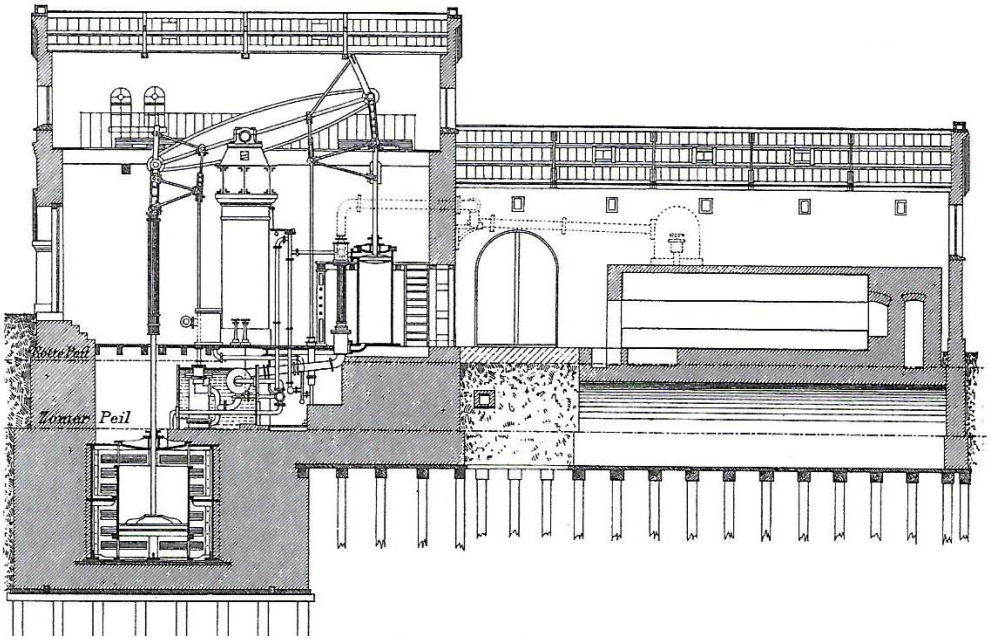
4.18.3 Zuigerpompen

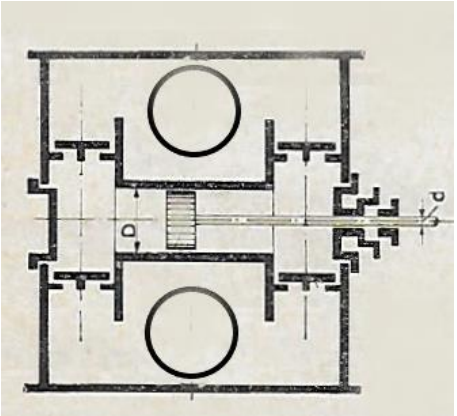
De eerste stoomgemalen in Nederland waren uitgeruste met zuigerpompen. Voor de invoering van de stoommachine was dit pomptype nog nooit toegepast voor de bemaling in Nederland. De vroege installaties werden zonder uitzondering uit Engeland geïmporteerd, waar de zuigerpomp zich bewezen had in de steenkoolmijnen. 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:

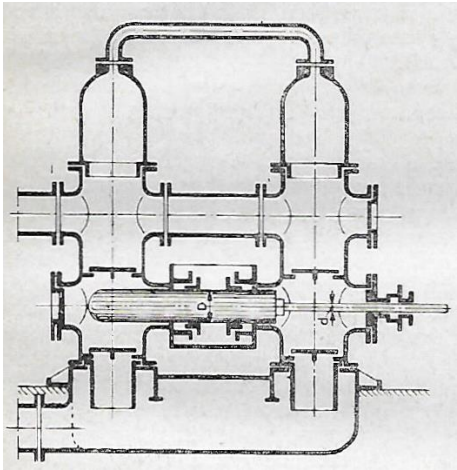
- Ten eerste de enkel- en dubbel werkende pomp. Bij een dubbel werkende pomp wordt bij elke slag water opgevoerd, hetzij aan de ene zijde dan wel aan de andere zijde van de zuiger of plunjer. Enkel werkende pompen voeren slechts één keer per twee slagen water op.



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:

$$F = \frac{\pi D^2}{4} \ [m^2]$$

Maakt de verdringer een slag van s m dan zal de volgende hoeveelheid water worden aangezogen:

$$Q = F \, . \, s \ [m^3]$$

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:

$$Q_{th} = F \, . \, s \, . \, n \ [\, m^3/min]$$

Voor een dubbelwerkende pomp waar dus elke slag water oplevert is de opbrengst:

$$Q_{th} = 2 \,.\, F \,.\, s \,.\, n \;\; [\, m^3/min]$$

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:

$$Q_{th} = (2 \,.\, F - f) \,.\, s \,.\, n \;\; [\, m^3/min]$$

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:

$$\eta_v = \frac{Q_e}{Q_{th}}$$

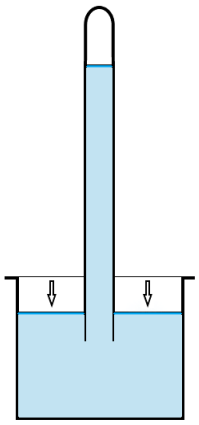
Een praktische waarde voor het volumetrisch rendement bij goed uitgevoerde pompen is 0,9 – 0,98. Behalve met het naar binnen lekken van lucht moet vooral bij polderwater ook rekening worden gehouden met in het water opgeloste lucht, die zich afscheidt in de zuigbuis en zich verzamelt in het hoogste punt 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.

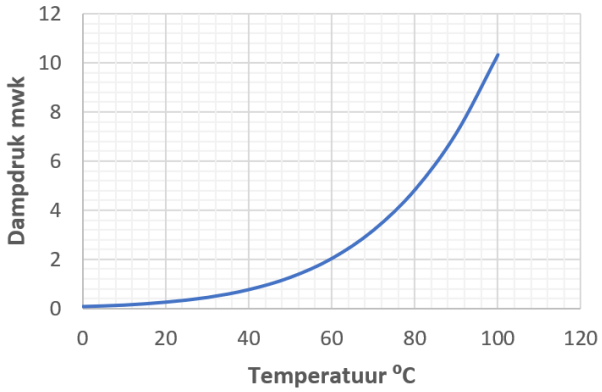


Principe barometer

Bevindt zich in de buis water dan zal bij een barometerstand van 760 mm kwik van een soortelijk gewicht van 13,6 kg/dm³ 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 ºC is 1 kg/dm³.

$$p = \frac{760 \,.\, 13.6}{1 \,.\, 1000} = 10{,}336 \ \ [\mathrm{mwk}]$$

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.

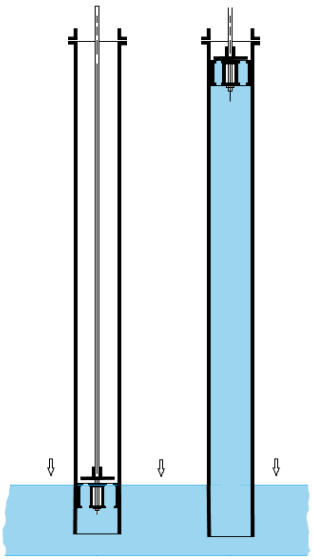


Dampdruk water bij verschillende temperaturen

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 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:



$$A.V.B. = \frac{1}{2} m.c^2 \ [kgm]$$

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:

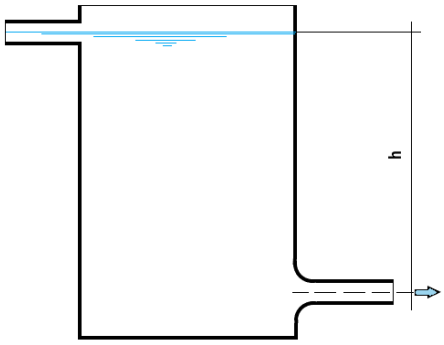
$$A.V.P. = m.g.h \ [kgm]$$

Hierin is g de versnelling van de zwaartekracht in m/sec² .

Principe werking zuigerpomp

Wanneer men de stromingsweerstanden verwaarloost moeten de beide arbeidsvermogens aan elkaar gelijk zijn , dus moet:

$$\frac{1}{2} m.c^2 = m.g.h \ [kgm]$$



Dus:

$$c^2 = 2.g.h$$

Of de uitstroomsnelheid is:

$$c = \sqrt{2.g.h} \ [m/sec]$$

De vloeistof hoogte bedraagt:

$$h = \frac{c^2}{2g} \ [mvk]$$

Bepaling statische- en snelheidshoogte

Hierin is h uitgedrukt in m vloeistofkolom. Een vloeistofkolom van h meter oefent op een vlak van 1 m² een kracht uit die gelijk is aan het gewicht van h kubieke meter vloeistof. Als γ (gamma) het soortelijk gewicht uitgedrukt in kg/m³ is dan is de druk die deze kracht veroorzaakt:

$$p = \gamma.h \ [kg/m^2]$$

De hier voor afgeleide vergelijking kan men daarom ook schrijven als:

$$p = \gamma . \frac{c^2}{2g} \ [kg/m^2]$$

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/m². 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/cm² en niet de bij de afgeleide formules gebruikte kg/m². Een waterkolom met een oppervlak van 1 m² en 10 m hoog weegt 10.000 kg. Als we dit gewicht verdelen over 1 cm² in plaats van 1 m²: dus delen door 100 x 100, dan krijgen we 1 kg/cm². We maken geen grote fout als we bij berekeningen10 mwk gelijkstellen aan 1 kg/cm².

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 ºC 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:

$$p = \frac{750 . 13.6}{1 . 1000} = 10{,}2 \ [mwk]$$

Door het op snelheid brengen van het water onder in de cilinder heeft het een dynamische druk verkregen van:

$$h = \frac{c^2}{2g} = \frac{2^2}{2 . 9{,}81} \approx 0{,}2 \ [mwk]$$

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:

$$10{,}2 = x + 0{,}24 + 0{,}2\ [\mathrm{mwk}]$$

Of anders geformuleerd:

$$\mathrm{x} = 10{,}2 - (0{,}24 + 0{,}2) = 9{,}76\ [\mathrm{mwk}]$$

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.

$$10{,}2 - 0{,}24 = 9{,}96\ [\mathrm{mwk}]$$

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:

$$\mathrm{p_{abs}} = 10{,}2 - (0{,}2 + 4) = 6\ \ [\mathrm{mwk_{abs}}]$$

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 ºC waarbij een dampspanning hoort van 7,14 mwk, dan zou de hoogte van 4 meter niet bereikt kunnen worden maar slechts een hoogte van:

$$\mathrm{h} = 10{,}2 - (7{,}14 + 0{,}2) = 2{,}86\ \ [\mathrm{mwk}]$$

De absolute druk onder de zuiger als deze stil staat is:

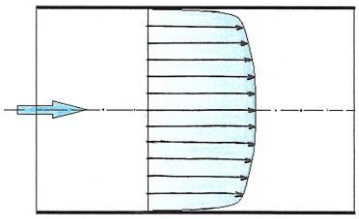
$$\mathrm{p_{abs}} = 10{,}2 - 4 = 6{,}2\ \ [\mathrm{mwk_{abs}}]$$

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:

$$\mathrm{p_{abs}} = 10{,}2 - (0{,}2 + 4 + 1{,}5) = 4{,}5\ \ [\mathrm{mwk_{abs}}]$$

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:

$$\mathrm{Re} = \frac{\mathrm{c\,.\,d}}{\nu} \leq 2320$$

Hierin is:

Re	=	Getal van Reynolds	
c	=	Vloeistofsnelheid	m/sec
d	=	Buisdiameter	m
v	=	Kinematische viscositeit (nu)	m^2/sec

De weerstand die een vloeistof ondervindt, wanneer deze door een buis stroomt, kan worden voorgesteld door de formule:

$$\mathrm{h}_w = \lambda \frac{\mathrm{l}}{\mathrm{d}} \cdot \frac{c^2}{2g} \; [\mathrm{mwk}]$$

Hierin is:

h_w	=	Weerstand	mwk
λ	=	Weerstandscoëfficiënt (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 weerstandscoëfficiënt λ kan worden afgelezen.
De weerstandscoëfficiënt λ kan bij het ontbreken van een tabel ook berekend worden met de volgende empirische formule:

$$\lambda = 0{,}02 + \frac{0{,}0018}{\sqrt{c\,.\,d}}\ [\mathrm{m/sec}]$$

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:

$$h_w = \zeta\,.\,\frac{c^2}{2g}\ [\mathrm{mwk}]$$

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 º - 45 º)	0,2 – 0,4
Leidingbocht (knik 90 º)	1,2
Rechte uitstroomstuk	1,0 – 1,1

Weerstandsgetallen voor gemaal onderdelen

In de hier voor afgebeelde tabel worden een aantal weerstandsgetallen 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:

$$\eta_h = \frac{H_{man}}{H_{th}} . 100\ [\%]$$

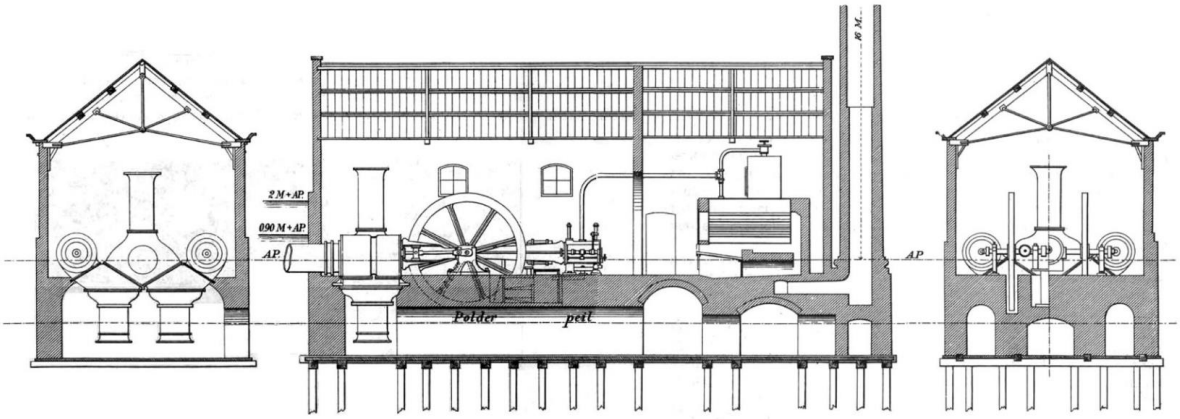
De theoretische opvoerhoogte wordt voornamelijk gebruikt voor het bepalen van het benodigde aandrijf vermogen van de pomp.

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- drijfstang 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 m^3 zou moeten zijn. Ook bij de dubbelwerkende pomp is nog een aanzienlijk luchtvolume nodig van 2 m^3 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 vertragingskrachten op. Daarenboven konden de pompen via de zuig- en perskleppen water naleveren.

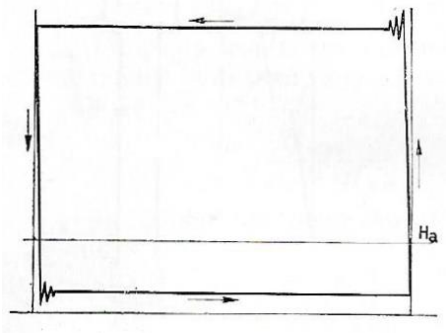


Gemaal Abbenbroek (tweeling dubbelwerkende zuigerpomp)

De boven de waterlijn opgestelde bemalingspompen die meestal ook een expansie stoommachine en dus een kruk- drijfstangmechanisme hebben, hadden wel windketels of zoals bij het gemaal Abbenbroek een soort druktoren. 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 indicateur 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 indicateurdiagram 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 indicateur 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 indicateur 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 m^3/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-drijfstangmechanisme, 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:

$$s = \frac{p \,.\, D}{2\,\sigma}$$

Hierin is p de inwendige druk in kg/cm², D de inwendige diameter in cm en σ de toelaatbare materiaalspanning in kg/cm². In verband met de veranderlijke, dikwijls stotende belasting, neemt men σ toelaatbaar kleiner naarmate het toerental of beter gezegd de zuigersnelheid groter wordt.

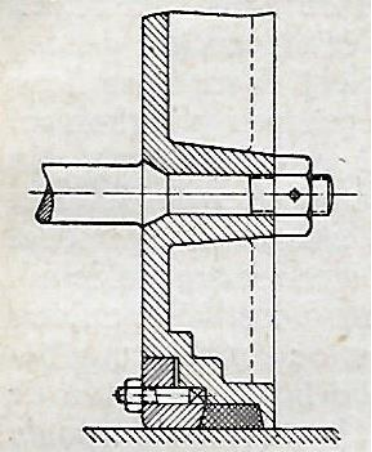
Plunjers

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

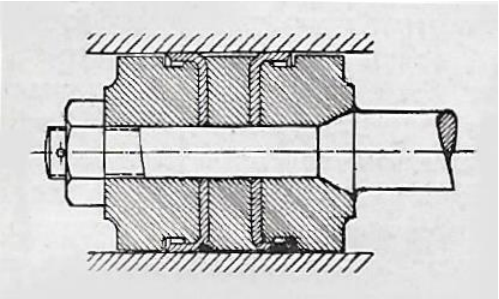
Het materiaal van de zuiger bij bemalingspompen is meestal van gietijzer. De dichting van de zuiger bestaat vaak uit een week dichtingsmateriaal zoals gevlochten strengen hennep die door het losse deksel van de zuiger samengedrukt worden tegen de trapeziumvormige kamer aan de omtrek van de zuiger. Soms 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 henneppakking

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.

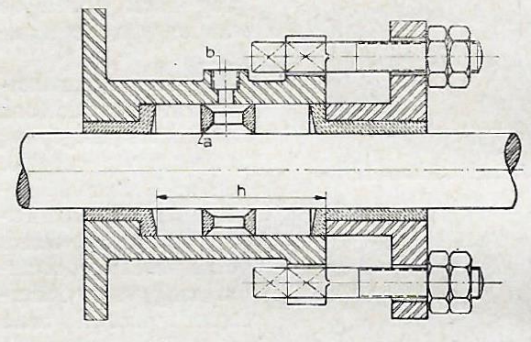
Pakking bussen

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:

$$s = 2\sqrt{d} \div 2{,}5\sqrt{d}\ [\mathrm{mm}]$$

Hierin is s de dikte van de pakking en d de diameter van de stang of plunjer. Voor de lengte van de pakking- kamer neemt men ongeveer 8 x s, terwijl het voldoende is dat de pakking drukker over een lengte van 3 x 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.

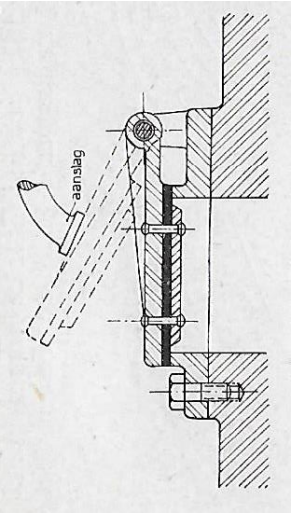


Pakkingbus voor weke pakking

Kleppen en zittingen

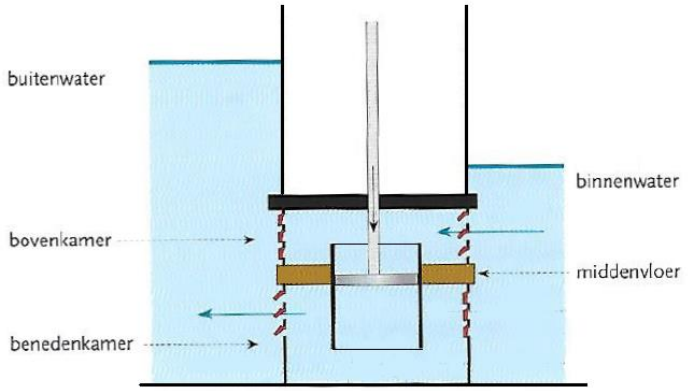
Voor dat polderwater naar een opvoerwerktuig wordt gevoerd passeert het een zogenoemd krooshek. Hier worden zoveel als mogelijk de in het water aanwezige vaste delen opgevangen. Desondanks worden naast zachte ook harde voorwerpen naar het opvoerwerktuig aangevoerd en is men bij zuiger- en plunjer pompen aangewezen op een deels zachte klepafdichting. Verder komt in het polderwater sliertvormige vervuiling voor die vooral bij de doortocht vernauwende klepconstructies verstopping kan veroorzaken dan wel tussen de klepafdichting 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.



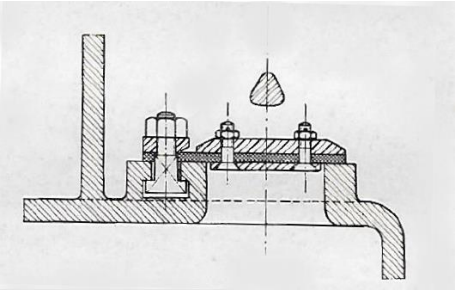
Scharnierklep

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.



Dubbelwerkende zuigerpomp (onder de waterlijn opgesteld)

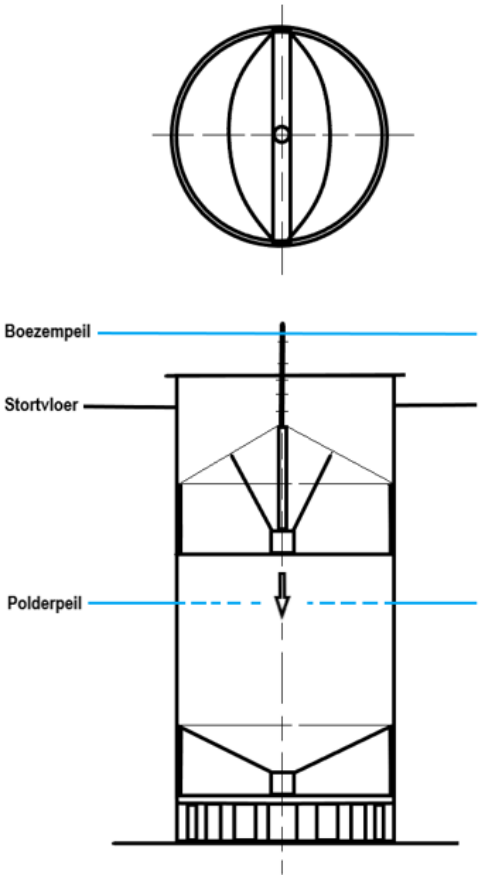
Een variant op de hier voor beschreven klep is die waarbij het scharnier en de afdichting één geheel vormen. In de beschrijvingen van dit soort kleppen wordt nog gesproken over gummi platen waarmee wat wij tegenwoordig, rubber noemen wordt bedoeld. Ook deze klepuitvoering werd in vierkante of rechthoekige 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 º) 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 .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 .V**.**

De druk P_p die dan in de schadelijke ruimte en de cilinder heerst is dan volgens de wet van Boyle:

$$P_a \,.\, x \,.\, V = P_p \,.\, (V + x \,.\, V)\ [\mathrm{mwk}]$$

Of anders geschreven:

$$P_p = \frac{P_a \,.\, x \,.\, V}{V + x \,.\, V}\ [\mathrm{mwk}]$$

Of vereenvoudigd geschreven:

$$P_p = P_a \frac{x}{1 + x}\ [\mathrm{mwk}]$$

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;

$$P_p = 10 \frac{4}{1 + 4} = 8\ [\mathrm{mwk}]$$

De onderdruk, dus de druk die het water moet opzuigen en de weerstand over de zuigklep die overwonnen moet worden is dan:

$$P_p = 10 - 8 = 2\ [\mathrm{mwk}]$$

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.