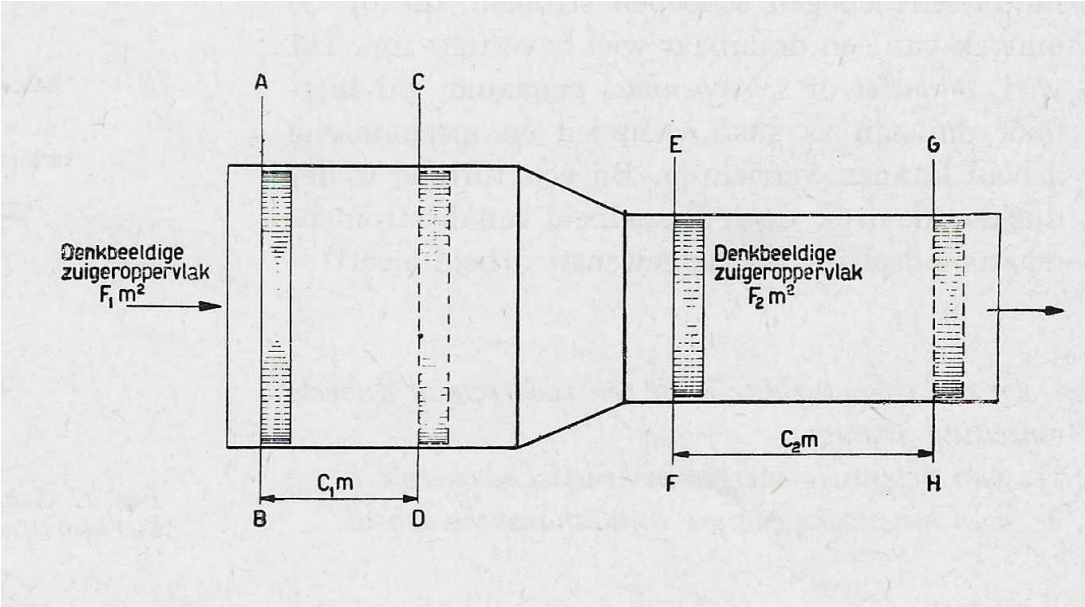
### 4.18.7 Vacuümsystemen

**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. (**a**rbeids-vermogen **v**an **p**laats) wordt omgezet in snelheidsenergie aangeduid met a.v.b. (**a**rbeidsvermogen **v**an **b**eweging) laat zich als volgt verklaren.

**Continuiteitsformule**

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 continuiteitsformule**

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 $F_1$ m$^2$ bedraagt dan is het volume stoom tussen de genoemde zuigervlakken gelijk aan $F_1 \,.\, C_1$ m$^3$.

$$\text{Doortocht} \,.\, \text{Snelheid} = \text{Volume/seconde}$$

$$F_1 \,.\, C_1 = V \; [\text{m}^3/\text{sec}]$$

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:

$$G_1 = \frac{V}{v_1} \ [kg]$$

Of:

$$G_1 . v_1 = V \ m^3/\ sec$$

Substitueert men deze vergelijking in de vorige dan gaat deze over in:

$$F_1 \ . \ C_1 = G_1 . v_1$$

$$G_1 = \frac{F_1 \ C_1}{v_1} [kg]$$

Anders geschreven:

$$\text{Gewicht stoom/seconde} = \frac{\text{Doortocht . Snelheid}}{\text{Soortelijk volume van de stoom}}$$

$$G_2 = \frac{F_2 \ C_2}{v_2} \ [kg]$$

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:

$$\boxed{\frac{F_1 \ C_1}{v_1} = \frac{F_2 \ C_2}{v_2}}$$

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 $\chi$ (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 $\chi_0$ en $\chi_1$ 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:

$$G\,.\,\chi\,.\,427 \text{ kgm}$$

De vergelijking van de totale energie voor en na de expansie ziet er als volgt uit:

$$G\,.\chi_0\,.\,427 + \frac{G}{2g}\,C_0^2 = G\,.\,\chi_1\,.\,427 + \frac{G}{2g}C_1^2$$

$$G\,.\chi_0\,.\,427 - G\,.\,\chi_1\,.\,427 = \frac{G}{2g}C_1^2 - \frac{G}{2g}\,C_0^2$$

$$(\chi_0 - \chi_1)\,.\,427 = \frac{1}{2g}(C_1^2 - C_0^2)$$

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:

$$C_1^2 - C_0^2 = 2\,.\,9{,}8\,.\,427\,.\,H$$

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:

$$C_1^2 = 2\,.\,9{,}81\,.\,427\,.\,H$$

Of anders geschreven:

$$\mathbf{C = 91{,}5\sqrt{H}}$$

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.

$$C = 91{,}5\sqrt{200} = 1294\ \mathrm{m/sec}$$

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 Continuiteitsformule 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:

$$G = \frac{F\,.\,C}{v}$$

Waarvoor geschreven kan worden:

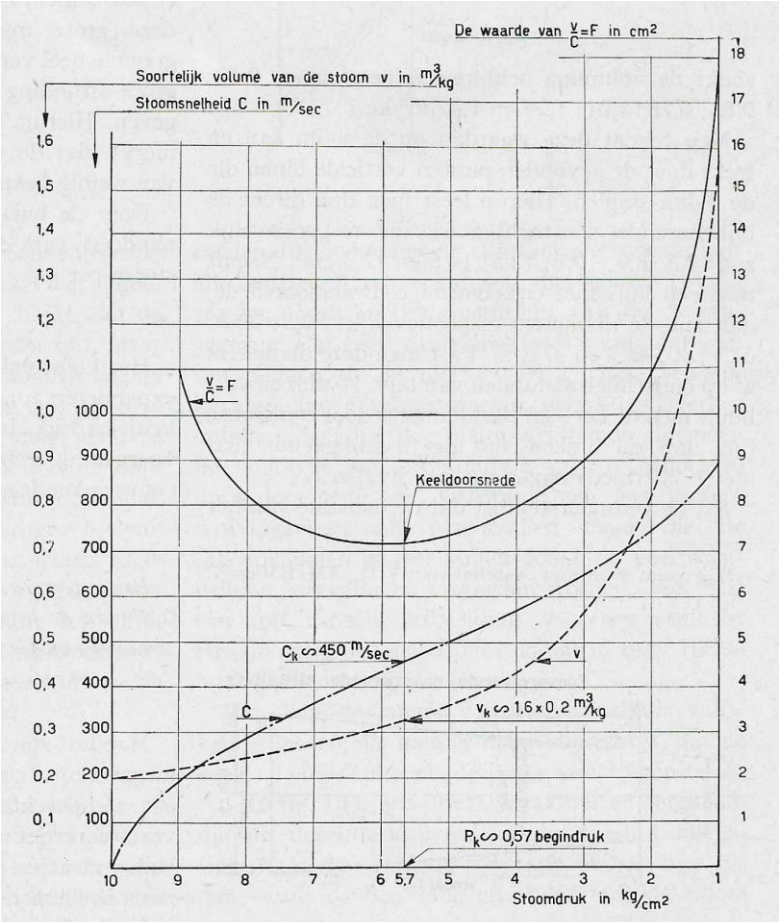
$$F = G\,.\frac{v}{C}\ \mathrm{m}^2$$

En de hierbij herhaalde formule van Zeuner:

$$C = 91{,}5\sqrt{H}\ \mathrm{m/sec}$$

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 cm² weergegeven. Men leest hieruit af dat de doorsnede tot een druk van 5,7 kg/cm² 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

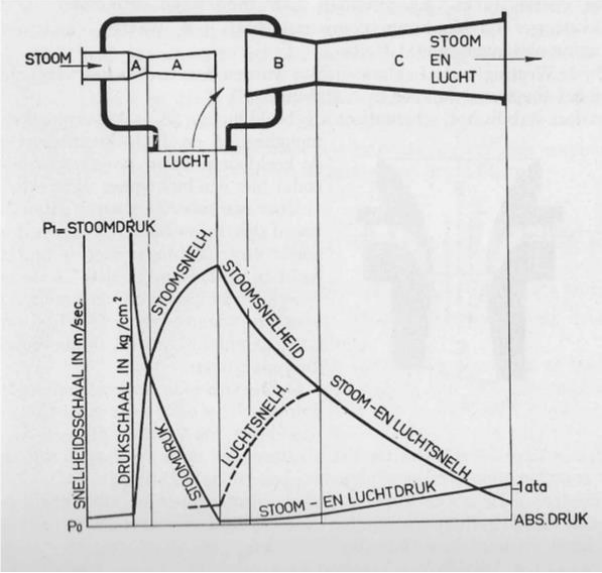



**Grafische weergave ejecteur**

## Ejecteur

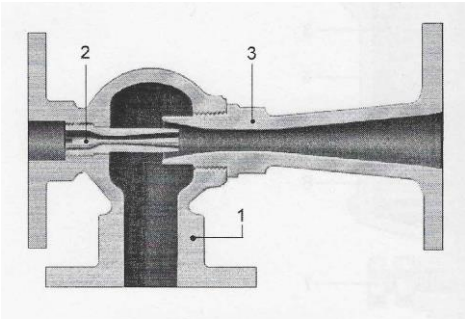
De stoomejecteur zoals hierna schematisch is afgebeeld, bestaat uit twee convergerend – divergerende straalbuizen. Tussen de twee straalbuizen bevindt zich de ruimte waar de lucht uit de te evacueren ruimte wordt toegevoerd. In de eerste straalbuis “A” vindt de snelheidsopbouw plaats van de expanderende 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.

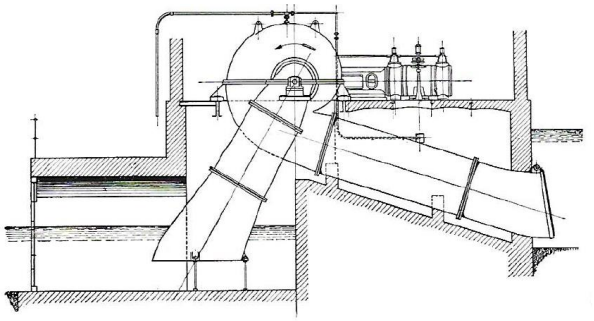



**Drukverloop in de ejecteur**

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 vacuuminstallatie meerdere pompen bediend worden.




**Doorsnede ejecteur**



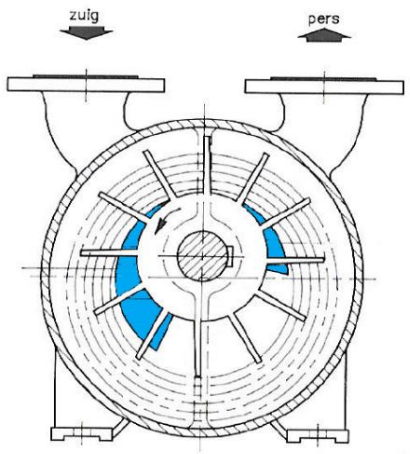
**Plaats van de ejecteur op de pomp**

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 pompdeksel, 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.

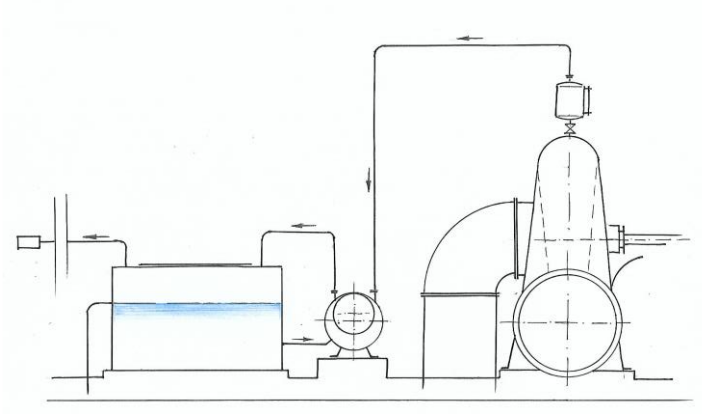



**Vloeistofring vacuümpomp**

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.

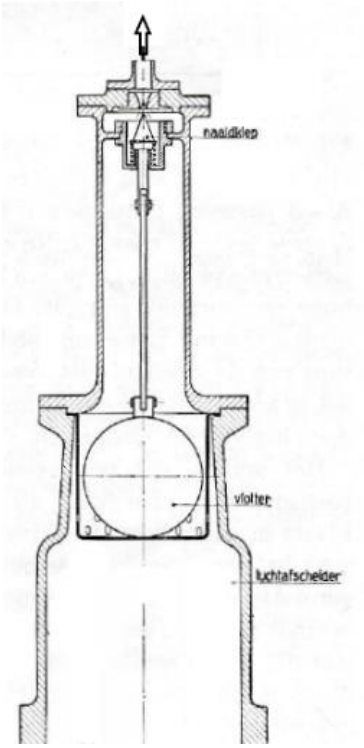
Het water noemen we sperwater en de tank sperwatertank. De lucht/water-afvoerleiding van de vacuümpomp mondt ook in deze tank uit zodat de tank steeds gevuld blijft en men steeds verzekerd is van voldoende sperwater. Tijdens bedrijf wordt vermogen aan het water toegevoerd waardoor een verhoging van de 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 zuigleidingsysteem geen syphons voor komen omdat die, als ze gevuld zijn met water het vacuüm in de bemalingspomp nadelig beïnvloeden.

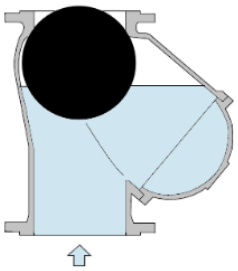



De rotatie snelheid van de pomprotor is 900 … 1400 omw/min en relatief hoog. Als er plotseling een grote hoeveelheid water wordt aangevoerd worden de schoepen overbelast, buigen krom of kunnen zelfs breken.

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.

**Vlotterinrichting**

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**