingos)

Aan het eind van de 15 eeuw kwam Leonardo Da Vinci op het idee om stromingsenergie te benutten bij het opvoeren van water.

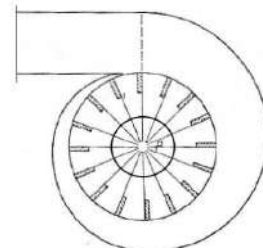
Door de Fransman Denis Papin werden in 1687 de eerste prototypes van een centrifugaalpomp ontwikkeld: eerst met een cilindrisch pomphuis en iets later met een pomphuis in de vorm van een slakkenhuis. Beide types hadden een waaier met rechte- en radiaal gerichte schoepen.



Centrifugaalpomp ontwerpen van Denis Papin 1687



Cilindrisch pomphuis



Slakkenhuisvormig pomphuis

4.18.1 Soorten opvoerwerktuigen

Een opvoerwerktuig in een gemaal is bedoeld om water te transporteren van een laag naar een hoog peil. Tussen de eerder bij de inleiding genoemde opvoerwerktuigen bestaan essentiële verschillen met betrekking tot de wijze waarop dat gebeurt. Hierbij zijn twee principes te onderscheiden: het opvoeren van water door middel van verdringing of door stroming. Bij het eerste principe worden met behulp van het werktuig afgemeten porties water naar een hoger hydraulisch niveau geduwd. Bij het tweede principe wordt met het werktuig een continue stroom water op een dusdanig hoge snelheid gebracht dat het uiteindelijk als het ware naar een hoger niveau gespoten wordt. De snelheid wordt omgezet in druk of anders gezegd: het arbeidsvermogen van beweging wordt omgezet in arbeidsvermogen van plaats. Er is in de loop van de tijd een heel breed scala aan opvoerwerktuigen ontwikkeld; elk met zijn eigen toepassingsgebied. De opvoerwerktuigen kunnen op volgorde van hun specifieke toepassing in de bemaling in Nederland als volgt worden gerubriceerd:

Opvoerwerktuigen	
Verdringingswerktuigen	Stromingswerktuigen
Zuigerpomp	Centrifugaal-waaierpomp
Scheprad	Schroef-waaierpomp
Vijzel	Schroefcentrifugaal-waaierpomp

De specifieke kenmerken van de hier voor genoemde opvoerwerktuigen zullen hierna nader worden toegelicht. Hierbij wordt opgemerkt dat hoewel het principe van de werking van stromingswerktuigen met de als eerste in de bemaling toegepaste centrifugaalwaaierpomp al heel lang bekend waren, dit toch relatief jonge werktuigen zijn. De sinds het begin van de 20^e eeuw met succes toegepaste schroef- en de schroefcentrifugaal- waaierpomp zijn in het stoomtijdperk bij gemalen nooit toegepast omdat ze aan het einde van het stoomtijdperk nog amper bestonden.

Aan het opvoerwerktuig moet energie worden toegevoerd door een uitwendige energiebron: in deze leidraad is dat voor de bemaling een stoommachine.

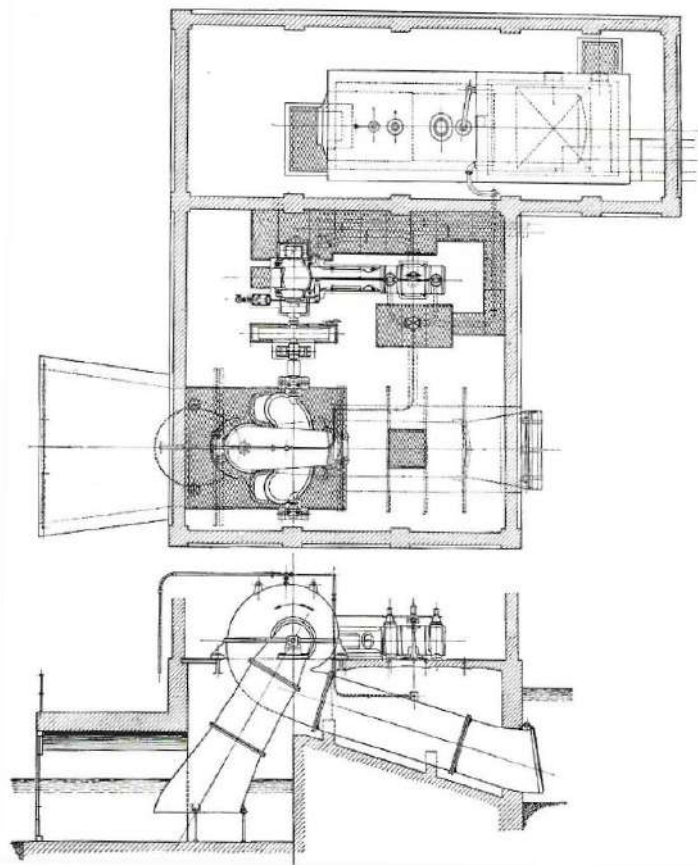
4.18.2 Natte pad

Onder het natte pad verstaan we het systeem dat het veilig opvoeren van water via bemaling, c.q. een gemaal mogelijk maakt, zonder gevaar van terug stromen van water en zonder risico van beschadiging van het opvoerwerktuig.

Het systeem bevat een aantal voorzieningen, waaronder als belangrijkste uiteraard het opvoerwerktuig, die voor het goed en veilig functioneren onontbeerlijk zijn.

De belangrijkste voorzieningen zijn, in volgorde van instroming naar uitstroming:

- Het krooshek
- Droogzet middelen
- Drijfschotten
- Het opvoerwerktuig
- Afsluitmiddelen
- Terugslagkleppen
- Wachtdeuren



Pompsysteem stoomgemaal met centrifugaalwaaierpomp

Omdat er essentiële verschillen bestaan tussen de werking en de opstelling van de diverse opvoerwerktuigen zijn niet alle systemen op dezelfde wijze ingericht. Ook zijn, veelal uit kostenoverwegingen, de systemen niet altijd even volledig uitgerust.

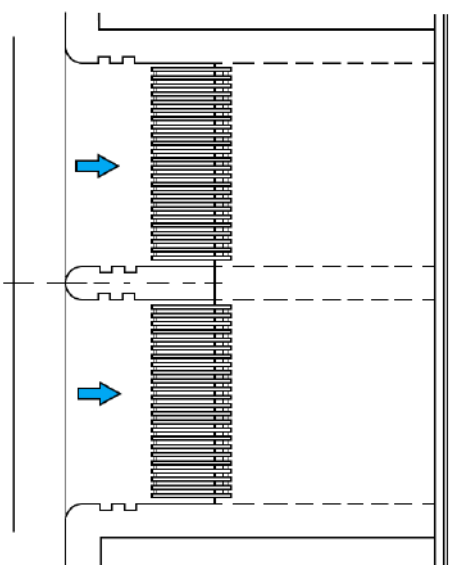
Met name ontbreken vaak de afsluitmiddelen of goede voorzieningen voor het droogzetten van de installatie voor inspectie en onderhoud van de onder de waterspiegel gelegen onderdelen.

Krooshek

Het krooshek dient er voor om losgeraakte en in het water drijvende vegetatie tegen te houden. Ook andere en met name harde voorwerpen, moeten door het krooshek worden tegen gehouden omdat deze het opvoerwerktuig kunnen beschadigen of verstoppem. Ook bij ijsgang vervult het krooshek een belangrijke functie door te voorkomen dat de harde schotsen de draaiende delen van het opvoerwerktuig raken.

Het krooshek bestaat uit een groot aantal onder een flauwe hoek naast elkaar opgestelde staven. De steek, de onderlinge afstand waarmee de kroosstaven worden geplaatst, wordt hoofdzakelijk bepaald door het type opvoerwerktuig. Een scheprad en een vijzel zijn aanmerkelijk minder verstoppingsgevoelig dan een pomp. Daarenboven heeft een grote pomp een grotere waaier doorlaat dan een kleine pomp en kan de steek derhalve evenredig groter of kleiner zijn. Krooshekken worden uit secties opgebouwd die aan de onderzijde tegen een aanslag liggen en aan de bovenzijde met bouten aan een boven aanslag zijn bevestigd.

Bij de oude stoomgemalen is het krooshek gemaakt van stevige houten regels van een duurzame houtsoort. Soms zijn deze krooshekken later vervangen door rond- of plat stafijzer al of niet gegalvaniseerd of met verf, soms nog koolteer, behandeld. De kroosstaven of houten regels rusten onder water tegen de onder- aanslag. Aan de bovenkant zijn ze met de zogenoemde boven aanslag aan de kroosbrug bevestigd. Veel oudere krooshekken zijn verticaal opgesteld en rusten aan de bovenkant tegen de aanslag. Deze opstelling bemoeilijkt het krozen (reinigen), een betere opstelling is onder een hoek van 15° met de verticaal en een afstand tot de bovenaanslag van minimaal de



Bovenaanzicht kroosvloer

tandlengte van de kroosshark waarmee het hek handmatig gereinigd wordt. Als er geen mechanische voorziening aanwezig is moeten de hekken handmatig worden gereinigd. Als het krooshek verstopt raakt door een overmaat aan vegetatie of ander drijvend vuil en bijvoorbeeld ook ijsschotsen, dan ontstaat -vaak in korte tijd- een groot waterpeil verschil tussen de voor-en de achterzijde van het krooshek en wordt dit door het diutengevolge wegvallen van de waterdruk aan de binnenzijde aan grote krachten blootgesteld. Dit kan tot schade aan het hek leiden en moet daarom vermeden worden. Ook zal het krozen moeilijker worden omdat het kroosvuil door het grote verval tegen het hek wordt gedrukt en loopt men het gevaar dat de pomp lucht zuigt en afslaat.

Schotbalken en sponningen

De normaal onder water gelegen delen van het pompsysteem alsmede de civiel technische constructies moeten van tijd tot tijd worden geïnspecteerd en daarom droog gezet kunnen worden. Een goed gemaal-ontwerp is daarom zowel aan de instroom- als aan de uitstroomzijde voorzien van twee schotbalksponningen en de daarbij behorende houten balken of schotten. Bij het droogzetten van de in- of uitstroomzijde worden de balken/schotten in de sponningen aangebracht en wordt de tussenliggende ruimte opgevuld met klei. De droog te zetten ruimte achter de schotten wordt vervolgens met een aparte pomp leeggepompt. Omdat tussen de balken/schotten onderling en de balken/schotten en de sponning kieren ontstaan door oneffenheden wordt meestal aan de onderste balk of onder aan het schot aan de drukzijde een zeildoek, tegenwoordig ook dik plastic, gespijkerd. Het doek voorkomt dat er water door de eventuele kieren en reten stroomt. Soms, en dat met hetzelfde doel, zijn de schotbalken voorzien van een trapeziumvormige groef. Als extra maatregel voor het verkrijgen van een goede afdichting wordt ook wel koolas uit de aspit van de stoomketel, in het water gestrooid. Zowel het aanbrengen als het later weer verwijderen van de schotbalken/schotten vergt de nodige behendigheid en ervaring. Omdat de balken als gevolg van de waterdruk aan grote krachten worden blootgesteld is het raadzaam om de balken voor gebruik te controleren op gebreken zoals houtworm en -rot zodat men zeker is van de vereiste sterkte.

Bij het droogzetten krijgt ten gevolge van de grondwaterdruk het drooggezette gedeelte een opwaartse kracht te verwerken. Deze kracht kan dermate groot zijn dat de vloer van het drooggezette gedeelte bezwijkt. Vóór het droogzetten moet dan ook worden nagegaan of er hier eventueel ballast op moet worden aangebracht. Bij oude fundatie technieken wordt gebruik gemaakt van houten heipalen en eveneens houten vloeren waarop de gemetselde fundaties en een afwerkvloer werden aangebracht. Deze oude en beproefde manier van funderen is duurzaam zolang zuurstof geen invloed kan uitoefenen op het hout. Daarom is het van groot belang dat de constructie altijd nat blijft en bij voorkeur onder een laagje water staat. Moderne gemalen zijn tegenwoordig slechts met een enkele schotbalksponning uitgerust. Bij de desbetreffende sponning hoort een soms uit een aantal delen opgebouwd stalen- of kunststof schot met rubberen randen voor de afdichting.

Drijfschotten

Bij onvoldoende verticale afstand van de waterspiegel tot de zuigmond van de pomp en een ongunstige aanstroom conditie kunnen vortexen (cycloonvormige luchtzuilen in het water) ontstaan waardoor lucht in de pomp wordt gezogen. De pomp verzet hierdoor minder water of slaat zelfs af. Vaak werd dit probleem geëlimineerd door een houten drijfschot rondom de zuigbuis van de pomp

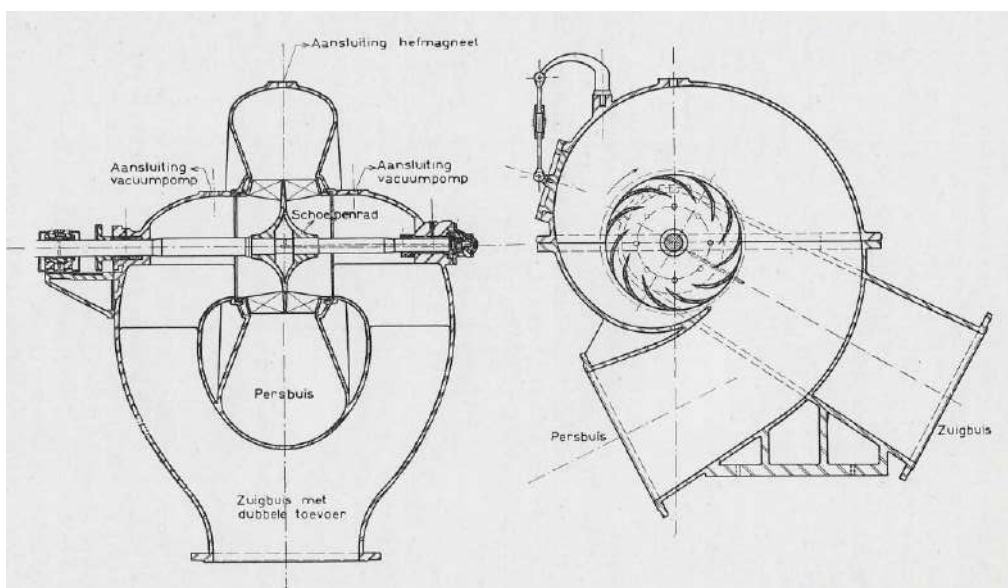


te plaatsen. Het schot gaat met het waterniveau mee omhoog en omlaag en zorgt ervoor dat met de eventueel gevormde vortex geen lucht mee de pomp in kan worden gezogen. Het probleem met vortexen werd ook wel opgelost door een aantal ballen in het water te gooien. De ballen worden in de vortex gezogen en zorgen er voor dat er geen lucht wordt meegenomen

Voorbeeld van een vortex

Opvoerwerktuig

Ondanks alle voorzieningen die worden getroffen om vuil te weren kan het voor komen dat een pomp verstopt raakt of dat het scheprad of de vijzel harde voorwerpen te verwerken krijgen. Pompen zijn daarom van een inspectiedeksel voorzien. Via het deksel kan doorgaans de verstopping worden opgeheven.



Inspectiedeksel centrifugaalwaaierpomp

De schroeflinten van vijzels zijn soms aan de onderkant van een versterking voorzien om schade te voorkomen. Bij door harde voorwerpen getroffen houten vijzels zal dit tot beschadiging en verbuigen van een of meerdere duigen van de schroeflinten leiden en zullen de beschadigde duigen vervangen moeten worden. Bij stalen vijzels moeten de verbogen delen door middel van warm stoken, buigen en hameren weer in vorm gebracht worden. Soms worden ernstig beschadigde delen er uit gesneden en nieuwe delen er in gelast. De bladen van schepraden worden uit voorzorg van relatief goedkoop vuren hout gemaakt en met slotbouten bevestigd. Mocht zich beschadiging voordoen dan kunnen dergelijke bladen snel en gemakkelijk vervangen worden.

Persafsluiter of schuiven

Afhankelijk van de locatie in een watersysteem moet een gemaal van een aantal onafhankelijk van elkaar werkende keringen zijn voorzien. Daarenboven is het van belang minimaal een van die keringen snel te kunnen sluiten in geval van een calamiteit of het uitvoeren van onderhoud of reparaties aan onderdelen van het systeem. Oude gemalen werden daartoe vaak uitgerust met een schuif- afsluiter, plaat- of dooschuif. In de loop der tijd zijn daar tol- en vlinderkleppen aan toegevoegd. Bij de schuifafsluiter, waarvan hieronder een foto wordt de doortocht afgesloten door een met een schroefspindel bewogen wigvormige gietijzeren schijf. De schijf is voorzien van bronzen afdichtingsringen en kan tot even voorbij de binnen-bovenkant van de boring worden opgetrokken. De afsluiters worden uitgevoerd met een zogenoemde stijgende- of niet-stijgende

spindel. Bij de uitvoering met de stijgende spindel bevindt de spindelmoer zich buiten de afsluiter waardoor de schroefdraad van de moer en de spindel niet vervuilen en goed gesmeerd kunnen worden. De spindel wordt door middel van een handwiel, al dan niet met een overbrenging, bewogen. Omdat het wigvormige afsluitorgaan al met een geringe krachtsinspanning muurvast op de zitting wordt gedrukt is het raadzaam na het sluiten het handwiel iets terug te draaien, zodanig dat de afdichtingsringen net lossen.



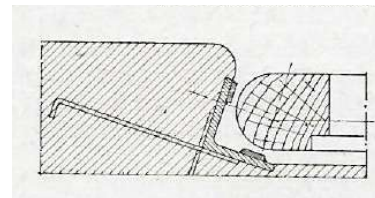
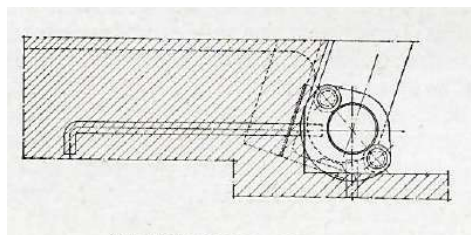
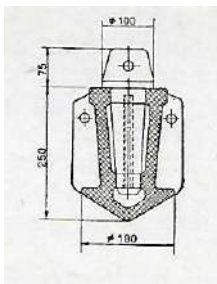
Een onhebbelijkheid van dit type afsluiter is dat de uitsparing onder in de afsluiter waar het afsluitorgaan bij sluiting in zakt, wordt opgevuld met slib of andere vaste delen waardoor deze niet meer sluit. De enige oplossing is dan de gehele installatie droog te zetten en het euvel via de persleiding te verhelpen of de afsluiter geheel of gedeeltelijk uit te bouwen.

In het verleden werd de noodzaak voor afsluitmiddelen wel eens omzeild door de pomp ruim boven het hoogst mogelijke boezem of buitenpeil op te stellen. Het water wordt dan in eerste instantie hoger opgevoerd dan noodzakelijk is; vanwege de hevelwerking kost dit nauwelijks extra energie. Als de hevel verbroken is kan er geen water terugstromen, wel is er bij een dergelijke oplossing een vacuüminstallatie nodig.

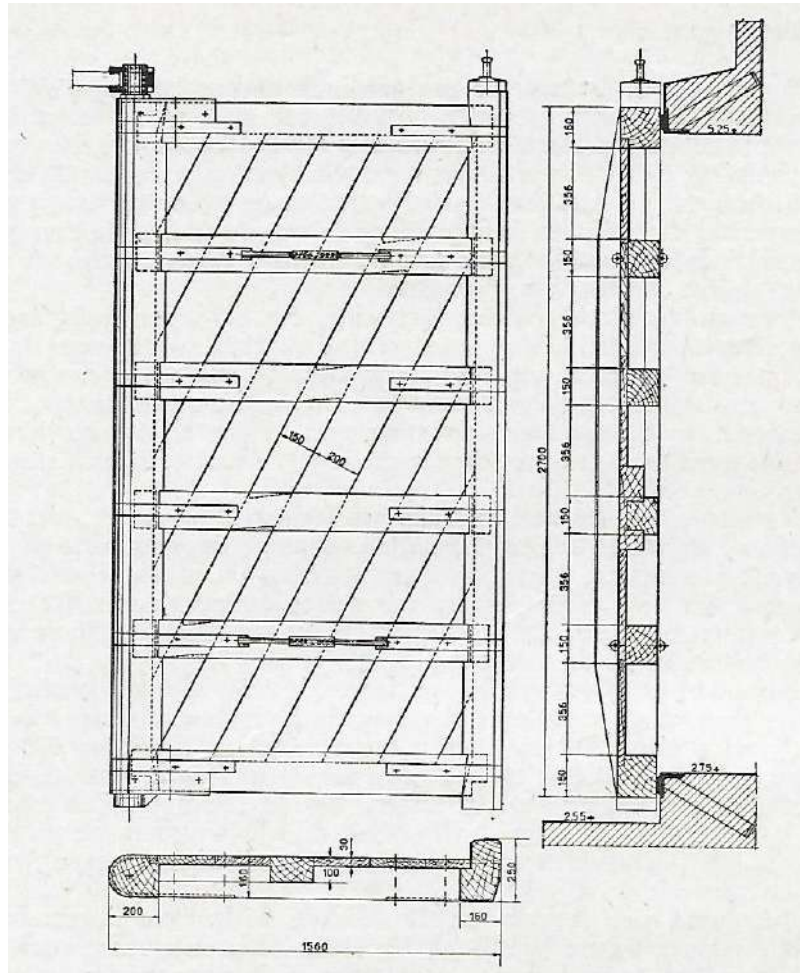
Schuifafsluiter

Wachtdeur/Terugslagklep

Om te voorkomen dat als het opvoerwerktuig stopt of wordt stopgezet er water terugstroomt, is het pompsysteem van een wachtdeur of een terugslagklep voorzien. De wachtdeur draait om een verticale as en wordt doorgaans toegepast in een open leidingsysteem terwijl de terugslagklep een horizontale draaiingsas heeft en uitsluitend wordt toegepast bij een gesloten leidingsysteem.

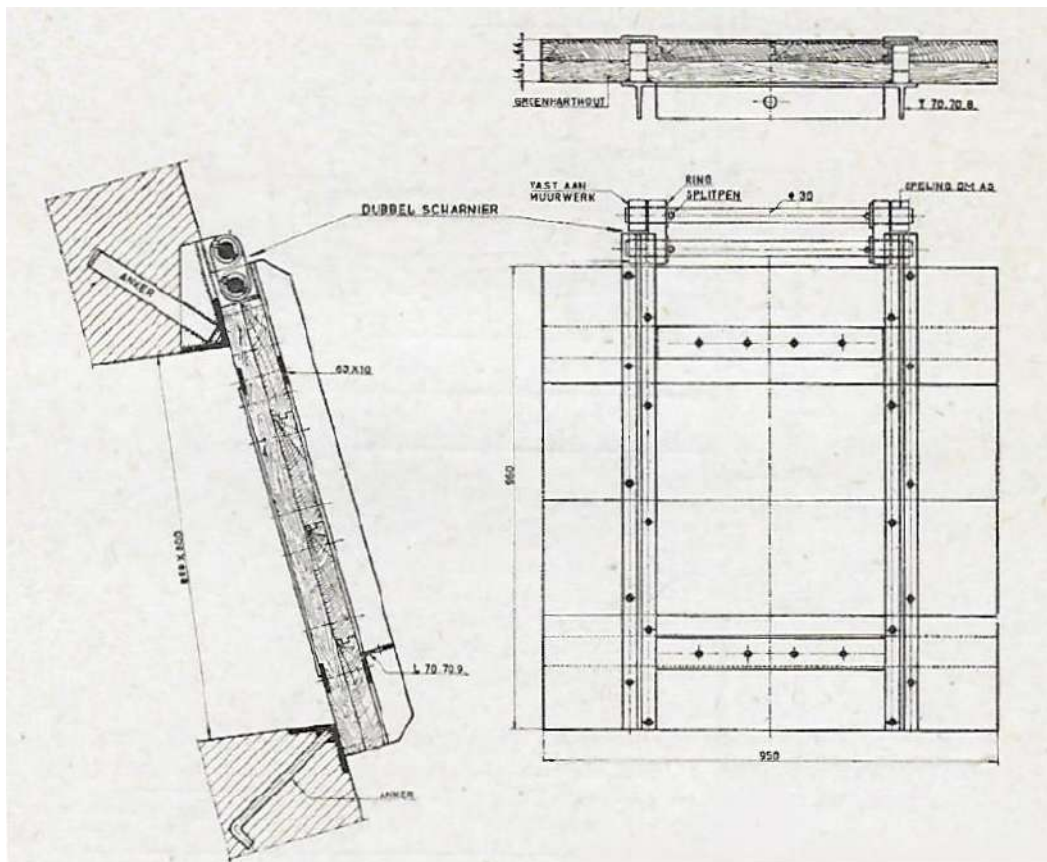


Constructie details wachtdeur



Houten wachtdeur

Zowel de wachtdeur als de terugslagklep werken door middel van niveauverschil dat wil zeggen waterdruk. Kleine wachtdeuren zoals die bij kleine schepraderen worden toegepast hebben een, soms dubbel opgeklampte, houten deur en idem aanslagframe. De gehengen zijn van gietijzer of van smeedstaal gemaakt. Grote pompeenheden zoals bij het ir D.F. Woudagemaal hebben wachtdeuren die qua constructie vergelijkbaar zijn met de puntdeuren van een suatie- of schutsluis. Deze deuren zijn voor een waterdichte afdichting niet dubbel opgeklampt maar worden gebreeuwd. Bij gemalen die op zout- of brak water uitslaan is men vanwege de daarin voor komende paalworm niet vrij in de keuze van de houtsoort en is men aangewezen op een aantal tropische houtsoorten zoals Demerara groenhart, Basralocus, Teak of het iets minder tegen paalworm resistente Azobé. De terugslagklep en het aanslagframe werden in het verleden ook van een dubbel opgeklampte harde- en watervaste houtsoort gemaakt en voorzien van gietijzeren of smeedstalen gehengen.

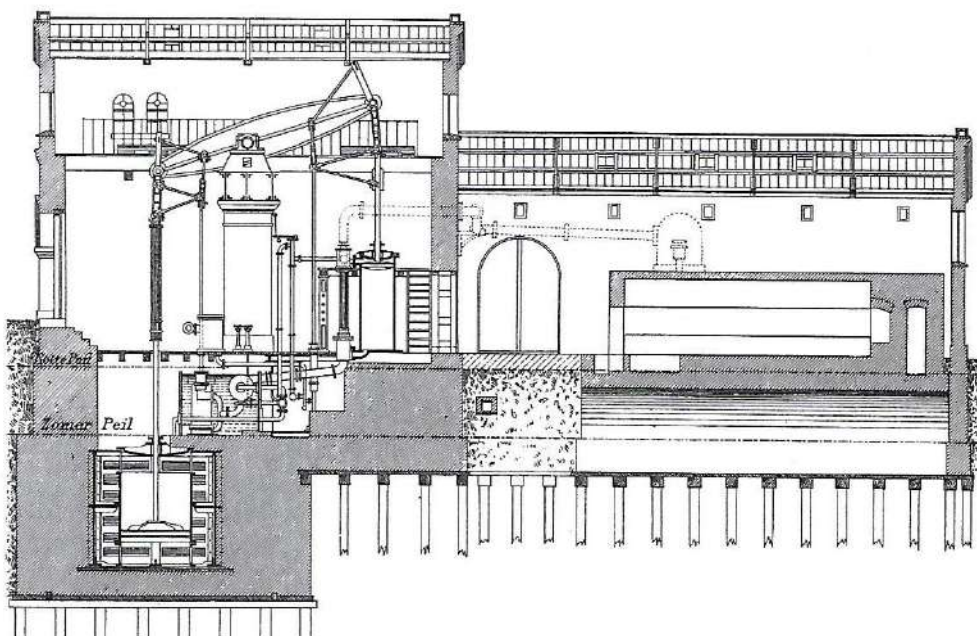


Houten terugslagklep (met dubbel scharnier)

Modernere uitvoeringen zijn inclusief het aanslagframe geheel van gietijzer en later van geconserveerd staal, aluminium of roestvast staal gemaakt. Voor de afdichting en het dempen van de klep bij het sluiten zijn de afdichtingsranden van de klep voorzien van een rubberprofiel. Belangrijke details bij kleppen zijn dat de gehengen bij het scharnierpunt van een slobgat zijn voorzien of dubbel scharnierend zijn uitgevoerd. Dit voorkomt dat de gehengen breken als zich bij het sluiten tussen de bovenkant van de klep en de aanslag een hard voorwerp bevindt. Verder moet de klep dusdanig zwaar zijn dat voordat de stroomrichting omkeert bij het stoppen de klep gesloten is. Gebeurt dit niet dan kan de sluitkracht als gevolg van het terugstromende water zo groot worden dat de klep vervormt of anderszins beschadigd raakt. Terugslagkleppen worden daarom vaak gebalanceerd, Dit is de reden dat men op een klep zware ijzeren delen aantreft die geen functie hebben voor de stijfheid van de constructie maar bijdragen aan de balans. Bij moderne vaak als een doos uitgevoerde kleppen wordt de aldus gevormde holle ruimte gedeeltelijk met een vloeistof gevuld om de klep te balanceren..

4.18.3 Zuigerpompen

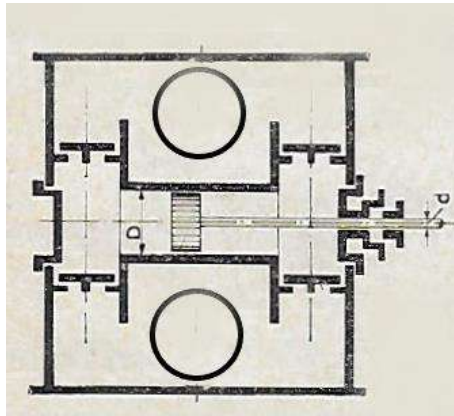
De eerste stoomgemalen in Nederland waren uitgeruste met zuigerpompen. Voor de invoering van de stoommachine was dit pomptype nog nooit toegepast voor de bemaling in Nederland. De vroege installaties werden zonder uitzondering uit Engeland geïmporteerd, waar de zuigerpomp zich bewezen had in de steenkoolmijnen. In Engeland werden zij dan ook heel toepasselijk als "Miners Friend" of "An Engine to Raise Water by Fire" aangeduid. De lineaire beweging van de aandrijvende, meestal verticaal opgestelde, stoommachine sloot goed aan bij die van de antieke zuigerpomp. Echter daar waar de mijnwaterpomp relatief geringe hoeveelheden water naar grote hoogtes moest opvoeren moest de bemalingspomp grote hoeveelheden water over slechts een paar meter opvoeren. Daarenboven was het polderwater vaak vervuild met grote hoeveelheden vegetatie en soms harde voorwerpen terwijl de verontreinigingen die de mijnwaterpomp te verwerken kreeg slechts bestonden uit eenvoudig met een zuigkorf op te vangen steentjes of steenkoolgruis.



Wester stoomgemaal (dubbel werkende verticaal opgestelde zuigerpomp)

Bij de zuigerpompen die we van de bemalingsinstallaties in Nederland kennen worden de volgende principes onderscheiden:

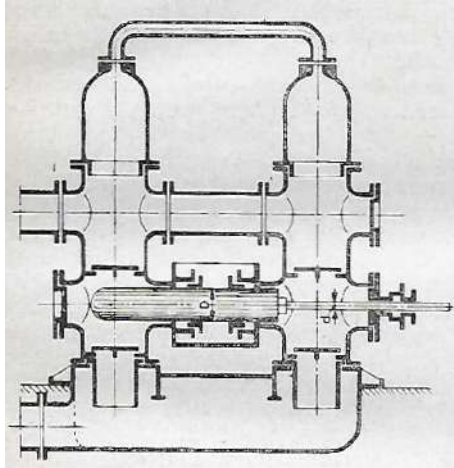
- Ten eerste de enkel- en dubbel werkende pomp. Bij een dubbel werkende pomp wordt bij elke slag water opgevoerd, hetzij aan de ene zijde dan wel aan de andere zijde van de zuiger of plunjer. Enkel werkende pompen voeren slechts één keer per twee slagen water op.



Dubbelwerkende zuigerpomp

- Ten tweede alleen zuigend of zuigend en persend. In het eerste geval, waar de pompen van het gemaal De Cruquius een voorbeeld van zijn, wordt het water net als met een schepemmer van een laag naar hoger gelegen punt - de stortvloer- gebracht. Het te verpompen water wordt weliswaar door de bewegende zuiger aangezogen maar er is vanwege het ontbreken van een gesloten afvoerleiding geen sprake van het onder druk brengen van het water. Wel wordt het water naar het gewenste boezem- of buitenpeil geperst. Bij de zuig-perspomp wordt eerst het water aangezogen en vervolgens weggeperst via een pompkamer of een gesloten leidingsysteem. Een dergelijk pompsysteem is bij het door Fijnje van Salverda ontworpen poldergemaal te Dreumel en het Wester stoomgemaal in Rotterdam toegepast.. Het grote verschil met het vorige pomp principe is dat deze min of meer gesloten zuigerpomp in principe ook boven polderpeil en horizontaal kan worden opgesteld en daarmee beduidend beter toegankelijk is voor onderhoud. Een voorbeeld hiervan is het stoomgemaal van de polder Abbenbroek uit 1879. Het boven polderwaterniveau opstellen van een zuigerpomp stelt overigens aanmerkelijk hogere eisen aan de zuigerafdichting, de ongehinderde doortocht en de vuilgevoeligheid van de zuig- en perskleppen van de desbetreffende pomp. De pomp is vanwege de grote ruimte tussen de zuig- en persklep niet zelf aanzuigend.

- Ten derde naar de aard van het pomporgaan: zuiger of plunjer. Een zuigerpomp heeft een verdringer in de vorm van een cilindrische schijf terwijl die van een plunjerpomp gezien kan worden als een verdikte zuigerstang die als zodanig bij een enkel- werkende pomp ook dienst doet.



Dubbelwerkende plunjerpomp

Werking en opbrengst verschillende pomptypen

Bij de boven aangehaalde pompen wordt het water door middel van een heen- en weer gaande verdringer (zuiger of plunjer) van de zuigzijde naar de perszijde gevoerd. Men noemt deze pomp horizontaal of verticaal als de verdringer respectievelijk in horizontale dan wel in verticale richting beweegt.

Wanneer de pompruimte tussen de zuig- en persklep gevuld is met water en de verdringer beweegt zich van de binnenste dode stand naar de buitenste dode stand dan daalt de druk in de pompcilinder en kan de luchtdruk het water in de zuigleiding aanvoeren en de zuigklep open drukken; men zegt dan dat de pomp aanzuigt. Is de middellijn van de verdringer D m dan is het oppervlak F :

$$F = \frac{\pi D^2}{4} \text{ [m}^2\text{]}$$

Maakt de verdringer een slag van s m dan zal de volgende hoeveelheid water worden aangezogen:

$$Q = F \cdot s \text{ [m}^3\text{]}$$

In het buitenste dode punt keert de bewegingsrichting van de verdringer om, waarna deze weer naar binnen beweegt. Door de druktoename in de pompcilinder sluit de zuigklep en opent de persklep, zodat gedurende de naar binnen gerichte slag het bij de vorige slag aangezogen volume weggeperst wordt.

Gedurende een omwenteling van de kruk (of twee slagen) is het slagvolume Q weggeperst. Maakt de enkelwerkende pomp n omwentelingen per minuut dan is dus theoretisch de wateropbrengst:

$$Q_{th} = F \cdot s \cdot n \text{ [m}^3\text{/min]}$$

Voor een dubbelwerkende pomp waar dus elke slag water oplevert is de opbrengst:

$$Q_{th} = 2 \cdot F \cdot s \cdot n \text{ [m}^3\text{/min]}$$

Bij de dubbelwerkende pomp moet, vooral bij de plunjerpomp, ook de stangdiameter in rekening worden gebracht. Als we het oppervlak van de stang f noemen dan wordt de formule voor de capaciteit voor deze pomp:

$$Q_{th} = (2 \cdot F - f) \cdot s \cdot n \text{ [m}^3\text{/min]}$$

De werkelijke effectieve opbrengst aangeduid met Q_e is door verschillende oorzaken kleiner. In de eerste plaats kan de pomp door lekkage van bijvoorbeeld de pakkingbus lucht aanzuigen die een even groot volume water inneemt. Vervolgens zullen de zuig- en perskleppen nooit precies sluiten als de verdringer zich in de dode stand bevindt, maar pas later, wanneer deze reeds van richting is omgekeerd. Ten gevolge van dit verschijnsel zal bij elke slag een hoeveelheid water van de perszijde naar de pompcilinder en van pompcilinder naar de zuigzijde terugstromen.

Steeds zal dus de werkelijke opbrengst Q_e kleiner zijn dan theoretische opbrengst Q_{th} . Hiervoor is in de techniek het begrip volumetrisch rendement ingevoerd. Het volumetrisch rendement ontstaat uit de volgende verhouding:

$$\eta_v = \frac{Q_e}{Q_{th}}$$

Een praktische waarde voor het volumetrisch rendement bij goed uitgevoerde pompen is 0,9 – 0,98. Behalve met het naar binnen lekken van lucht moet vooral bij polderwater ook rekening worden gehouden met in het water opgeloste lucht, die zich afscheidt in de zuigbuis en zich verzamelt in het hoogste punt van de pomp. Vooral de op machinekamer niveau (droog) opgestelde pompen zullen hiervan hinder ondervinden en zal het volumetrisch rendement lager zijn dan hier voor is aangegeven. Tijdens de persslag zal overigens de vrijgekomen lucht weer oplossen. Het is daarom van groot belang dat de pomp zo geconstrueerd en opgesteld is dat de lucht via de perskleppen kan worden afgevoerd en zich geen luchtophoping kan voordoen.

Theorie van de zuigwerking van een pomp.

In een aan één kant gesloten buis die na gevuld te zijn met het open einde in de vloeistof gedompeld wordt, kan de druk van de luchtdruk om de buis, evenwicht maken met een kolom vloeistof in de buis. Bij de zogenoemde bakbarometer meet men op deze wijze de luchtdruk. Men vult de buis met kwik en drukt de luchtdruk uit in mm kwikkolom. Deze druk neemt af met de toename van de hoogte boven de zeespiegel.

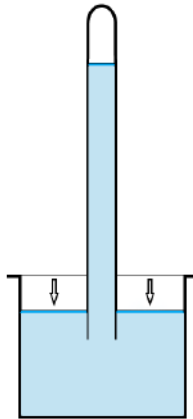
Hoogte boven de zeespiegel in m	0	100	200	300	400	500	600	800	1000	2000
Luchtdruk in mm kwikkolom	760	751	742	733	724	716	707	690	674	598
Luchtdruk in m waterkolom	10,3	10,2	10,1	9,9	9,8	9,7	9,6	9,4	9,2	8,1

Luchtdruktabel boven zeeniveau bij gemiddelde barometerstand

Bij een barometerstand van 760 mm kwikkolom zal dus de druk van de buitenlucht evenwicht maken met een kolom kwik van 760 mm, wanneer daar boven het absolute luchtledige heerst. Brengt men

boven de kwikkolom een druppel aether dan verdampt deze en de kolom komt zoveel lager te staan als de dampspanning van de aether.

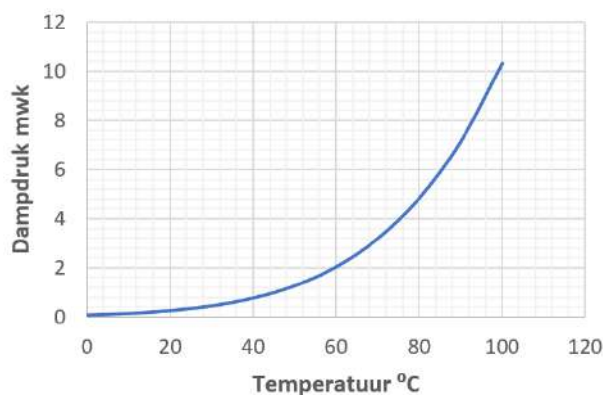
Bevindt zich in de buis water dan zal bij een barometerstand van 760 mm kwik van een soortelijk gewicht van $13,6 \text{ kg/dm}^3$ de luchtdruk een waterkolom van 10,3 m in evenwicht houden indien boven de waterkolom geen druk aanwezig is. Het soortelijk gewicht van water van 4°C is 1 kg/dm^3 .



$$p = \frac{760 \cdot 13,6}{1 \cdot 1000} = 10,336 \text{ [mwk]}$$

Principe barometer

Boven de waterkolom bevindt zich echter waterdamp. Men kan deze dampspanning niet verwaarlozen zoals we uit de stoomtabel kunnen afleiden en hier in onderstaande grafiek wordt



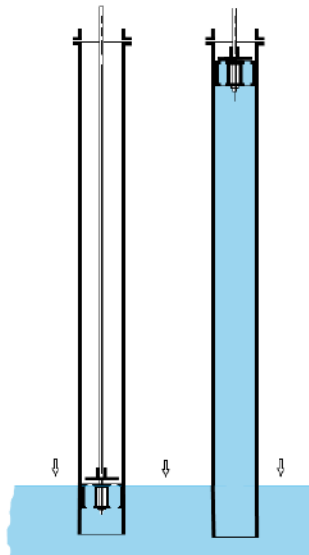
weergegeven. We weten dat de maximum druk van verzadigde waterdamp van 20°C 0,24 mwk is, zodat boven een kolom water met een temperatuur van 20°C steeds een druk van ten minste 0,24 mwk aanwezig is. Dit laatste is van belang te weten bij het begrijpen van de werking van een pomp in het algemeen en in het bijzonder voor pompen die boven de vloeistofspiegel staan opgesteld of die een vloeistof met hoge temperatuur moeten verpompen.

Dampdruk water bij verschillende temperaturen

Bij een barometerstand van 76 cm kwikkolom zal dus een kolom water van 20°C in evenwicht gehouden kunnen worden die $10,33 - 0,25 = 10,09 \text{ m}$ hoog is.

Beweegt men een zuiger die men eerst tot in het waterniveau heeft laten dalen tot er geen lucht meer onder aanwezig is, langzaam omhoog, dan zal het water de zuiger tot het niveau van 10,09 m volgen.

Beweegt men de zuiger met een zekere snelheid omhoog, dan moet het water dat in rust was, onder in de buis op snelheid worden gebracht. Hiervoor is een zekere druk nodig wat men als volgt verklaren kan aan de hand van de hier onder getekende figuur van een vat met een uitstroomopening op een hoogte h van de vloeistofspiegel in dat vat. Wanneer uit de opening een



waterdeeltje stroomt met een massa m en een snelheid van c m/sec dan heeft dit deeltje het volgende Arbeidsvermogen Van Beweging:

$$A. V. B. = \frac{1}{2} m \cdot c^2 \text{ [kgm]}$$

Om de hoogte h van de waterspiegel tot de uitstroomopening constant te houden moet ter hoogte van de waterspiegel een massadeeltje worden toegevoegd. Dit massadeeltje heeft ten opzichte van de uitstroomopening een Arbeidsvermogen Van Plaats van:

$$A. V. P. = m \cdot g \cdot h \text{ [kgm]}$$

Hierin is g de versnelling van de zwaartekracht in m/sec^2 .

Principe werking zuigerpomp

Wanneer men de stromingsweerstand verwaarloost moeten de beide arbeidsvermogens aan elkaar gelijk zijn, dus moet:

$$\frac{1}{2} m \cdot c^2 = m \cdot g \cdot h \text{ [kgm]}$$

Dus:

$$c^2 = 2 \cdot g \cdot h$$

Of de uitstroomsnelheid is:

$$c = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \text{ [m/sec]}$$

De vloeistof hoogte bedraagt:

$$h = \frac{c^2}{2g} \text{ [m]} \text{ [mvk]}$$

Bepaling statische- en snelheidshoogte

Hierin is h uitgedrukt in m vloeistofkolom. Een vloeistofkolom van h meter oefent op een vlak van 1 m^2 een kracht uit die gelijk is aan het gewicht van h kubieke meter vloeistof. Als γ (gamma) het soortelijk gewicht uitgedrukt in kg/m^3 is dan is de druk die deze kracht veroorzaakt:

$$p = \gamma \cdot h \text{ [kg/m}^2\text{]}$$

De hier voor afgeleide vergelijking kan men daarom ook schrijven als:

$$p = \gamma \cdot \frac{c^2}{2g} \text{ [kg/m}^2\text{]}$$

Wanneer een vloeistof stroomt met een snelheid van c m/sec kan zij door deze snelheid loodrecht op de stromingsrichting een druk uitoefenen die we kunnen uitdrukken in mvk of in kg/m^2 . Deze druk werkt niet op de wanden en kan daarom niet met een manometer worden gemeten die haaks op die wand is aangesloten. Bij het afleiden van de hier voor gegeven formules is uitgegaan dat de beschikbare statische hoogte volledig wordt omgezet in snelheidshoogte hetgeen zoals we later zullen zien niet altijd het geval is.

Omdat we bij berekeningen aan pompen van gemalen met de vloeistof polderwater te doen hebben wordt de term mvk meestal weergegeven met mwk of in sommige oude studieboeken met m W.K. Verder geven de manometers die we gebruiken meestal de druk weer in kg/cm^2 en niet de bij de afgeleide formules gebruikte kg/m^2 . Een waterkolom met een oppervlak van 1 m^2 en 10 m hoog weegt 10.000 kg . Als we dit gewicht verdelen over 1 cm^2 in plaats van 1 m^2 : dus delen door 100×100 , dan krijgen we 1 kg/cm^2 . We maken geen grote fout als we bij berekeningen 10 mwk gelijkstellen aan 1 kg/cm^2 .

Voorbeeld:

De zuiger van het hier voor gegeven voorbeeld van het principe van een zuigerpomp beweegt met een snelheid van 2 m/sec omhoog terwijl het polderwater 20°C is.

Gevraagd:

Tot welke hoogte zal het water de zuiger met dezelfde snelheid blijven volgen als de barometerstand 75 cm kwik is?

Hoe hoog zal de absolute druk onder tegen de zuiger zijn, wanneer deze op een hoogte van 4 m boven de waterspiegel om de pompcilinder heen is gekomen?

Hoe hoog zal bij deze stand die druk zijn, wanneer de zuiger daar stil staat?

Oplossing:

De luchtdruk p bij de vraag over het volgen van de zuiger in de lange cilinder is:

$$p = \frac{750 \cdot 13.6}{1 \cdot 1000} = 10,2 \text{ [mwk]}$$

Door het op snelheid brengen van het water onder in de cilinder heeft het een dynamische druk verkregen van:

$$h = \frac{c^2}{2g} = \frac{2^2}{2 \cdot 9,81} \approx 0,2 \text{ [mwk]}$$

De dampdruk van het water, dat is de minimum druk die onder de zuiger kan heersen, volgens de hier voor gegeven grafiek of stoomtabel is 0,24 mwk. Noemen we de gevraagde hoogte x dan geldt:

$$10,2 = x + 0,24 + 0,2 \text{ [mwk]}$$

Of anders geformuleerd:

$$x = 10,2 - (0,24 + 0,2) = 9,76 \text{ [mwk]}$$

Komt de zuiger op deze hoogte dan zal het water achterblijven op de zuigerbeweging, maar met afnemende snelheid verder stijgen totdat het op de volgende hoogte tot rust komt.

$$10,2 - 0,24 = 9,96 \text{ [mwk]}$$

Bij de vraag over de druk onder tegen de bewegende zuiger bij 4 meter, wordt van de luchtdruk 0,2 mwk omgezet in dynamische druk en was 4 mwk nodig om de waterkolom onder de zuiger omhoog te houden. De absolute statische druk, gerekend vanaf 0, is dus:

$$p_{\text{abs}} = 10,2 - (0,2 + 4) = 6 \text{ [mwk}_{\text{abs}}\text{]}$$

De dampdruk van het water heeft hierop geen invloed, deze geeft alleen het minimum aan dat bereikt kan worden. Had het water bijvoorbeeld een temperatuur van 90 °C waarbij een dampspanning hoort van 7,14 mwk, dan zou de hoogte van 4 meter niet bereikt kunnen worden maar slechts een hoogte van:

$$h = 10,2 - (7,14 + 0,2) = 2,86 \text{ [mwk]}$$

De absolute druk onder de zuiger als deze stil staat is:

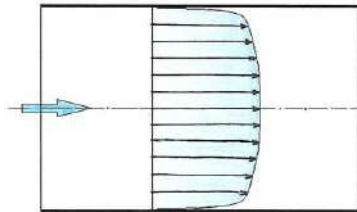
$$p_{\text{abs}} = 10,2 - 4 = 6,2 \text{ [mwk}_{\text{abs}}\text{]}$$

Wanneer het water dat de zuiger volgt daarbij nog andere weerstanden ondervindt zoals bijvoorbeeld wrijvingsweerstand tijdens het stromen, dan kunnen die ook in mwk worden uitgedrukt en moeten deze van de beschikbare theoretisch beschikbare stijghoogte als gevolg van de luchtdruk worden afgetrokken. Zijn deze verliezen bijvoorbeeld 1,5 mwk dan wordt de absolute druk onder de zuiger:

$$p_{\text{abs}} = 10,2 - (0,2 + 4 + 1,5) = 4,5 \text{ [mwk}_{\text{abs}}\text{]}$$

Stromingsweerstand

Bij de stroming van een vloeistof door een buis onderscheidt men laminaire stroming en turbulente stroming. Als een vloeistof met een geringe snelheid door een buis stroomt blijkt dat de snelheid



van de vloeistof aan de wand geringer is dan de snelheid in het midden van de buis. De vloeistof beweegt laagsgewijs wat we een laminaire stroming noemen. Als de vloeistofsnelheid opgevoerd wordt, zullen, in plaats van dit laagsgewijs verplaatsen van de vloeistof, bij een bepaalde snelheid de vloeistofdeeltjes door elkaar gaan bewegen. Men spreekt dan van een turbulente stroming.

Verdeling snelheid laminaire stroming

Bij nadere bestudering van dit verschijnsel is vastgesteld, dat de overgang van een laminaire naar een turbulente stroming afhankelijk is van de stroomsnelheid, de buisdiameter en van de viscositeit van de vloeistof. O. Reynolds heeft aangetoond dat het al of niet laminair zijn van een stroming afhankelijk is van het hierna volgende en naar hem genoemde kengetal van Reynolds. Een stroming is laminair indien:

$$Re = \frac{c \cdot d}{\nu} \leq 2320$$

Hierin is:

Re	=	Getal van Reynolds	
c	=	Vloeistofsnelheid	m/sec
d	=	Buisdiameter	m
ν	=	Kinematische viscositeit (nu)	m ² /sec

De weerstand die een vloeistof ondervindt, wanneer deze door een buis stroomt, kan worden voorgesteld door de formule:

$$h_w = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{c^2}{2g} [\text{mwk}]$$

Hierin is:

h_w	=	Weerstand	mwk
λ	=	Weerstandscoefficiënt (lambda)	m/sec
l	=	Leiding lengte	m
d	=	Buisdiameter	m
g	=	Versnelling van de zwaartekracht	m/sec ²

Indien een stroming turbulent is betekent dit nog niet dat het vloeistoflaagje dat onmiddellijk aan de buiswand raakt in turbulente beweging is.

Bij bepaalde snelheden blijkt namelijk dat dit grenslaagje een laminair stromingsbeeld geeft en de turbulente hoofdstroom verhindert de oneffenheden van de buiswand te raken. Deze grenslaag kan worden gezien als een smeerfilm. Men spreekt in dat geval over een hydraulisch gladde buis.

Als de stroomsnelheid wordt opgevoerd zal de grenslaag dunner worden en tenslotte verdwijnen. Men spreekt dan over een hydraulisch ruwe wand.

Dat de wandruwheid maar ook de diameter van een buis bepalend is voor de weerstand die de vloeistofstroom in de buis ondervindt mag duidelijk zijn. De wandruwheid wordt met k in mm aangeduid en is proefondervindelijk met zandkorrels van verschillende grootte vastgesteld. Voor verschillende leidingdiameters, k -waarden en Re -getallen zijn tabellen beschikbaar waaruit de weerstandscoefficiënt λ kan worden afgelezen.

De weerstandscoefficiënt λ kan bij het ontbreken van een tabel ook berekend worden met de volgende empirische formule:

$$\lambda = 0,02 + \frac{0,0018}{\sqrt{c \cdot d}} \text{ [m/sec]}$$

In de hydraulica maakt men gebruik van het zogenoemde weerstandsgetal ζ (zeta). Dit getal wordt gebruikt voor rechte stukken leiding maar ook voor bochten, verloopstukken en allerlei soorten appendages.

$$\zeta = \lambda \frac{l}{d}$$

Dit onbenoemde getal ingevoerd in de eerder afgeleide formule voor het drukverlies geeft:

$$h_w = \zeta \cdot \frac{c^2}{2g} \text{ [mwl]}$$

Door fabrikanten en leveranciers van buisleidingen en seriematig gefabriceerde appendages zijn de weerstandswaarden proefondervindelijk bepaald of met behulp van ervaringscijfers afgeleid. Deze waarden zijn in tabellen en grafieken samengevat en zijn voor de ontwerper van een hydraulisch systeem beschikbaar.

Onderdeel	Weerstandsgetal (ζ zeta)
Zuigmond met rechte hoeken	0,8 – 1,0
Zuigmond afgerond trompetvormig	0,1 – 0,2
Intrede in de zuigklep	0,1
Schuifafsluiter	0,1 – 0,3
Kleppen en terugslagkleppen	2,0 – 5,0
Leiding (recht per meter $d = 0,90$ m, $v = 2,5$ m/sec)	0,023
Leidingbocht (knik 30 ° - 45 °)	0,2 – 0,4
Leidingbocht (knik 90 °)	1,2
Rechte uitstroomstuk	1,0 – 1,1

Weerstandsgetalen voor gemaal onderdelen

In de hier voor afgebeelde tabel worden een aantal weerstandsgedaten van bij gemalen voorkomende pomp-onderdelen en systeem appendages weergegeven.

Uit de bovenstaande tabel kan worden afgeleid dat scherpe bochten en nauwe en of gesmoorde doortochten zoals kleppen, in een hydraulisch systeem veel weerstand opleveren en zoveel als mogelijk vermeden dienen te worden.

In de pomp techniek kom je met betrekking tot de druk dan wel de opvoerhoogte een aantal termen tegen die van belang zijn om ze te kennen.

Statische opvoerhoogte

Met de statische opvoerhoogte wordt bedoeld het verschil in mwk tussen het polderpeil en dat van de boezem, c.q. van het water waarheen opgevoerd wordt . Deze hoogte noemt men ook wel de geodetische of geometrische opvoerhoogte en wordt aangeduid met H_{stat} . Dit is de hoogte waarover de pomp het water zou moeten opvoeren als er geen verliezen zouden zijn.

Manometrische opvoerhoogte

De pomp moet echter ook de weerstand in de zuig- en persleiding kunnen overwinnen. De statische opvoerhoogte met daarbij opgeteld de drukverliezen in de leidingen noemt men de manometrische op- voerhoogte; aangeduid met H_{man} . Deze opvoerhoogte wordt evenals de statische opvoerhoogte ook uitgedrukt in mwk. Bij een zuigerpomp in bedrijf kan men deze vinden door de absolute druk in de perswindketel te verminderen met die van de zuigwindketel en het niveauverschil tussen de twee ketels hierbij op te tellen. De manometrische opvoerhoogte is samen met de capaciteit een gegeven dat door de leverancier of de fabrikant van de pomp wordt verstrekt aan de gebruiker. Hierbij wordt opgemerkt dat in de hier voor genoemde drukverliezen van de leidingen de omzetting van statische- in dynamische druk is begrepen. Dit verlies wordt twee maal in rekening gebracht omdat, anders dan bij een centrifugaal waaier- pomp, deze dynamische druk in de zuigwindketel niet weer wordt omgezet in statische druk maar verloren gaat door wervelingen.

Theoretische opvoerhoogte

Men noemt de manometrische opvoerhoogte met daarbij opgeteld de drukverliezen voor het overwinnen van de weerstanden en het versnellen van de watermassa bij het zuigen en persen in de pomp zelf, de theoretisch opvoerhoogte; aangeduid met H_{th} . De theoretische opvoerhoogte is dus ook gelijk aan de statische opvoerhoogte met daarbij opgeteld de drukverliezen in de pompleidingen en de pomp zelf.

Om een opvoerhoogte H_{man} te verkrijgen moet aan het water een drukverhoging van H_{th} gegeven worden. Men noemt nu de verhouding tussen die twee het hydraulisch rendement η_h dat wordt uitgedrukt in procenten van H_{man} .

Het hydraulisch rendement van de pomp is dus:

$$\eta_h = \frac{H_{\text{man}}}{H_{\text{th}}} \cdot 100 [\%]$$

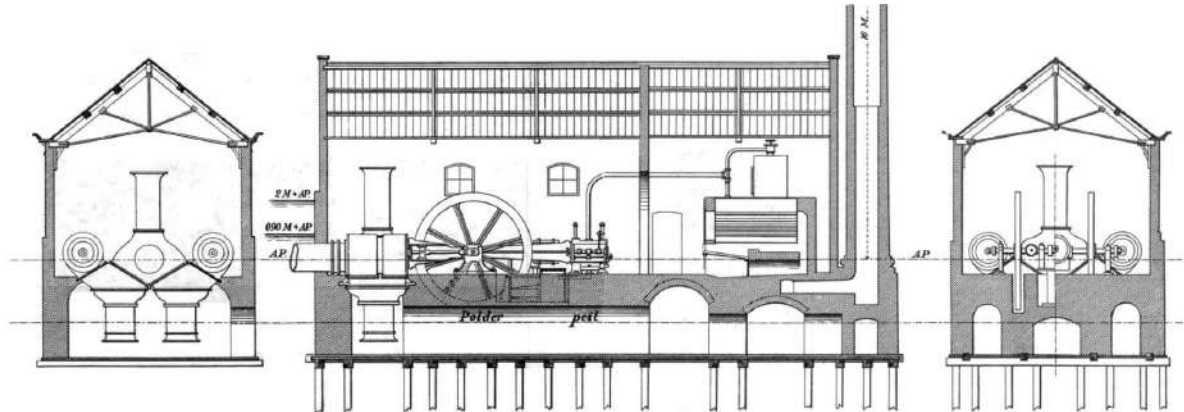
De theoretische opvoerhoogte wordt voornamelijk gebruikt voor het bepalen van het benodigde aandrijf vermogen van de pomp.

Windketels

Het pomplichaam van de zuiger- of de plunjerpomp maakt geen eenparige heen- en weer of op- en neer gaande beweging. De snelheid varieert van 0 naar maximum en omgekeerd en wanneer de zuig- en de persleiding direct op de pompcilinder aangesloten zijn zal de snelheid van het water in deze leidingen in die zelfde mate veranderlijk zijn. Bij een enkelwerkende pomp zal gedurende de zuigende slag het water in de persleiding in rust zijn, evenals het water in de zuigleiding bij de persende slag. Om een meer gelijkmatige snelheid van het water in de zuig- en persleiding te krijgen brengt men zo dicht mogelijk bij de pomp in elke leiding een zogenoemde windketel aan die als buffer-reservoir werkt, waarin boven het water een luchtruimte aanwezig is. Neemt bijvoorbeeld gedurende het zuigen het volume water in de zuigwindketel af dan wordt het luchtvolume evenveel groter en daalt de druk van de lucht. De druk verandering is kleiner naarmate het luchtvolume in de windketel groter is ten opzichte van het slagvolume van de pomp. Het druk verschil tussen de luchtdruk van de buitenlucht en de druk in de windketel verandert dan ook minder en daarmee ook de snelheid van het water in de leiding tussen de pers- en zuigwindketel. Een geheel overeenkomstige redenering geldt voor de perswindketel.

Voor een enkelwerkende zuiger- of plunjerpomp aangedreven door middel van een kruk- drijfslag mechanisme en met een drukschommeling van ongeveer 5 % houdt men een luchtvolume aan van 11 x het slagvolume. Bij een dubbelwerkende pomp is dat een stuk gunstiger en kan men volstaan met 4 x het slagvolume. Bij een bemalingspomp met een capaciteit van ongeveer 60 m³/min, een zuiger diameter van 800 mm en een slag van 1000 mm, zou dit betekenen dat het volume van de windketel bij een enkelwerkende pomp 5,5 m³ zou moeten zijn. Ook bij de dubbelwerkende pomp is nog een aanzienlijk luchtvolume nodig van 2 m³ om de drukschommeling in toom te houden.

Bij gemalen, behoudens de gemalen die waren uitgerust met boven de waterlijn opgestelde pompen, ontbraken de windketels. De pompen van die gemalen zijn onder het polderwater niveau opgesteld en werden met behulp van balansarmen rechtstreeks door de stoommachine aangedreven. Door de gemiddelde zuigersnelheid van de stoommachine laag te houden en op het eind en het begin van de slag gecontroleerd af te remmen dan wel op snelheid te brengen, traden minder grote versnellings- maar ook vertragskrachten op. Daarenboven konden de pompen via de zuig- en perskleppen water naleveren.

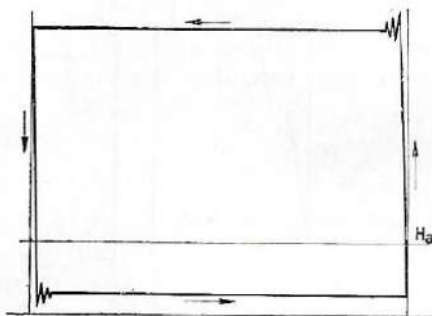


Gemaal Abbenbroek (tweeling dubbelwerkende zuigerpomp)

De boven de waterlijn opgestelde bemalingspompen die meestal ook een expansie stoommachine en dus een kruk- drijfslagmechanisme hebben, hadden wel windketels of zoals bij het gemaal Abbenbroek een soort druktoeren. Van deze overigens weinig toegepaste installaties is helaas van de inrichting van de toegepaste pomp nog maar weinig meer bekend.

Vermogen

Evenals bij een stoommachine en de verbrandingsmotor wordt bij zuiger- en plunjerpompen het drukverloop in de cilinder grafisch voorgesteld door een aan de pomp opgenomen indicator diagram. Tevens kan men met behulp hiervan de eventuele gebreken in de constructie of de werking vaststellen. In de hiernaast afgebeelde figuur is links boven het einde van de slag bereikt en keert de bewegingsrichting van de zuiger om, waarbij de druk snel daalt. Indien de persklep precies in het dode punt sluit, zal bij afwezigheid van lucht door de onsamendrukbaarheid van het water deze drukdaling plotseling en volgens een verticale lijn moeten geschieden. Omdat de persklep altijd iets later en niet ineens volledig sluit vloeit nog een kleine hoeveelheid water uit de persruimte terug in de pompcilinder. Ook zal bij afnemende druk enige lucht oplossen. Samen met het terug vloeiende water uit de persruimte zorgt dit er voor dat de lijn iets schuin staat of bij veel lucht zelfs afbuigt.



Theoretisch indicatordiagram zuigerpomp

Bij het verder bewegen van de zuiger opent, als de druk ver genoeg gedaald is om de weerstand van de zuigklep te overwinnen, de zuigklep. Zodra de klep opent, wordt de weerstand kleiner en neemt de druk weer plotseling toe; er treden drukgolven op die door de indicator worden opgetekend. Afhankelijk van de snelheid van de zuiger en het functioneren van de windketels zal een min of meer rechte iets naar onder toe doorbuigende horizontale lijn ontstaan die de absolute zuigdruk weergeeft. De drukstijging tijdens het begin van de persende slag zal ook volgens een hellende verticale lijn worden opgetekend. Ook hier zal, om dezelfde reden als bij de zuigklep, de

persklep niet spontaan geopend blijven en drukgolven veroorzaken. De perslijn wordt hier als een vlakke lijn voorgesteld. In de werkelijkheid zal deze iets bol verlopen. In het diagram stelt in een bepaalde verhouding het drukverschil tussen de bovenste en de onderste lijn de theoretische opvoerhoogte voor, dat wil zeggen de manometrische opvoerhoogte met daar- bij opgeteld de verliezen in het leidingsysteem. De afstand tussen de loodlijnen van de vertikalen geeft, ook weer in verhouding, de hoeveelheid verpompt water weer, dus het oppervlak van het diagram als het theoretische vermogen.

Het indicator vermogen van de pomp kan daarom geschreven worden als:

$$P_i = \frac{Q_{th} \cdot H_{th} \cdot 1000}{75 \cdot 60} = \frac{Q_{th} \cdot H_{th}}{4,5} \text{ [pk]}$$

Of:

$$P_i = \frac{Q_{th} \cdot H_{th}}{4,5} \text{ [pk]}$$

Hierin is Q_{th} in m³/min en H_{th} in mwk uitgedrukt.

Het aan de zuigerstang of de pompas toe te voeren vermogen is echter groter omdat het zogeheten effectieve vermogen groter moet zijn omdat een gedeelte verloren gaat door wrijving in de pomp en de aandrijving. Evenals bij een stoommachine voert men nu het begrip mechanisch rendement in, of mechanisch nuttig effect. Het mechanisch rendement wordt voorgesteld door:

$$\eta_{mech} = \frac{P_i}{P_e}$$

Het aan de pompas of de zuigerstang toe te voeren vermogen wordt dan als volgt bepaald:

$$P_e = \frac{Q_{th} \cdot H_{th}}{4,5 \cdot \eta_{mech}} \text{ [pk]}$$

Constructieve aspecten

Voor zuiger- en plunjerpompen dienen een aantal constructieve aspecten in acht te worden genomen. Een aantal hiervan die van toepassing zijn op de pompen voor polderwater worden hierna toegelicht aan de hand van een paar voorbeeld bemalingsinstallaties.

Hoofdafmetingen

De verhouding van de slag en de diameter van de verdringer kiest men groter naarmate de opvoerhoogte groter is, teneinde te grote stangkrachten te voorkomen. Voor een opvoerhoogte tot 40 mwk hanteert men:

$$\frac{s}{D} = 0,7 - 1,4$$

De slag in verhouding tot de zuigerdiameter van de pompen van het stoomgemaal Cruquius is bijvoorbeeld 1,6 en die van het Wester stoomgemaal 1,2. Hoe kleiner de slag is, des te groter mag het toerental van de aandrijvende (stoom)machine zijn, terwijl bij een gelijkblijvende opbrengst het slagvolume van de pomp kleiner kan zijn. De zuigersnelheid en daarmee ook de hydraulische verliezen nemen daarbij wel toe.

De gemiddelde zuigersnelheid kan tot 2,4 m/sec bedragen: deze voor pompen betrekkelijk hoge snelheid komt vooral voor bij pompen die rechtstreeks dus zonder kruk-drijfslagmechanisme, door de stoommachine worden aangedreven.

Cilinders en klepkasten

In normale gevallen is het materiaal van de pompcilinder, de klepkast het pomphuis van gietijzer. De wanddikte s kan wanneer zij klein is ten opzichte van de cilindermiddellijn, en dus de spanning gelijkmatig over de doorsnede is verdeeld, berekend worden met de formule:

$$s = \frac{p \cdot D}{2 \sigma}$$

Hierin is p de inwendige druk in kg/cm^2 , D de inwendige diameter in cm en σ de toelaatbare materiaalspanning in kg/cm^2 . In verband met de veranderlijke, dikwijls stotende belasting, neemt men σ toelaatbaar kleiner naarmate het toerental of beter gezegd de zuigersnelheid groter wordt.

Plunjers

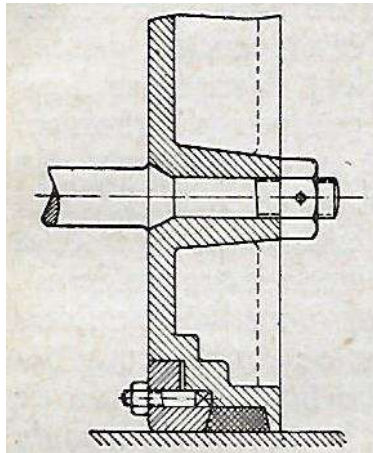
Het materiaal van de plunjers is gietijzer, brons of staal. Plunjers van gietijzer of brons worden bij niet al te kleine diameter hol gegoten. Verwacht men brak water te verpompen dan worden de plunjers van brons gemaakt of bekleed met een bronzen voering. Het einde van de plunjer wordt meestal bol uitgevoerd om vooral bij snellopende pompen de botsingsverschijnselen te verminderen. De dichting van de plunjer in de cilinderwand wordt verkregen door een pakkingbus of door de plunjerstang dan wel de plunjer zelf te laten lopen in een bronzen bus, waarin zij nauwkeurig past. Bij een lengte van 3 x de diameter van de plunjer wordt een goede afdichting verkregen. Soms wordt een dergelijke bus van een witmetaal voering voorzien met labyrintgroeven. De plunjer moet over de gehele lengte zuiver glad worden gedraaid. Verder hoeven alleen de pakkingdrukker en de grondring die voor de geleiding zorgen zuiver op maat uitgedraaid te worden.

Zuigers

Het materiaal van de zuiger bij bemalingspompen is meestal van gietijzer. De dichting van de zuiger bestaat vaak uit een week dichtingsmateriaal zoals gevlochten strengen hennep die door het losse deksel van de zuiger samengedrukt worden tegen de trapeziumvormige kamer aan de omtrek van de zuiger. Soms gebruikt men hiervoor de hardere geïmpregneerde strengen hennep die in een rechthoekige kamer worden aangebracht en voor het plaatsen in de cilinder op de gewenste cilindermaat worden gedraaid.

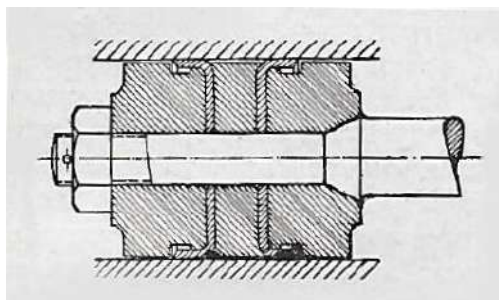
Ook pokhout dat door het water zelf gesmeerd wordt bewijst in de vorm van houten klossen die pas gedraaid worden goede diensten. Men moet hierbij er goed op letten dat het kopse gedeelte van het hout naar de cilinderwand is gericht.

Eenmaal verwerkt en gebruikt als zuigerafdichting mag pokhout niet meer droog worden omdat het dan krimpt en de goede eigenschappen van deze bijzondere houtsoort verloren gaan. Pokhout is naast de toepassing in de scheepvaart bij de schroefaskoker van zeegaande schepen ook veel toegepast bij de lagers van grote bemalingspompen.



Zuiger met hennepakking

Verder zien we dat ook leer voor de afdichting van de zuigers of de plunjers is toegepast. De zuigersnelheid mag vanwege slijtage niet hoger zijn dan 1 m/sec. Het leer wordt met behulp van



een matrijs in de juiste vorm geperst en tussen de uit drie ringen bestaande zuiger geklemd. De afdichting wordt verkregen doordat de opstaande rand door de waterdruk tegen de cilinderwand geperst wordt. Nadelen van leer zijn dat het sterk slijt als gevolg van ijzerroest en evenals pokhout niet mag uitdrogen .

Zuiger met leren pakking

Bij de zuigerpomp moet de pompcilinder van binnen zuiver op maat uitgedraaid of gekotterd worden. De zuiger wordt bewerkt al naar gelang de soort toegepaste afdichting en wordt met enige speling in de cilinder aangebracht.

Pakking bussen

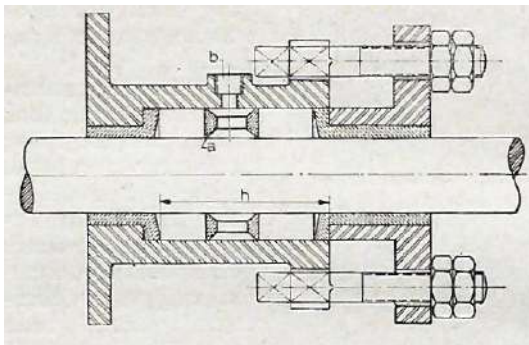
Voor de afdichting van de zuiger, plunjer of plunjerstang bij polder bemalingspompen wordt meestal een min of meer conventionele pakkingbus afdichting met zachte pakking toegepast. Een en ander zoals hieronder is afgebeeld. De pakkingkamer wordt hier in tweeën gedeeld door een zogenoemde lantaarnring waar onder druk water kan worden toegevoerd. Hierdoor wordt vermeden dat bij het zuigen lucht naar binnen gezogen wordt, die het volumetrisch rendement zou verminderen. Als pakking worden vaak hennep of in talk gedrenkte katoenstrengen toegepast. De strengen hebben een vierkante doorsnede en moeten met behulp van het drukstuk voorzichtig worden aangedrukt. Het te sterk aanhalen van de drukstukmoeren heeft tot gevolg dat de stang onherstelbaar wordt

beschadigd en er overmatige lekkage zal blijven optreden. Er is een groot scala aan weke pakkingsoorten in de handel waarvan één speciale aandacht verdient. Dat is de zogenaamde wigmariet pakking. Deze bestaat uit smalle zeer dunne bandjes zacht metaal, bijvoorbeeld witmetaal met grafiet, die tot strengen ineen gedraaid worden en op dezelfde manier als de strengen katoen of hennep in de pakkingkamer worden aangebracht. Als deze pakking na het aanbrengen uiterst voorzichtig wordt aangedrukt vormt zich een nauwsluitende afdichting rond de stang met tevens goede glij-eigenschappen.

Voor de dikte van de pakkingstrengen neemt men:

$$s = 2 \sqrt{d} \div 2,5 \sqrt{d} \text{ [mm]}$$

Hierin is s de dikte van de pakking en d de diameter van de stang of pluiner. Voor de lengte van de pakking- kamer neemt men ongeveer $8 \times s$, terwijl het voldoende is dat de pakking drukker over een lengte van $3 \times s$ kan worden aangehaald. Bij het opnieuw verpakken van de pakkingbus dient men



er zorg voor te dragen dat het lantaarnstuk a juist tegenover de watertoevoer b wordt aangebracht. Meestal is dat in het midden van de kamer. Bij het aanbrengen van wigmariet pakking zal men door opmeten de juiste plaats moeten vaststellen. Men brengt eerst 3 tornen pakking aan, dan het lantaarnstuk en vervolgens de laatste 3 tornen pakking. Het lantaarnstuk heeft een lengte ter dikte van 2 tornen pakking.

Pakkingbus voor weke pakking

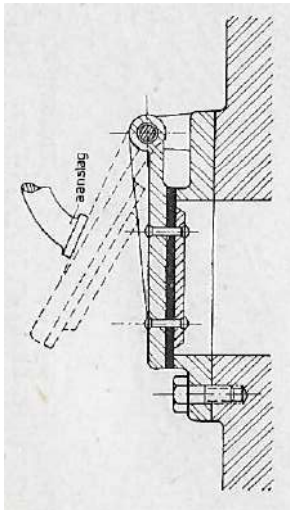
Kleppen en zittingen

Voor dat polderwater naar een opvoerwerktuig wordt gevoerd passeert het een zogenoemd krooshek. Hier worden zoveel als mogelijk de in het water aanwezige vaste delen opgevangen. Desondanks worden naast zachte ook harde voorwerpen naar het opvoerwerktuig aangevoerd en is men bij zuiger- en pluiner pompen aangewezen op een deels zachte klepaafdichting. Verder komt in het polderwater slietvormige vervuiling voor die vooral bij de doortocht vernauwende klepconstructies verstopping kan veroorzaken dan wel tussen de klepaafdichting kan blijven steken. Vervuiling van de kleppen leidt zonder meer tot capaciteitsverlies en kan, bij boven het polderpeil opgestelde pompen, zelfs tot het afslaan van de pomp leiden. Bij de boven de waterlijn opgestelde pompen zoals bij het gemaal Abbenbroek had men het voordeel dat weliswaar het pompbedrijf moest worden onderbroken maar dat men, door het openen van de ruimte waarin de kleppen zijn aangebracht, de vervuiling relatief eenvoudig kon verwijderen en zodoende het probleem kon oplossen. Bij de onder de waterlijn opgestelde pompen, zoals bij de pompen van de inmiddels geamoveerde gemalen te Dreumel (H.F. Fijnje van Salverda) en het Rotterdamse Westerstoomgemaal moest men de installatie droog zetten om een probleem met een klep op te kunnen lossen. Na te lezen valt dat bijna zonder uitzondering alle met zuigerpompen uitgeruste

gemalen problemen hadden met de kleppen en alle modificaties ten spijt dit nooit heeft geleid tot een generieke oplossing.

Een redelijke oplossing die in tweede instantie is gevonden en ook toegepast is bij het gemaal te Dreumel is de hangende scharnierklep, waarvan hiernaast een voorbeeld is gegeven. De kleppen, die ontworpen zijn voor met vaste stoffen verontreinigde vloeistoffen, hebben aan de bovenzijde een scharnierpunt en worden met het bijbehorende aanslagframe in smalle stroken, boven elkaar in een kleppenraam geplaatst.

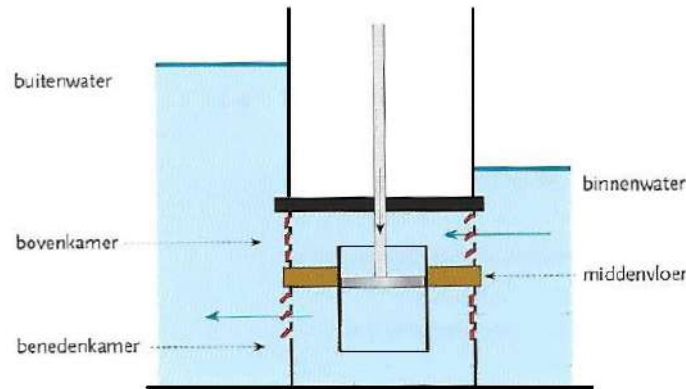
De klep, die te vergelijken is met de conventionele houten terugslagklep bij gemalen, heeft een grote doortocht en valt door zijn eigen gewicht dicht. In de figuur zorgt een leren plaat die tussen een metalen plaat en de eigenlijke klep vastgeklonken zit voor de afdichting. Om er voor te zorgen dat het leer over de gehele omtrek op de dichtingsrand drukt is het scharnier voorzien van een slobgat dan wel enige ruimte om de pen. Latere uitvoeringen zijn in plaats van het speciaal gelooide



leer voorzien van plaatrubber met een canvas inlage. De kleppen kunnen ook in een horizontale positie worden toegepast. In alle gevallen verdient het de voorkeur de klep van een aanslag te voorzien om te voorkomen dat deze achterover klapt en zijn functie verliest. De gietijzeren klepframes worden met bouten op het klepraam vastgezet. Door de randen van de doortocht royaal af te ronden wordt de weerstand over de klep beperkt en blijft er minder makkelijk vuil achter hangen. De hoogte van de kleppen mag niet te groot zijn omdat het anders te lang duurt bij het einde van de slag voor de klep sluit, de richting van de vloeistof stroom is dan omgekeerd en laat de klep met grote kracht op de zitting neerkomen. Een nog betere werking wordt verkregen door de klep iets schuin achterover op te stellen. Het gewicht van de klep zorgt er dan voor dat de klep gesloten is voordat de vloeistofstroom is omgekeerd en voorkomt daarmee het op de zitting klappen.

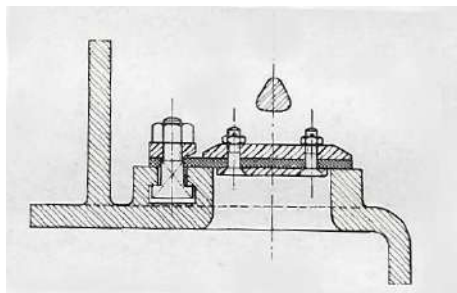
Scharnierklep

De onderstaande figuur laat de werking zien van het pompprincipe van Fijnje dat bij het gemaal in Dreumel en op nog een aantal andere plaatsen in Nederland is toegepast. . De dubbelwerkende pompen werden met behulp van een balansarm rechtstreeks aangedreven door de stoommachine. Uit de figuur mag blijken dat de kleppen slecht toegankelijk onder de waterlijn opgesteld waren.



Dubbelerkende zuigerpomp (onder de waterlijn opgesteld)

Een variant op de hier voor beschreven klep is die waarbij het scharnier en de afdichting één geheel vormen. In de beschrijvingen van dit soort kleppen wordt nog gesproken over gummi platen

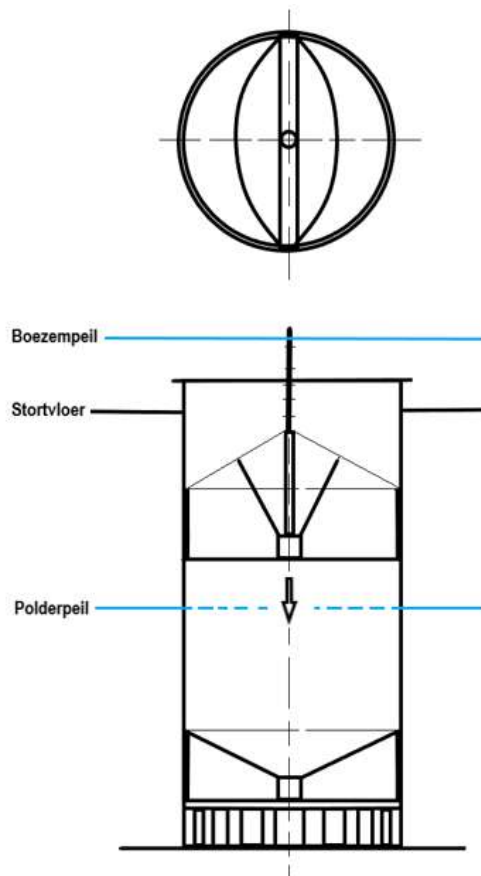


waarmee wat wij tegenwoordig, rubber noemen wordt bedoeld. Ook deze klepuitvoering werd in vierkante of rechthoekige vorm uitgevoerd en kan zowel horizontaal als verticaal worden opgesteld. In de getekende uitvoering is de klepkast voorzien van een sleuf waarin de hamerkop bouten voor de bevestiging van de klep zijn aangebracht en is de klep horizontaal opgesteld.

Scharnierklep met rubberen afdichting

Bij de enkelwerkende pompen van de Haarlemmermeer; in de gemalen Leegwater, Lijnden en de Cruquius, zijn enkelwerkende zuigerpompen toegepast. Bij deze pompen zijn de zuigkleppen in de cilinder en de perskleppen in de zuiger aangebracht. Deze pompen die voor wat het onderste deel betreft onder het polderpeil staan opgesteld, hebben geen windketels en zijn uitgerust met halve ellipsvormige scharnierkleppen die schuin staan opgesteld (ongeveer 30 °) en draaien om de rechte zijde van een halve ellips. De zuigkleppen bij dit type pomp zijn op dezelfde manier geconstrueerd als de perskleppen. De afdichting tegen de cilinderwand vindt plaats met behulp van hardleren randen op de klepdelen.

In de figuur op de volgende bladzijde wordt schematisch de werking van de pomp weergegeven. Bij het naar beneden bewegen van de zuiger sluiten de kleppen aan de onderzijde van de cilinder en stroomt het in de cilinder aanwezige water via de kleppen in de zuiger naar de bovenzijde van de cilinder. Op dat moment wordt er geen water verplaatst. Bij de opgaande slag wordt het water naar boven weggeperst en wordt tegelijkertijd onder de zuiger een zelfde hoeveelheid aangezogen. Het aanzuigen van een nieuwe hoeveelheid water en het wegpersen van het water wat zich al in de cilinder bevond vindt dus tegelijkertijd plaats. Voor de opgaande slag van de pomp is dus de meeste energie nodig.



Doorsnede klepopstelling pompen gemaal De Cruquius

In bedrijf stellen pomp

In het algemeen zal men vanwege de grote schadelijke ruimte van droog opgestelde zuigerpompen voor polderbemaling deze eerst moeten vullen met water voor dat ze in bedrijf kunnen worden gesteld. Deze noodzaak wordt op de volgende wijze aangetoond.

Bij de binnenste stand van de zuiger van een enkelwerkende pomp zal tussen de zuig- en persklep een zekere ruimte overblijven, die de schadelijke ruimte vormt als de pomp als luchtpomp zou worden gebruikt. De inhoud van deze ruimte kan worden uitgedrukt in verhouding tot het slagvolume V , bijvoorbeeld $x \cdot V$.

Nemen we aan, dat bij de binnenste stand van de zuiger deze ruimte reeds gevuld is met lucht van atmosferisch druk P_a , doordat in de persleiding ook deze druk heerst. Beweegt nu de zuiger naar buiten tot in het andere dode punt, dan wordt het volume van de lucht $V + x \cdot V$.

De druk P_p die dan in de schadelijke ruimte en de cilinder heerst is dan volgens de wet van Boyle:

$$P_a \cdot x \cdot V = P_p \cdot (V + x \cdot V) \text{ [mwk]}$$

Of anders geschreven:

$$P_p = \frac{P_a \cdot x \cdot V}{V + x \cdot V} \text{ [mwk]}$$

Of vereenvoudigd geschreven:

$$P_p = P_a \frac{x}{1 + x} \text{ [mwk]}$$

De schadelijke ruimte kan wel 3 tot 4 keer het slagvolume van de pomp bedragen. Als we uitgaan van een atmosferische druk van 10 mwk en een schadelijke ruimte van 4 keer het slagvolume dan wordt de absolute druk P_p in de zuigruimte aan het einde van de zuigslag;

$$P_p = 10 \frac{4}{1 + 4} = 8 \text{ [mwk]}$$

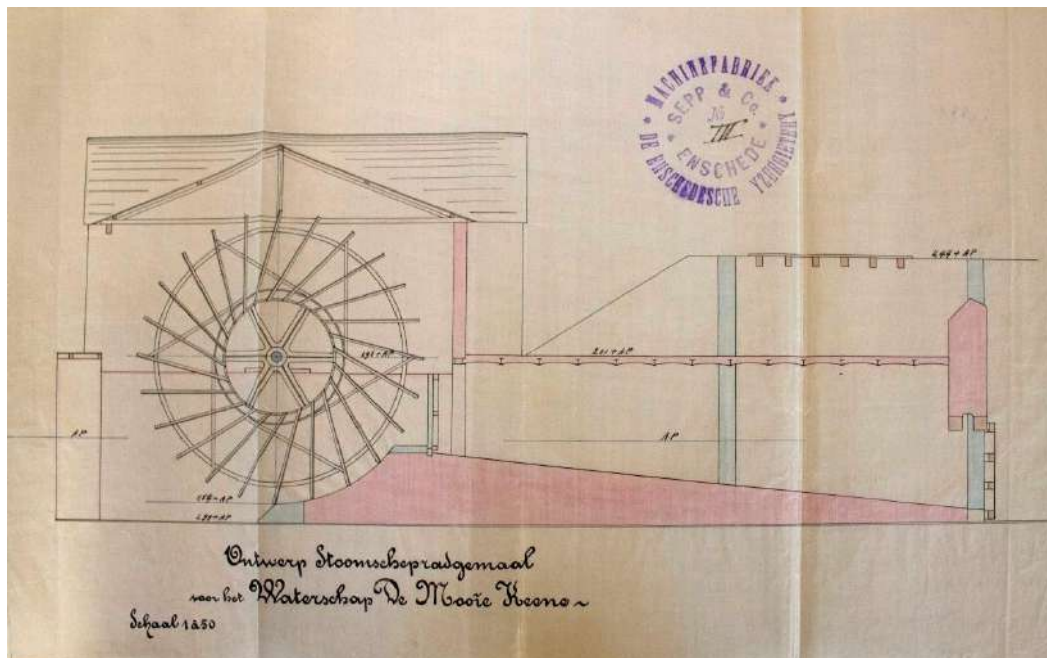
De onderdruk, dus de druk die het water moet opzuigen en de weerstand over de zuigklep die overwonnen moet worden is dan:

$$P_p = 10 - 8 = 2 \text{ [mwk]}$$

Deze onderdruk zal in het algemeen niet voldoende zijn en dus zal men de pompcilinder en de aangrenzende ruimte met water moeten vullen. In de meeste gevallen gebeurt dit door met behulp van een kortsluitleiding tussen het buitenwater en de pomp, water in de pompruimte tussen de zuig- en persklep te laten stromen totdat alle lucht uit de zuigleiding is gezogen en de pomp aanslaat. Niet te grote luchthoeveelheden zullen met de waterstroom worden meegenomen en bij de uitmonding van het systeem dit verlaten. Lekkages in de zuigleiding of het aanzuigen van lucht als het polderpeil zover gedaald is dat dit in de buurt van de zuigmond komt, kunnen aanleiding zijn voor het afslaan van de pomp tijdens bedrijf.

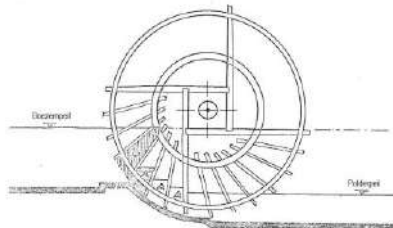
4.18.4 Schepraderen

Het scheprad is het oudste en tot nu toe het langst en vaak toegepaste opvoerwerktuig in de bemalingstechniek. Alhoewel er bij de windwatermolens veel ervaring was opgedaan met het scheprad werden bij de introductie van door stoommachines aangedreven gemalen deze uitgerust met zuigerpompen. Hierbij werd de lineaire beweging van de stoommachine met een balansarm of rechtstreeks op de zuiger van de pomp overgebracht. Een scheprad vereist een langzame roterende beweging die met tandwielen moet worden overgebracht. Dit heeft met de aanmerkelijk grotere stoommachine vermogens ten opzichte van die van de windmolen in die beginperiode dan ook voor de nodige problemen gezorgd.

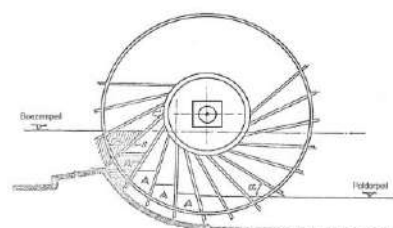


Voorbeeld van een stalen scheprad in de Keenesluis

Sinds de ontwikkeling van het scheprad in de 15^e eeuw hebben geen ingrijpende en principiële ontwikkelingen plaats gevonden. De schepraderen waren oorspronkelijk van hout wat de vorm en de afmetingen beperkte. In de zestiger jaren van de 19^e eeuw verschenen de eerste nagenoeg geheel uit gietijzer en staal opgebouwde schepraderen en werd na verloop van tijd ook geëxperimenteerd met de schoepvorm om het rendement te verbeteren.



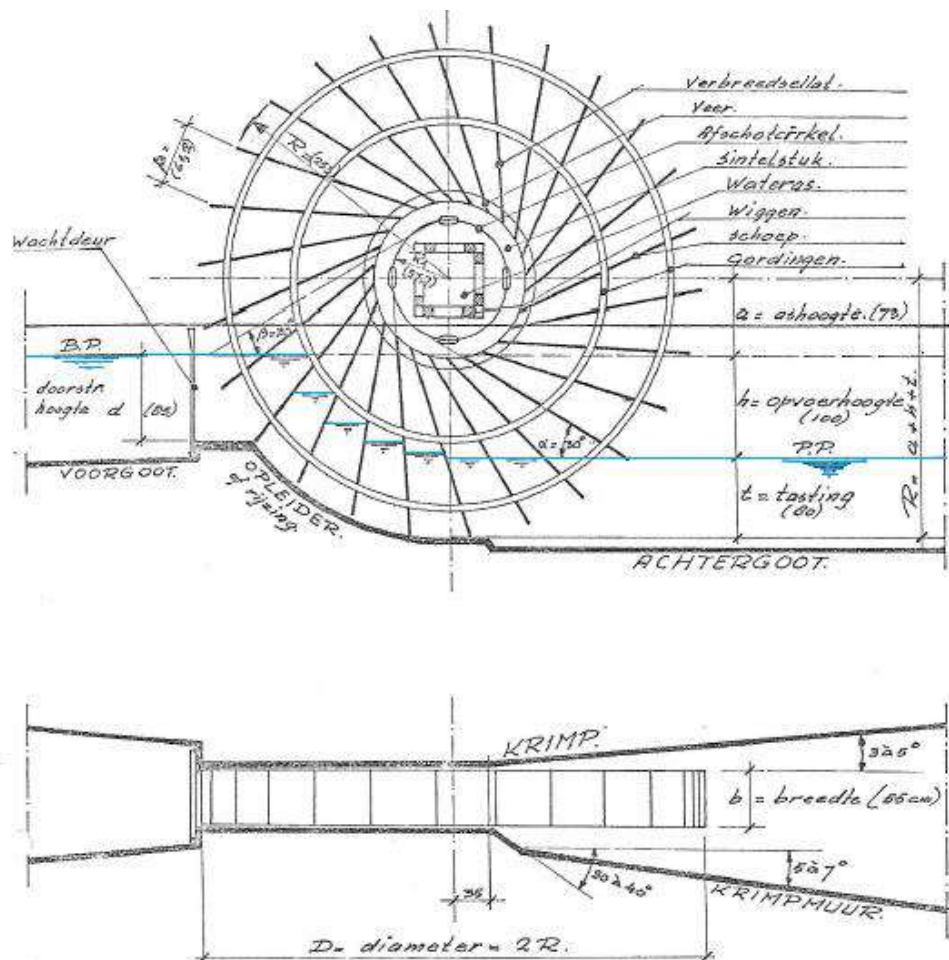
Houten scheprad



Stalen scheprad

Het scheprad bestaat uit twee ronde schijven of spaakwielen van gietijzer, de zogenaamde sintelstukken. Bij de oude scheprad constructies zijn deze sintelstukken met eikenhouten wiggen op het vierkante deel van de gietijzeren as bevestigd. Bij jongere constructies worden de sintelstukken met kopspieën op een verdikt gedeelte van een stalen as bevestigd.

Aan de sintelstukken zijn tangential de veren met daaraan de schoepen of borden bevestigd, rakend aan een denkbeeldige cirkel de zogenaamde afschotcirkel. Door deze wijze van bevestiging kan de ruimte tussen de schoepen goed leegstromen en wordt het zogenoemde over de kop malen, het mee terugnemen van het water, voorkomen. Een nadeel hiervan is dat de schoepen aan de instroomzijde onder een geringe hoek met de waterspiegel staan en op het water gaan slaan. Naast het lawaai wat dit veroorzaakt is dit verschijnsel schadelijk voor de bevestiging van het scheprad op de as en de hieraan gekoppelde tandwiel-overbrenging. De hellingshoek van de schoepen wordt bepaald door de grootte van de afschotcirkel. De hoek van intrede α mag niet te groot zijn omdat dan de hoek van uittrede β te klein wordt en het water niet goed kan uitstromen. Gestreefd wordt naar een hoek van intrede die varieert tussen de 25° en 30° , en een hoek van uittrede β die varieert tussen de 30° en 35° .



Benaming en maatvoering van een voorbeeld scheprad

De schoepen zijn soms van metaal maar bij voorkeur van hout. Eventueel meegevoerde harde voorwerpen zoals hout of ijs kunnen het houten bord doen breken maar verder geen schade aanrichten. Bij metalen borden zullen naast het bord zelf de veren en de gordingen schade oplopen en in die gevallen opnieuw gericht moeten worden. Een of twee hoepels, de zogenaamde gordingen aan beide zijden van het rad verbinden rondom de uiteinden van de schoepen.

Verder worden om de vier schoepen tussen de buitenste gording en het sintelstuk schoren aangebracht. Deze schoren voorkomen dat de schoepen achterover gedrukt worden.

Met een speling van 10 tot hooguit 20 mm draait het scheprad tussen de beide krimpmuren van de goot of de krimp zoals dat genoemd wordt. Om de speling tussen rad en krimp zo gering mogelijk te maken worden bij stalen schoepen zogenoemde verbreedsel-latten langs de zijanten aangebracht. Het relatief zachte grenen hout, wat daarvoor gebruikt wordt, moet nagenoeg zonder speling aangebracht worden waarna het tijdens bedrijf langs de ruwe krimpmuur op maat schuurt. De axiale speling wordt bij een glijlager constructie vaak met eenvoudige taatsen en drukbouten op de koppen van de scheprad-as ingesteld. Het spreekt voor zich dat de axiale speling van het rad zo gering als mogelijk dient te worden gehouden.

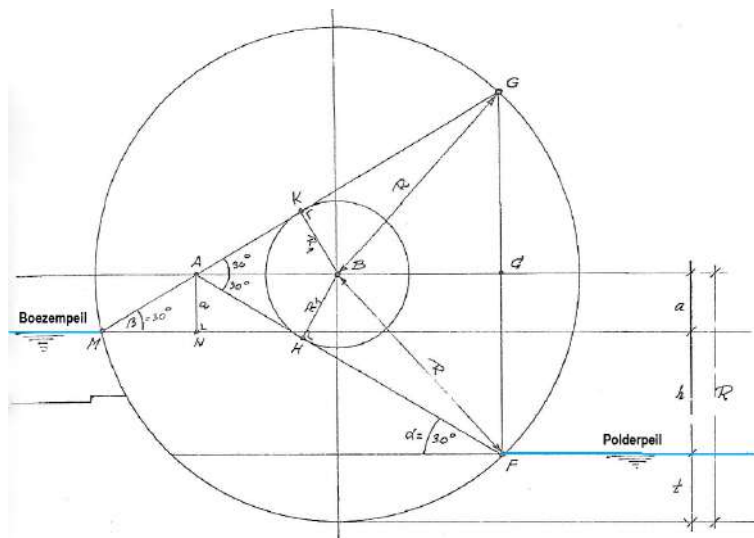
De vorm van de instroom goot is zodanig dat er voldoende water tussen de schoepen kan stromen. Is dit niet het geval dan zal het rad minder water opbrengen bij een grotere opvoerhoogte. Hetzelfde effect wordt teweeg gebracht als het krooshek vervuld is of als de aanvoer van water stagneert. Een ander belangrijk punt voor het goed functioneren van het scheprad is de hoogte van de opleider. Deze is zoals we hierna zullen zien afhankelijk van de tasting, de opvoerhoogte en de diameter van het scheprad.

Is de opleider te laag, zoals bij de figuur van het houten scheprad is getekend, dan zal bij de rondgang van het rad telkens bij het bereiken van de bovenkant van de opleider een hoeveelheid buitenwater terugstromen in het compartiment tussen twee schoepen. Dit terugstromen kost, vooral bij lage radsnelheden extra energie. Hetzelfde negatieve effect doet zich voor bij een te gering aantal schoepen.

Een ander belangrijk punt is de verhouding tussen de tasting en de doorstroomhoogte boven de opleider. Het veranderen van stroomsnelheid kost energie en moet voorkomen worden en is de reden dat bij de streefpeilen op de boezem c.q. het buitenwater en de polder de natte profielen aan de in- en uitstroomzijde in die situatie gelijk worden gehouden. Omdat de breedte van de goot aan de in- en uitstroomzijde gelijk is zal de waterhoogte boven de opleider minimaal de hoogte van de tasting moeten hebben.

De schoeplengte is bepalend voor het kerend vermogen van het scheprad: dus de hoogste boezem/buitenwaterstand met daarbij opgeteld de opstuwing tijdens het malen. Is deze onvoldoende dan loopt een deel van het opgevoerde water terug naar de instroming. In de rechter figuur van het stalen scheprad is dat door het gearceerde gedeelte schetsmatig weergegeven.

Aan de hand van de hier voor aangegeven voorwaarden en uitgangspunten voor een scheprad om goed te kunnen functioneren kunnen de hoofdafmetingen worden bepaald en het rad worden geconstrueerd.



Figuur voor het bepalen van de hoofdafmetingen van een scheprad

De bekende gegevens voor het tekenen van de figuur zijn de opvoerhoogte h : het verschil tussen het boezem/buitenpeil en dat van het polderpeil. Dit verschil varieert meestal tussen de 70 en 150 cm. Bij grotere opvoerhoogten wordt de diameter van het rad te groot zoals we hierna kunnen afleiden. Verder stijgen als gevolg van het grote drukverschil de spleetverliezen en daalt daardoor het rendement. De tasting t varieert tussen de 70 tot 110 cm. Ook een te grote tasting resulteert in een grotere diameter van het rad maar biedt wel de mogelijkheid verder af te malen c.q. in te spelen op een toekomstige polderpeildaling.

Uit de figuur kan worden afgeleid dat de diameter van de afschotcirkel is:

$$R_1 = h \cdot \tan \alpha \text{ [m]}$$

In het voorbeeld zijn de in- en uitstroomhoeken gelijk gehouden en bedragen beide 30° . De tangens van deze hoek is 0,57735 zodat geschreven kan worden:

$$R_1 = 0,57735 \cdot h \text{ [m]}$$

De straal van het rad R kan worden berekend met behulp van de driehoek BHF. Hierbij is a de hoogte die de as boven het boezem/buitenpeil wordt opgesteld.

$$R = \sqrt{(2a + h)^2 + (0,57735 \cdot h)^2} \text{ [m]}$$

Voor de straal van het rad kan ook worden geschreven:

$$R = a + h + t \text{ [m]}$$

Door de uitkomsten van beide formules aan elkaar gelijk te stellen zijn a en t uit te drukken in h en t respectievelijk de bekende opvoerhoogte en de aan te nemen tasting. De uitkomst van deze rekenexercitie voor de straal is:

$$R = 2,05 \cdot t + 0,89 \cdot h \text{ [m]}$$

En voor de opstelhoogte:

$$2,05 \cdot t + 0,89 \cdot h = a + h + t \text{ [m]}$$

Of:

$$a = 1,05 \cdot t - 0,11 \cdot h \text{ [m]}$$

Is voor een gegeven situatie de opvoerhoogte 1,50 m en de tasting 1,00 m dan is de straal van het rad:

$$R = 2,05 \cdot 1 + 0,89 \cdot 1,50 = 3,385 \text{ [m]}$$

De straal van de afschotcirkel is:

$$R_1 = 0,57735 \cdot 1,50 = 0,866 \text{ [m]}$$

En de opstelhoogte van het rad boven het boezem/buitenpeil:

$$a = 1,05 \cdot 1 - 0,11 \cdot 1,50 = 0,885 \text{ [m]}$$

De afstand tussen de schoepen aan de omtrek wordt in de regel op 60 á 70 cm gehouden. Een te grote afstand leidt tot capaciteitsverlies omdat de ruimte tussen de schoepen verder voorbij het tastpunt tot het polderpeil is gevuld. Verder leidt het tot grotere spleetverliezen omdat het drukverschil per schoep groter wordt.

De breedte van de schepraderen voor windmolens bedraagt 35 tot 60 cm waarbij een verhouding van de tasting t tot de breedte b van 3 : 2 wordt aangehouden. Een grotere breedte leidde tot windmolens met een groter vermogen dan wel hogere gemiddelde windsnelheden om te kunnen malen. Bij schepraderen die worden aangedreven door stoommachines geldt deze beperking niet en zie je dan ook aanzienlijk bredere schepraderen toegepast of raderen die parallel aan elkaar geschakeld zijn. Bij deze laatste optie worden de assen verbonden door een al dan niet verschuifbare koppeling waarmee een gedeelte van de capaciteit kan worden uitgeschakeld.

Capaciteit

Wanneer het rad een boog, gelijk aan de onderlinge afstand van twee schoepen heeft doorlopen, wordt een hoeveelheid water verplaatst, gelijk aan de inhoud van de watermassa tussen twee schoepen, te rekenen als de schoepen het diepst in het water staan.

Tijdens een omwenteling is dat:

$$2\pi \left(R - \frac{1}{2} t \right) \cdot 0,9 \text{ [m}^3\text{]}$$

Men noemt dit de waterkrul. Deze hoeveelheid moet worden verminderd met de inhoud van de ondergedompelde schoepengedeelten, alsmede het waterverlies ontstaan door het terugstromen van water langs de beschoeping. Bij goed geconstrueerde en uitgevoerde schepraderen bedraagt dit verlies ongeveer 10 %.

Het toerental n van een scheprad is zeer gering en bedraagt 5 á 8 omwentelingen per minuut. Als het geschatte verlies en het toerental in voorgaande formule worden ingevoerd kan men de capaciteit als volgt berekenen:

$$Q_{th} = n \cdot b \cdot t \cdot 2\pi \left(R - \frac{1}{2} t \right) \cdot 0,9 \text{ [m}^3\text{/min]}$$

Hierin is:

Q_{th}	De berekende capaciteit van het scheprad	m ³ /min
R	De straal van het scheprad	m
n	Het toerental van het scheprad	omw/min
b	De breedte van het scheprad	m
t	De indompel diepte van de schoep	m
0,9	Correctie factor voor het door de beschoeping ingenomen volume	

Als het toerental van het hier voor gegeven voorbeeld 7 omw/min is dan bedraagt de capaciteit:

$$Q_{th} = 7 \cdot \frac{2}{3} \cdot 1,00 \cdot 1,00 \cdot 2\pi \left(3,385 - \frac{1}{2} 1,00 \right) \cdot 0,9 = 76 \text{ [m}^3\text{/min]}$$

Vermogen

Het vermogen van 1 pk is gelijk aan 75 kgm/sec en het gewicht van 1 l water :1kg. Als de capaciteit, en de opvoerhoogte van het scheprad bekend zijn kan men met deze wetenschap op de volgende wijze het theoretisch benodigde vermogen aan de as van het scheprad berekenen:

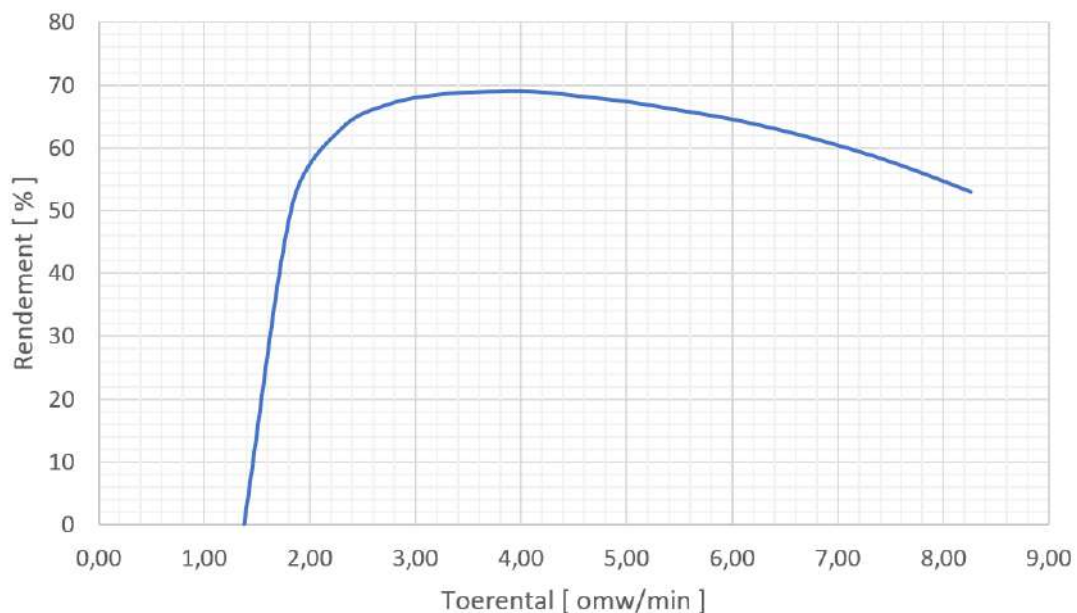
$$P_{th} = \frac{Q_{th} \cdot 1000 \cdot h}{60 \cdot 75} = \frac{Q \cdot h}{4,5} \text{ [pk]}$$

Het theoretisch benodigde vermogen aan de as van het scheprad uit het voorgaande voorbeeld is dan:

$$P_{th} = \frac{76 \cdot 1,5}{4,5} = 25 \text{ [pk]}$$

Dit vermogen werd voorheen met Wpk (water paardenkrachten) aangeduid en was een maat voor de grootte van het gemaal. Tegenwoordig gebruiken we hiervoor de capaciteit van het opvoerwerktuig met daarbij de gedefinieerde opvoerhoogte.

Het uiteindelijke door het aandrijfwerktuig te genereren vermogen, dus wat beschikbaar komt aan de as van de stoommachine, kan worden bepaald als het rendement van de overbrenging en van het opvoerwerktuig bekend is. In het verleden is door diverse instanties onderzoek gedaan naar het rendement van een scheprad. Uit die onderzoeken blijkt dat het rendement van een goed geconstrueerd scheprad inclusief de overbrenging in de orde grootte ligt van 50 - 70 % en bij benadering verloopt zoals in onderstaande grafiek wordt weergegeven.



Schepradrendement versus toerental

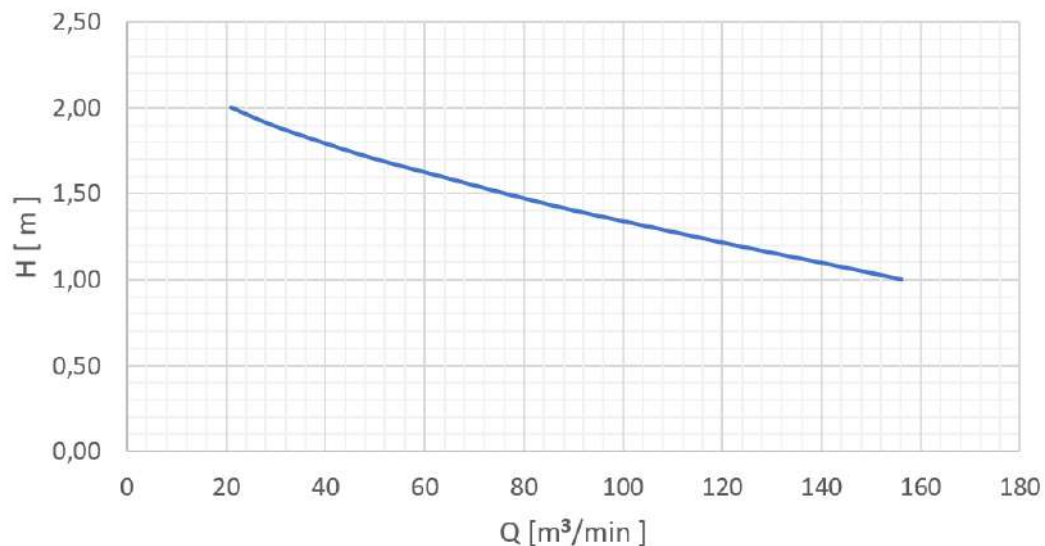
Uit de grafiek kan worden afgeleid dat het hoogste rendement wordt bereikt bij ongeveer 4 omw/min van het scheprad. De stromingsverliezen als gevolg van een geringer debiet spelen bij dit toerental een geringere rol. Om het scheprad onder alle omstandigheden te kunnen laten functioneren zal voor de bepaling van het vermogen van het aandrijfwerktuig uitgegaan moeten worden van de meest ongunstige situatie dus 50 %. In het geval van het hier voor gegeven voorbeeld dus:

$$P_a = \frac{25}{\frac{50}{100}} = 50 \text{ [apk]}$$

Tussen de opvoerhoogte H en de capaciteit Q bestaat een relationeel verband dat met behulp van een grafiek kan worden aangegeven. Uitgaande van een vast boezem/buitenpeil en een constant toerental ziet de grafiek van het hier voor gegeven voorbeeld er uit zoals hieronder is aangegeven. De ontwerp capaciteit van dit scheprad, zo is hier voor berekend, is 76 m³/min bij een statische opvoerhoogte van 1,50. De tasting die in het ontwerppunt 1,00 m bedraagt wordt als het polderpeil

stijgt steeds groter en resulteert diensgevolge in een steeds grotere capaciteit. Deze capaciteit kan zover oplopen dat de stoommachine het gevraagde vermogen niet meer kan opbrengen en er alleen gemalen kan worden door het toerental te verminderen. Omgekeerd zal de capaciteit afnemen als het polderpeil onder het streefpeil daalt. De stoommachine wordt dan minder belast. Door het toerental van de stoommachine te verhogen kan dan de verminderde capaciteit worden gecompenseerd.

Het nastreven van een polderpeil onder dat van het streefpeil zal zich in de praktijk niet makkelijk voordoen anders dan wanneer als gevolg van maaiveldddaling in de loop der tijd de bemalingsinstallatie te hoog is komen te staan. Een hoog polderpeil daarentegen komt vaak voor en behoeft de nodige kennis en kunnen van de machinist van de machinerieën om hier op een verantwoorde wijze mee om te gaan.



Q - H relatie scheprad

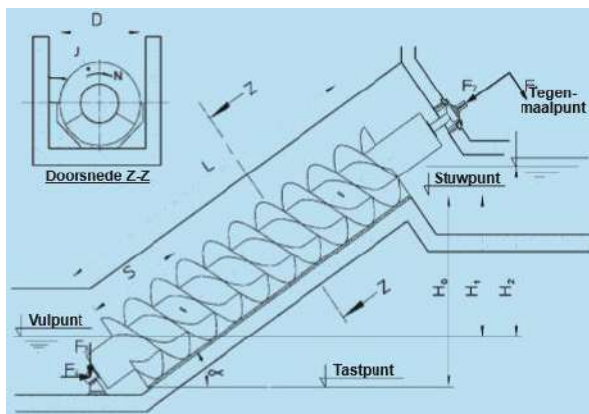
In het verleden heeft men om de maaiveldddaling het hoofd te bieden weleens bestaande schepraderen laten zakken of vervangen door een rad met een grotere diameter. Hierbij werd dan vaak omwille van de investeringskosten een aantal essentiële uitgangspunten geweldig aangedaan.

4.18.5 Vijzels

Het principe van de vijzel is in de 3^e eeuw v. Chr. al bekend als de schroef van Archimedes. Na de uitvinding van de tonmolen, waarbij een schroeflint in een buis is bevestigd die meedraait, werd dit opvoerwerktuig ook ingezet voor bemaling in Nederland. De vijzel zoals wij die nu kennen voor de bemaling, werd in 1634 als uitvinding van Symon Hulsbos geïntroduceerd. Eerst bij de windwatermolen en vanaf 1825 ook in gemalen voorzien van mechanische aandrijving zoals een stoommachine.

De vijzel bestaat uit de vijzelbalk (een spil), die omgeven is door twee of drie schroeflinten. De dikke balk is aan de boven- en de onderzijde voorzien van een stalen as die is opgelegd in draaipunten met glij- rol- of kogellagers. Het bovenlager is naast de radiaal lagering ook voorzien van een axiaal lagering om de trekkracht veroorzaakt door het gewicht van de vijzel en dat van het te verplaatsen water op te vangen.

De vijzel wordt onder een hoek tussen de 22 en 30° met de horizontaal in een halfronde goot, of opleider, opgesteld. Voor een grote opstellingshoek, dus een steil geplaatste vijzel, moet de spoed van de schroeflinten in verhouding tot de diameter kleiner zijn dan voor een vijzel met een kleine hoek om een gelijke vulling te behouden. Het onderste deel van de vijzel bevindt zich onder water. Waar onder de waterlijn de goot en de beschoeping beginnen noemt men het tastpunt. Aan de andere zijde van de balk waar de beschoeping en de goot eindigen noemen we het stort- of stuwpunt. Verder wordt nog onderscheiden het vulpunt: het laagst mogelijke polderpeil waarbij juist voldoende water tussen de beschoeping toetreedt om deze geheel te vullen, en het tegenmaulpunt,



het boezem/buitenpeil boven het stortpunt waar het opgevoerde water niet over de vijzelbalk terugstroomt.

Omdat het water in de goot van de vijzel tijdens het malen in de draairichting gezien scheef staat wordt de goot iets doorgetrokken of van een zogenoemde maalkant voorzien. Zou men dit niet doen dan stroomt een aanzienlijke hoeveelheid water terug richting de instroming en gaat een deel van de capaciteit verloren.

Benaming vijzelonderdelen (Landustrie Sneek)

De vijzelas is met een klauwkoppeling bevestigd aan een tussenas. Op de tussenas zit bij de oude installaties een conisch tand- of kamwiel dat samenwerkt met een eveneens conisch rondsel. Bij jongere installaties vervalt de tussenas en is het conische tandwiel rechtstreeks op vijzelas geplaatst. Hedendaagse en soms ook oude aangepaste vijzelinstallaties bij museale stoomgemalen zijn met behulp van een flexibele koppeling gekoppeld aan een gesloten haakse tandwieloverbrenging. De rondselas is voorzien van een riemschijf of een kamwiel dat samen werkt met respectievelijk een kleine riemschijf of rondsel.

Constructie

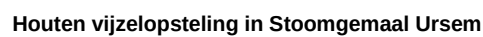
Aanvankelijk werden vijzels samengesteld uit hout. De doorgaans eikenhouten balk of spil werd voorzien van drie vaak uit grenenhouten duigen samengestelde schroeflinten. De duigen werden naast elkaar in de van te voren in de balk gehakte ondiep groeven gestoken welke aan de omtrek en vaak ook op het werkvlak met behulp van dunne stalen strippen bijeen werden gehouden. Bij de houten vijzels werden vaak slechts twee schroeflinten toegepast. Op de beide aseinden werd een gietijzeren of een stalen muts met astap geklemd. Hierbij moest de uiterste zorg worden besteed aan de uitlijning van de twee astappen en de hartlijn van de cilindervorm van de beschoeping.

Grote afwijkingen leiden tot slijtage van de lagers dan wel de duigen van de beschoeping. Als gevolg hiervan kan de vijzel in de veelal gemetselde goot aanlopen en ontstaat er een te grote speling en dientengevolge bovenmatig lekverlies. Ook kan te zwaar aanlopen tot breuk van de kammen van de houtentandwielen leiden. Het spreekt voor zich dat voor het maken van een houten vijzel het nodige vakmanschap vereist is.



Houten vijzel

Bij de hier onder weergegeven vijzelinstallatie van het voormalige stoomgemaal Ursem wordt getoond dat zowel het boven- als het onderlager van de vijzel worden afgesteund op een zware houten balkconstructie. Het onderlager, hier ook gelijk het taatslager, vaak bestaande uit niet meer dan een bronzen bus of pot, is in een schuin opgestelde balk onder gebracht.



513/578

In de 20^e eeuw is men zich meer en meer gaan toeleggen op het vervaardigen van (elektrisch) gelaste vijzels. Ook bij deze fabrikage wijze worden de schroeflinten uit voorgevormde schoepsegmenten opgebouwd echter zonder felsrand. De vorm van de segmenten: het schroefprofiel, wordt met behulp van een hydraulische pers met een mesvormig stempel aangebracht waarna ze stuk voor stuk op de vijzelbalk worden gelast. De vijzelbalk bestaat uit een naadloos stalen buis van 8 á 10 mm wanddikte. De vijzel beschoeping met een dikte van 3 á 5 mm, wordt na het lassen op een soort grote draaibank met een snijbrander op de juiste diameter gesneden. Ook de ingelaste astappen worden op deze bank in dezelfde bewerkingsgang nabewerkt zodat een zuivere uitlijning wordt verkregen van zowel de astappen als de cilindervorm van de beschoeping met die van de astappen.

Opleider

De opleider werd vroeger gemaakt van metselsteen. De stenen werden op de kant en met de strek in de lengterichting van de opleider vermeteld. Het uiteindelijke resultaat was tamelijk ruw wat men soms voor lief nam of oploste door het ruwe zichtvlak van een laag specie te voorzien. Tegenwoordig worden de opleiders gemaakt met behulp van een dunne metalen mal of worden ingedraaid. Bij de methode met de metalen mal wordt de vijzel met de mal in het werk boven de ruw in beton voorgevormde opleider opgesteld. Na het opstellen wordt de aldus gevormde kist gedicht en van bovenaf volgegoten met slappe betonmortel. Na verharding wordt de vijzel gelicht en de mal weggenomen.

Bij de indraaimethode wordt een van de schroeflinten aan de top voorzien van een u-vormig gootje van dun plaatmateriaal ter dikte van de lekspleet-wijde, of er wordt over de lengte van de bechoeping een stalen snaar gespannen. Vervolgens wordt de vijzel inclusief de overbrenging in de uiteindelijke positie opgesteld en voorzien van een langzaam draaiende elektrische hulpaandrijving. Men laat de vijzel met behulp van de aandrijving langzaam draaien en voegt van onder af cementmortel toe tussen de beschoeping. Het teveel aan mortel wordt door de beschoeping naar boven toe meegenomen net zo lang tot de gehele opleider is gevuld. Na verharding wordt het u-vormige gootje of de snaar verwijderd en blijft er een gladde nauwkeurig met overal dezelfde lekspleetwijde gevormde opleider over.

Capaciteit

De nominale opbrengst van een vijzel Q_n is de inhoud van de twee of drie waterkrullen tussen de schoepen die per minuut worden opgebracht. Door prof.ir J Muijsken is in de jaren dertig van de vorige eeuw berekend dat deze opbrengst als volgt te berekenen is:

$$Q_n = q \cdot n \cdot D^3 \text{ [m}^3/\text{min]}$$

Hierin is q een waarde afhankelijk van de vijzelvorm, namelijk die van de verhouding van de spoed S tot de vijzeldiameter D , van de verhouding van de vijzeldiameter D tot de diameter van de balk d , en verder van de hellingshoek van de vijzel, het aantal omwentelingen n en de diameter D . De waarden voor q zijn in onderstaande tabel weergegeven.

d/D	Hellingshoek 22 °		Hellingshoek 26 °			Hellingshoek 30 °	
	S = D	S = 1,2 D	S = 0,8 D	S = D	S = 1,2 D	S = 0,8 D	S = D
0,3	0,288	0,291	0,238	0,250	0,249	0,214	0,213
0,4	0,304	0,329	0,248	0,275	0,281	0,228	0,236
0,5	0,300	0,330	0,244	0,276	0,298	0,277	0,250
0,6	0,274	0,305	-	0,258	0,284	-	0,237

Waarden q voor bepalen debiet (stalen vijzels en 3 gangen)

Uit de tabel valt af te leiden dat bijna in alle gevallen een verhouding van $d/D = 0,45$ de grootste opbrengst geeft. In de praktijk wordt deze verhouding weinig aangetroffen en kiest men voor een dikte van de balk van 0,35 – 0,4 van de vijzeldiameter hetgeen uit constructief oogpunt, doorbuiging van de balk, voldoende is. bij langere vijzels, langer dan 3 á 4 meter, zal men ten koste van de opbrengst voor een groter verhoudings getal kiezen om overmatig doorbuigen te voorkomen.

Tijdens de werking van de vijzel lekt er onvermijdelijk een constante hoeveelheid water weg naar beneden. Het water stroomt van boven naar beneden, daar iedere gang wordt bijgevuld door het lekwater van de gang er boven. Volgens de eerder genoemde professor Muijsken is dit verlies voor een vijzel met een diameter D en een lekspleetwijdte s ongeveer:

$$Q_l = 150 \cdot s \cdot D \cdot \sqrt{D} \text{ [m}^3/\text{min]}$$

De lekspleetwijdte s wordt met behulp van de volgende empirisch bepaalde formule afgeleid van de diameter van de vijzel en luidt:

$$s = 0,0045 \sqrt{D} \text{ [m]}$$

Door substitutie s in voorgaande formule :

$$Q_l = 150 \cdot 0,0045 \sqrt{D} \cdot D \cdot \sqrt{D} \text{ [m}^3/\text{min]}$$

Of:

$$Q_l = 0,675 \cdot D^2 \text{ [m}^3/\text{min]}$$

Voor een onder een hoek van 30° opgestelde vijzel met een diameter van 1,8 m, een toerental van 30 omw/min, een d/D verhouding van 0,5 en een S = D betekent dit een nominale opbrengst van:

$$Q_n = q \cdot n \cdot D^3 = 0,250 \cdot 30 \cdot 1,8^3 = 43,7 \text{ [m}^3/\text{min]}$$

Het lekverlies bedraagt:

$$Q_l = 0,675 \cdot D^2 = 0,675 \cdot 1,8^2 = 2,2 \text{ [m}^3/\text{min]}$$

Dit betekent een verlies van 5 % van de berekende nominale opbrengst. In de praktijk wordt in verband met de meer of minder zuivere afwerking van de opleider voor het lekverlies 5 % aangenomen.

In voorbedoeld voorbeeld bedraagt de berekende lekspleetwijdte:

$$s = 0,0045 \sqrt{D} = 0,0045 \sqrt{1,8} = 0,006 \text{ [m]}$$

Met behulp van een mal, snaar, of een andere gerenommeerde techniek om vijzelopleiders in te draaien is deze speling bij niet al te lange vijzels terug te brengen tot 3 mm en in het geval van ons voorbeeld het lekverlies daardoor tot de helft reduceren.

In gunstige omstandigheden is de werkelijke opbrengst van de vijzel iets hoger dan de op de bovenstaande wijze berekende hoeveelheid. De voornaamste reden hiervan is, dat het water hoger in de gangen komt te staan dan het laagste punt waarover het kan wegstromen. Bij verschillende in het verleden uitgevoerde proefnemingen bedroeg de werkelijke opbrengst 13 tot 20% meer. De formule voor de werkelijke opbrengst waar doorgaans mee gerekend wordt luidt daarom:

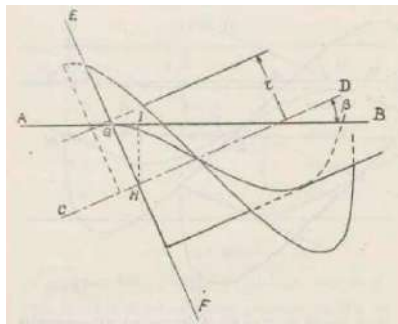
$$Q = 1,15 \cdot q \cdot n \cdot D^3 \text{ [m}^3\text{/min]}$$

Voor het voorbeeld betekent dit een werkelijk waterverzet van:

$$Q = 1,15 \cdot q \cdot n \cdot D^3 = 1,15 \cdot 0,250 \cdot 30 \cdot 1,8^3 = 50,3 \text{ [m}^3\text{/min]}$$

Hierna worden de voorwaarden voor een dergelijke opbrengst puntsgewijs nader uiteengezet en toegelicht:

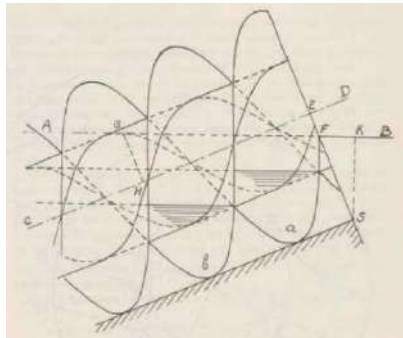
De binnen waterstand moet op of boven het vulpunt liggen zodat er met volle schoepen wordt gemalen. Het na te streven polderpeil moet dus ruimschoots boven de bovenkant van de balk, ter



plaatsse waar de beschoeping begint, liggen. In de figuur hiernaast is dit punt met de letter G aangegeven. Zoals reeds aangegeven noemen we dit het vulpunt. Hierbij moet rekening worden gehouden dat er tijdens het malen een zogenoemde verhanglijn ontstaat om het water naar het gemaal te kunnen laten stromen. Bij het gemaal staat dan tijdens het malen het water een aantal centimeters lager dan het streefpeil in de polder.

Vulpunt vijzel

De buiten waterstand mag niet hoger liggen dan het tegenmaalpunt omdat dan een deel van het reeds opgevoerde water over de vijzelbalk terugstroomt. Om aan deze voorwaarde te voldoen wordt het hart van de vijzelbalk aan de bovenzijde op 0,10 tot 0,15 m boven de hoogst voorkomende



buiten waterstand gelegd. Beter is om bij het bepalen van het zogenoemde tegenmaalpunt gebruik te maken van de tabel van de door Muijsken bepaalde factoren voor verschillende vijzelvormen en opstellingshoeken.

Het tegenmaalpunt ligt op een hoogte S-K boven het stortpunt S en wordt met F in de figuur hiernaast aangegeven.

$$S - K = f \cdot D \text{ [m]}$$

Tegenmaalpunt vijzel

Voor de vijzel met een diameter van 1,8 m uit het eerder gegeven voorbeeld betekent dit:

$$S - K = f \cdot D = 0,33 \cdot 1,8 = 0,594 \text{ [m]}$$

Het tegenmaalpunt ligt bij de vijzel uit ons voorbeeld dus ongeveer 0,60 m of 1/3 D boven het stortpunt hetgeen als een algemeen geldende waarde gehanteerd wordt.

d/D	Hellingshoek 22 °		Hellingshoek 26 °			Hellingshoek 30 °	
	S = D	S = 1,2 D	S = 0,8 D	S = D	S = 1,2 D	S = 0,8 D	S = D
0,3	0,39	0,33	0,39	0,32	0,26	0,35	0,27
0,4	0,42	0,36	0,43	0,36	0,29	0,37	0,30
0,5	0,47	0,40	0,47	0,40	0,33	0,40	0,33
0,6	0,50	0,43	-	0,43	0,36	-	0,37

Waarden f voor het bepalen tegenmaalpunt (stalen vijzels en 3 gangen)

Dat de lekverliezen tot een minimum moeten worden beperkt is overduidelijk. Hiervoor is reeds aangegeven dat een zo klein mogelijke lekspleet hiertoe bijdraagt. Door goed lageronderhoud tijdens gebruik kan men de bij de nieuwbouw bereikte lekspleet handhaven. Overmatige lagerslijtage kan bij vijzels lang onopgemerkt blijven en tot het slijten van de schoeptoppen leiden. Een bekend euvel en veroorzaker van lager- en vijzelschade zijn gebroken of doorgeroeste vetleidingen naar het onderlager.

De vijzel moet het juiste aantal omwentelingen maken. Een laag toerental gaat ten koste van de capaciteit en ook van het rendement. Bij een te hoog toerental wordt als gevolg van de wrijving het op te voeren water over de vijzelbalk getrokken en zal er water dat aan de beschoeping kleeft door de centrifugaalkracht naar buiten worden geslingerd en langs de opleider naar beneden wegstromen. Beide verschijnselen veroorzaken een rendementsverlies.

Het wegslingeren van het water noemt men buizen en hoeft zich bij goed ontworpen en mechanisch aangedreven vijzelgemalen niet voor te doen.

Voor de ontwerptoerentallen van vijzels is een aantal verschillende formules voorhanden. De meest bij de huidige praktijk passende formule is die van Horch en luidt:

$$n = \frac{50}{\sqrt[3]{D}} [\text{omw/min}]$$

Voor de vijzel met een diameter van 1,8 m betekent dit:

$$n = \frac{50}{\sqrt[3]{1,8}} = 34 [\text{omw/min}]$$

Verder wordt door Horch aanbevolen geen groter toerental te bezigen dan hierna wordt aangegeven om het eerder vermelde over de balk draaien c.q. wegslingeren van het water te voorkomen.

$$n \leq \frac{64}{\sqrt[3]{D}} [\text{omw/min}]$$

Vermogen

Het vermogen van 1 pk is gelijk aan 75 kgm/sec en het gewicht van 1 l water: 1kg. Als de capaciteit, en de opvoerhoogte van de vijzel bekend zijn kan men met deze wetenschap op de volgende wijze het theoretisch benodigde vermogen aan de as van de vijzel berekenen:

$$P_{va} = \frac{Q \cdot 1000 \cdot h}{60 \cdot 75} = \frac{Q \cdot h}{4,5} [\text{pk}]$$

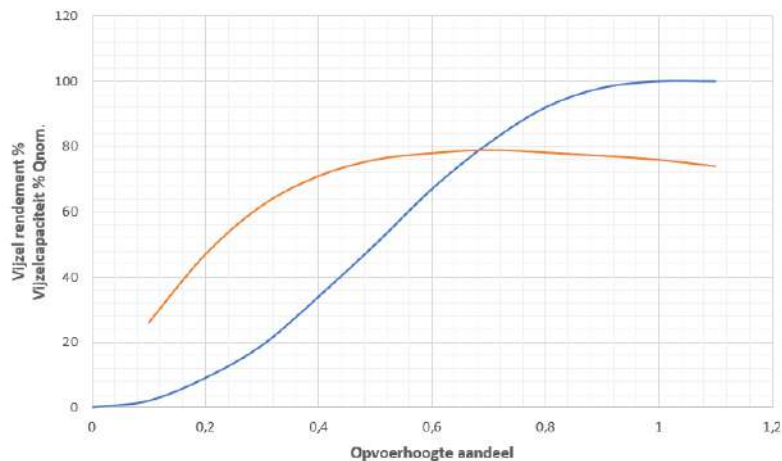
Als het maximale peilverschil tussen de polder en het boezem/buitenwater 2,5 m is, dan bedraagt het theoretisch benodigde vermogen aan de as van de vijzel uit voorgaand voorbeeld:

$$P_{va} = \frac{50,3 \cdot 2,5}{4,5} = 28 [\text{pk}]$$

Een goed uitgevoerde vijzel heeft een totaal rendement, dus inclusief de aandrijving, dat varieert tussen de 60 en 65 %. Het vermogen dat aan de as van het aandrijfwerktuig uit het voorbeeld beschikbaar dient te komen is bij een rendement van 60 %:

$$P_{va} = \frac{50,3 \cdot 2,5}{4,5 \cdot \frac{60}{100}} = 47 [\text{pk}]$$

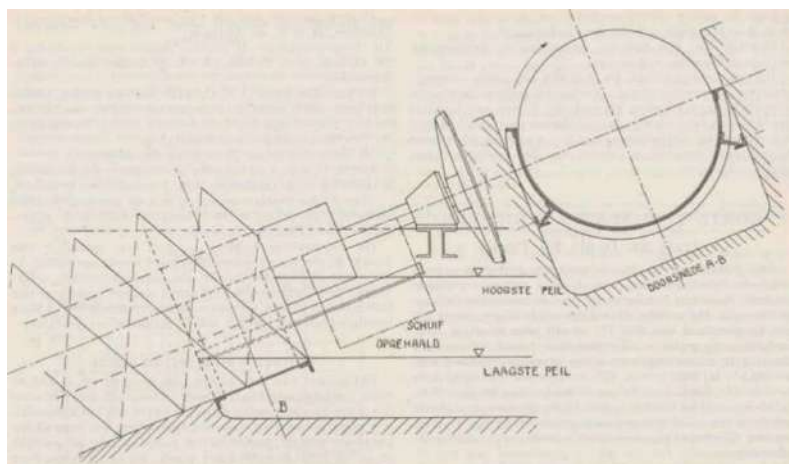
Het vermogen van de stoommachine dient in dit voorbeeld dus ongeveer 50 apk te bedragen.
De capaciteit en het rendement van de vijzel verandert als het polderpeil onder dat van het vulpunt komt te liggen. Omdat de schoepen niet meer volledig gevuld zijn neemt de capaciteit af, echter als gevolg van dat de vijzel minder diep in het water steekt neemt het rendement eerst gering toe. Uit de grafiek valt ook af te lezen dat het omgekeerde plaats vindt als het polderpeil boven het vulpunt komt te liggen.



Capaciteit en rendement vijzel bij gebruik onder vulpunt

De x as van de hierboven getoonde grafiek geeft het aandeel weer van het niveauverschil tussen het tastpunt en het vulpunt. Dit betekent dat bij 0,5 het polderpeil waarbij gemalen wordt precies halverwege het tastpunt en het vulpunt ligt en bij 1 het polderpeil samenvalt met het vulpunt.

Een nadeel van de vijzel is dat als het boezem/buiten- peil lager ligt dan het stortpunt van de vijzel het water toch tot de hoogte van het stortpunt moet worden opgevoerd.

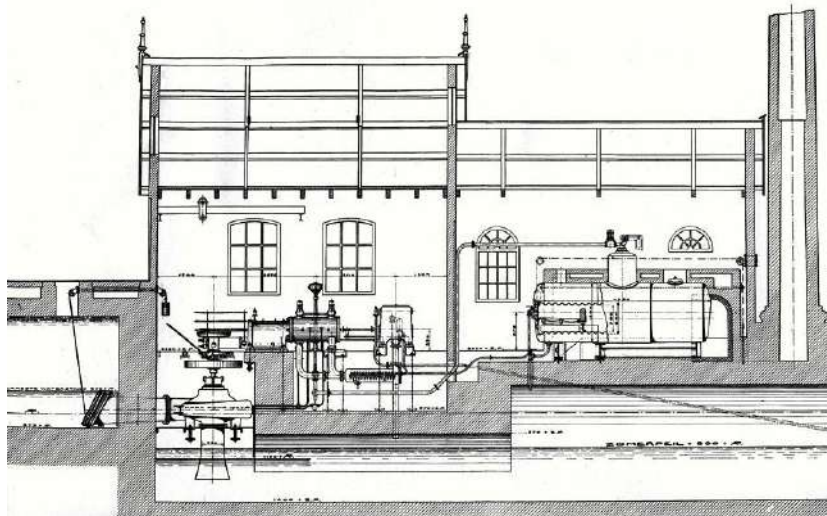


Vijzel met verstelbare opleider

De opvoerhoogte is in dat geval groter dan het werkelijke verschil tussen het binnen en buitenwater. Waar grote verschillen in de buiten- waterstanden voor komen worden daarom vijzels toegepast met een verstelbare opleider of twee voor verschillende opvoerhoogtes geschikte vijzels. De stalen verstelbare opleider kan als schuif worden uitgevoerd maar ook als een om het laagste stortpunt scharnierende klep. In alle gevallen moet door de machinist van het gemaal handmatig het juiste stortpunt worden ingesteld en zal het vermogen van de aandrijving moeten worden bepaald voor de grootste opvoerhoogte.

4.18.6 Stromingspompen

Het principe van de stromingspomp met een centrifugaalwaaier bestaat al heel lang. De eerste toepassing ervan voor de bemaling in Nederland heeft echter tot 1862 moeten wachten. Dit was een door een stoommachine aangedreven centrifugaalwaaierpomp van Engelse makelij voor de Bullewijker en Holendrechtterpolder. De centrifugaalpomp bleek een succes en is in de jaren daarna vrij snel algemeen toegepast.



Gemaal Dreumel (horizontale centrifugaalwaaierpomp)

De toenmalige stoommachines hadden een vrij laag toerental, zodat het noodzakelijk was een riem- of kamwieloverbrenging toe te passen om aan het vereiste en hogere toerental van de pomp te kunnen voldoen. Ook het probleem dat de pomp gevuld moest zijn om te kunnen werken moest opgelost worden en leidde soms tot niet direct voor de hand liggende oplossingen zoals bijvoorbeeld een liggende en onder de waterspiegel opgestelde pomp en een aandrijving met een stoommachine met een liggend vliegwiel.

Centrifugaalwaaierpomp

Het basisprincipe van een stromingspomp is dat bewegingsenergie aan het te verpompen medium wordt toegevoegd en dat die bewegingsenergie vervolgens deels in de pomp maar ook daarbuiten wordt omgezet in druk, dat wil zeggen het opvoeren van het medium naar een hoger geodetisch niveau. Bij het toevoegen van energie wordt gebruik gemaakt van een waaier in de een of andere vorm. Naar de vorm van de waaier worden in de techniek de stromingspompen benoemd en kunnen we vervolgens een aantal karakteristieke eigenschappen hieruit afleiden. Met behulp van de stromingsleer worden deze eigenschappen toegelicht en beter begripbaar gemaakt.

Stroming van vloeistoffen

Onder een stationaire stroming van een vloeistof verstaat men een stroming waarbij in iedere doorsnede van een zogenoemde stroombuis gedurende gelijke tijddelen, hoe klein ook genomen, eenzelfde gewicht aan vloeistof passeert, zodat in een willekeurig punt van de vloeistof, de druk en

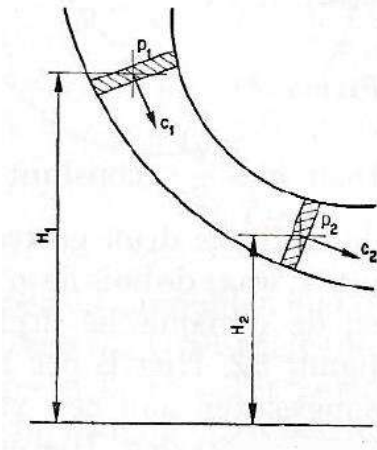
de snelheid onveranderd blijven. In de vloeistof mechanica wordt voor een dergelijke stroming het volgende bewezen:

$$\frac{p_1}{\gamma} + H_1 + \frac{c_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + H_2 + \frac{c_2^2}{2g}$$

Dit bewijs noemen we de wet van Bernoulli waarbij p de druk is, γ het soortelijk gewicht van de vloeistof is en g de versnelling van de zwaartekracht.

Is de stroombuis horizontaal dus $H_1 = H_2$ dan gaat de vergelijking over in:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{c_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{c_2^2}{2g}$$



Of als we de druk direct in meters waterkolom uitdrukken:

$$h_1 + \frac{c_1^2}{2g} = h_2 + \frac{c_2^2}{2g}$$

Stroombuis

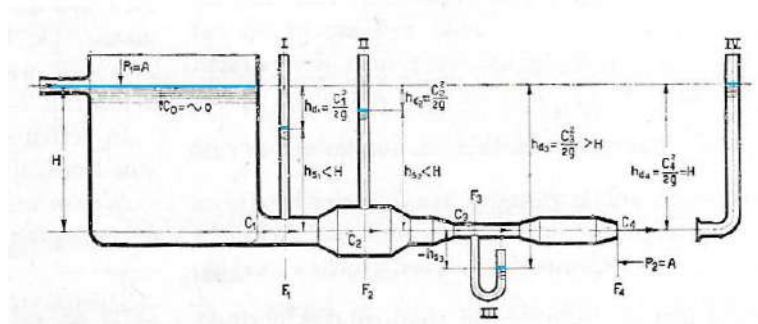
De termen p_1/γ en p_2/γ , c.q. h_1 en h_2 , stellen de statische drukhoogten of statische druk voor en kunnen gemeten worden met een open meetbuis. De term $c^2/2g$ heet de dynamische drukhoogte, deze druk is niet rechtstreeks te meten.

De vergelijking kan ook als volgt worden geschreven:

$$h_1 + \frac{c_1^2}{2g} = h_2 + \frac{c_2^2}{2g} = H \text{ [mwk]}$$

Of in woorden: de som van de statische- en dynamische druk in een horizontale stroombuis is constant.

Onderstaande figuur stelt een stroombuis voor met verschillende doorsnedes. . Met behulp van de continuïteitsformule (zie hoofdstuk 3.18.7, over de injecteur) kan worden aangetoond dat de vloeistofsnelheid omgekeerd evenredig is met de doorsnede van de buis.



Stroombuis met verschillende doorsnedes

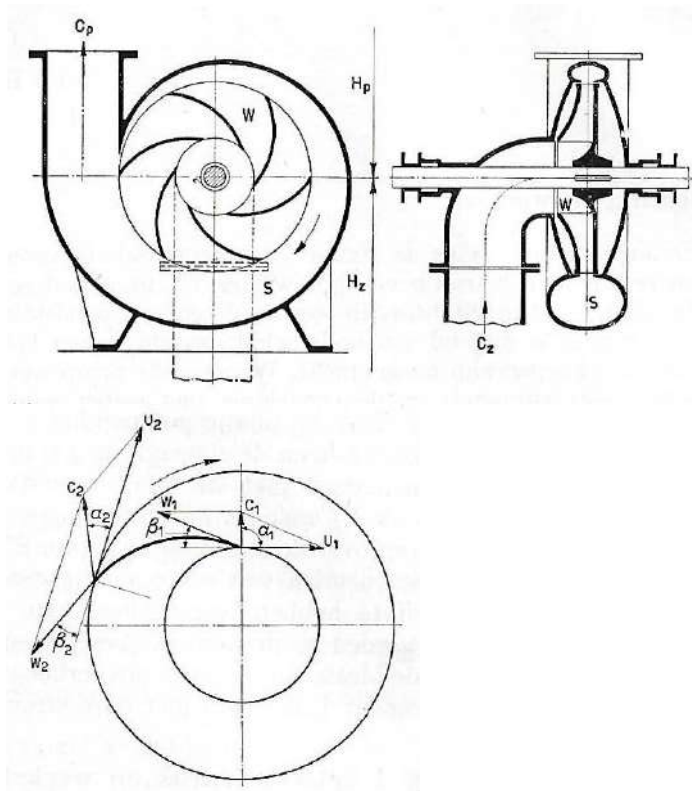
Bij de verschillende meetpunten zie je dan ook dat de dynamische druk bij de buisdelen met een grote doortocht lager is dan bij die delen waar de buis nauwer is. Het omgekeerde geldt voor de statische druk. Bij de doorsnede C_4 is de statische druk geheel omgezet in dynamische druk zodat geschreven kan worden:

$$H = h_1 + \frac{c_1^2}{2g} = h_2 + \frac{c_2^2}{2g} = h_3 + \frac{c_3^2}{2g} = \frac{c^2}{2g} \text{ [mwk]}$$

Deze wetmatigheid geldt bij de stroming in de waaier van een stromingspomp.

Stroming in de waaier

Hier onder wordt een eenvoudig voorbeeld gegeven van een centrifugaalwaaierpomp met daaronder een tekening waarin de snelheidsdriehoeken zijn aangegeven van de waterdeeltjes als de pomp in bedrijf is.



Centrifugaalwaaierpomp

Wanneer de pomp werkt, stroomt het water vanuit de zuigleiding in axiale richting van de as de waaier in. In de waaier krijgen de stroomlijnen van het water een andere richting en stroomt het water met de absolute intree- snelheid tussen de schoepen. We nemen aan dat c_1 tussen de schoepen radiaal gericht is. Wanneer we een waterdeeltje observeren , onmiddellijk na de intrede in de waaier, kunnen we de absolute beweging van dat deeltje samengesteld denken uit een beweging langs de schoep (relatieve beweging) en een beweging met de waaier mee. De eerste beweging geschiedt met een snelheid, die wij de relatieve intreesnelheid noemen en aanduiden met w_1 en de tweede beweging, de tangentielle omtreksnelheid, aangeduid met u_1 . De resultante van deze twee snelheden is de absolute intreesnelheid c_1 . De hoeken, die c_1 en w_1 met de omtreksnelheid u_1 of het verlengde daarvan maken zijn respectievelijk α_1 en β_1 . Voor een stootvrije intrede moet de richting van de schoep raken aan de gevonden richting van w_1 .

Na de intrede stroomt het waterdeeltje tussen de twee schoepbladen door naar de buitenomtrek van de waaier. Bij het verlaten van de waaier heeft het deeltje, wanneer een ideale stroomtoestand verondersteld wordt, een relatieve uittreesnelheid w_2 in de richting van de raaklijn aan de schoep aan de uittreezijde en een omtreksnelheid gelijk aan die van de buitenkant van de waaier. De resultante van deze twee snelheden is de absolute uittreesnelheid c_2 . Met deze snelheid treedt dus het waterdeeltje de waaier uit en het slakkenhuis binnen. De hoeken α_2 en β_2 , waardoor de richtingen van c_2 en w_2 zijn bepaald worden gemeten vanaf de raaklijn aan de waaieromtrek.

Als men de statische druk bij de intrede van de waaier h_1 stelt dan is de totale druk aan de zuigzijde:

$$H = h_1 + \frac{c_1^2}{2g} \text{ [mwk]}$$

Als men de statische druk na het verlaten van de waaier h_2 stelt dan is de totale druk aan de perszijde:

$$H = h_2 + \frac{c_2^2}{2g} \text{ [mwk]}$$

Deze totale drukken zijn niet aan elkaar gelijk, omdat in de waaier drukverhoging heeft plaats gevonden. Stellen we het drukverschil voor door H_E dan is:

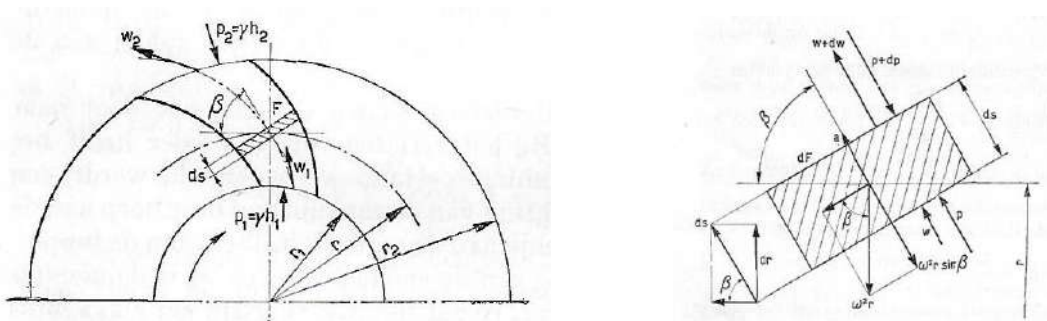
$$H_E = h_1 - h_2 + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2g} \text{ [mwk]}$$

De waarde $h_2 - h_1$ wordt de spleetoverdruk genoemd en is het verschil in statische druk aan de perskant en aan de zuigkant van de waaier.

Zoals bij zuigerpompen het verschil van de drukken tijdens de pers- en de zuigslag gelijk is aan de geodetische opvoerhoogte vermeerderd met de totale weerstandshoogte, dus gelijk aan $H + H_w$, komt H_E overeen met dezelfde grootte. Een voorwaarde hierbij is dat de waaier een oneindig aantal schoepen moet hebben met een oneindig kleine dikte. We noemen daarom H_E de ideale theoretische opvoerhoogte of ook wel de opvoerhoogte volgens Euler, de wetenschapper die zich intensief met de stromingsleer bezig hield.

Spleetoverdruk

Voor het bepalen van de spleetoverdruk is in onderstaande figuur de vloeistofmassa getekend tussen twee schoepen met daarnaast een detail met de bijbehorende maten, hoeken, en snelheden, aan de hand waarvan de formule voor de spleetoverdruk wordt afgeleid.



Figuren ten behoeve van de afleiding van de spleetoverdruk

Bij de intrede is de statische druk $p_1 = h_1 \cdot \gamma$ en de relatieve snelheid w_1 ; bij de uitrede zal de druk op de vloeistof $p_2 = h_2 \cdot \gamma$ en de relatieve snelheid w_2 zijn. Op een willekeurige plaats tussen de schoepen is het oppervlak van de doortocht F . Wij beschouwen daar een schijfje ter dikte van ds en meer in het bijzonder een vloeistofdeeltje met oppervlak dF uit het midden van dat schijfje. Onmiddellijk onder dit deeltje is de druk p , onmiddellijk daarboven $p + dp$; de relatieve snelheden zijn respectievelijk w en dw .

Als dit deeltje geen beweging in de stroomrichting, dus ook niet in radiale richting heeft, doorloopt het een cirkel met de straal r , en heeft het een centripetale (middelpunt trekkende) versnelling a van :

$$a = \omega^2 \cdot r \quad [\text{m/sec}^2]$$

Hierin is r de afstand tot de as en ω de hoeksnelheid van de waaier en dus ook van het beschouwde deeltje. De ontbondene van deze versnelling volgens een raaklijn aan de stroomrichting naar onder is:

$$a = \omega^2 \cdot r \cdot \sin \beta \quad [\text{m/sec}^2]$$

Bij een werkende pomp heeft het waterdeeltje een beweging door de waaier waarbij de hoeksnelheid toeneemt van ω tot ω_2 en waarvan de versnelling door a voorgesteld wordt. De totale versnelling volgens de raaklijn aan de stroomrichting is dus:

$$a = \omega^2 \cdot r \cdot \sin (\beta - \alpha) \quad [\text{m/sec}^2]$$

Om het deze versnelling te geven is een kracht K nodig:

$$K = m \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \sin (\beta - \alpha) \quad [\text{kg}]$$

We noemen K de middelpunt trekkende of centripetale kracht. Deze kracht is volgens de wet der traagheid nodig om een materieel punt met een eenparige snelheid in een cirkelvormige baan te laten bewegen.

Zou deze kracht er niet zijn dan zou het punt een rechtlijnige beweging hebben. Omgekeerd oefent het punt op de omgeving een even grote tegengestelde kracht uit die we de middelpunt vliedende kracht of centrifugale kracht noemen die zorgt voor het drukverschil op het beschouwde deeltje.

Met behulp van integraalrekening kan aan de hand van het bovenstaande worden bepaald dat de spleetoverdruk is:

$$h_1 - h_2 = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} - \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} \quad [\text{m} \cdot \text{wk}]$$

Wanneer, zoals voorkomt, de relatieve snelheid $w_1 > w_2$ dan hoeft alleen het teken in de formule veranderd te worden. Vult men de afgeleide waarde voor de spleetoverdruk in de formule voor de ideale theoretische opvoerhoogte in dan krijgt men:

$$H_E = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2g} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2g} \quad [\text{m} \cdot \text{wk}]$$

Hiermee is de Eulerse opvoerhoogte H_E geheel in snelheidshoogte uitgedrukt.

Werkt men deze formule verder uit, door op de snelheidsparallelogrammen de cosinusregel toe te passen en de gevonden waarden voor w_1^2 en w_2^2 substitueert in de voorgaande formule voor de H_E dan is:

$$H_E = \frac{u_2 \cdot c_2 \cdot \cos \alpha_2 - u_1 \cdot c_1 \cdot \cos \alpha_1}{g} \text{ [mwk]}$$

Omdat de weerstand langs de intree-zijde overal gelijk is wordt meestal aangenomen, dat de vloeistof onder de invloed van de atmosferische druk radiaal in de waaier stroomt met de snelheid c_1 . De hoek α_1 is dan 90° waarvan de cosinus 0 is. De ideale theoretische opvoerhoogte kan dan worden geschreven als:

$$H_E = \frac{u_2 \cdot c_2 \cdot \cos \alpha_2}{g} \text{ [mwk]}$$

Dit is de hoofdformule voor de opvoerhoogte van centrifugaalpompen en wordt de formule van Euler genoemd. Wordt de term $c_2 \cdot \cos \alpha_2$ op de omtreksnelheid u_2 geprojecteerd dan krijgt men:

$$H_E = \frac{u_2 \cdot c_{2u}}{g} \text{ [mwk]}$$

Deze opvoerhoogte geldt alleen voor een ideale stromingstoestand, dus een waaier met een oneindig aantal oneindig dunne schoepen. In de praktijk heeft de waaier echter een beperkt aantal schoepen met enige dikte, ten gevolge waarvan het water onvoldoende wordt geleid op zijn stroombanen, zodat geen ideale stroming ontstaat. Dit veroorzaakt verlies in pershoogte dus ook in opvoerhoogte maar heeft zoals algemeen wordt aangenomen geen energieverlies tot gevolg.

De pershoogte en dus de opvoerhoogte, die opgewekt kan worden in een pomp zonder botsing, wervelingen door een waaier met een ideale stromingstoestand, noemt men de theoretische opvoerhoogte, aangeduid met H_{th} in mwk.

Tussen H_E en H_{th} bestaat een bepaalde verhouding, die geen specifieke naam heeft, en die men aanduidt met de letter k . Deze verhouding kan geschreven worden als:

$$k = \frac{H_{th}}{H_E}$$

Voor de theoretische opvoerhoogte kan dus geschreven worden:

$$H_{th} = k \cdot H_E \text{ [mwk]}$$

De factor k is onder andere afhankelijk van het aantal schoepen en van de schoepelhoeken en kan alleen op een omslachtige wijze worden bepaald. Uit proeven blijkt dat deze factor varieert tussen de circa 0,7 en circa 0,8.

In de pomp treden de hierna te noemen verliezen op, die niet alleen verlies in pershoogte en dus in opvoerhoogte tot gevolg hebben maar tevens energieverlies veroorzaken.

Deze inwendige verliezen zijn:

- Verlies door wrijving van het water in de waaier en in het perskanaal van het pomphuis.
- Verlies door inwendige vloeistofwrijving als gevolg van wervelingen die ontstaan bij de omzetting van snelheids- in drukenergie, in eventueel aanwezige leidschoepen en in het perskanaal van het pomphuis.
- Verlies door botsing van het water tegen de intreezijde van de schoepen. Deze verliezen stijgen aanzienlijk naarmate de richting van de relatieve intreesnelheid meer afwijkt van de schoephoek.

Deze inwendige verliezen of weerstanden die men gezamenlijk h_{wi} kan stellen, zijn de oorzaak dat de manometrische opvoerhoogte H_m kleiner is dan de theoretische zodat:

$$H_{th} = H_m + h_{wi} \quad [\text{mwk}]$$

De werkelijke opvoerhoogte H is weer kleiner dan de manometrische opvoerhoogte H_m . Als gevolg van de uitwendige weerstanden h_{wu} in de zuig- en persleiding, als gevolg van snelheidshoogte verlies en door wrijving.

De manometrische opvoerhoogte is dus:

$$H_m = H + h_{wu} \quad [\text{mwk}]$$

De theoretische opvoerhoogte kan dus ook geschreven worden als:

$$H_{th} = H + h_{wu} + h_{wi} \quad [\text{mwk}]$$

De theoretische opvoerhoogte is blijkbaar de som van de werkelijke opvoerhoogte, de uitwendige weerstandshoogte, en de inwendige weerstandshoogte.

Het verlies aan opvoerhoogte en aan energie dat wordt veroorzaakt door de inwendige weerstanden drukt men uit in het hydraulisch rendement η_h van de pomp.

$$\eta_h = \frac{H_m}{H_{th}} \cdot 100 \quad [\%]$$

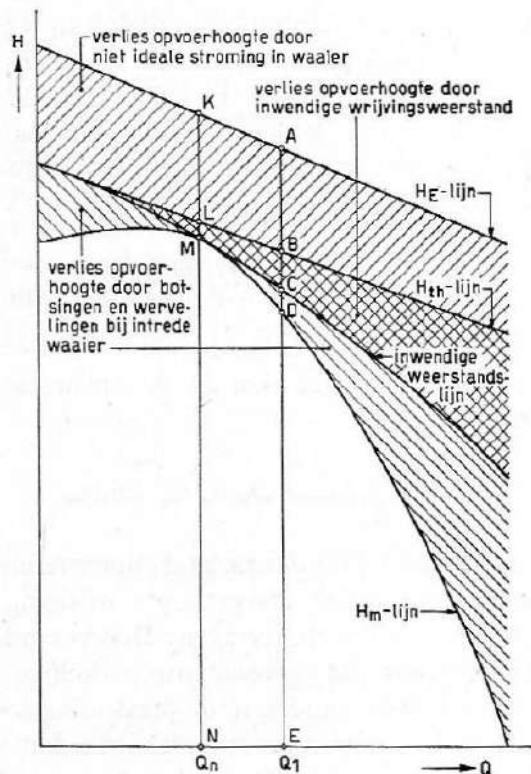
Of:

$$H_m = \eta_h \cdot H_{th} \quad [\text{mwk}]$$

Het hydraulisch rendement is dus een maat voor de inwendige verliezen van de pomp; zij is in belangrijke mate afhankelijk van de constructie van de waaier en van het perskanaal van het pomphuis en stijgt in het algemeen met het toenemen van de capaciteit van de pomp. Voor polderwaterpompen met in de regel grote capaciteiten ligt dit hydraulische rendement tussen de 60 - 80 %.

Het verloop van de opbrengst van een centrifugaalpomp en de daarbij behorende opvoerhoogte is hier onder in een rechthoekig assenstelsel weergegeven en geeft een beeld van de verliezen die

optreden in het ontwerp punt en daarbuiten. Bij een andere opbrengst dan waarvoor de pomp geconstrueerd is, bijvoorbeeld als Q_1 groter is dan Q_n , ontstaan er botsingen en wervelingen bij de instroomzijde van de schoepen. Deze inwendige verliezen veroorzaken uiteraard ook verlies in opvoerhoogte. Door de grotere stroomsnelheid is ook het verlies in opvoerhoogte toegenomen ten gevolge van de inwendige wrijving. Bij Q_1 stellen de ordinaten voor:



- A – E De opvoerhoogte volgens Euler
- B – E De theoretische opvoerhoogte
- D – E De manometrische opvoerhoogte
- A – B Verlies van opvoerhoogte door niet ideale stroming
- B – C Verlies van opvoerhoogte door inwendige wrijvingsweerstand
- C – D Verlies van opvoerhoogte door botsingen en wervelingen
- B – D Verlies van opvoerhoogte door botsingen en wervelingen en inwendige wrijvingsweerstand, aangeduid met h_{wi}

Verband tussen opbrengst en opvoerhoogte ($Q - H$)

Indien men nu voor alle opbrengsten tussen $Q = 0$ en $Q = \text{maximum}$ het verlies in opvoerhoogte bepaalt ten gevolge van de inwendige weerstand dan kan men de H_m -lijn tekenen. Een proefondervindelijk vastgestelde $Q - H$ kromme heeft hetzelfde karakter als hier boven is getekend.

Capaciteit

De theoretisch door de pomp te verzetten hoeveelheid water is te berekenen aan de hand van de pompafmetingen en de radiale in- of uitreesnelheid van het water bij de waaier.

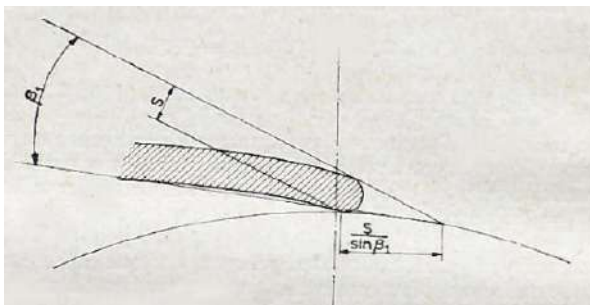
De formule hiervoor luidt:

$$Q_{th} = \pi \cdot D \cdot b \cdot c_{rad} \cdot \varphi$$

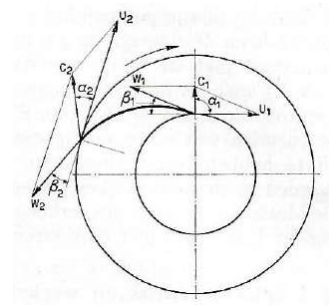
Hierin is:

Q_{th}	De theoretische capaciteit	m ³ /min
D	De diameter van de waaier aan in- of uitstroomzijde	m
b	De doortocht breedte van de schoep aan in- of uitstroomzijde	m
c_{rad}	De radiale in- of uitstroomsnelheid	m/sec
φ	De vernauwingsfactor	%

De vernauwingsfactor wordt berekend aan de hand van het aantal schoepen, de schoepdikte en de hoek β uit de snelheidsdriehoek bij in- of uittrede : lees de hoek die de vector van de relatieve snelheid maakt met de vector van de omtreksnelheid.



Radiale doortocht vernauwing schoep en uittrede



Snelheidsdriehoeken bij in-

De vernauwingsfactor φ (phi) wordt gevonden met:

$$\varphi = \frac{\pi \cdot D - z \cdot \frac{s}{\sin \beta}}{\pi \cdot D}$$

Hierin is:

D	De diameter van de waaier aan in- of uitstroomzijde	mm
z	Het aantal schoepen	
s	De schoepdikte	mm

Opgenomen vermogen en nuttig effect

Voor het bepalen van het vermogen voor de aandrijving van een pomp moet men inzicht in het hydraulisch,- volumetrisch- en het mechanisch rendement hebben.

Het hydraulisch rendement is:

$$\eta_h = \frac{H_{man}}{H_{th}} [\%]$$

Hierin is H_{th} de theoretische opvoerhoogte, berekend op grond van de stromingsvergelijkingen. H_{man} is de som van de manometerwaarde op de zuig- en de persbuis van de pomp, vermeerderd met het hoogteverschil tussen die twee meters. Het hydraulisch rendement hangt af van het ontwerp van de pomp en de nauwkeurigheid waarmee deze is afgewerkt en bedraagt tussen de 75 – 95 %. De fabrikant levert normaal gesproken een pomp op grond van de manometrische opvoerhoogte en alleen deze garandeert hij. De pompeenheden voor gemalen zijn vaak dermate groot dat ze niet op een proefstand beproefd kunnen worden. In die gevallen wordt een schaalmodel van de waaier gemaakt en beproefd of er wordt gebruik gemaakt van de gegevens van eerder uitgevoerde pompeenheden. In alle gevallen moet door of vanwege de klant de pomp in het leidingsysteem worden ingepast. Omdat de prestaties van een polderwaterpomp sterk afhangen van de aanstroomcondities wordt bij het ontwerpproces, en de inpassing vaak de fabrikant dan wel de leverancier nauw betrokken.

Bij een polderwaterpomp, als deze boven de waterlijn staat opgesteld, bestaat de kans dat lucht langs de pompas via de pakking bus naar binnen lekt. Deze lucht zal bij geringe hoeveelheden de opbrengst verminderen. Bij het opeenhopen ervan zal de pomp of het leidingsysteem op de hoogst gelegen delen geheel of gedeeltelijk kunnen blokkeren. Er wordt dan minder water verpompt of de pomp slaat af.

Aan de buitenzijde zal door de spleet die er moet zijn tussen de roterende waaier en het stilstaande pomphuis, als gevolg van het drukverschil tussen pers- en zuigzijde water weglekken, waardoor de opbrengst eveneens kleiner wordt. Om dit laatste te beperken worden tussen de waaier en het pomphuis soms verwisselbare afsluitringen aangebracht met een zeer kleine spleet, bijvoorbeeld 0,1 mm. De verhouding tussen de effectieve opbrengst Q_e en de theoretische opbrengst Q_{th} noemen we het volumetrisch rendement van de pomp. Het volumetrisch rendement is:

$$\eta_v = \frac{Q_e}{Q_{th}} \quad [\%]$$

Het volumetrisch rendement van een centrifugaalpomp bedraagt tussen de 92 - 99 %.

In de pomp ontstaat wrijving in de lagers en de pakkingbussen. Verder ontstaat er wrijving tussen de draaiende waaier en het stilstaande pomphuis. We noemen dit schijfwrijving; deze moet niet verward worden met de stromingswrijving in de waaier. Deze laatste is in η_h verwerkt. Ten gevolge van deze verliezen is het uitwendige vermogen dat nodig is om de pomp aan te drijven groter dan het theoretische vermogen. Is P_i het door het water opgenomen of inwendige vermogen en P_e het aan de as toegevoerde of uitwendige vermogen, dan is:

$$\eta_m = \frac{P_i}{P_e} \quad [\%]$$

Het mechanisch rendement van een centrifugaalpomp bedraagt tussen de 85 - 95 %.

Het product van de hiervoor genoemde rendementen noemen we het totale rendement η . Dit rendement wordt door de pompleverancier bij verschillende capaciteiten met behulp van een grafiek weergegeven.

Het totale rendement kan geschreven worden als:

$$\eta = \eta_m \cdot \eta_v \cdot \eta_h \quad [\%]$$

Het totale rendement van een centrifugaalpomp bedraagt tussen de 50 - 80 % en bij uitzondering wel eens 85 % doch is in ieder geval lager dan bij plunjerpompen.

Het totale rendement wordt afgeleid uit proefstand gegevens van het model of de pomp op ware grootte en berekeningen aan de hand van de waaier-tekening van de onderhavige pomp.

Het vermogen dat nodig is aan de pompas dan wel het aandrijfvermogen wordt berekend aan de hand van de bij de zuigerpompen reeds uiteengezette arbeidsvergelijking:

$$P_e = \frac{Q_e \cdot H_{man}}{4.5 \cdot \eta} \quad [\text{pk}]$$

Hierin is:

Q_e	De effectieve capaciteit van de pomp	m ³ /min
H_{man}	De manometrische opvoerhoogte	mwk
η	Het totale rendement van de pomp	%

Uiteraard wordt dit aandrijfvermogen ook tijdens de beproeving van de pomp of het model vastgesteld.

Specifiek toerental

Bij het ontwerpen van pompen wordt gebruik gemaakt van een specifieke grootte die bij de water-turbinebouw werd ingevoerd en waarmee de karakteristieke geometrische verhoudingen van waaier, waaier-type en pomphuis kunnen worden vastgesteld. Met behulp deze grootte kan voor een groot deel de keuze voor een bepaald pomptype worden gemaakt. Onder het specifiek toerental wordt verstaan de rotatiesnelheid van een waaier die in verhouding gelijk is gedimensioneerd aan een waaier die ontworpen is voor een capaciteit van 1 m³/sec en een opvoerhoogte van 1 mwk.

$$n_s = \frac{n}{H_{man}} \sqrt{Q \cdot \sqrt{H_{man}}} \quad [\text{omw/min}]$$

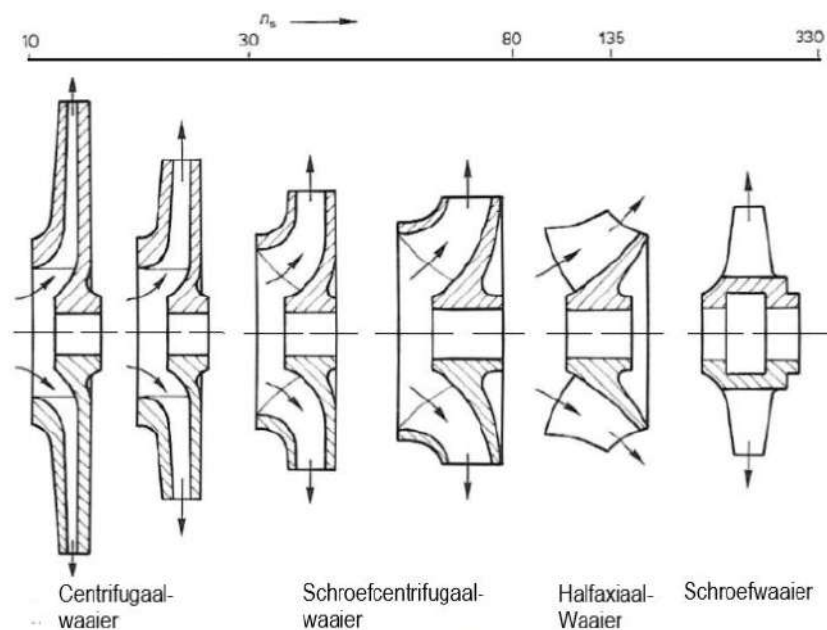
Of anders geformuleerd:

$$n_s = n \cdot \frac{Q^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{3}{4}}} \quad [\text{omw/min}]$$

Hierin is:

n_s	Specifiek toerental	omw/min
n	Toerental van de pomp	omw/min
H_{man}	Manometrische opvoerhoogte	mwk
Q	Capaciteit	m ³ /sec

Uit de hier voor gegeven formule blijkt dat bij gelijkblijvend toerental het specifieke toerental n_s afhankelijk is van de capaciteit Q en de opvoerhoogte H . Naar gelang Q of H meer of minder dominerend is, zijn zoals hier onder is aangegeven zeer uiteenlopende waaiertypes ontwikkeld.



Specifiek toerental en waaier type

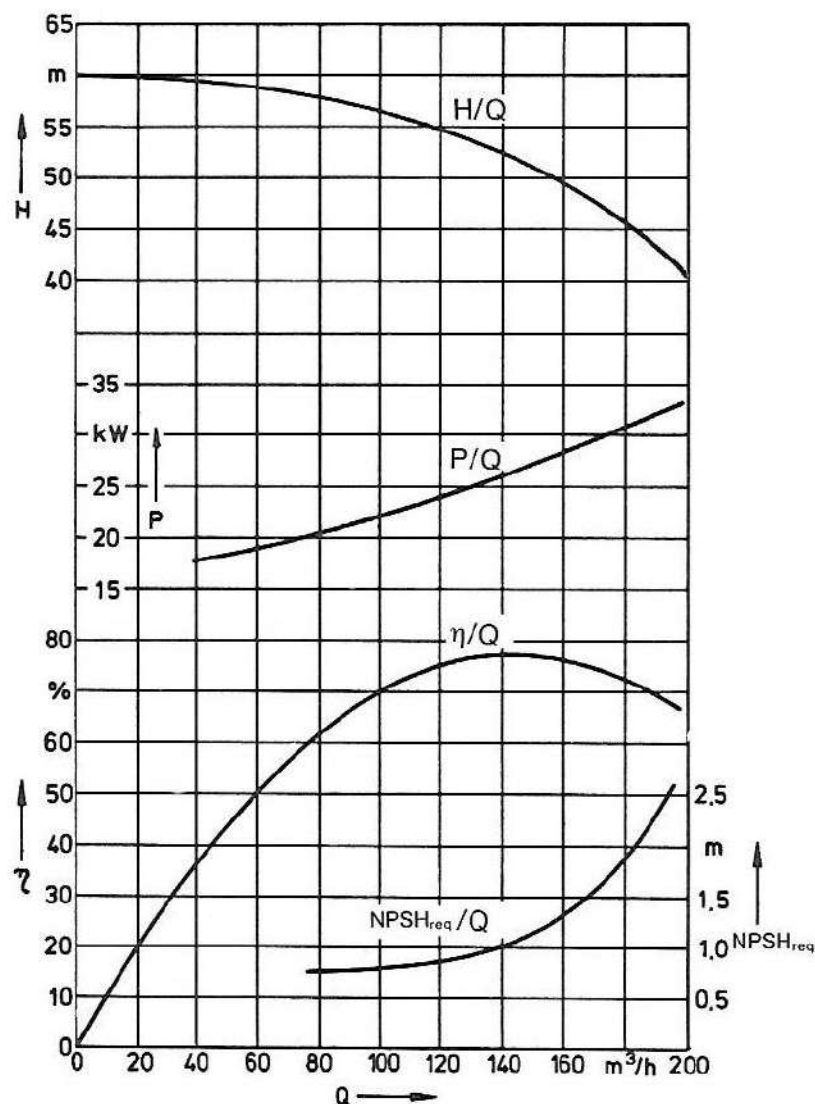
Is het debiet klein en de opvoerhoogte groot dan is het specifieke toerental laag. De waaier heeft een grote radiale afmeting van de schoepkanalen en een kleine breedte en is vanwege de kleine doortocht ongeschikt als bemalingspomp. Naarmate bij hetzelfde toerental de gewenste opbrengst toeneemt en de opvoerhoogte afneemt, dus de kanaallengte korter en de breedte groter wordt, neemt het specifieke toerental toe en is de pomp aanzienlijk beter geschikt voor het verpompen van polderwater met de daarin aanwezige vaste verontreinigingen. Schroefcentrifugaalpomp hebben een specifiek toerental dat ligt tussen 35 – 80 omw/min.

Verdere toename van de volumestroom en afname van de opvoerhoogte leidt tot de constructie van pompen met halfaxiale waaiers met specifieke toerentallen van 80 – 150 omw/min. Vanwege de tamelijk complexe bouw zijn dit type pompen weinig toegepast bij polderbemalingsinstallaties in Nederland.

De schroefpompen kenmerken zich door een zeer grote volumestroom bij een zeer kleine manometrische opvoerhoogte. Het specifieke toerental is hoog en kan tot 330 omw/min bedragen. Dit type pomp is dan ook uitermate geschikt voor polderbemaling.

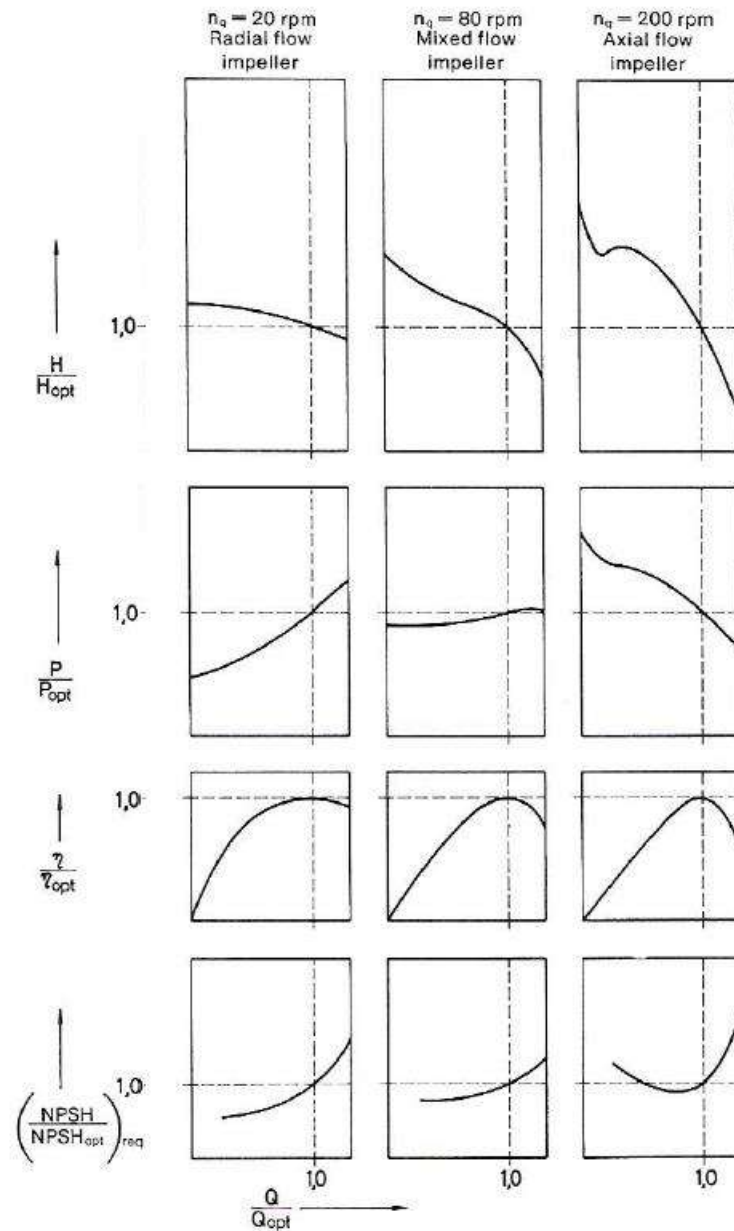
Pompprestaties

Bij een centrifugaalpomp met een constant toerental, zijn de opvoerhoogte H , het opgenomen vermogen en daarom ook het rendement en de vereiste NPSH (netto positieve zuighoogte) functies van het debiet Q . De karakteristieke relatie tussen de verschillende waarden worden in een grafiek weergegeven. Een en ander zoals hieronder voor een één-traps centrifugaalwaaierpomp met een toerental van 50 omw/min. Is weergegeven.



Prestatie krommes centrifugaalpomp

De vormen van deze krommes die de prestaties van de pomp weergeven worden in de basis bepaald door de waarden van de specifieke toerental-snelheid n_s . Eén en ander wordt met behulp van onderstaande grafieken voor de centrifugaalpomp (radial flow impeller), schroefcentrifugaalpomp (mixed flow impeller) en de schroefpomp (axial flow impeller) geïllustreerd.

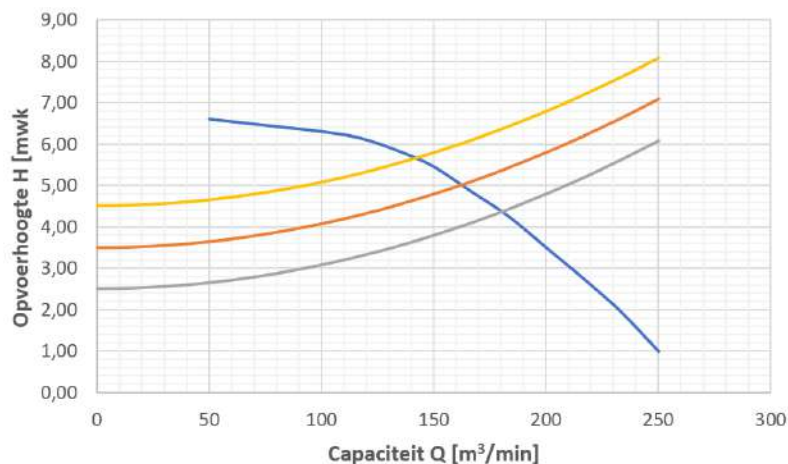


Invloed van het specifiek toerental op de vorm van de krommes

Uit de bovenstaande grafieken kan worden afgeleid dat het vermogensverloop bij verschillende debieten van de schroefcentrifugaalpomp gering is. Dit betekent dat het verschil tussen het maximum te leveren vermogen en het nominale vermogen gering is en er dus niet overgedimensioneerd hoeft te worden. Er hoeft dus niet geïnvesteerd te worden in een (te) grote aandrijving. Deze voor de aandrijving gunstige eigenschap heeft vaak de keuze voor dit pomptype bepaald; zeker toen na het stoomtijdperk (en ook reeds gedurende het dieseltijdperk) de aandrijving met elektromotoren in combinatie met de aanvankelijk nog zwakke elektriciteitsnetwerken, kwam opzetten.

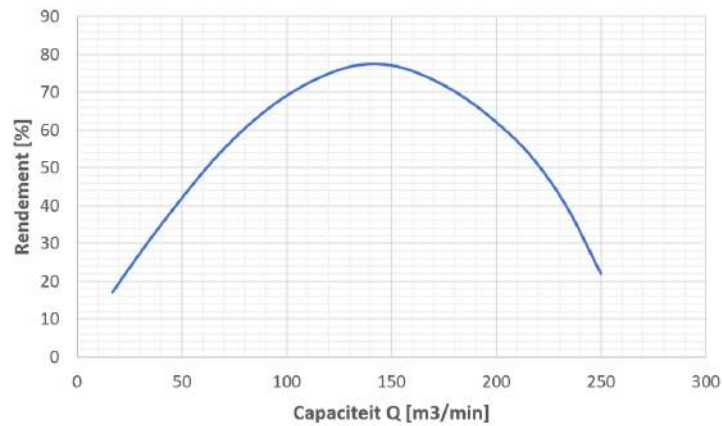
Garantiekrommes

Een pompenfabrikant garandeert van zijn product een bepaalde capaciteit, een bepaald hydraulisch rendement en een bepaalde manometrische opvoerhoogte. Aan de hand van de werkelijke opvoerhoogte en de uitwendige weerstanden kan dan bepaald worden of de te kiezen pomp geschikt is voor de gegeven locatie en leidingsysteem. Hij verstrekt hiervan de volgende gegevens in de vorm van grafieken.



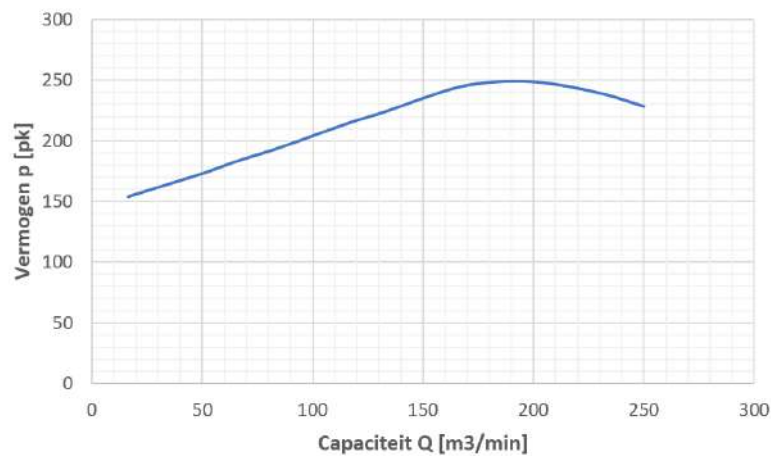
Q – H kromme centrifugaalwaaierpomp met uitwendige weerstandslijnen

Met de Q-H kromme wordt inzicht gegeven in de prestaties van een bepaald pomptype bij één bepaald toerental. In de grafiek waarvan hierboven een voorbeeld is gegeven, is op de horizontale as de de capaciteit uitgezet en op de vertkale as de opvoerhoogte. Door de weerstanden in de zuig- en de persleiding te berekenen en deze ook uit te zetten in de grafiek, kun je bij elke opvoerhoogte de capaciteit aflezen. Te doen gebruikelijk wordt de capaciteit bij gemalen meestal in m³/min aangegeven en de opvoerhoogte in mwk. De opvoerhoogte bij een gemaal wordt bepaald door de aflezing van de peilschalen aan de in- en de uitstroomzijde. De pomp uit het voorbeeld zal bij een opvoerhoogte van 3,50 m ongeveer 162 m³/min water verzetten. Hiervoor moet de oranje weerstandslijn worden gevolgd tot deze de capaciteitskromme snijdt. Als de minimale en de maximale statische opvoerhoogte bekend zijn; hier aangegeven bij respectievelijk 2,50 en 3,50 mwk, dan is tevens het werkgebied en dus het waterverzet dat daarbij hoort bepaald. Bij deze pomp ligt dat tussen de 142 en 181 m³/min. Door de pomp met een hoger of lager toerental te laten draaien verschuift de blauwe Q – H kromme respectievelijk naar links of naar rechts en krijgt men een ander werkgebied. Deze verschaling zal, omdat dit voor toeren- regelbare aandrijvingen van belang is, verderop in deze handleiding nader worden uiteen-gezet.



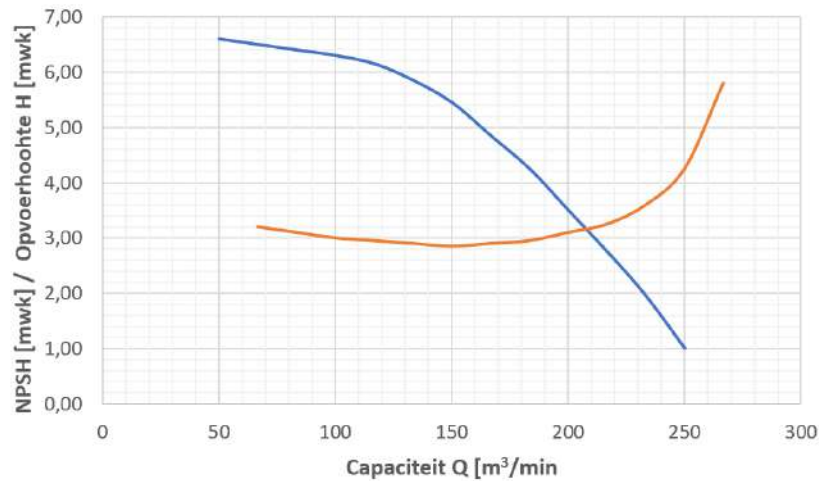
Q – η (eta) kromme

Met behulp van de rendementskromme verkrijgt de gebruiker inzicht bij welke opvoerhoogte hij op de meest efficiënte wijze water verpompt. In de praktijk kun je niet veel met dit gegeven, echter de ontwerper van een installatie zal een pomp kiezen waarvan het hoogste rendement in het werkgebied ligt. Als het werkgebied zoals hiervoor is aangegeven bij een capaciteit tussen de 142 en de 181 m³/min ligt dan is dat in het voorbeeld bijna het geval.



Q – P kromme

De vermogenskromme verschaft de gebruiker inzicht in hoeveel vermogen nodig is aan de pompas onder de verschillende omstandigheden. De ontwerper van een gemaal gebruik dit vermogen om het vermogen van het aandrijfwerktuig te bepalen. De gebruiker van de pompinstallatie kan deze kromme gebruiken voor het opstellen van bijvoorbeeld een energiebalans; dus hoeveel kg steenkool er nodig is om een bepaalde hoeveelheid water te verplaatsen.



Q - NPSH

Omdat een centrifugaalwaaierpomp is ontworpen voor het verpompen van vloeistoffen is het duidelijk dat deze slechts kan werken wanneer er geen dampvorming kan optreden. Dit is het geval als de druk aan de intreezijde van de schoepen boven de bij de pomptemperatuur behorende dampdruk van de te verpompen vloeistof ligt; in ons geval dus polderwater. Dit betekent dat voor een storingsvrije werking van een pomp de druk aan de zuigflens naast de snelheidshoogte tenminste ook boven de dampdruk van het water moet liggen. Deze druk aan de zuigflens wordt met "Net Positive Suction Head" (NPSH) aangeduid.

Onder de NPSH verstaat men de absolute druk (statisch en dynamisch) aan de zuigflens verminderd met de dampspanning. In formule vorm krijgen we dan:

$$\text{NPSH} = H_{zf} - H_d + \frac{c_z^2}{2 \cdot g} \quad [\text{m}]$$

Hierin is:

NPSH	Netto positieve zuighoogte	m
H_{zf}	De absolute druk aan de zuigflens voor de zuigkant van de waaier van de pomp	m
H_d	De dampdruk van het water	m
c_z	Watersnelheid bij de zuigflens van de waaier voor het bepalen van de dynamische snelheid van het water	m/sec
g	Versnelling van de waterkracht (9,81)	m/sec ²

De NPSH wordt uitgedrukt in m. Ook noemt men de NPSH wel de toestroomhoogte of toeloophoogte, uiteraard ook uitgedrukt in m.

Men onderscheidt verder nog de vereiste en de beschikbare NPSH. De vereiste NPSH wordt door de pompleverancier opgegeven en geeft de minimum waarde weer die nodig is om de pomp cavitatie-vrij te laten functioneren. De grootte hangt af van het pompontwerp. De beschikbare NPSH wordt berekend aan de hand van het ontwerp voor het pompsysteem en niet van de pomp. Als regel houdt men aan dat de beschikbare NPSH, 0,1 – 0,15 mwk groter is dan de vereiste NPSH. Elke pomp heeft door zijn constructie een bepaalde toevoerdruk nodig. Deze is afhankelijk van de gewenste opvoerhoogte en volumestroom, de rotatie frequentie van de waaier en de pompconstructie zelf. Men bepaalt de vereiste NPSH op de proefstand met behulp van een schaalmodel door de zuigdruk te variëren bij verschillende debieten. Van deze gegevens stelt men een grafiek samen waarin de NPSH een functie is van de volumestroom. Een dergelijke kromme ziet er uit als de gele lijn in de voorgaande figuur.

Bij het ontwerp van een pompinstallatie houdt men rekening met het gevaar van cavitatie door bijvoorbeeld de pomp(en) lager of zelfs onder de waterlijn op te stellen. Ook de keuze van een pomp met een lagere rotatiefrequentie of dubbelzijdige aanstroming kan tot een meer verantwoord pompsysteem leiden.

De beschikbare NPSH kan bepaald worden met behulp van de eerder gegeven formule volgens:

$$NPSH_{\text{beschikbaar}} = H_{zf} - H_d + \frac{c_z^2}{2 \cdot g} \text{ [mwk]}$$

Hierin is de absolute statische inlaatdruk H_{zf} geschreven als:

$$H_{zf} = H_a - H_z - H_{wz} - \frac{c_z^2}{2 \cdot g} \text{ [mwk]}$$

Hierin is:

H_{zf}	De absolute druk aan de zuigflens voor de zuigkant van de waaier van de pomp	mwk
H_a	De luchtdruk (10 mwk)	mwk
H_z	De zuighoogte, afstand waterspiegel tot het hart van de pomp	mwk
H_{wz}	De weerstand in het zuiggedeelte van de zuigleiding	mwk
c_z	Watersnelheid bij de zuigflens van de waaier voor het bepalen van de dynamische druk van het water	m/sec
g	Versnelling van de zwaartekracht (9,81)	m/sec ²

Ingevuld in de eerdere formule geeft dit:

$$NPSH_{\text{beschikbaar}} = H_a - H_z - H_{wz} - \frac{c_z^2}{2 \cdot g} - H_d + \frac{c_z^2}{2 \cdot g} \text{ [mwk]}$$

Of :

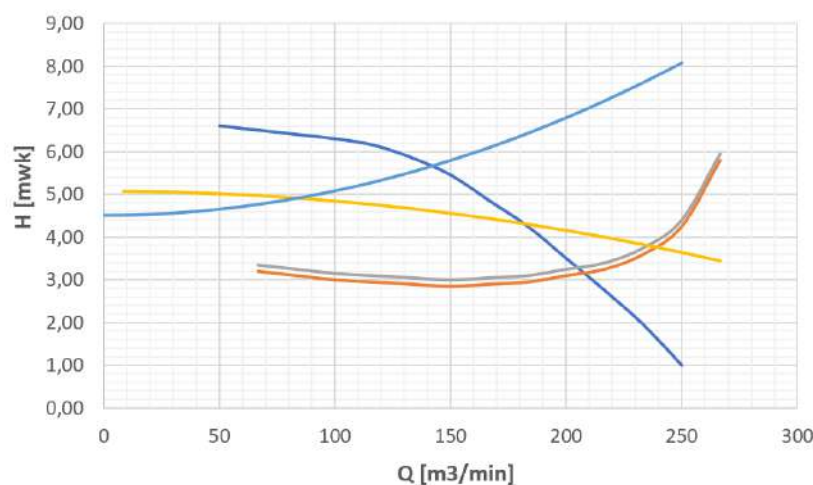
$$NPSH_{\text{beschikbaar}} = H_a - H_z - H_{wz} - H_d \text{ [mwk]}$$

Hiermee kan men dus de beschikbare zuighoogte berekenen of voor een gegeven situatie narekenen.

Anderzijds kan men, als de vereiste NPSH van de pomp bekend is, de zuighoogte H_z narekenen.

$$H_z = H_a - \text{NPSH}_{\text{vereist}} - H_{wz} - H_d \text{ [mwk]}$$

Voor de polderwaterpomp waarvan hier voor de verschillende krommes zijn afgebeeld is voor de grootste opvoerhoogte de beschikbare NPSH berekend bij een watertemperatuur van 30 °C, dus een dampspanning van 0,43 mwk. De resultaten zijn met de gele lijn in de grafiek hieronder weergegeven. De door de fabrikant opgegeven vereiste NPSH: de oranje lijn, is met 0,15 mwk verhoogd : de grijze lijn, om er zeker van te zijn dat de pomp in het snijpunt met de beschikbare NPSH niet caviteert. Dit snijpunt voorgesteld door de grijze met de gele lijn, rechts in de grafiek, ligt ruimschoots buiten het werkpunt van de pomp op dat moment. Bij geringer opvoerhoogtes neemt weliswaar het debiet toe en schuift het werkpunt van de pomp in de richting van het getekende NPSH snijpunt, echter dit snijpunt schuift ook op als gevolg van de gunstiger beschikbare NPSH.



Q – NPSH

Hier voor is aangegeven dat als op enig moment de druk in de pomp daalt onder die van de dampspanning er dampbellen ontstaan die met de vloeistofstroom worden meegenomen naar een gebied met een hogere druk en daar imploderen. Dit imploderen noemen we cavitatie en is hoorbaar als een lichte ruis tot hevig knetteren in de pomp.



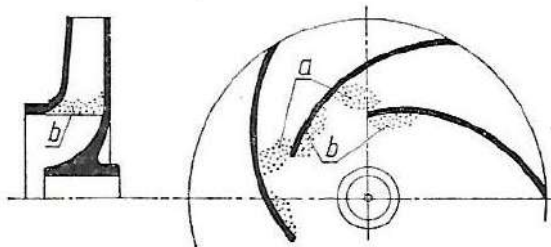
Door cavitatie aangetast onderdeel (bovenaanzicht)



Door cavitatie aangetast onderdeel (doorsnede)

Cavities heeft mechanische schade tot gevolg en vermindering van de capaciteit omdat de dampbellen meer ruimte innemen dan het water. Vindt de dampvorming aan de gehele intreezijde van de pomp plaats dan zal deze afslaan, echter dit is een situatie die zich eerder bij ketelvoeding waterpompen zal voordoen dan bij de onder aanmerkelijk gunstiger omstandigheden werkende polderwaterpompen..

Cavities is fysiek herkenbaar aan putjes met messcherpe randen loodrecht op het vlak van de waaier. Cavities ontstaat ten gevolge van door stroming gecreëerde onderdruk als gevolg van het moeten volgen van het stroomprofiel door de waterdeeltjes. Een en ander is te vergelijken met een vliegtuigvleugel waar met name aan de ronde voorkant het drukverschil tussen de boven- en de onderkant het grootst is. Cavities- schade moet gezocht worden bij de intreezijde van de schoep aan de niet-drukszijde hiervan. Een eenmaal aangetast, dus ruw geworden deel, verergert de situatie



en kan er voor zorgen dat de waaier onherstelbaar beschadigd wordt. Cavities heeft niet op elk materiaal dezelfde invloed. Zo is aangetoond dat de materiaal afname als gevolg van cavities bij gietijzer in gewicht 70 keer meer bedraagt dan bij aluminiumbrons. Het overigens aanmerkelijk duurdere aluminiumbrons is dus aanzienlijk beter

resistent tegen cavities dan gietijzer. Ook de hedendaagse en veel toegepaste roestvaste staalsoorten komen wat dit betreft in de buurt van het aluminium brons

Locaties waar cavities zich voor kan doen

Schroefwaaierpompen

Van het principe van de stromingspomp met een schroefwaaier is voor polderbemaling pas vanaf het begin van de 20^e eeuw gebruik gemaakt toen de voor deze pompen vereiste hogere toerentallen via de sneller draaiende elektromotoren mogelijk werden. Deze pomp is, vanwege zijn geschiktheid om grote hoeveelheden water bij relatief geringe opvoerhoogte te verpompen, uitermate geschikt voor de bemaling van polders. Het water in dit type pomp stroomt in axiale richting dat wil zeggen in lengterichting van de rotatie-as. Bij de hiervoor behandelde centrifugaalwaaierpomp stroomt het water in radiale richting dus haaks op de rotatie-as. De pompen worden daarom ook wel axiaal- en radiaalwaaierpompen genoemd. De as van de schroefpomp kan verticaal of horizontaal gepositioneerd zijn, waarbij in het laatste geval de pomp meestal boven de waterlijn wordt opgesteld en vanwege de verschijningsvorm met kattenrugpomp wordt aangeduid. Verder worden deze opvoerwerktuigen in gesloten- en open vorm toegepast. Bij de open-schroefpomp wordt de hydrauliek tussen de boven elkaar gebouwde zuig- en perskelder geplaatst waarbij de aandrijving op het dek van de perskelder staat. In sommige gevallen kan zelfs een overbrenging achterwege blijven waardoor een zeer eenvoudige en onderhoudsvriendelijke installatie wordt verkregen.

Bij de schroefwaaierpompen speelt de centrifugaalkracht geen rol bij het verkrijgen van de opvoerhoogte. Men kan als de naar het middelpunt gerichte kracht buiten beschouwing wordt gelaten, de formule voor de opvoerhoogte op dezelfde manier afleiden als bij de centrifugaalpomp.

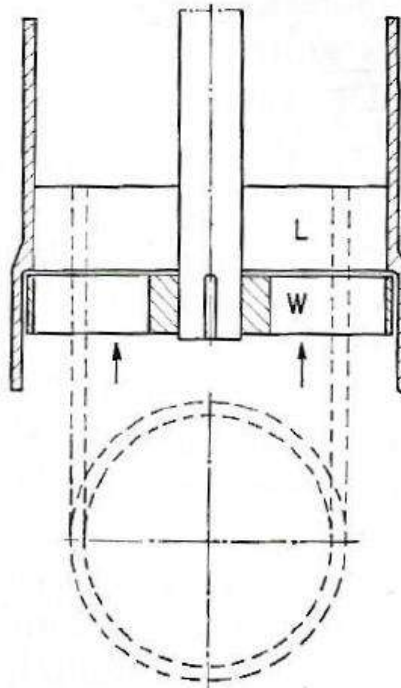
Beschouwt men in dit verband, een smalle concentrische ring van de waaier W en de zich daarachter bevindende leidschoepenkrans L , dan mag men over deze smalle ring, gerekend van binnen naar buiten, de omtreksnelheid constant denken. In de figuur op de volgende bladzijde is deze ring in een plat vlak uitgeslagen en zijn de schoepen met de daarbij behorende snelheidsparellen getekend die hetzelfde zijn als bij een centrifugaalwaaierpomp.

Men vindt dan voor de opvoerhoogte volgens Euler:

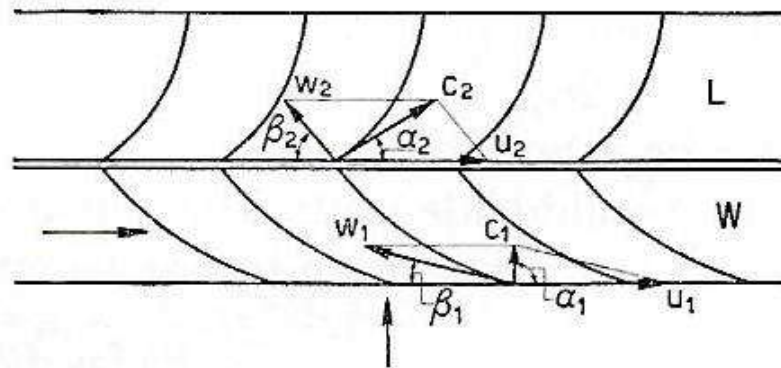
$$H_E = \frac{w_1^2 - w_2^2}{2g} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2g} \text{ [mwk]}$$

Men vindt deze uitkomst ook als men bij de centrifugaalpomp de omtreksnelheden u_1 en u_2 aan elkaar gelijk stelt dus zoals dat bij de schroefpomp het geval is. Als we de omtreksnelheid u noemen en op de snelheidsdriehoeken de cosinusregel toepassen vinden we voor de opvoerhoogte van de schoepen:

$$H_E = \frac{u \cdot c_2 \cdot \cos \alpha_2 - u \cdot c_1 \cdot \cos \alpha_1}{g} \text{ [mwk]}$$



Vereenvoudigde voorstelling schroefwaaierpomp



Snelheidsparallellogrammen schroefwaaierpomp

Het water stroomt onder de invloed van de atmosferische druk radiaal in de waaier met de snelheid c_1 . De hoek α_1 is dan 90° , waarvan de cosinus 0 is. De ideale theoretische opvoerhoogte kan dan, evenals bij de centrifugaalwaaierpomp, worden geschreven als:

$$H_E = \frac{u \cdot c_2 \cdot \cos \alpha_2}{g} \text{ [mwk]}$$

Het bepalen van de theoretische opvoerhoogte H_{th} en het hydraulisch rendement η_h gebeurt op dezelfde en eerder aangegeven wijze als bij de centrifugaalwaaierpomp. Vast staat dat het hydraulisch rendement bij schroefpompen hoog is, echter de factor k zeer laag en het product van beide 0,26 bedraagt.

Hierna wordt de uiteindelijke manometrische opvoerhoogte afgeleid, die zoals hiervoor is aangegeven

beduidend lager zal zijn dan die van een centrifugaalwaaierpomp.

$$H_E = \frac{u_2 \cdot c_{2u}}{g} \text{ [mwk]}$$

$$H_{th} = k \cdot H_E \text{ [mwk]}$$

$$H_m = \eta_h \cdot H_{th} \text{ [mwk]}$$

$$H_m = \eta_h \cdot H_{th} \text{ [mwk]}$$

$$H_m = \eta_h \cdot k \cdot \frac{u_2 \cdot c_{2u}}{g} \text{ [mwk]}$$

Het verloop van de verhoudingen tussen u_2 en c_{2u} over de schoeplengte evenals het aantal schoepen en het al of niet het elkaar overlappen van de schoepen zijn aannames die bij de

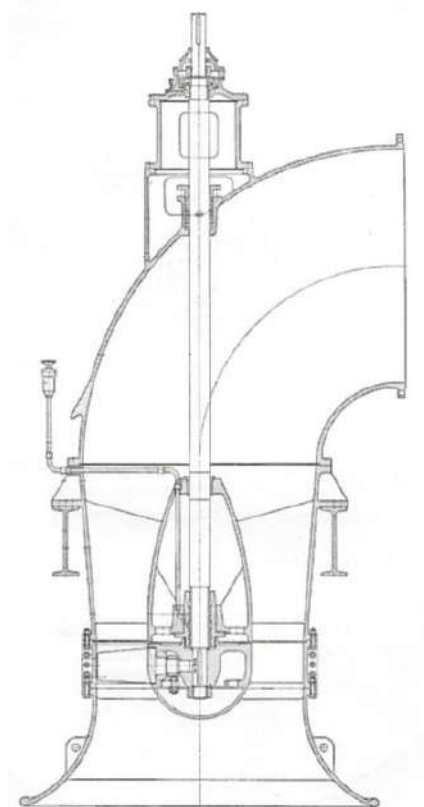
constructie van de pomp gedaan worden in samenhang met de uiteindelijk te bereiken k factor en het rendement. Het leidapparaat krijgt een zodanig aantal schoepen dat er nooit evenveel waaerschoepen zijn als leidschoepen om drukstoten en daardoor veroorzaakte trillingen te vermijden.

Men bepaalt de intreehoek van het leidapparaat uit het snelheidsdiagram van de waaier met in- acht name van de afwijking die de werkelijke stroomrichting zal hebben ten opzichte van de theoretische. De intreehoek zal iets groter zijn (5 ° - 10 °) dan de uittreehoek α_2 van de waaier.

De snelheidsenergie die in het leidapparaat omgezet moet worden in drukenergie bedraagt per liter -dus ongeveer per kg- water:

$$A. V. B. = \frac{c_2^2 - c_1^2}{2g} \text{ [kg. m]}$$

Het verloop van deze energie omzetting moet zo geleidelijk mogelijk geschieden om wervelingen en dus verliezen te voorkomen. Meestal gebeurt dit door de naaf van de pomp over te laten lopen in het leidschoepen gedeelte en deze daar geleidelijk in diameter te laten afnemen. Soms wordt dit gecombineerd met een verwijding van de diameter van het leidschoepenhuis, een en ander zoals in onderstaande tekening van een verticaal opgestelde gesloten schroefpomp is weergegeven.



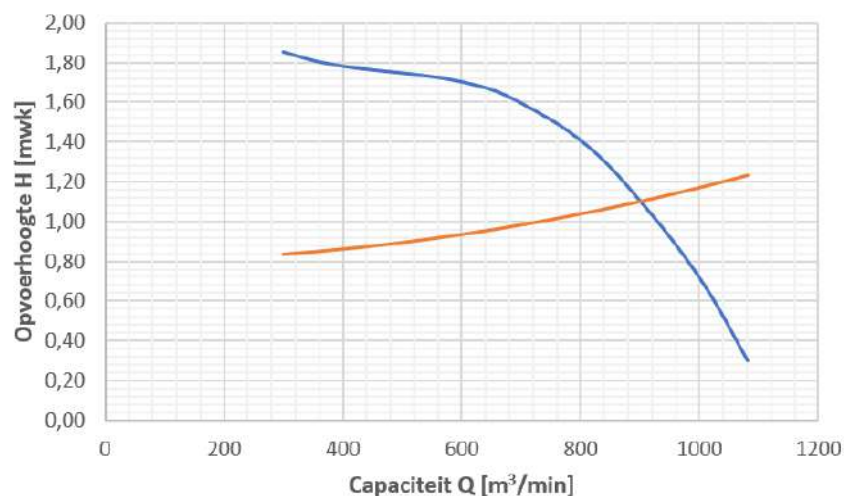
Verticaal opgestelde gesloten schroefpomp

Meestal wordt de verwijding na het leidschoepenhuis doorgezet in de pomp dan wel in de betonnen of stalen persbuis van de pomp. Om te voorkomen dat het water in de pomp een pre-rotatie krijgt

en niet onder een hoek van 90° binnentreedt wordt deze van een anti-rotatieschot voorzien. Dit schot is onderdeel van de zuigmond van de pomp, zoals op de tekening is aangegeven of wordt direct onder de zuigmond van de pomp in de zuigkast van de pomp aangebracht.

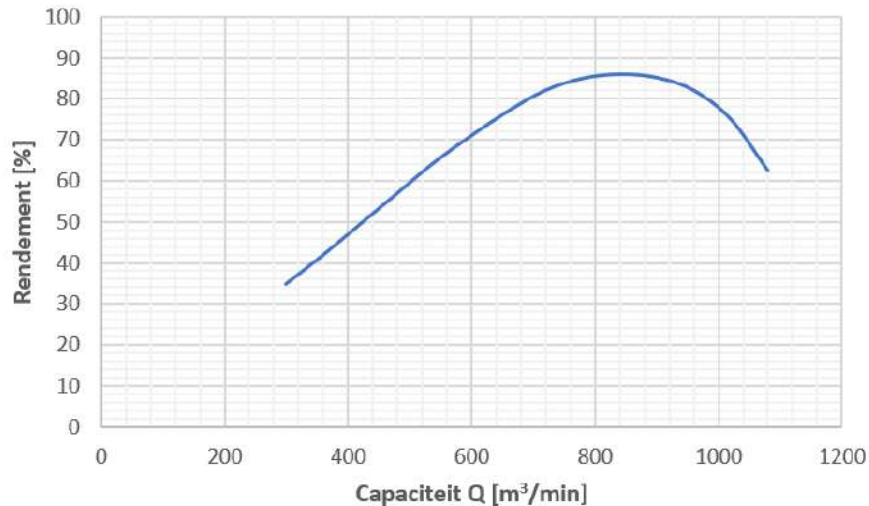
Bij kleine pompeenheden worden de waaiers uit een stuk gegoten. Bij pompen met een grote capaciteit bestaat de waaier uit meerdere onderdelen waarbij de naaf is voorzien van meerdere hieraan met een schroefverbinding bevestigde schoepen. Door de schoephoek te wijzigen kan men met één pompconcept meerdere capaciteiten bereiken. Soms worden de schoepbladen verstelbaar uitgevoerd en kan men bij sterk wisselende opvoerhoogten (bijvoorbeeld ten gevolge van getijde beweging) met een gelimiteerd vermogen ook bij extreem hoogwater toch nog water uitslaan of zelfs in twee richtingen pompen. Het pomphuis moet dan ter plaatse van de waaier bolvorming zijn uitgevoerd terwijl de pompas hol is om de verstelstang aan te kunnen brengen.

Het verband tussen opbrengst en opvoerhoogte kan bij de schroefwaaierpomp op dezelfde wijze in een grafiek worden weergegeven als bij de centrifugaalwaaierpomp. De kromme wordt bij niet al te grote pompen proefondervindelijk bepaald.



Q – H kromme schroefwaaierpomp met weerstandslijn (Linge gemaal)

In theorie vindt men op verschillende afstanden van de as een verschillende Q - H kromme. De kromme aan de omtrek van de waaier zal, doordat de uittreehoek daar veel kleiner is dan aan de naaf, een steiler verloop hebben dan de Q – H aan de naaf. Het snijpunt van beide krommes geeft aan welke opbrengst en bij welke opvoerhoogte deze laatste over de gehele dwarsdoorsnede gelijk zal zijn. Dit is dus maar bij één bepaalde opbrengst het geval. Bij elke andere opbrengst of opvoerhoogte zal de opvoerhoogte op verschillende afstand van de rotatie-as verschillend zijn en zullen circulatiestromen ontstaan, die een ongunstige invloed op het rendement hebben.

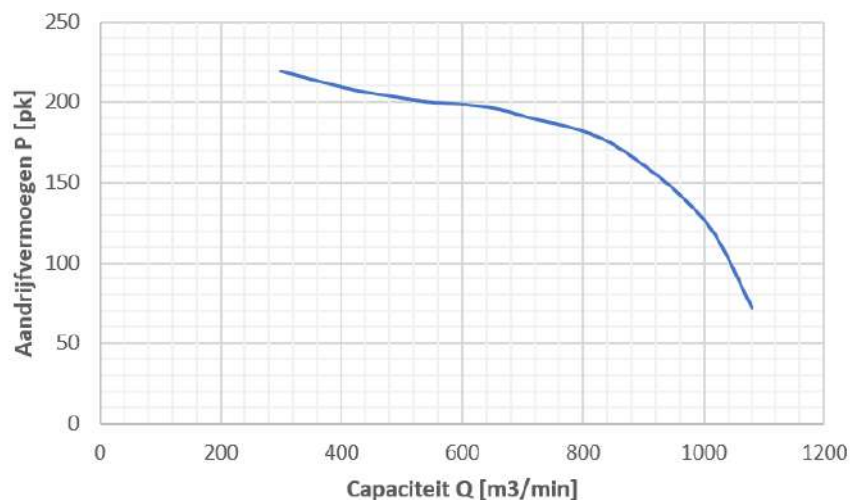


Q – η kromme schroefwaaierpomp (Linge gemaal)

De kromme die het verband aangeeft tussen de opbrengst en het totaal rendement is dan ook vrij steil. Hiermee dient rekening te worden gehouden bij het in bedrijfstellen van de pomp omdat dan het benodigde vermogen het grootst is.

Immers de waaier, het pomphuis, de zuigleiding en een deel van de persleiding zijn gevuld met water dat, evenals de massa van het roterende gedeelte, versneld in beweging moet worden gebracht.

Bij boven de waterlijn opgestelde pompen lost men dit probleem op door te wachten met het verwijderen van lucht tot de pomp draait.



Q – P kromme schroefwaaierpomp (Linge gemaal)

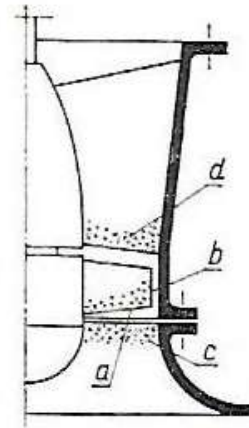
De kromme die het verband aangeeft tussen de opbrengst en het benodigde vermogen daalt bij een geringere opvoerhoogte en dus groter debiet. Echter bij een grotere opvoerhoogte, buiten het

werkgebied van de pomp, laat de grafiek een vrij steil verloop zien van het vermogen. Dit steile verloop bij grotere opvoerhoogte kan men verklaren door het te verpompen water als een min of meer vaste massa te beschouwen die door de schroefvormige waaier naar de perszijde wordt geschroefd. Als de afvoer wordt belemmerd zal er steeds meer energie nodig zijn om deze massa te verplaatsen. Dit maakt dat bij een schroefwaaierpomp bij grote opvoerhoogtes, buiten het werkgebied, het nominale aandrijfvermogen niet toereikend is. Ook moet uit oogpunt van veiligheid de pompas zwaarder worden gedimensioneerd om te voorkomen dat deze breekt als bijvoorbeeld abusievelijk de persafsluiter bij het in bedrijf stellen niet geopend is.

Een ander nadeel van de schroefwaaierpomp is, dat de zuighoogte kleiner is dan bij de centrifugaalpomp. Bij de centrifugaalpomp ligt de intreekant van de schoepen op een kleinere afstand van de as dan de uittrekant. De omtreksnelheid en de relatieve snelheid van het water ten opzichte van de schoep behoeven daar dus niet groot te zijn. Bij de schroefwaaierpomp daarentegen zal aan de omtrek van de waaier de omtreksnelheid groot zijn. De relatieve snelheid zal dus ook groot zijn wat de kans op cavitatie vergroot en dan ook vaak op die plaats optreedt.

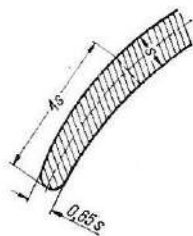


Voorbeeld van cavitatie bij schroefwaaier



Locaties waar cavitatie zich voor kan doen

Bij de centrifugaalpomp is reeds aangegeven dat als het geleidelijk volgen van het stroomprofiel problemen oplevert dit cavitatie tot gevolg kan hebben. Voor de schroefwaaierpomp zijn in de bovenstaande rechterfiguur deze potentiële plaatsen nader aangegeven.



Met het oog op de grote relatieve snelheid en de gevolgen hiervan voor cavitatie, is het van belang dat de schoepen zo nauwkeurig mogelijk van vorm en zo glad mogelijk van oppervlak zijn. Ook het glad houden van de waaierbladen gedurende het bedrijf is van groot belang.

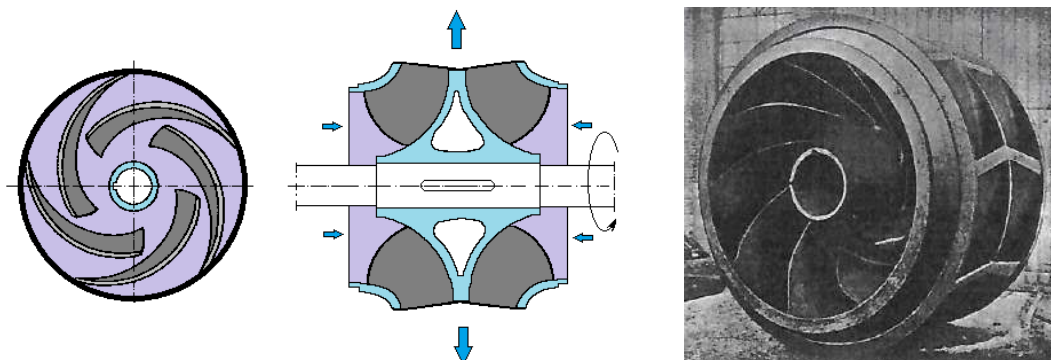
Schoepvorm schroefwaaier

In de schroefwaaierpomp ondergaat het water minder richtingveranderingen dan in een centrifugaalwaaier-pomp. De hydraulische verliezen die vooral bij geringe opvoerhoogte een dominante rol spelen blijven daardoor klein.

Bij geringe opvoerhoogte is ook het rendement van een schroefwaaierpomp, wanneer deze in de buurt werkt van het gunstigste punt van de $Q - H$ kromme, beter dan dat van een centrifugaalwaaier-pomp. Het hoge rendement bij kleine opvoerhoogte verklaart dan ook de veelvuldige toepassing van de schroefpomp voor polderbemaling in Nederland.

Schroef-centrifugaalwaaierpompen

Door de goede eigenschappen van de centrifugaalwaaierpomp met die van een schroefwaaierpomp te combineren krijgt men een pomp die geschikt is voor het verpompen van grote waterhoeveelheden bij relatief geringe opvoerhoogte en een vlak verlopende vermogens kromme. Dit soort pompen die op grote schaal voor polder- en boezembemaling zijn toegepast noemen we schroefcentrifugaalwaaierpompen. Het basisprincipe van de pomp is afgeleid van het waterturbinerad volgens Francis. De waaiers waarmee deze pompen, die vaak abusievelijk als centrifugaalwaaierpompen werden aangeduid, noemen we Franciswaaiers. Het kenmerk van deze waaiers is het grote aantal schoepen die schroefvormig zijn aan de intreezijde en waaievormig aan de uittreezijde, dus dubbel gekromd.



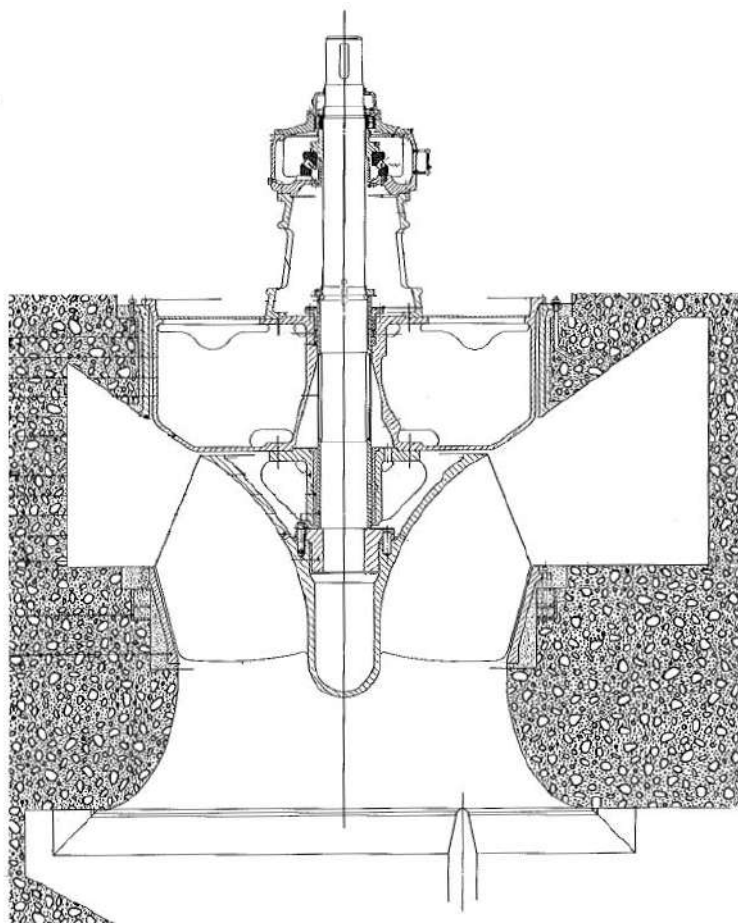
Schroefcentrifugaalwaaier pomp met tweezijdige instroming (Francis)

De schets en de foto laten de waaier zien waarmee de pompen bij het ir. D.F. Woudagemaal te Lemmer zijn uitgerust. De in 1953 gemonteerde waaier heeft 5 dubbel gekromde schoepen en is goed voor een capaciteit van $2 \times 250 \text{ m}^3/\text{minuut}$ bij een opvoerhoogte van 0,55 m. De originele, uit 1920, daterende waaier met een diameter van 1,70 m had 12 schoepen en was daarmee aanzienlijk verstoppingsgevoeliger dan de huidige waaier.

De waaiers van dit pompconcept zijn gesloten. Dat betekent dat de schoepen aan de zijde van het pomphuis zijn voorzien van een afdekking. Dit maakt samen met de dubbel gekromde schoepen de constructie bijzonder complex en moeilijk te vervaardigen. Door de dubbele kromming kan men namelijk geen goed uit het vormzand lossend gietmodel maken. Daarom werden de schoepen vaak uit plaatstaal gesmeed, in de gietvorm aangebracht en tijdens het gieten versmolten met de andere onderdelen van de waaier. Omdat staal minder resistent is tegen roestvorming trad bij de op deze

wijze vervaardigde waaiers bij de schoepen dan ook als eerste roestschade op, wat leidde tot vroegtijdige vervanging.

Schroefcentrifugaalwaaierpompen hebben zoals hiervoor aangegeven een axiaal-radiale doorstroming van de vloeistof. Als de vloeistof via de diagonaal van de waaier uitstroomt noemen we een dergelijke pomp een half-axiaalwaaierpomp. Een voorbeeld hiervan met een open waaier en een slakkenhuis van beton is op de volgende bladzijde afgebeeld.



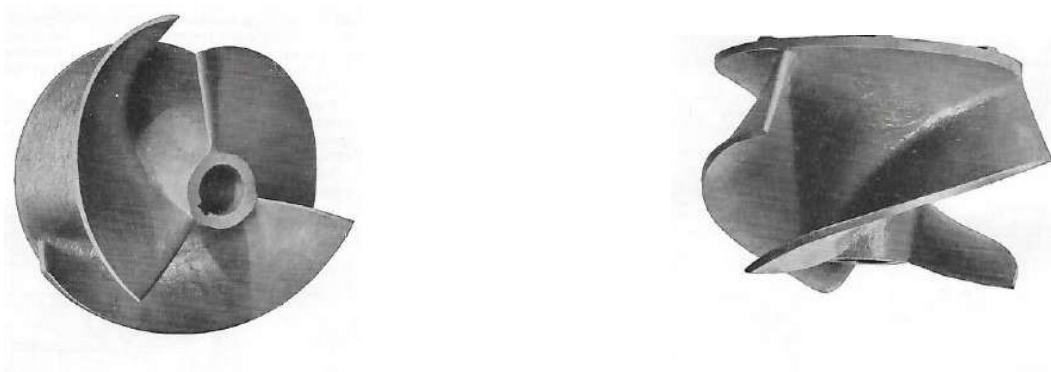
Schroefcentrifugaalpomp (halfaxiaal uitvoering en betonnen slakkenhuis)

Deze indertijd door Stork ontwikkelde pomp werd een enkele keer boven maar meestal onder de waterlijn opgesteld en geïntegreerd in de betonconstructie van het gemaal. Bij de getoonde uitvoering worden de axiaal- en de radiaalkrachten van de pomp rechtstreeks op het pompdekseel en dientengevolge op de onderbouw van het gemaal overgebracht. Dit zelfde pomptype werd ook vaak uitgevoerd met een radiaal lagering in de pomp en een axiaal lager in de tandwielkast of een speciale lagerpot op machinekamerniveau. De betonconstructie zorgt voor een corrosievrij slakkenhuis en daarmee een uiterst duurzaam pompconcept. De eerste generaties van deze pompen werden monoliet gebouwd waarbij de civieltechnische aannemer op aanwijzing en onder

toezicht van de pompleverancier de betonconstructie van de pomp verzorgde. Eventueel werden hiervoor door de pompleverancier stalen mallen beschikbaar gesteld.

Aan het eind van de 20^e eeuw is men overgegaan om, als de grootte dat toeliet, het slakkenhuis te prefabriceren en werden het slakkenhuis inclusief het betonnen gedeelte van de zuigmond ook door de pompfabrikant geleverd.

De waaiers van deze pompen worden meestal uitgevoerd met slechts drie schoepen waardoor een betrekkelijk eenvoudige constructie met een voor gemalen belangrijke ruime doortocht wordt verkregen. Hier onder staat een voorbeeld afgebeeld van een dergelijke schroefcentrifugaalwaaier.



Schroefcentrifugaalwaaier open constructie

In tweedimensionaal aanzicht bestaat de waaier uit twee afgeknotte kegels. De parabolische vorm van de waaiernaaf waarop de schoepen zijn geplaatst zorgt er voor dat het water vloeiend tussen de schoepen door stroomt.

Invloed toerental op pompprestaties

Bij zuigerpompen is de manometrische opvoerhoogte alleen afhankelijk van de geodetische hoogteverschillen en de drukverliezen in de leiding en onafhankelijk van de volumestroom. Bij de centrifugaal pomp bestaat er wel een verband tussen de manometrische opvoerhoogte H_{man} , de volumestroom Q en het toerental n van de pomp. Bij verschillende toerentallen geeft dezelfde centrifugaal- pomp verschillende pompkarakteristieken. Die van een hoger toerental ligt boven die van een lager toerental. Deze bij elkaar behorende karakteristieken worden door een gelijkvormigheidswet bepaald, zodat ze binnen bepaalde verschalingsgrenzen dezelfde vorm hebben. Bij polderwater maar ook andere vloeistoffen met voldoende lage viscositeit bestaan tussen het debiet Q , de manometrische opvoerhoogte H_{man} , het aan de pompas toe te voeren vermogen en het toerental n de volgende betrekkingen.

Voor de capaciteit:

$$Q_2 : Q_1 = n_2 : n_1$$

Of:

$$Q_2 = \frac{n_2}{n_1} \cdot Q_1$$

Voor de opvoerhoogte luidt deze betrekking:

$$H_2 : H_1 = n_2^2 : n_1^2$$

Of:

$$H_2 = \frac{n_2^2}{n_1^2} \cdot H_1 = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \cdot H_1$$

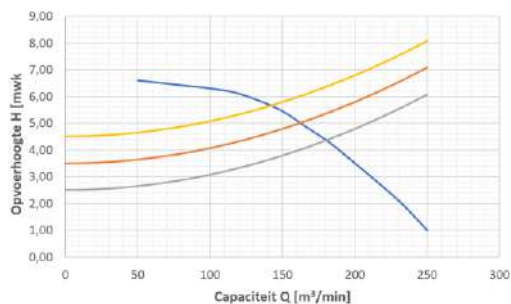
Voor het vermogen luidt deze betrekking:

$$P_2 : P_1 = n_2^3 : n_1^3$$

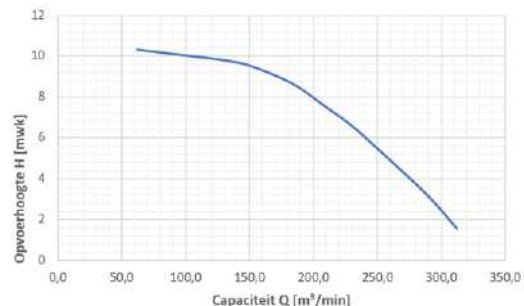
Of:

$$P_2 = \frac{n_2^3}{n_1^3} \cdot P_1 = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \cdot P_1$$

Van het voorbeeld van de centrifugaalpomp is met behulp van de hier voor gegeven verschalingsformules de Q – H relatie bij een toerental van 250 omw/min bepaald. De nieuwe berekende kromme ligt parallel aan die van de garantiekromme die is bepaald bij 200 omw/min.



Q – H bij 200 omw/min



Q – H bij 250 omw/min

Door het verhogen van het toerental kan dus bij toenemende opvoerhoogte dezelfde capaciteit worden verpompt of omgekeerd bij gelijkblijvende opvoerhoogte wordt er meer water verzet. Hiervan werd en wordt nog steeds gebruik gemaakt bij polderbemaalingsinstallaties door bewust te kiezen voor een aandrijving die in toeren regelbaar is zoals de stoommachine en in het verleden de dieselmotor en de elektromotoren met meerdere toerentallen.

Omdat het vermogen met de derde macht en het koppel met de tweede macht van het toerental toeneemt moet de installatie ontworpen zijn voor het hoogst mogelijke toerental.

Constructieve aspecten stromingspompen

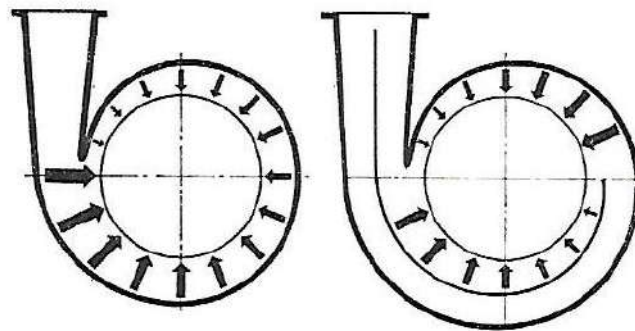
De steeds betere kennis van de hydraulica, de betere materialen maar ook de verbeterde technieken en bewerkingswerktuigen om stromingspompen te vervaardigen hebben geleid tot een grote verscheidenheid aan soorten en type pompen waarvan de verschillen soms alleen door een kenner kunnen worden waargenomen. Een aantal constructieve aspecten van de pompen die

hiervoor zijn behandeld, die bij de bemaling worden ingezet en die van belang zijn te kennen in het kader van bediening en onderhoud, worden hierna nader toegelicht.

Radiale krachten

In het slakkenhuis wordt als gevolg van de omzetting van de snelheidshoogte in statische druk vanaf de tong van de pomp naar de uitstroomtuit een steeds grotere radiaalkracht op de waaier en derhalve op de pompaslagers uitgeoefend. We noemen dit in de pomptechniek de slakkracht. De resultante van deze krachten is zoals in onderstaande figuur is aangegeven naar één zijde gericht. Pompen met een hoge druk en die niet van leidschoepen zijn voorzien worden daarom vaak met een dubbele slak uitgevoerd waardoor de kracht-resultante nul wordt. Bij de met glijlagers uitgevoerde pompen met een enkelvoudige slak moet men de grootste lagerslijtage dan ook in de richting van deze kracht en die van het gewicht van de waaier en de as vinden.

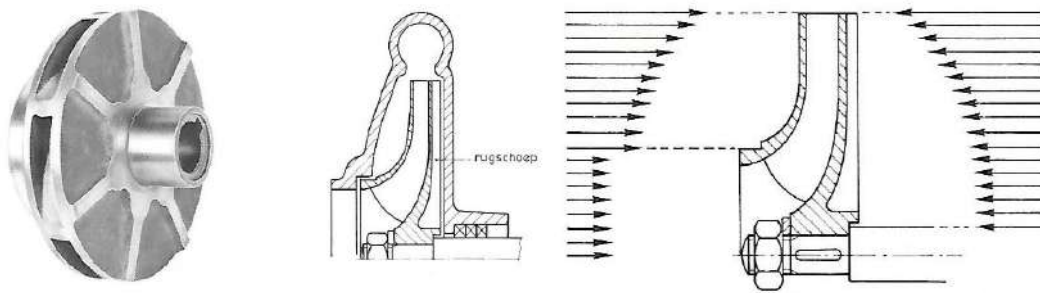
Bij overslag pompen zal deze kracht door het gewicht van de waaier en de as worden versterkt. Bij een onderslag pomp zal de slakkracht de kracht veroorzaakt door het gewicht juist geheel of gedeeltelijk opheffen.



Slakkrachten pomp met slakkenhuis

Axiale krachten

Bij centrifugaalpompen met eenzijdige instroming lekt door de spleet aan de omtrek water naar de buik en de rug van de waaier. In deze ruimten heerst dus een grotere druk dan in de instroming van de waaier. Omdat de ruimte tegenover de instroming groter is dan de ruimte in de omtrek boven de instroming, ontstaat een axiale kracht die de waaier naar de zuigzijde drukt. Een en ander zoals hieronder is weergegeven.

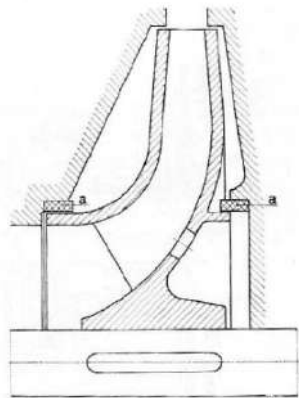


Opheffen axiaalkracht met behulp van rugschoep

Behalve dat er een axiale kracht ontstaat die moet worden opgevangen door een axiaal lager, lekt er vanuit de buikzijde van de waaier water naar de zuigzijde. Deze lekkage, aan te merken als lekverlies, wordt zo veel als mogelijk beperkt door de nauwe spleet (0,1 – 1,15 mm) tussen de in het huis bevestigde en verwisselbare slijtring en de waaier. Bij tweezijdige instroming heffen de axiaalkrachten elkaar op en hoeft de lagering slechts de krachten als gevolg van toevallige drukverschillen op te nemen. Drukverschillen treden bijvoorbeeld op bij het opstarten van de pomp of als er lucht wordt aangezogen,

Een veel toegepaste methode om de axiaal krachten op te heffen, naast die van een tweezijdige aanstroming, is die met behulp van een rugschoep. Een en ander zoals hierboven is weergegeven. Deze rugschoepen draaien dan met een geringe speling langs de vlakke achterwand van het pomphuis. Het water tussen de rugschoepen draait met de waaier mee en ondervindt een centrifugale kracht. Ten gevolge van deze kracht zal de druk in die ruimte, en dus ook de kracht op de achterwand van de waaier, naar de as toe afnemen. Volledige compensatie van de axiale kracht zal maar op één punt van de Q – H kromme mogelijk zijn. Er zal dus steeds enige compensatie van de axiaalkracht door middel van een axiaal lager nodig zijn. De constructie met rugschoepen heeft het voordeel dat de druk voor de pakkingkamer wordt verminderd en dat eventuele verontreinigingen zoals zand, niet de pakking bus binnen dringen en de as beschadigen.

Een andere en veel toepaste oplossing om de axiale kracht op te heffen is met behulp van de in de hieronder staande figuur weergegeven constructie. De ruimte tegenover de zuigzijde van de waaier



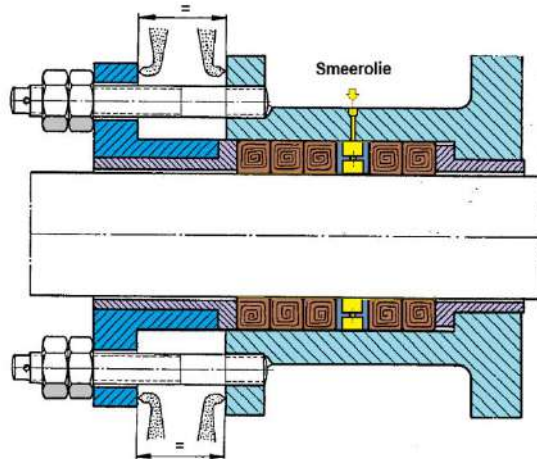
is evenals bij die aan de zuigzijde afgedicht met een slijtring terwijl in de rug van de waaier een aantal gaten is aangebracht. Met deze constructie vermijdt men wel de axiale kracht, echter nu treedt aan beide zijden van de waaier spleetverlies op zodat het volumetrisch rendement minder is. Ook bij deze oplossing zal enige compensatie van axiaal krachten veroorzaakt door toevallige drukverschillen, met behulp van een lager moeten plaatsvinden.

Waaier met ontlastboringen

Asafdichting of gland

De afdichting van de as is een van de meest kritische punten bij een pompconstructie omdat deze in zeer grote mate de bedrijfszekerheid bepaalt. In de praktijk worden tegenwoordig een groot aantal uiteenlopende constructies toegepast, echter bij de onderhavige installaties waarvoor deze leidraad is geschreven worden voor de afdichting van de bemalingspompen bijna uitsluitend de beproefde stopbus- pakkingbussen met zachte pakking toegepast. Van deze stopbus of gland, waarvan een groot aantal afdichtingen zijn afgeleid, is op de volgende bladzijde een voorbeeld gegeven. Deze bus wordt met olie gesmeerd om de pakking soepel te houden en de wrijving te verminderen. Als

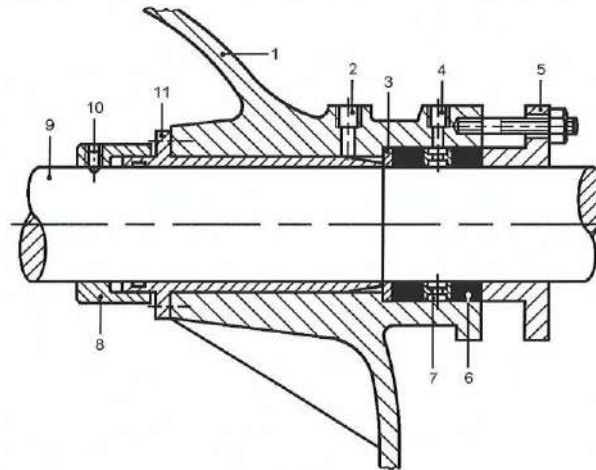
smeermiddel wordt echter meestal vet gebruikt dat wordt toegediend met behulp van bijvoorbeeld een zogenoemde Staufer vetpot.



Conventionele stopbus

Het opnieuw verpakken van de stopbus dient zorgvuldig te gebeuren waarbij het drukstuk bij draaiende machine gelijkmatig en beetje bij beetje wordt vastgedraaid. Hierbij moet er voor worden gewaakt, door aan de bus te voelen of de temperatuur oploopt, dat het drukstuk te strak wordt vastgedraaid omdat daardoor de as onherstelbaar beschadigd wordt. Dit laatste is de reden dat sommige pompfabrikanten de as ter plaatse van een slijtbus voorzien. Deze relatief dunne bus kan door afdraaien worden verwijderd en door een nieuwe worden vervangen. Tegenwoordig worden beschadigde assen opgespoten en tot de originele diameter afgedraaid. Soms kiest men er voor om hiervoor een hard metaal te gebruiken waardoor de slijtage minder snel verloopt.

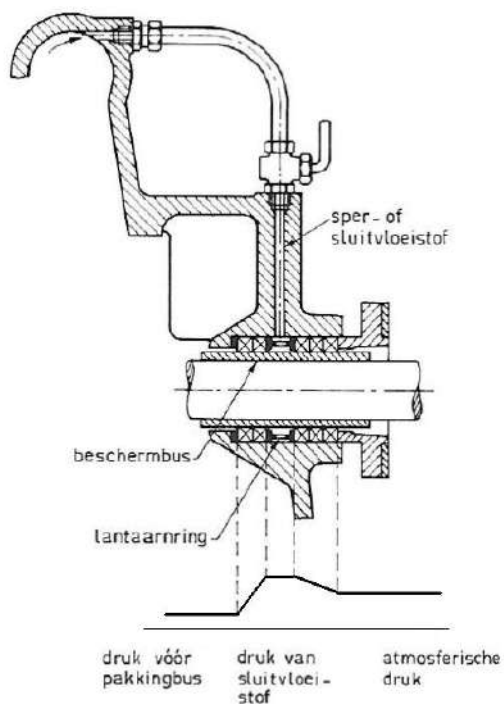
Er bestaan twee principiële verschillen met betrekking tot de richting waarin de as moet worden afgedicht: Bij een onder het polderpeil opgestelde pomp zal er in de pomp ter plaatse van de asafdichting een hogere druk dan die van de omgeving heersen terwijl bij de boven de waterlijn opgestelde pomp die druk meestal lager is. In het ene geval wordt het water naar buiten geperst terwijl in het andere geval lucht wordt aangezogen. Daarenboven wordt de lagering van de pompas in de pomp, zo dicht mogelijk bij de waaier en dus in het natte gedeelte aangebracht, terwijl bij andere constructies de lagering bewust buiten het natte gedeelte van de pomp wordt gehouden. In alle gevallen is de asafdichting dichtbij de lagering gesitueerd of is hiervan zelfs onderdeel zoals we in de onderstaande tekening van een (oude) Stork pomp kunnen zien. Bij deze constructie wordt het lager met olie gesmeerd en de pakking met vet gesmeerd. De as heeft geen slijtbus ter plaatse van de stopbus.



1 Slakkenhuis	5 Drukstuk	9 Pompas
2 Aansluiting smeertoestel	6 Pakking	10 Stelschroef
3 Ring	7 Lantaanring	11 Lagerbus
4 Aansluiting Stauffer-vetpot	8 Dichtingsring	

Lagering en asafdichting gecombineerd

Om het binnendringen van lucht en het afslaan van de pomp te voorkomen wordt bij bepaalde pompconstructies gebruik gemaakt van zogenoemd sperwater. Dit water wordt door de pomp zelf of een aparte sperwaterpomp geleverd en heeft een iets hogere druk dan die van de atmosfeer. Van een dergelijke constructie wordt hiernaast een voorbeeld gegeven. Het sperwater zoals uit de



druklijn onderaan de tekening kan worden afgelezen, vloeit dus voor een deel weg naar de pomp en voor een ander (kleiner) deel naar buiten in de lekbak onder de asafdichting. Soms, meestal als de pakking kamer aansluit op het glijlager van de pomp, wordt inplaats van water olie onder geringe druk toegevoerd. Deze olie wordt met het te verpompen polderwater afgevoerd. Met de huidige milieu- wetgeving is dit slechts toegestaan als er beperkt hoeft te worden gedoseerd en de olie snel afbreekbaar is in het oppervlaktewater. Bij deze constructie is de as voorzien van een slijtbus.

Asafdichting met spervloeistof

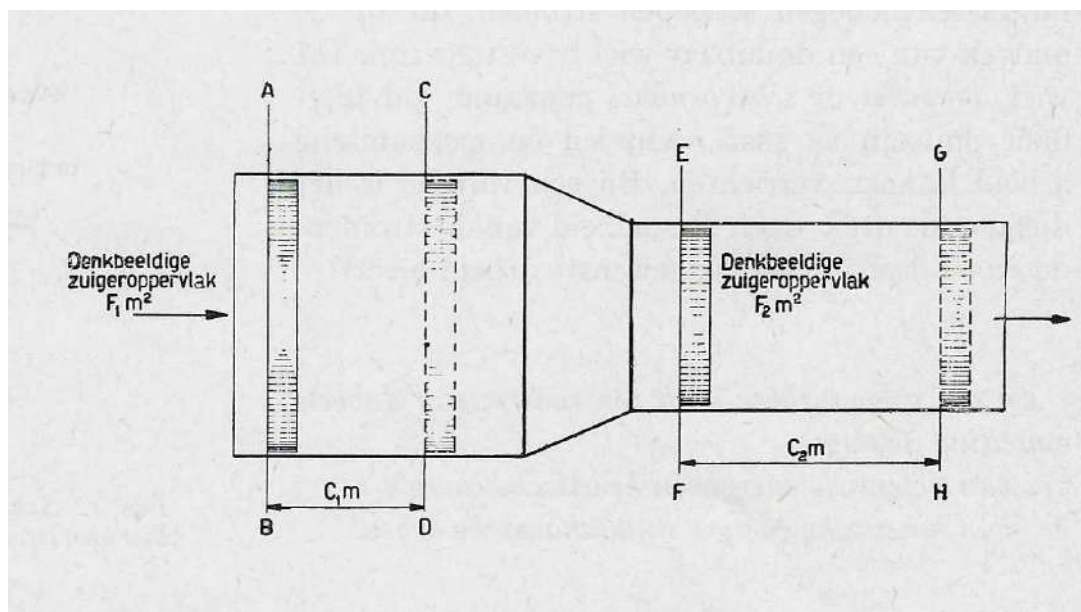
4.18.7 Vacuümsystemen

Stoomejecteur

De stoomejecteur wordt bij bemalingsinstallaties gebruikt voor het evacueren van lucht uit boven de waterlijn opgestelde bemalingspompen. Bij een ejecteur maar ook bij de injecteur waarmee water in de stoomketel wordt gevoerd, wordt gebruik gemaakt van een zogenoemde straalbuis ook wel Lavalse buis genoemd. De werking van zo'n buis waar drukenergie aangeduid met a.v.p. (arbeidsvermogen van plaats) wordt omgezet in snelheidsenergie aangeduid met a.v.b. (arbeidsvermogen van beweging) laat zich als volgt verklaren.

Continuïteitsformule

Om te kunnen nagaan hoeveel stoom er per seconde door een buis met een cirkelvormige doorsnede stroomt, stelt men zich voor dat in een willekeurige doorsnede A-B in de hierbij afgebeelde figuur zich een denkbeeldige zuiger bevindt.



Afbeelding bij afleiding van de continuïteitsformule

Is de stromingssnelheid van de stoom C m/sec dan verplaatst deze zuiger zich in 1 seconde over een afstand C_1 m. tot in de stand C-D. Het volume stoom, dat dus in de beschouwde seconde de doorsnede A-B gepasseerd is, bevindt zich tussen de denkbeeldige vlakken A-B en C-D van de zuiger. Als het oppervlak van de buis F_1 m² bedraagt dan is het volume stoom tussen de genoemde zuigervlakken gelijk aan $F_1 \cdot C_1$ m³.

$$\text{Doortocht} \cdot \text{Snelheid} = \text{Volume/seconde}$$

$$F_1 \cdot C_1 = V \text{ [m}^3/\text{sec]}$$

Is het soortelijk volume (specifiek volume) , v_1 m³/kg dan is, als G_1 het gewicht (de massa), uitgedrukt in kg, voorstelt dat per seconde de doorsnede passeert, gelijk aan:

$$G_1 = \frac{V}{v_1} \text{ [kg]}$$

Of:

$$G_1 \cdot v_1 = V \text{ m}^3 / \text{sec}$$

Substitueert men deze vergelijking in de vorige dan gaat deze over in:

$$F_1 \cdot C_1 = G_1 \cdot v_1$$

$$G_1 = \frac{F_1 \cdot C_1}{v_1} \text{ [kg]}$$

Anders geschreven:

$$\text{Gewicht stoom/seconde} = \frac{\text{Doortocht} \cdot \text{Snelheid}}{\text{Soortelijk volume van de stoom}}$$

$$G_2 = \frac{F_2 \cdot C_2}{v_2} \text{ [kg]}$$

Bij een regelmatige stroming is het gewicht stoom dat per seconde door de ene zijde van de buis stroomt gelijk aan dat van de andere zijde, zodat $G_1 = G_2$. Hieruit volgt:

$\frac{F_1 \cdot C_1}{v_1} = \frac{F_2 \cdot C_2}{v_2}$

Deze betrekking staat bekend als de continuïteitsformule en is van toepassing bij de stroming van gassen maar ook voor vloeistoffen door buizen en kanalen.

Formule van Zeuner

Om na te kunnen gaan hoe groot in een bepaald geval de stroomsnelheid van stoom wordt, beschouwen we stoom in een ruimte met een druk die hoger is dan die van de omgeving. Deze stoom bezit een hoeveelheid arbeidsvermogen van plaats, afgekort a.v.p., ten gevolge van de in de stoomketel opgenomen energie. Maakt men nu een opening vrij van bij voorbeeld een straalbuis dan stroomt er door het drukverschil stoom naar buiten. Deze stoom expandeert en krijgt een bepaalde snelheid en ten gevolge hiervan bezit de stoom arbeidsvermogen van beweging, afgekort a.v.b.

Ten gevolge van de verkregen snelheid bevinden de stromende stoomdeeltjes zich maar zeer kort in de straalbuis, zodat ze nagenoeg geen gelegenheid hebben warmte aan de omgeving af te staan of daarvan op te nemen.

Daarom mogen we veronderstellen dat er geen warmte uitwisseling met de omgeving plaats vindt. Een dergelijke vorm van expansie noemt men een adiabatische of isentropische expansie. Indien nu tijdens de stroming, de stoom geen warmte opneemt of afstaat moet dus een deel van de in de stoom aanwezige energie gebruikt zijn voor het opwekken van de stromingssnelheid. Dit is inderdaad het geval want de stoom heeft na de expansie een lagere druk en temperatuur, dat wil zeggen het a.v.p.van de stoom is afgenomen. Stroming van stoom in een straalbuis is dus een proces waarbij een deel van de in de stoom opgeslagen warmte omgezet wordt in a.v.b. of kinetische energie.

Volgens de wet van behoud van energie moet het a.v.b. gelijkwaardig zijn aan de hoeveelheid aan de stoom onttrokken warmte. De uitstromingssnelheid is dus afhankelijk van het verschil van de warmte-functie of enthalpie van de stoom vóór en ná de expansie. De warmtefunctie wordt aangeduid met de Griekse letter χ (chi) met de dimensie kcal/kg.

We laten voor het afleiden van de hier voor aangegeven formule G kg stoom in een straalbuis expanderen. Hierbij vindt dus geen warmte uitwisseling plaats en wordt verondersteld dat de stoom geen wrijvingsweerstand ondervindt. De warmtefunctie vóór en ná de expansie stellen we op respectievelijk χ_0 en χ_1 kcal/kg. De snelheid waarmee de stoom de straalbuis instroomt C_0 en die bij de uitstroming C_1 m/sec.

De totale energie van de stoom vóór respectievelijk ná de expansie is gelijk aan de som van het arbeidsvermogen van plaats en het arbeidsvermogen van beweging. Voor stoom die met een snelheid van C m/sec stroomt is het a.v.b.:

$$\frac{G}{2g} C^2 \text{ kgm}$$

Drukt men de warmte energie van stoom ook uit in kgm dan wordt dit, omdat 1 kcal gelijk is aan 427 kgm, voor G kg stoom:

$$G \cdot \chi \cdot 427 \text{ kgm}$$

De vergelijking van de totale energie voor en na de expansie ziet er als volgt uit:

$$G \cdot \chi_0 \cdot 427 + \frac{G}{2g} C_0^2 = G \cdot \chi_1 \cdot 427 + \frac{G}{2g} C_1^2$$

$$G \cdot \chi_0 \cdot 427 - G \cdot \chi_1 \cdot 427 = \frac{G}{2g} C_1^2 - \frac{G}{2g} C_0^2$$

$$(\chi_0 - \chi_1) \cdot 427 = \frac{1}{2g} (C_1^2 - C_0^2)$$

De term $(\chi_0 - \chi_1)$ stelt de warmteval H over de straalbuis voor. Als voor de zwaartekracht g 9,8 m/sec² wordt ingevoerd dan gaat de formule over in:

$$C_1^2 - C_0^2 = 2 \cdot 9,8 \cdot 427 \cdot H$$

De snelheid C_0 waarmee de stoom de straalbuis binnen stroomt bedraagt ongeveer 30 - 40 m/sec. Deze waarde is vrij klein ten opzichte van C_1 na de expansie van de stoom en kan zonder grote fout te maken verwaarloosd worden. De vergelijking gaat dan over in:

$$C_1^2 = 2 \cdot 9,81 \cdot 427 \cdot H$$

Of anders geschreven:

$$C = 91,5\sqrt{H}$$

Deze betrekking staat bekend als de formule van Zeuner en geeft aan dat de stoomsnelheid na de expansie gelijk is aan 91,5 maal de vierkantswortel uit de warmteval. Om een tweemaal zo grote snelheid te krijgen moet de warmteval verviervoudigd worden.

Dat de stoom grote snelheden kan verkrijgen in een straalbuis toont het volgende voorbeeld aan. We veronderstellen in een straalbuis een adiabatische expansie van stoom met een absolute druk van 13 kg/cm² en 300 °C die expandeert naar een druk van 0,1 kg/cm² en een temperatuur van 45 °C. Volgens de stoomtabel bedraagt de enthalpie van de stoom in de begintoestand 727 kcal/kg en die in de eindtoestand 527 kcal/kg zodat de warmteval 200 kcal/kg bedraagt.

$$C = 91,5\sqrt{200} = 1294 \text{ m/sec}$$

Deze snelheid komt overeen met 4650 km/h.

Straalbuis

Met gebruikmaking van het Mollier diagram of de stoomtabel en met behulp van de hier voor afgeleide Continuïteitsformule en de formule van Zeuner kunnen de snelheden en vervolgens de daarbij behorende doorsneden worden berekend en kan vervolgens de vorm van een straalbuis worden bepaald.

Men kan dit gemakkelijk inzien met behulp van de formule:

$$G = \frac{F \cdot C}{v}$$

Waarvoor geschreven kan worden:

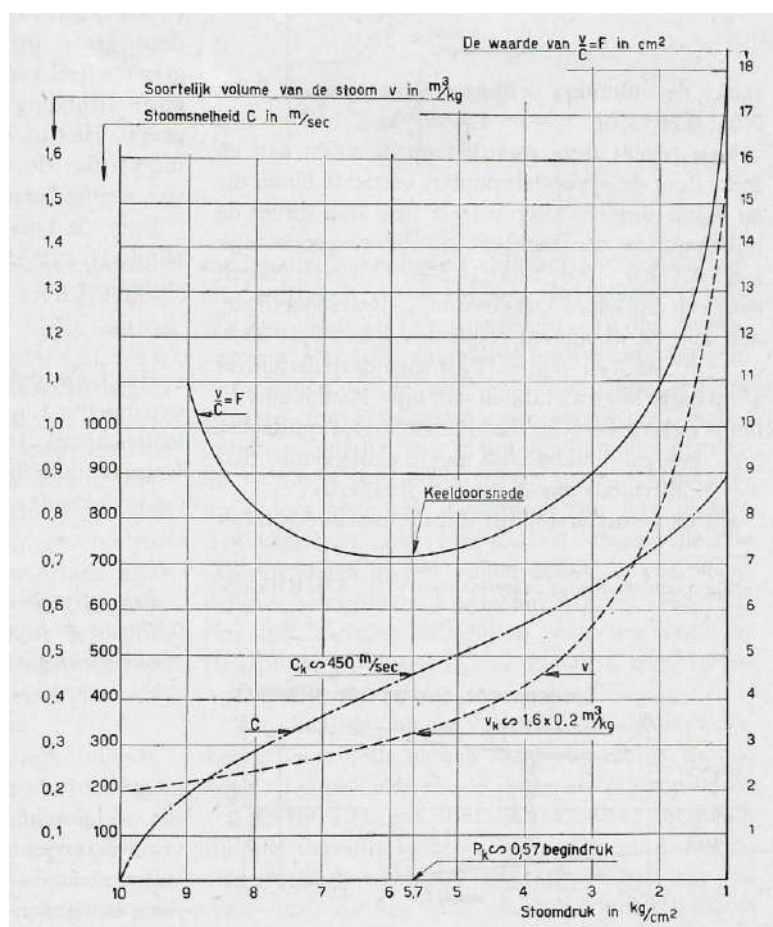
$$F = G \cdot \frac{v}{C} \text{ m}^2$$

En de hierbij herhaalde formule van Zeuner:

$$C = 91,5\sqrt{H} \text{ m/sec}$$

Een dergelijke berekening is aan de hand van een voorbeeld met stoom met een druk van 10 kg/cm² uitgewerkt en in de hierna volgende figuur grafisch weergegeven.

Het verloop van de doorsneden wordt door de stippellijn F in cm^2 weergegeven. Men leest hieruit af dat de doorsnede tot een druk van $5,7 \text{ kg/cm}^2$ afneemt om daarna weer toe te nemen. De nauwste doortocht noemt men de keel. Het eerste deel van de buis is convergerend, toelopend, het laatste deel, dus na de keel is divergerend, uitlopend. Zoals uit de figuur is af te leiden heeft de straalbuis de vorm van een parabool. Om praktische redenen wordt de berekende vorm bij het maken niet exact gevolgd maar hanteert men een compromis in de vorm van een afgeknotte kegel met gladde ronde overgangen. Proefondervindelijk heeft men vastgesteld dat de tophoek van het divergerende deel 10° moet zijn



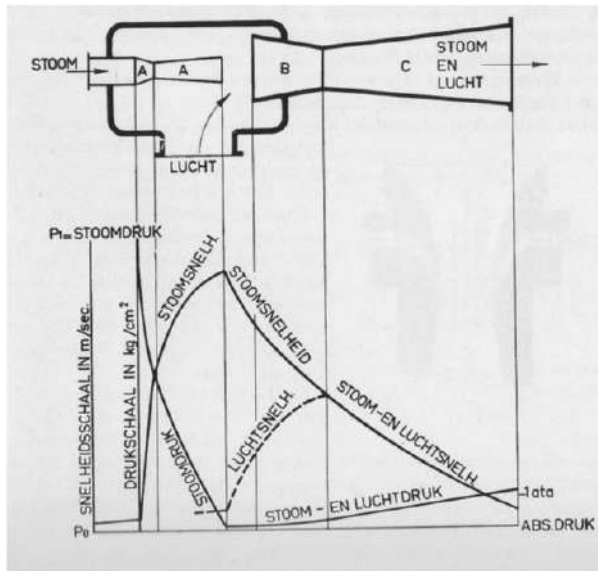
Grafische weergave ejecteur

Ejecteur

De stoejecteur zoals hierna schematisch is afgebeeld, bestaat uit twee convergerend – divergerende straalbuizen. Tussen de twee straalbuizen bevindt zich de ruimte waar de lucht uit de te evacueren ruimte wordt toegevoerd. In de eerste straalbuis "A" vindt de snelheidsopbouw plaats van de expanderende stoom. In de tweede buis "C", de drukkegel, wordt deze snelheid, omdat de doorsnede steeds verder toeneemt, samen met de via de mengkegel "B" aangezogen lucht, weer omgezet in druk. Deze druk is iets hoger dan de atmosferische druk.

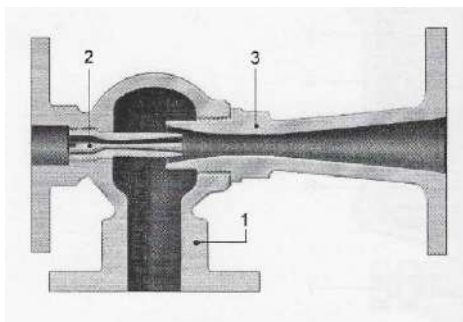
Dat de lucht met de stoom wordt meegenomen is een gevolg van de wrijving die de lucht ondervindt bij de onder hoge snelheid uitstromende stoom. Deze wrijving neemt af bij het toenemen van het

ijdel, onderdruk of vacuüm in de pomp omdat er minder luchtmoleculen aanwezig zijn. Dit zal resulteren in het afnemen van de capaciteit van de ejecteur hetgeen duidelijk merkbaar is tegen het einde van het evacueren.

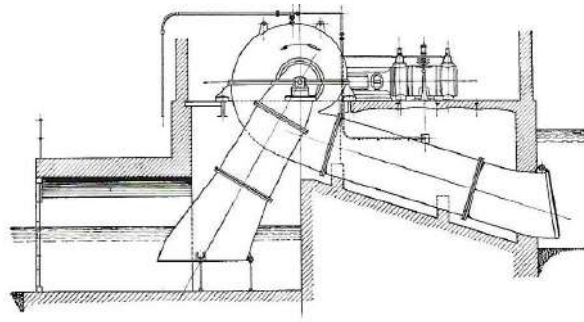


Drukverloop in de ejecteur

De ejecteur, waarvan hier onder de langsdoorsnede van een willekeurig voorbeeld, kan rechtstreeks op het hoogste punt van de pomp zijn geplaatst, echter er zijn ook voorbeelden dat men een aegirtank (vacuümtank) toepast waar men de lucht met behulp van de ejecteur uit zuigt. De tank brengt men, zodra een pomp in bedrijf gesteld moet worden, in verbinding met de desbetreffende installatie. Op deze manier kunnen met één vacuüminstallatie meerdere pompen bediend worden.



Doorsnede ejecteur



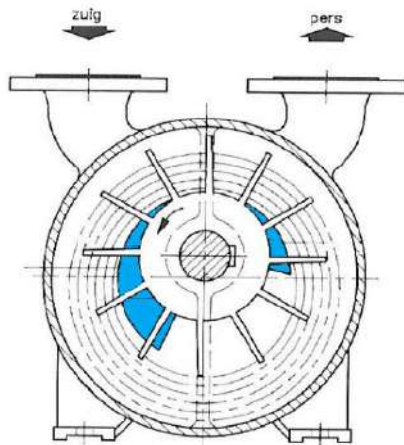
Plaats van de ejecteur op de pomp

Het stoom-luchtmengsel wordt meestal naar buiten het gemaal afgevoerd. De hoge snelheden die ten behoeve van de werking in de straalbuizen worden gecreëerd veroorzaken een oorverdovend lawaai. Om gehoorbeschadiging van de omstanders te voorkomen moeten deze oorbeschermers dragen. Vooral bij plaatsing direct op de pomp kan zich gemakkelijk verstopping voordoen. De ejecteur moet daarom zodanig opgesteld zijn dat zij eenvoudig in- en uitgebouwd kan worden.

Vloeistofringpomp

Vanwege zijn eenvoudige werking wordt voor het evacueren van bemalingspompen en leidingen vaak een zogenoemde vloeistofring-vacuümpomp toegepast waarvan hieronder een doorsnede is getekend.

In de figuur wordt een cilindrisch gevormd pomphuis weergegeven dat bij stilstand voor een deel met water en lucht is gevuld. In het cilindrisch huis kan een excentrisch gemonteerde waaier roteren. Bij rotatie van de waaier gaat de vloeistof mee roteren en wordt ten gevolge van de centrifugaal kracht tegen de wand van het huis geslingerd. De vloeistof vormt daarbij een concentrische met het huis verlopende ring. Lucht en waterdamp verzamelen zich rond de naaf in de ruimten of cellen die gevormd worden door de naaf, de schoepen en de vloeistofring. Deze ruimten zijn niet alle even



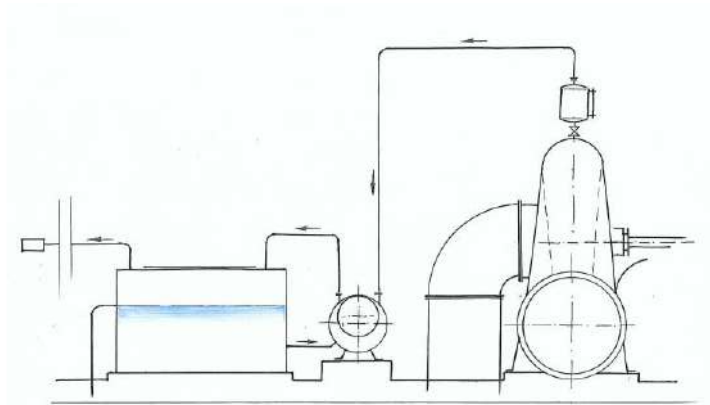
groot, bovendien veranderen ze voortdurend van grootte. Gezien in de draairichting van de waaier worden ze links van de hartlijn groter en rechts daarvan kleiner. Worden in het pompdekse, de achterwand, de blauw gekleurde niervormige openingen aangebracht dan wordt aan de linkerkant waar de cellen groter worden lucht aangezogen. Aan de rechterzijde waar de cellen kleiner worden wordt deze hoeveelheid lucht eerst gecomprimeerd en bij het bereiken van de blauwgekleurde opening naar buiten geperst. Voor het bereiken van een hoog vacuüm dus bij hoog boven de waterspiegel opgestelde bemaling pompen of persleidingen kan deze vacuümpomp in twee trappen worden uitgevoerd.

Vloeistofring vacuümpomp

Gezien het principe van de vloeistofringpomp moet deze altijd gevuld zijn met vloeistof; bij bemalingsinstallaties is dat water. Sowieso blijft er in de vacuümpomp een hoeveelheid water achter als deze na een bepaalde bedrijfsperiode gestopt wordt. Tijdens bedrijf wordt een deel van dat water met de luchtstroom meegesleurd en afgevoerd terwijl tegelijkertijd ook water met de luchtstroom uit de bemalingspomp of persleiding wordt aangevoerd. Ook bij stilstand kan het water in de pomp verdampen en zal deze bij het inbedrijf stellen niet werken. De pomp is daarom aangesloten op een dunne suppletieleiding zodat er altijd voldoende water is voor het vormen van de vloeistofring. Het water wordt betrokken uit een naast de pomp geplaatste open tank. Een en ander zoals op volgende bladzijde is weergegeven.

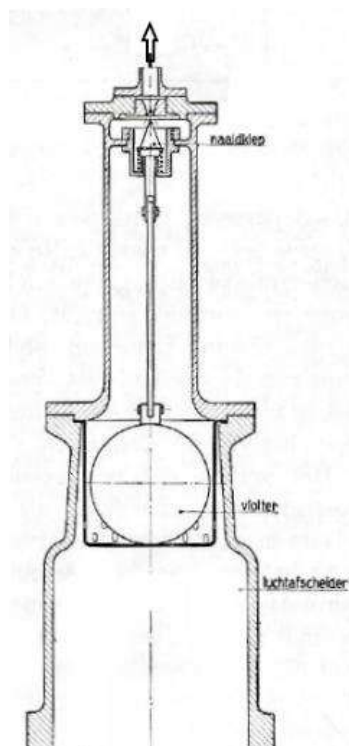
Het water noemen we sperwater en de tank sperwatertank. De lucht/water-afvoerleiding van de vacuümpomp mondt ook in deze tank uit zodat de tank steeds gevuld blijft en men steeds verzekerd is van voldoende sperwater. Tijdens bedrijf wordt vermogen aan het water toegevoerd waardoor een verhoging van de temperatuur van het sperwater ontstaat. Samen met de steeds lagere druk zal hierdoor het water sneller gaan verdampen en de capaciteit van de pomp afnemen.

Er wordt om die reden een overmaat aan sperwater toegevoerd welke bij een voldoende grote tankinhoud er voor zorgt dat de pomp voldoende afkoelt. Op de sperwatertank is een overloop gemaakt die er voor zorgt dat het teveel aan water naar een gecontroleerde plaats wordt afgevoerd



Vacuümpompopstelling

Een belangrijk punt van aandacht is de vorstbescherming van het vacuümsysteem. De pomp en de sperwatertank zijn daarom van proppen voorzien waarmee het water kan worden afgetapt. Verder mogen in het zuigleidingssysteem geen syphons voor komen omdat die, als ze gevuld zijn met water het vacuüm in de bemalingspomp nadelig beïnvloeden.

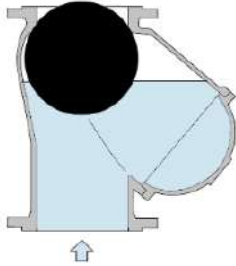


Vlotterinrichting

De rotatie snelheid van de pomprotor is 900 ... 1400 omw/min en relatief hoog. Als er plotseling een grote hoeveelheid water wordt aangevoerd worden de schoepen overbelast, buigen krom of kunnen zelfs breken.

Bij oude installaties vind je daarom op het hoogste punt van de pomp, daar waar de lucht wordt weggezogen, een klein vat met een peilglas. Zodra er water in dit vat wordt gesignaleerd moet de vacuümpomp worden gestopt en de driewegkraan onder de tank worden gesloten. Ook wordt wel, met hetzelfde doel, bovenop de bemalingspomp een vlottermechanisme geplaatst dat de wateraanvoer afsluit als het gewenste vacuüm is bereikt. Een dergelijke inrichting staat hiernaast afgebeeld. De meestal uit koper vervaardigde en verend opgehangen vlotterbal is verbonden met een naald- afsluiter. Zodra er water in de korf komt gaat de koperen bal drijven, sluit deze de lucht afvoerleiding af en moet de vacuümpomp gestopt worden.

Een moderne variant van deze vlotter is een balkeerklep waar een drijvende rubber bal in een speciaal gevormd huis de water/lucht aanvoer naar de vacuümpomp afsluit zodat geen beschadiging kan optreden. Bij deze inrichting ligt tijdens het evacueren de bal naast de luchtstroom. Op het moment dat zich water in het klephuis verzamelt gaat de bal drijven en sluit de zuigopening af en kan er geen water worden meegevoerd naar de vacuümpomp. De vacuümpomp moet dan gestopt worden.



Balkeerklep

4.19 Eenheid voor eenheden en symbolen

Sinds 1978 wordt in Nederland het internationale stelsel van eenheden (SI) erkend. SI staat voor System International d'Unites. Het stelsel kent 7 grondeenheden en een groot aantal afgeleide en of samengestelde eenheden. Alle eenheden worden aangeduid met een naam die men grootheid noemt. Zo is de meter de grondeenheid voor de grootheid lengte die met het symbool m wordt aangeduid.

In deze leidraad en de oude technische beschrijvingen van gemalen, maar meestal ook op de instrumenten op de locatie zelf, treft men vaak nog de oude eenheden aan wat tot verwarring kan leiden. Daarom een uiteenzetting van het (nieuwe) stelsel met een relatie naar het voor 1978 gebruikte en inmiddels verouderde stelsel en aanduidingen.



Manometers met een schaal in kg/cm²

De lezer van deze leidraad, de medewerker of de bezoeker van het gemaal, die het onderwijs hebben gevolgd tot het einde van de jaren 70 van de vorige eeuw, zal zich om voornoemde reden makkelijker uitdrukken in de oude eenheden zoals calorie, paardenkracht en atmosfeer. De generatie hierna zal de Joule, Watt en bar uit het SI stelsel gebruiken. In het dagelijkse leven zondigen overigens beide generaties met betrekking tot dit nieuwe stelsel, want bij de groenteboer hebben we het nog steeds over een kilogram aardappelen. Gewicht is per definitie een kracht en wordt uitgedrukt in Newton. De kilogram is in het SI stelsel de eenheid voor de grootheid massa,

waarvoor het symbool kg wordt gebruikt. Ook de voedingswaarde van ons voedsel blijven we nog steeds uitdrukken in calorieën terwijl dat eigenlijk Joule moet zijn.

4.19.1 Internationaal eenheden stelsel

Het internationale stelsel van eenheden (SI) kent 7 grondeenheden voor even zoveel basis grootheden. Van deze grondeenheden zijn de andere fysische grootheden afgeleid. De grondeenheid voor de basis grootheid lengte is de meter en wordt aangegeven met het symbool m. De afgeleide eenheid voor de grootheid oppervlakte is vierkante meter en wordt aangegeven met het symbool m². Een aantal van de afgeleide eenheden heeft vervolgens weer een eigen naam en symbool. Voor de in deze leidraad gebruikte grootheden worden hierna de grondeenheden en de afgeleide eenheden aangegeven. Ook worden hiervoor de omrekeningsfactoren gegeven.

Grondeenheden

Grootheid		SI-eenheid	
		naam	symbool
1	Lengte	meter	m
2	Massa	kilogram	kg
3	Tijd	seconde	s
4	Elektrische stroom	ampère	A
5	Thermodynamische temperatuur	Kelvin	K
6	Hoeveelheid stof	mol	mol
7	Lichtsterkte	candela	cd

Definitie grondeenheden

1	Meter	De meter is de lengte van de afstand die het licht aflegt in een tijd van 1/299792458 seconde.
2	Kilogram	De massa van een prototype van platina-iridium, dat door de Derde Algemene Conferentie voor maten en gewichten tot eenheid van massa is verklaard en dat wordt bewaard in het Internationale Bureau voor maten en gewichten te Sèvres bij Parijs.
3	Seconde	De tijdsduur van 9192631770 perioden van de straling overeenkomend met de overgang tussen twee hyperfijn niveaus van de grondtoestand van het atoom cesium 133.
4	Ampère	De constante elektrische stroom, die indien hij geleid wordt door twee evenwijdige, rechtlijnige en oneindig lange geleiders van te verwaarlozen cirkelvormige doorsnede, welke geplaatst zijn in het luchtledig op een onderling afstand van 1 meter, tussen de twee geleiders voor elke meter lengte een kracht veroorzaakt gelijk aan 2×10^{-7} N.
5	Kelvin	De thermostatische temperatuur, die gelijk is aan het 1/273,16 gedeelte van de thermodynamische temperatuur van het tripelpunt (vast, vloeibaar en gasvormig) van water.
6	Mol	De hoeveelheid stof, die evenveel deeltjes (atomen of moleculen) bevat als 0,012 kg van het nuclide ^{12}C .
7	Candela	De lichtsterkte, in een gegeven richting van een bron die een monochromatische straling met een frequentie van 540×10^{12} hertz uitzendt en waarvan de stralingssterkte in die richting 1/683 watt per steradiaal is.

Afgeleide eenheden met eigen naam en symbool

Grootheid	SI-eenheid		
	naam	symbool	Afleiding
oppervlakte	vierkante meter	m ²	
inhoud	kubieke meter	m ³	
snelheid	Meter per seconde	m/s	
versnelling	meter per seconde kwadraat	m/s ²	
hoeksnelheid	radiaal per seconde	rad/s	
volumieke massa, dichtheid	kilogram per kubieke meter	kg/m ³	
stroomdichtheid	Ampère per vierkante meter	A/m ²	
frequentie	hertz	Hz	1/s
kracht	newton	N	kg.m/s ²
druk	pascal	Pa	N/m ² = kg/m.s ²
energie, arbeid, hoeveelheid joule warmte		J	N.m = kg.m ² /s ²
vermogen	watt	W	J/s = kg.m ² /s ³ .
elektrische lading	coulomb	C	A.s
elektrische spanning	volt	V	W/A = kg.m ² /s ³ .A
elektrische capaciteit	farad	F	C/V
elektrische weerstand	ohm	Ω	V/A = kg.m ² /s ³ . A ²
magnetische flux	weber	Wb	V.s = kg.m ² /s ² .A
zelfinductie	henry	H	Wb/A = kg.m ² /s ² . A ²

Combinatie van afgeleide eenheden met eigen naam en een grondeenheid

Grootheid	SI-eenheid	
	naam	symbool
moment van een kracht	Newton meter	N.m
soortelijke warmte	joule per kilogram kelvin	J/kg.K
thermische geleiding	watt per meter kelvin	W/m.K
elektrische veldsterkte	volt per meter	V/m
dynamische viscositeit	pascal seconde	Pa.s

Voorvoegsels

Bij het internationale stelsel van eenheden hoort ook een aantal voorvoegsels voor het vormen van decimale veelvouden of delen van de eenheid. Hiermee kan een beter hanteerbare getalwaarde van de grootte worden verkregen.

Voorvoegsel	Symbool	factor	Voorvoegsel	Symbool	factor
exa	E	10^{18}	deci	d	10^{-1}
penta	P	10^{15}	centi	c	10^{-2}
tera	T	10^{12}	milli	m	10^{-3}
giga	G	10^9	micro	μ	10^{-6}
mega	M	10^6	nano	n	10^{-9}
kilo	k	10^3	pico	p	10^{-12}
hecto	h	10^2	femto	f	10^{-15}
deca	E	10^{18}	atto	a	10^{-18}

Het symbool van het voorvoegsel bestaande uit een hoofdletter of een kleine letter wordt zonder spatie voor de eenheid geplaatst. Een eenvoudig voorbeeld is: 1000 m wordt genoteerd als km. Voorvoegsels worden niet gecombineerd bijvoorbeeld: 10 km wordt niet geschreven als 1 dakm.

Symbolen

De basisgrootheden, afgeleide grootheden, eenheden en afgeleide eenheden zijn in het SI stelsel voorzien van een symbool. In een aantal gevallen is het symbool ontleend aan één van de hoofd- of kleine letters van het Griekse alfabet.

A α alfa	H η èta	N ν nu	T τ tau
B β bèta	Θ θ thèta	Ξ ξ xi	Υ υ ypsilon
Γ γ gamma	I ι jota	Ο ο omikron	Φ φ phi
Δ δ delta	K κ kappa	Π π pi	Χ χ chi
E ε epsilon	Λ λ lambda	Ρ ρ rho	Ψ ψ psi
Z ζ zèta	M μ mu	Σ σς sigma	Ω ω omega

Griekse alfabet

Het cijfer π (pi) die de verhouding tussen de omtrek en de diameter van een cirkel weergeeft is een voorbeeld hiervan. Ook wordt gebruikt gemaakt van de voorletters van de wetenschappers die zich met een bepaald natuurkundig verschijnsel hebben bezig gehouden zoals bijvoorbeeld Newton waarvan de letter N staat voor het grafische symbool van kracht.

Druk

De grootheid druk, officieel uitgedrukt in de eenheid Pa (Pascal), is sinds de jaren 70 van de vorige eeuw nieuw. Deze grootheid werd voorheen op verschillende manieren aangegeven. De huidige en officiële benaming volgens het SI eenheden stelsel voor druk is pascal (Pa). Deze eenheid is te klein voor het dagelijks gebruik (1 atm. = 100.000 Pa) en zou eenvoudig tot afleesfouten kunnen leiden bij instrumenten. In de techniek wordt daarom kPa of bar gebruikt, waarbij 1 bar ongeveer gelijk is aan 100 kPa. De eenheid van 1 bar is zonder al te grote fout te vergelijken met 1 kg/cm².

Herleiding oude eenheden voor druk

1 at (technische atmosfeer)	98,0665 kPa	0,980665 bar
1 atm (normale atmosfeer)	101,325 kPa	1,013250 bar
1 kg/cm ²	98,0665 kPa	0,980665 bar
10 m H ₂ O (water)	98,0665 kPa	0,980665 bar
10 mm Hg (kwik)	1,3332 kPa	0,013333 bar
1 lbf/in ²	6,8947 kPa	0,068947 bar

De manometers (instrument waarmee druk wordt gemeten) op bijvoorbeeld de stoomketels van oude museumgemalen zijn meestal niet vervangen en geven de druk weer in kg/cm².

Temperatuur

In het dagelijkse leven wordt de temperatuur van een stof uitgedrukt in graden Celsius. In sommige Angel Saksische landen, onder andere in Amerika, wordt de temperatuur nog in graden Fahrenheit aangegeven. In de techniek is dit geen handige uitdrukking. Daarom maakt men daar gebruik van de thermodynamische temperatuur uitgedrukt in Kelvin (K) omdat hiermee de verhoudingen tot andere natuurkundige grootheden kunnen worden aangegeven. Bijvoorbeeld de druk van een ideaal gas van een bepaald volume verhoudt zich als de temperatuur. Anders geschreven $T_1/T_2 = P_1/P_2$. In de hedendaagse stoomtabel zie je bijvoorbeeld dat de enthalpie (warmte inhoud) van stoom wordt uitgedrukt in kJ/kg.K.

Kelvin kan eenvoudig worden herleid door bij de temperatuur uitgedrukt in graden Celsius, 273,15 op te tellen. Anders opgeschreven $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ komt overeen met $T = 273,15\text{ K}$.

Soms wordt de temperatuur kelvin (K) met graden kelvin (°K) uitgedrukt. Dit is pertinent onjuist. De uitdrukking graden en het symbool hiervoor (°) dient voor een correcte aanduiding, maar ook in het spraakgebruik, achterwege gelaten te worden.

Energie, arbeid, hoeveelheid warmte, vermogen en druk

De grootheden energie, arbeid en hoeveelheid warmte worden tegenwoordig uitgedrukt in de eenheid joule (J) terwijl het vermogen meestal in watt (W) wordt aangegeven. Dit schept nogal eens verwarring bij rondleiders op een gemaal maar ook bij het rond te leiden publiek; omdat in de tijd, toen het gemaal werd gebouwd, deze grootheden niet of op een andere manier werden gebruikt.

Arbeid en energie zijn twee verschillende uitdrukkingen voor dezelfde grootheid. Arbeid wordt meestal voor mechanische energie gebruikt, de andere vormen van dezelfde grootheid duiden we aan met energie, elektrische energie, thermische energie of hoeveelheid warmte.

Vermogen is arbeid of energie per tijdseenheid. Hier voor zagen wij dat het vermogen van 1W gelijk is aan 1J/s. Dat betekent dat als dezelfde hoeveelheid arbeid of energie wordt geleverd in een kortere tijd er een groter vermogen nodig is.

Tot omstreeks 1978 was het gebruikelijk om het vermogen van een elektromotor in de eenheid watt (W) uit te drukken en die van een stoommachine of verbrandingsmotor in paardenkracht (pk).

De pk is, evenals de huidige eenheid voor vermogen, arbeid per tijdseenheid. Een pk komt overeen met de arbeid die nodig is om de massa van 75 kg in 1 seconde 1 meter op te hijsen. Anders uitgedrukt 1pk komt overeen met 75 kg.m/sec. Het hier voor aangeduide verschil in aanduiding tussen een elektrische machine en een calorisch werktuig, zoals een stoommachine of verbrandingsmotor, bestaat niet meer en dat is wel zo eenvoudig. Het vermogen van 1pk komt overeen met 735,4987 W of 0,735 kW.

In het verleden gebruikte men voor de grootte warmte de eenheid calorie (cal) en tegenwoordig dus de joule (J). Hierbij komt de hoeveelheid energie van 1 cal overeen met 4,1868 J. Het warmtevermogen, uitgedrukt in de oude eenheden van 1kcal/h, komt overeen met 1,163 kJ/s of 1,163 kW.

Verder kennen we in de elektrotechniek nog het begrip kilowatt uur (kWh) voor een hoeveelheid energie. De kWh past niet in het SI stelsel maar het is wel toegestaan die te gebruiken, bijvoorbeeld om de energierekening te berekenen. Voor de begripsvorming 1 kWh komt overeen met 3,6 MJ.

Water paardenkrachten

In oude (waterbouwkundige) vakliteratuur of verhandelingen over gemalen kom je de uitdrukking Wpk tegen. Deze uitdrukking staat voor water-paardenkrachten, waarbij de W met een hoofdletter werd geschreven en de pk zoals het hoort met kleine letters. Met Wpk's drukte men de grootte van een gemaal uit. Professor Dijkhoorn en ook ingenieur Wouda, de ontwerpers van het Ir. D.F. Woudagemaal in Lemmer, hebben het in een aantal verhandelingen over krachtige gemalen met in eerste instantie een vermogen van 750 Wpk bij Teakesyl (Tacoziyl) en later 900 Wpk voor een gemaal bij de Teroelsterkolk.

Men vermenigvuldigde de hoeveelheid te verplaatsen water, uitgedrukt in liters (1kg) per seconde, met de ontwerp-opvoerhoogte, uitgedrukt in meters en deelde deze door 75 (1pk=75 kgm/sec).

De uitdrukking Wpk is dus een puur theoretisch begrip en zegt weinig over de capaciteit, de opvoerhoogte of het vereiste aandrijfvermogen, dat nodig is voor de aandrijving van het opvoerwerktuig, als hierbij geen systeemrendement wordt aangegeven. Bij het Ir. D.F. Woudagemaal is uiteindelijk een totaal capaciteit gerealiseerd van ongeveer 4000 m³/min met een aandrijfvermogen van 2000 pk.

Tegenwoordig drukt men de grootte van een gemaal uit in het debiet en de daarbij behorende statische opvoerhoogte. Dit debiet, met de daarbij behorende opvoerhoogte, wordt het garantiepunt genoemd. Vervolgens wordt aan de hand van berekening en verwachting over de inzetbaarheid van het gemaal in de toekomst het verdere werkgebied van de pompinstallaties bepaald.

In de ontwerpfase en tijdens de beproeving van een gemaal wordt het theoretisch vermogen gebruikt voor het vergelijken van de garantiegegevens en uiteindelijk het toetsen van de pomp en de pompsysteemrendementen. In die gevallen spreekt men tegenwoordig niet meer over Wpk's maar over kW.

4.20 Geraadpleegde bronnen en verantwoording illustraties

Bij het samenstellen van deze leidraad is gebruik gemaakt van een aantal bronnen en illustraties welke in het bezit zijn de Nederlandse Gemalenstichting en de auteurs. Daarnaast is gebruik gemaakt van informatie op het internet. Zonder uitzondering zijn daarbij zowel de illustraties als de tekst bewerkt en geschikt gemaakt voor het doel. De leidraad is opgesteld en wordt gebruikt zonder enig financieel oogmerk.

4.20.1 Geraadpleegde Bronnen

Krachtwerktuigen	Stoom, Uitgave van Krachtwerktuigen, N.V. Uitgevers-Maatschappij AE. E. Kluwer, 1933
J. Vader	Materialenkennis, N.V. Uitgevers-Maatschappij voorheen Van Mantgem & De Does, 1944
W.J.C. van Paasen en J.H. Ruygrok	Scheikunde, J.B. Wolters Uitgeversmij N.V., 1963
J.P.P. Morré en J.T.Kloet	Stoomketels Deel I, De Technische Uitgeverij H. Stam N.V., 1964
J.P.P. Morré en J.T.Kloet	Stoomketels Deel II, De Technische Uitgeverij H. Stam N.V., 1965
J.T.Kloet en Ir F. Muller van Brakel	Stoomketels, De Technische Uitgeverij H. Stam, 1949
J.T.Kloet / ir C. Kerkhoven	Stoomketels, Technische Uitgeverij H. Stam N.V., 1972
Ir D.J. Boks en Ir L.H. van der Deijl	Stoomketels, Scheepswerktuigkunde, N.V. Uitgevers-Maatschappij AE. E. Kluwer, 1937
F.A.A. Jasperse en J. van Kersen	Stoomketels, Deel 1, 2 ^e gedeelte, Scheepswerktuigkunde, Nijgh & van Ditmar N.V., 1949
J. Bonselaar en J. La Heij	Stoomketels, scheepswerktuigkunde, N.V. Uitgeverij v.h. A. Kemperman, 1954
F.W. van Nunen	Theorie en Practijk voor den Industriestoker, N.V. Uitgevers-Maatschappij AE. E. Kluwer
Ir. F.C. Wirtz C zn	De Controle in het Ketelhuis, N.V. Uitgevers-Maatschappij AE. E. Kluwer

T.J. Kloet	Stoomwet en Stoombesluit, N.V. De technische Uitgeverij H. Stam, 1954
W. van Strien	De Stoomwet in de Praktijk, Uitgave van N.V. Econosto, 1962
Ir. W.L. Brocx en Ir. F.P.M. Wijnheijmer	Inleiding tot de energietechniek, Uitgeverij Nijgh & van Ditmar, 1971
J.P.P. Morré	Scheepsstoomwerktuigkunde, Deel I, Zuigerstoomwerktuigen, De Technische Boekhandel H. Stam, 1940
J.P.P. Morré – W. Morée	Zuigerstoomwerktuigen, Deel I, De technische Uitgeverij H. Stam N.V., 1960
J.P.P. Morré – W. Morée	Zuigerstoomwerktuigen, Deel II, De technische Uitgeverij H. Stam N.V., 1962
A.N. Kruikemeijer	Kennis van Krachtwerktuigen, A, Stoomketels, H. ten Brink Uitgever, 1924
Ir. G Knop en J. La Heij	Kennis van Calorische werktuigen, Deel II, Uitgeverij voorheen A. Kemperman, 1950
J. La Heij F.J.W. Oostendorp	Scheepswerktuigkunde, Hulpwerktuigen, deel I, N.V. Uitgeverij voorheen A. Kemperman, 1957
P. Gerritsen en G. Huvers	Hulp- en bijwerktuigen, Uitgeverij Nijgh & van Ditmar
H. Duif	Leerboek voor den Stoker – Machinist, Uitgave van den Algemeenen Nederlandse Zuivelbond, 1943
J. van der Borden en J. La Heij	Turbines, Deel 1, N.V. Uitgeverij voorheen A. Kemperman, 1966
Ir. G.J.W. Esseling	Stoomtabellen, N.V. Uitgeverij voor heen A. Kemperman
Ir. G.J.W. Esseling	Nieuwe Stoomtabellen (internationale stelsel van eenheden), N.V. Uitgeverij voorheen A. Kemperman, 1966
Ir. J.W. Heil	Entropie-Enthalpie Diagram voor water en waterdamp, N.V. Uitgeverij Nijgh & van Ditmar, 1957

Ing. H.J. Bakker Ing. J.H. Dorst Ing. J.J.W. Heese Ing. B.J.H. van Rooij	SI – eenheid voor eenheid, Staatsuitgeverij, 1979
A. de Jong F. Goud	Handboek der metaalbewerking, N.V. Technische Boekhandel en Drukkerij J. Waltman Jr., 1924
J.C. Arp	Werktuigkundig en Bouwkundig Handboek, D. Bolle, S.L. van Looy, 1911
Ir. G. Hofstede Ir. H.J. Meewis Ir. P.G. Ritterhaus	Machineonderdelen. Morks Drukkerij en Uitgeverij N.V., 1951
T. Polderman	Materialenkennis, N.V. Uitgeverij v.h. A. Kemperman, 1960
A.P.J. Vijfeijken en R. van der Groen	De Centrifugaalpomp in de Praktijk, N.V. Koninklijke Nederlandse Machinefabriek voorheen E.H. Begemann, 1967
Ir. D.J. Boks	Pompen, Uitgeverij J.H. Gottmer, 1948
SIHI Group	Basic principles for the design of centrifugal pump installations, SIHI-Halberg,
Ir. J. Stolk Ir. L.W.P. Bianchi	Pomptechnologie, Educaboek BV, 1991
Ir. L.W.P. Bianchi en P. Büstraan	Pompen, De technische Uitgeverij H. Stam N.V., 1966
Dr. Ing. Kurt Holzenberger Dipl. Ing.(F.H.) Klaus Jung	Kreisel-pumpen Lexikon, KSB Aktiengesellschaft, 1989
Prof. A.T. Troskolanski en S. Lazarkiewicz	Kreiselpumpen Berechnung und Konstruktion, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1976
J. den Besten	Theorie Wateropvoerwerktuigen in Windmolens, Deel 1, Schepradwatermolens, J. den Besten, Molenbouwkundige, 1972
Prof. H. Dubbel	Tassenbuch für den Maschinenbau, Band 1 und 2, Julius Springer, 1939.

H. Felix en Ir. J.W. Niermans	Mechanische Technologie, N.V. Uitgevers-Maatschappij AE. E. Kluwer, 1949
Ir. P.G. Ritterhaus	Constructie en Berekening van Verbrandingsmotoren, N.V. Uitgevers-Maatschappij AE. E. Kluwer, 1949
Prof. Ir. J.M. Kuijper	Dieselmotoren constructie en berekening, N.V. De technische Uitgeverij H. Stam, 1954
H. Wytzes	Brandstoffen Smeermiddelen Materialen, Smit & Wytzes, 1998
E.F. Scholl	De Gids voor Machinisten, A.W. Sijthoff's Uitgevers-Mij, 1909
Ir. J.P. Josephus Jitta	Sluizen en andere waterbouwkundige kunstwerken in en langs kanalen, De Erven F. Bohn N.V., 1947
Ir H.E. Boer	Kanalen, Kanaalwerken, Polders, N.V. Uitgevers-Maatschappij voorheen Van Mantgem & De Does,
M.B.N. Bolderman en A.W.C. Dwars	Waterbouwkunde, Deel V, L.J. Veen's Uitgeversmaatschappij N.V., 1950
Ir. A Potma	Weg- en Waterbouwkunde, Deel II, N.V. Uitgevers-Maatschappij Kosmos, 1944

4.20.2 Verantwoording Illustraties

Ir. H.C. Grosjean	Atlas, Kennis van werktuigen, 3 ^e Deel met alleen samenstellingstekeningen van uitgevoerde stoominstallaties, hulp- en bijwerktuigen, 1933 Uit deze atlas figuren gebruikt van de injectiecondensor gecombineerd met een natte luchtpomp alsmede voorbeelden van zuig- en perskleppen bij deze pomp

4.20.3 Websites

Nederlandse Gemalenstichting	Diverse archiefgegevens uit de data base over gemalen
TAUW Advies & Ingenieursbureau	Diverse gegevens over het ontwerpen en de bouw van polder- en boezemgemalen
Stoomwet - Wikipedia	De stoomwet en privatisering stoomwezen

Bijlage 1 Vliegwielerberekening

Vliegwieler Stoomgemaal Mastenbroek

Onderdeel: Bepaling massatraagheid

Datum: 28-dec-20

Opsteller: JvR

$$\text{Massatraagheid} : I = G/2g \cdot (R^2 + r^2)$$

Vliegwieler gegevens

Massatraagheid

Gewicht (afgerond)

Diameter	7,620 m		
<i>R Straal v/d velg</i>	3,810 m		
Velgdiameter rond	0,292 m		
<i>r Straal v/d velg</i>	3,518 m		
Soortelijk gewicht GIJ	7300 kg/m ³		
Soortelijk gewicht St	7850 kg/m ³		
Gewicht velg	11243 kg	15410 kgmsec ²	11200 kg
Diameter naaf	0,500 m		
<i>R Straal v/d naaf</i>	0,250 m		
Breedte naaf	0,600 m		
Diameter as	0,292 m		
<i>r Straal v/d naaf</i>	0,146 m		
Extra (aangietingen)	1500 kg geschat		
Gewicht naaf	2066 kg	9 kgmsec ²	2100 kg
Spaken	9 stuks		
Spaakdiameter rond	0,115 m		
Lengte spaken	3,268 m		
<i>R Straal v/d spaken</i>	3,518 m		
<i>r Straal v/d spaken</i>	0,250 m		
Gewicht spaken	2397 kg	1520 kgmsec ²	2400 kg
Totalen	15706 kg	16939 kgmsec ²	
Afgeronde totalen	15700 kg	17000 kgmsec ²	15700 kg

G=m x g

kg

m= G/g

kg

A= I*w²*delta

kgm

5960 kgm

beschikbare arbeidsoverschot

Snelheidsvariatie	n min	8,4 omw/min	gegeven
Snelheidsvariatie	n max	11,6 omw/min	gegeven
Gemiddelde snelheid	n gem	10 omw/min	streeftoerental
Oneenparigheid	delta	0,32	
	GD ²	664668	kgm ² berekend
Dubbele traagheidsstraal	D	6,505	m berekend

Bronnen

Gegeven Prof. Dresden, De Ingenieur 27 juni 1941 17000 kgm² gegeven
 Vliegwielen / massatraagheid : $I = G/2g \cdot (R^2 + r^2)$ Dieselmotoren Prof. Ir. J.M. Kuijper blz. 98 en 634
 GD² Poly technisch zakboekje blz. 718
 Arbeid Polytechnisch zakboekje blz. 718
 Arbeid blz. 128 Motorenboek Ritterhaus.
 Arbeid blz. 198 Tassenbuch Maschinenbau.
 Traagheidskracht blz. 281 Zuigerstoomwerktuigen Morre Deel 1