

De dubbelzuigervoetpomp

ing. A. Kragten

februari 2003
herzien juli 2019

KD 137

Het is toegestaan om dit rapport te kopiëren voor privé gebruik. Het idee van de in dit rapport beschreven dubbelzuigervoetpomp mag door iedereen vrij gebruikt worden. De pomp is nog niet gebouwd en getest. Kragten Design zal dit ook niet doen.

Constructiebureau Kragten Design
Populierenlaan 51
5492 SG Sint-Oedenrode
tel. +31 413 475770
website: www.kdwindturbines.nl

Inhoudsopgave		blz.
1	Inleiding	3
2	Beschrijving van de dubbelzuigervoetpomp	3
3	Bediening en toepassing van de pomp	5
4	Bepaling van de pompgeometrie	6
5	Literatuur	10

1 Inleiding

In het Engelstalige rapport KD 490 (lit. 1) wordt een overzicht gegeven van aantal methoden waarop met een windmolen water gepompt kan worden. In de literatuuropgaven aan het eind van KD 490, worden een groot aantal andere KD-rapporten vermeld waarin op bepaalde aspecten van het pompen van water gedetailleerd wordt ingegaan.

Al in 1984, toen ik nog bij de windenergiegroep van de TU-Eindhoven werkte, kreeg ik het idee van de zogenaamde “dubbelzuigerpomp” waarbij elke zuiger gedurende 50 % van de tijd met een constante snelheid omhoog en gedurende de andere 50 % weer versneld omlaag beweegt. Dit idee werd, voor nokschijf gedreven zuigers, door twee studenten uitgewerkt in een rapport van de TUE-Eindhoven dat niet meer verkrijgbaar is. De belangrijkste aspecten van dit idee werden echter opgenomen in het Engelstalige rapport KD 544 (lit. 2). De werking van de dubbelzuigerpomp kan worden toegelicht aan de hand van de volgende analogie.

Stel in het midden van een grote vijver ligt een zware boot en er loopt een touw van de boot naar de kant. Als iemand de boot aan de kant wil hebben trekt hij het touw hand over hand naar zich toe. Door de grote massa van de boot zal de treksnelheid, zodra de boot op snelheid is, constant zijn. Hierdoor is de snelheid van de trekkende hand ook constant. De niet trekkende hand moet telkens versneld naar voren gebracht worden om het van de andere hand te kunnen overnemen. De handen zijn vergelijkbaar met de zuigers van de dubbelzuigerpomp en de massa van de boot is vergelijkbaar met de watermassa in de leidingen.

In KD 544 wordt een dubbelzuigerpomp beschreven waarbij de nokkenas wordt aangedreven door een elektromotor en waarbij de zuigers in twee verschillende cilinders lopen. Het lijkt mogelijk om een voetpomp te ontwikkelen met twee zuigers die naast elkaar liggen en die door de linker en de rechter voet bediend worden. Er is hierbij geen nokschijf nodig en de bijna constante snelheid van de zuigers in de persrichting wordt veroorzaakt door de traagheid van het te verpompen water.

2 Beschrijving van de dubbelzuigervoetpomp (zie fig. 1)

Om de zuigers met beide voeten te kunnen bedienen worden de zuigers niet in lijn maar naast elkaar geplaatst waardoor ook de pompstang van elke zuiger naar buiten uitgevoerd kan worden. De perszijde van de ene zuiger wordt doorverbonden met de zuigzijde van de andere zuiger. De zuigers worden naar boven gedrukt door een lange slappe veer waardoor de veerkracht tijdens het indrukken maar weinig toeneemt. De zuigersamenstellingen zijn identiek.

Elke zuiger is opgebouwd uit twee messing (of bronzen) schijven waartussen een leren manchet geklemd wordt. In dit geheel van schijven en manchet zitten zes gaten waar het water tijdens de zuigslag doorloopt. Aan de onderkant zit een lichte polypropyleen klep die geleid wordt door een messing klepgeleider en die door een roestvrij stalen veertje omhoog gedrukt wordt. Aan de bovenkant van de bovenste schijf zit een messing verloopring waar een rubber aanslagring tegen afsteunt. Het geheel van schijven en ringen wordt met een zelfborgende moer op de roestvrij stalen pompstang geklemd. De pompstang wordt aan de bovenzijde geleid door een INA-Permaglide lagerbus type P11 (met bronzen huis). Daarboven zit een afdichtingsring om te voorkomen dat er water naar buiten lekt en dat er vuil of lucht naar binnen komt. De lagerbus en de afdichtingsring zitten in een wartelhuis dat boven in de bovenste pompplaat geschroefd wordt. Op de pompstang is aan de bovenzijde een schotel geschroefd waar met de voet op gedrukt wordt. De schotel wordt geborgd met een moer. Tussen de moer en het wartelhuis zit ook een rubber aanslagring. Tussen de schotel en de bovenste pompplaat zit een roestvrij stalen drukveer.

De beide cilinders worden opgesloten door een bovenste en een onderste pompplaat. De beide pompplaten worden naar elkaar toe getrokken m.b.v. zes trekstangen. Midden tussen beide cilinders zit een verbindingsbuis die de perszijde van de rechter cilinder verbindt met de zuigzijde van de linker cilinder (zie figuur 1).

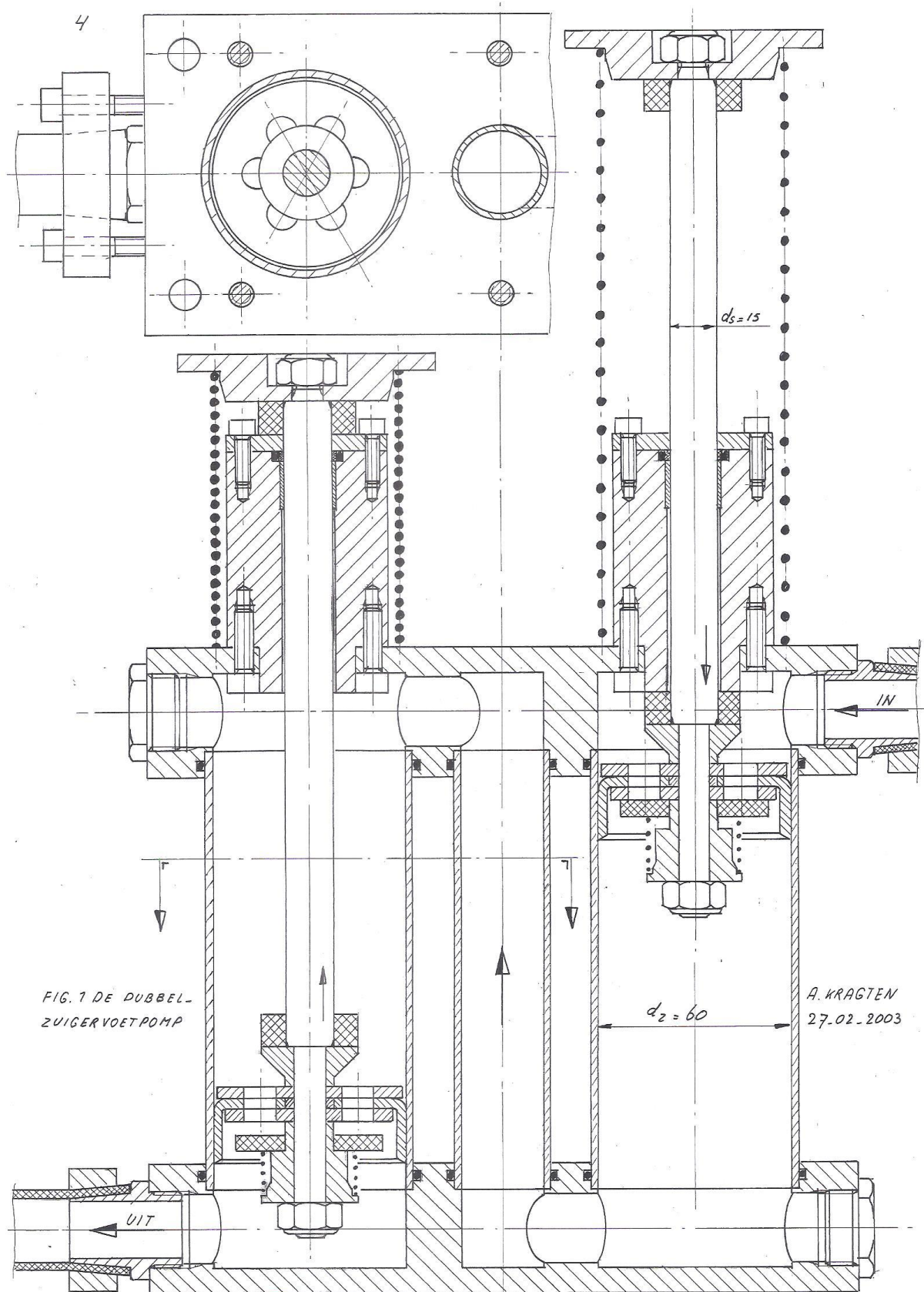


fig. 1 De dubbelzuigervoetpomp

Om de boring tussen de verbindingsbuis en de rechter cilinder te kunnen maken wordt vanaf de rechterkant een gat in de zijkant van de onderste pompplaat gemaakt die afgesloten worden met een eindstop. Op analoge manier wordt in de bovenste pompplaat een gat gemaakt vanaf de linkerkant. De toevoeropening zit aan de rechterkant van de bovenste pompplaat en bestaat uit een slangpilaar waarover een kunststof zuigslang geschoven kan worden. De afvoeropening zit aan de linkerkant van de onderste pompplaat. Om cavitatie bij grote zuighoogtes te voorkomen kan het nodig zijn om een grotere diameter zuigslang dan persslang te gebruiken. Omdat de zuigslang op onderdruk belast wordt moet hiervoor waarschijnlijk een gewapende slang of een stijve PVC buis gebruikt worden.

De onderste pompplaat wordt bevestigd aan een betonnen fundering of aan een zwaar houten schot. Om tijdens het pompen niet om te vallen is een steun nodig waar men zich aan vast kan houden. Waarschijnlijk moet dit een dubbele steun zijn links en rechts van het lichaam zodat men zich kan opdrukken waardoor niet altijd het gehele gewicht op één van beide zuigers rust. Deze steunen kunnen ook gebruikt worden om bij het starten aan te trekken. Misschien is het gemakkelijk om tijdens het pompen op een zadel te zitten.

De pomp is zelfaanzuigend en heeft vanwege de constante flow, een behoorlijk zuighoogte voordat cavitatie optreedt. Omdat de flow constant is kunnen leidingen met tamelijk kleine diameters gebruikt worden en kunnen zeer lange persleidingen gebruikt worden. Een ander voordeel van deze pomp is dat het water veel hoger opgevoerd kan worden dan de hoogte van de pomp zelf wat met de meeste handpompen niet mogelijk is. De pomp is met name geschikt om water uit een rivier of een niet al te diepe open put of tube well omhoog te pompen naar een reservoir. De put en het reservoir kunnen geheel afgesloten worden zodat er geen kans is op vervuiling van het water en op verspreiding van ziektes door bijvoorbeeld de malariamug. Omdat de pomp, als het goed is, niet zal lekken zal er ook bij de pomp zelf geen blubber ontstaan.

De pomp is niet geschikt voor diepe tube wells maar kan eventueel wel toegepast worden in diepe open putten mits geplaatst op een platform op een hoogte van ongeveer maximaal 8 m boven het laagste waterniveau en mits een degelijke ladder aanwezig is waarmee de pomp bereikt kan worden. In de tropen is het voordeel van een dergelijke opstelling dat het in de put koel is waardoor men het tijdens het pompen niet zo warm krijgt.

3 Bediening en toepassing van de pomp

De pomp wordt bediend door de linker en de rechter zuiger beurtelings met de linker en de rechter voet in te drukken. Hoe dit proces verloopt hangt af van de beginconditie.

Als de pomp leeg is zal hij eerst als luchtpomp werken en daardoor zal het water in de zuigleiding omhoog getrokken worden. Omdat er in het begin nog geen water in de persleiding zit zal de zuigersnelheid nog niet begrensd worden waardoor men in het begin voorzichtig moet pompen totdat de gehele pomp en de gehele persleiding gevuld zijn. Als de persleiding eenmaal gevuld is zal de pomp bij een lekkagevrij leidingstelsel en bij goed functionerende kleppen, manchetten en pompstangafdichtingen ook na enige tijd stilstand, niet leeglopen.

Als de pomp en de leidingen gevuld zijn zal vanuit stilstand eerst de watersnelheid in de leidingen opgebouwd moeten worden waardoor de zuigers in het begin maar langzaam ingedrukt kunnen worden. Als het water eenmaal op snelheid is, is een kleinere kracht nodig. Deze kracht wordt bij lage watersnelheden nagenoeg geheel bepaald door de statische opvoerhoogte en door de zuigerdiameter. Bij hogere watersnelheden zal ook de leidingweerstand overwonnen moeten worden die kwadratisch toeneemt met de watersnelheid. De leidingweerstand wordt weer bepaald door de leidinglengte en de inwendige leidingdiameter. De grootste kracht die iemand normaal kan uitoefenen treedt op wanneer hij zijn gehele gewicht op één van beide zuigers laat rusten. Wanneer de pomp voorzien is van een dubbele steun links en rechts van het lichaam, kan echter een grotere kracht worden uitgeoefend door aan de steunen te trekken.

De pompgeometrie moet zodanig afgesteld zijn op de opvoerhoogte dat een pompkracht nodig is van ongeveer 2/3 van het gemiddelde gewicht van een volwassen persoon.

De snelheid van de maximale opwaartse zuigerbeweging wordt bepaald door de sterkte van de drukveer en door de drukval over de klep. Om sterke stoten te voorkomen wanneer de bovenste rubber aanslag bereikt wordt, is een pomptechniek nodig waarbij de opwaartse snelheid door de voet beperkt wordt. De neerwaartse snelheid wordt al beperkt door de traagheid van de watermassa in de leidingen waardoor op de onderste rubber aanslag geen grote stootkracht uitgeoefend zal worden.

De pomp zal vooral bij lage watersnelheden een zeer hoog rendement hebben omdat er weinig wrijvings- en stromingsverliezen zijn. De pomp is zeer compact van opbouw en eenvoudig te installeren waardoor hij waarschijnlijk verkocht kan worden zonder dat er een installatieteam meegestuurd moet worden. Wanneer de pomp uit hoogwaardige materialen gemaakt wordt zal hij slechts weinig onderhoud behoeven. De leren manchet lijkt het enige slijtagegevoelige onderdeel en die is eenvoudig te vervangen.

4 Bepaling van de pompgeometrie

De maximale zuigerdiameter wordt bepaald door de maximale voetafstand waarmee nog comfortabel gepompt kan worden. Dit komt neer op een maximale hartafstand tussen de zuigers van ongeveer 300 mm. Omdat de verbindingsbuis tussen beide zuigers in ligt is de maximale zuigerdiameter ongeveer 250 mm wat zelfs voor lage opvoerhoogtes ruim voldoende is. De minimale hartafstand tussen beide zuigers moet ongeveer 120 mm zijn zodat de voeten elkaar tijdens het pompen niet raken.

De maximale slag waarmee nog comfortabel gepompt kan worden lijkt ongeveer 200 mm te zijn. Dit is ongeveer gelijk aan de tredhoogte van een normale binnentrap. Bij deze hoogte kan men zijn gehele gewicht nog makkelijk op één been optillen. Hierbij wordt de knie ongeveer 45° gebogen. Naarmate de kniehoek kleiner is kan een grotere kracht geleverd worden en voor een eerste prototype zal dan ook voor een kleinere slag dan 200 mm gekozen worden. Bij een normale fietsbeweging is de slag ongeveer 350 mm maar hierbij maken de voeten een cirkelbeweging in plaats van een lineaire beweging wat waarschijnlijk comfortabeler is. Vanwege de massatraagheid van de fiets hoeft ook niet een constante kracht geleverd te worden. Hetzelfde geldt echter ook voor de dubbelzuigervoetpomp. Zelfs met een behoorlijk variatie in de aandrijfkracht zal de watersnelheid en daardoor de zuigersnelheid nog nagenoeg constant zijn.

De pompgeometrie wordt nu bepaald onder aanname dat de omlaaggaande zuigersnelheid constant is en dat de leidingverliezen verwaarloosd mogen worden. In eerste instantie wordt uitgegaan van een statische opvoerhoogte $H = 20$ m die opgebouwd is uit een zuighoogte van 5 m en een pershoogte van 15 m. Hiermee wordt al een groot deel van het toepassingsgebied gedekt. Voorlopig wordt uitgegaan van een zuigerdiameter $d_z = 0,06$ m en een werkzame slag $s = 0,1$ m. De zuigerstang heeft een diameter $d_s = 0,012$ m. Voor het slagvolume van beide zuigers samen U_z geldt dan dat:

$$U_z = \pi/2 (d_z^2 - d_s^2) * s \quad (\text{m}^3) \quad (1)$$

De pompfrequentie van één zuiger wordt f genoemd (s^{-1}). Het volumetrisch rendement η_{vol} (-) wordt uitgedrukt als factor van 1 en dus niet in procenten. Vanwege de klepveren zal het volumetrisch rendement zeer hoog zijn. Voor het debiet q (m^3/s) geldt dan dat:

$$q = f * \eta_{\text{vol}} * U_z \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (2)$$

(1) + (2) geeft:

$$q = f * \eta_{\text{vol}} * s * \pi/2 (d_z^2 - d_s^2) \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (3)$$

Stel $f = 0,5$ slag/s, stel $\eta_{\text{vol}} = 0,98$, stel $s = 0,1$ m, stel $d_z = 0,06$ m en stel $d_s = 0,012$ m. Invulling van deze waarden in formule 3 geeft $q = 2,66 * 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} = 0,96 \text{ m}^3/\text{uur}$. Dit is al een aanzienlijke hoeveelheid water waardoor iemand in een relatief korte tijd de drinkwaterbehoefte voor die van zijn familie omhoog gepompt kan hebben.

De benodigde statische pompstangkracht F_{stat} wordt bepaald door product van het drukverschil over de zuiger ΔP en het effectieve zuigeroppervlak A_z . Voor ΔP geldt:

$$\Delta P = \rho_w * g * H \quad (\text{N/m}^2) \quad (4)$$

Voor A_z geldt:

$$A_z = \pi/4 (d_z^2 - d_s^2) \quad (\text{m}^2) \quad (5)$$

(4) + (5) geeft:

$$F_{\text{stat}} = \pi/4 * \rho_w * g * H * (d_z^2 - d_s^2) \quad (\text{N}) \quad (6)$$

Invulling van $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, $H = 20$ m, $d_z = 0,06$ m en $d_s = 0,012$ m in formule 6 geeft dat $F_{\text{stat}} = 532,6$ N.

Deze statische pompstangkracht wordt nog verhoogd met de wrijvingskracht F_w en de veerkracht F_v . F_w is het gevolg van de manchetswrijving en de wrijving tussen de pompstang en het glijlager en de afdichtingsring. De wrijving tussen het glijlager en de afdichtingsring is waarschijnlijk te verwaarlozen. De manchetswrijving hangt sterk af van de bewegingsrichting. Als de zuiger omlaag beweegt wordt het manchet door het drukverschil tegen de cilinderwand gedrukt waardoor de wrijving relatief hoog is. Als de zuiger omhoog beweegt veert het manchet terug waardoor de wrijving waarschijnlijk te verwaarlozen is. Voorlopig wordt voor de omlaag gaande beweging aangenomen dat voor F_w geldt dat:

$$F_w = 0,05 * F_{\text{stat}} \quad (\text{N}) \quad (7)$$

Invulling van $F_{\text{stat}} = 532,6$ N in formule 7 geeft $F_w = 26,6$ N.

De veerkracht F_v is nodig om de zuiger aan het einde van de werkzame slag weer omhoog te brengen. Tijdens de omhoog gaande beweging moet door F_v de volgende krachten overwonnen worden: a) het gewicht G van de zuiger en de pompstang. b) de benodigde versnellingskracht om de omlaaggaande zuigersnelheid om te zetten in een omhooggaande snelheid. c) de manchets- en pompstangwrijving in opwaartse richting. d) het drukverschil over de klep t.g.v. hydrodynamische verliezen in de doortocht door de zes gaten in de zuiger en de spleet tussen klep en zitting. Deze laatste kracht is waarschijnlijk het belangrijkste, mede omdat deze kwadratisch toeneemt met de watersnelheid door de zuiger. De veer moet zodanig gedimensioneerd zijn dat deze vier krachten bij een normale pompfrequentie ruim geleverd kunnen worden en dat de zuiger op tijd weer in de bovenste stand is. Als er nog wat reserve is betekent dit dat de voet omhoog geduwd wordt maar de vermindering van het pompvermogen die hier wordt veroorzaakt wordt verwaarloosd. De veerkracht is niet constant maar neemt toe met de indrukking. Wanneer een slappe veer gebruikt wordt is deze toename maar beperkt en kan gerekend worden met de gemiddelde waarde $F_{v \text{ gem}}$.

Tijdens de omlaaggaande beweging werkt het gewicht G van zuiger en pompstang tegen de veerkracht in. De zuiger heeft een constante snelheid dus de versnellingskracht is nul. De manchetswrijving werd al bij F_w in rekening gebracht en de klep staat dicht waardoor de hydrodynamische verliezen nul zijn. Voor de netto te leveren veerkracht $F_{v \text{ netto}}$ geldt dan:

$$F_{v \text{ netto}} = F_{v \text{ gem}} - G \quad (\text{N}) \quad (8)$$

Voorlopig wordt aangenomen dat voor $F_{v \text{ netto}}$ geldt dat:

$$F_{v \text{ netto}} = 0,05 * F_{\text{stat}} \quad (\text{N}) \quad (9)$$

Invulling van $F_{\text{stat}} = 532,6 \text{ N}$ in formule 9 geeft $F_{v \text{ netto}} = 26,6 \text{ N}$.

Voor de totale statische kracht $F_{\text{stat tot}}$ geldt dat:

$$F_{\text{stat tot}} = F_{\text{stat}} + F_w + F_{v \text{ netto}} \quad (\text{N}) \quad (10)$$

Invulling van $F_{\text{stat}} = 532,6 \text{ N}$, $F_w = 26,6 \text{ N}$ en $F_{v \text{ netto}} = 26,6 \text{ N}$ in formule 10 geeft dat $F_{\text{stat tot}} = 585,8 \text{ N} = 59,7 \text{ kgf}$. Deze kracht moet geleverd kunnen worden door een volwassen persoon die niet al te licht is. Een opvoerhoogte van 20 m is wel ongeveer het maximum voor deze pompgeometrie.

Wanneer een zuiger een effectieve slag s heeft van 0,1 m in 50 % van de cyclustijd geldt voor de omlaaggaande zuigersnelheid V_z dat:

$$V_z = 2 * f * s \quad (\text{m/s}) \quad (11)$$

Invulling van $f = 0,5 \text{ slag/s}$ en $s = 0,1 \text{ m}$ in formule 9 geeft dat $V_z = 0,1 \text{ m/s}$. Voor het aan beide zuigers toe te voeren mechanische vermogen P geldt:

$$P = F_{\text{stat tot}} * V_z \quad (\text{W}) \quad (12)$$

Invulling van $F_{\text{stat tot}} = 585,8 \text{ N}$ en $V_z = 0,1 \text{ m/s}$ in formule 12 geeft dat $P = 58,6 \text{ W}$. Dit moet een volwassen mens gedurende lange tijd kunnen leveren. Waarschijnlijk kan men best wat sneller trappen zodat de opbrengst evenredig toeneemt. Bij hoge watersnelheden zijn de leidingverliezen echter niet meer te verwaarlozen waardoor het benodigde vermogen meer dan evenredig toeneemt.

Voor het geleverde hydraulische vermogen P_{hyd} geldt:

$$P_{\text{hyd}} = \rho_w * g * H * q \quad (\text{W}) \quad (13)$$

Invulling van $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, $H = 20 \text{ m}$ en $q = 2,66 * 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ in formule 13 geeft dat $P_{\text{hyd}} = 52,2 \text{ W}$. Voor het pomprendement η_p als fractie van 1 geldt:

$$\eta_p = P_{\text{hyd}} / P \quad (-) \quad (14)$$

Invulling van $P_{\text{hyd}} = 52,2 \text{ W}$ en $P = 58,6 \text{ W}$ in formule 14 geeft dat $\eta_p = 0,89$ wat erg hoog is. Wel is het zo dat hierbij nog geen rekening is gehouden met de leidingverliezen en die hangen af van de leidinglengte l en de inwendige leidingdiameter d_l .

Tot nu toe werd aangenomen dat de watermassa in de leidingen zo groot is dat de omlaaggaande zuigersnelheid ongeveer constant is wanneer de watermassa eenmaal in beweging gezet is. Het effect van de watermassa in de leidingen heeft echter een effect op de dynamische zuigerkracht F_{dyn} dat zeer sterk afhangt van de verhouding i tussen het effectief zuigeroppervlak A_z en het inwendige oppervlak van de leidingen A_l .

Voorlopig wordt aangenomen dat de zuigleiding en de persleiding beiden dezelfde inwendige diameter d_l hebben waardoor de watersnelheden en de versnellingen in beide leidingen gelijk zijn. Wanneer twee roterende assen met een overbrengingsverhouding i aan elkaar gekoppeld zijn, wordt het traagheidsmoment I van de snelle as op de langzame as ervaren als $I * i^2$. Analoog hiermee wordt bij een hydraulische overbrenging met een overbrengingsverhouding i , de massa van het water in de leiding m op de zuiger ervaren als $m * i^2$.

Voor het oppervlak van de leiding A_1 met een inwendige diameter d_1 geldt:

$$A_1 = \pi/4 * d_1^2 \quad (\text{m}^2) \quad (15)$$

Voor de hydraulische overbrengingsverhouding i geldt:

$$i = A_z / A_1 \quad (-) \quad (16)$$

(5) + (15) + (16) geeft:

$$i = (d_z^2 - d_s^2) / d_1^2 \quad (-) \quad (17)$$

Voor de dynamische zuigerkracht F_{dyn} geldt dat:

$$F_{\text{dyn}} = a * m * i^2 \quad (\text{N}) \quad (18)$$

(17) + (18) geeft:

$$F_{\text{dyn}} = a * m * (d_z^2 - d_s^2)^2 / d_1^4 \quad (\text{N}) \quad (19)$$

Hierin is a de zuigerversnelling en m de massa van het water in de leidingen. Voor een totale leidinglengte l geldt voor m dat:

$$m = \rho_w * \pi/4 * l * d_1^2 \quad (\text{kg}) \quad (20)$$

(19) + (20) geeft:

$$F_{\text{dyn}} = \pi/4 * a * \rho_w * l * (d_z^2 - d_s^2)^2 / d_1^2 \quad (\text{N}) \quad (21)$$

$\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$, stel $l = 50 \text{ m}$, $d_z = 0,06 \text{ m}$, $d_s = 0,012 \text{ m}$, stel $d_1 = 0,015 \text{ m}$. Invulling van deze waarden in formule 21 geeft dat:

$$F_{\text{dyn}} = 2084,6 * a \quad (\text{N}) \quad (22)$$

Stel $a = 0,05 \text{ m/s}^2$. Invulling van deze waarde in formule 22 geeft $F_{\text{dyn}} = 104,2 \text{ N}$. Samen met $F_{\text{stat tot}} = 585,8 \text{ N}$ geeft dit een totale kracht $F_{\text{tot}} = 690 \text{ N} = 70,3 \text{ kgf}$. Dit is wel zo ongeveer de maximale kracht die iemand tijdelijk kan leveren en daarvoor zullen al steunen aan de zijkant van het lichaam nodig zijn om zich te kunnen afzetten. Aan deze berekening is te zien dat de massa van het water in de leiding en de hydrodynamische overbrengingsverhouding van grote invloed zijn op het startgedrag maar dat het systeem als het eenmaal op snelheid is ook zeer stabiel zal functioneren.

Nu kan worden berekend hoe lang het duurt voor het systeem bij de aangenomen versnelling van $0,05 \text{ m/s}^2$ op snelheid is, d.w.z. hoe lang het duurt voordat de zuigersnelheid $0,1 \text{ m/s}$ is. Voor een eenparig versnelde beweging geldt:

$$V = V_0 + a * t \quad (\text{m/s}) \quad (23)$$

Omdat de beginsnelheid V_0 nul is kan formule 23 geschreven worden als:

$$t = V / a \quad (\text{s}) \quad (24)$$

Invulling van $V = 0,1 \text{ m/s}$ en $a = 0,05 \text{ m/s}^2$ in formule 24 geeft dat $t = 2 \text{ s}$ wat toch nog niet erg lang is. Voor de pompfrequentie f was aangenomen dat $f = 0,5 \text{ slag/s}$. De cyclustijd $T = 1 / f$ en bedraagt dus 2 s . Dit is toevallig even lang als de tijd die nodig is om het systeem op snelheid te brengen. Wanneer de leidinglengte geen 50 maar 100 m is duurt het ook twee keer zo lang en dus 4 s voordat het systeem op snelheid is maar dat is nog steeds acceptabel.

Als men abrupt stopt met pompen zal het water nog een kort tijd doorstromen voordat de watersnelheid in de leidingen nul wordt maar zodra dit het geval is sluiten de kleppen in beide zuigers waardoor het water niet terug kan lopen.

5 Literatuur

- 1 Kragten A. Water pumping with a windmill, maart 2012, herzien mei 2019, openbaar rapport KD 490, Constructiebureau Kragten Design, Populierenlaan 51, 5492 SG Sint-Oedenrode.
- 2 Kragten A. Ideas about a double piston pump with a constant upwards piston speed driven by an asynchronous 4-pole, 3-phase motor or a permanent magnet DC motor frame size 71 and a reducing gear box frame size 32 of manufacture Rossi, januari 2014, herzien Mei 2016, openbaar rapport KD 544, Constructiebureau Kragten Design, Populierenlaan 51, 5492 SG Sint-Oedenrode.