

Windvoorziening met gebruik van een windmotor.

Inleiding en verantwoording

Een jaar of vier geleden ben ik begonnen met het ontwerp en de bouw van een compact en licht kistorgel, waarvan ik er inmiddels twee heb gebouwd..

Ook de windvoorziening moest compact zijn, voorzien van een mini-ventola windmotor, een kleine balg en drukregeling met een regelklep. Voor de windvoorziening heb ik gekozen voor een ontwerp van Tjeerd Bosklopper uit het boekje "Bau von Kleinorgeln" Het is een compact ontwerp met een zwemmerbalg, waarvan het balgblad aan één zijde scharnierend is bevestigd, in combinatie met een drukregeling met een regelklep.

Door de vrij wijde mensuur en krachtige intonatie wordt wel het maximale van de windmotor en de regeling gevraagd.

De stabiliteit van de winddruk vond ik met deze combinatie voor mijn orgel niet optimaal. Maar misschien ben ik te kritisch en is dit te vatten onder "levende wind".

Mijn zoektocht richtte zich daarom op de vraag "Wat veroorzaakt deze schommelingen in de winddruk en hoe zou ik dit kunnen verbeteren?"

Ik heb sindsdien veel testen en metingen gedaan met verschillende typen balgen en regelingen, maar allemaal compact, passend in de beschikbare ruimte van het kistorgel. De grondslagen en uitkomsten heb ik gepresenteerd tijdens een voordracht op de open zolderdag van 12 november. Dit artikel is deze voordracht in verhaalvorm. Ik heb de volgorde aangehouden naar de volgorde van de bouw en experimenten. De theoretische berekening heb ik niet overal uitgewerkt. De theorie is alleen bedoeld als een ondersteuning van wat ik gemeten heb.

Windvoorziening

De windvoorziening van een orgel is bedoeld om de hoeveelheid wind die een orgel vraagt te leveren met een constante druk en met een dynamisch stabiel gedrag bij een plotselinge verandering van de windvraag. Er zijn verschillende manieren om dit te bereiken, maar in dit verhaal beperk ik mij tot de tegenwoordig meest gangbare bij kleinere en grote orgels, nl. die waarbij een elektrische windmotor de gewenste hoeveelheid wind levert met een voldoende druk en waarbij door combinatie van een balg en regeling een constante winddruk aan het orgel geleverd wordt.

Waarom moet de winddruk constant zijn.

De toonhoogte van het pijpwerk is afhankelijk van de winddruk. Een lagere winddruk veroorzaakt het verlagen van de toonhoogte. De mensuur en het soort, labialen of tongwerken, bepalen deze afhankelijkheid. Voor enkele pijpen heb ik dit gemeten. Het resultaat staat in onderstaande tabel. N.B. Fluit 4' c''' is een open fluit en klinkt een octaaf hoger dan Holpijp 8' c'''.

- Afwijking in cent per % winddrukverandering
- Holpijp 8 c''' 1,84
- Fluit 4 c'' 0,80
- Fluit 4 c''' 1,47

Je ziet dat pijpwerk met een wijde mensuur meer verstemt dan enger pijpwerk. Het kleinere pijpwerk uit een register verstemt meer dan het grote.

Wat is acceptabel.

Dat is een moeilijk verhaal. Als je bedenkt dat niet alle pijpwerk evenveel verstemt bij verandering van de winddruk zal het effect zijn dat bij iedere verandering van de winddruk het gespeelde akkoord onzuiver zal klinken.

Bijvoorbeeld: Bij een winddruk verandering van 3% zal het octaaf fluit 4 c''- c''' gaan zweven met een frequentie van 2,4Hz, even voorbijgaand aan het feit dat de octaven van pijpwerk elkaar wel tot een zekere grens zullen meentrekken.

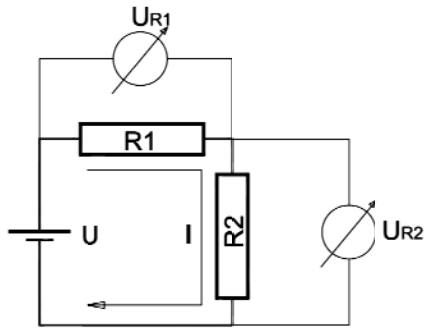
Nu is "onzuiver" bij een toetsinstrument natuurlijk relatief. Ieder stemrecept bevat onzuiverheden, maar onzuiverheden die teveel voorbij gaan aan de zuiverheid die juist de bedoeling is van een gebruikt stemrecept is m.i. onacceptabel.

Verder is het zo dat afwijkingen sterker naar voren komen bij pijpwerk dat veel harmonischen produceert en bij hoge stemmen (2', 1', mixturen). Tenslotte ontstaat er een vreemd springend effect als een hoge toon aangehouden wordt en een staccato reeks in het groot octaaf gespeeld wordt

De theorie van de windvoorziening

Voor een beter begrip van de werking van de windvoorziening komt tussendoor wat theorie om de hoek kijken. Ik heb alleen de basis opgenomen om het verhaal niet al te lang en hopelijk leesbaar te houden.

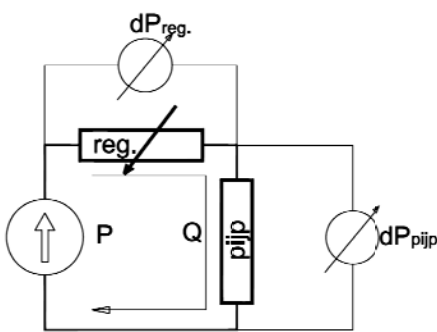
Wet van Ohm



Natuurlijk komt met mijn achtergrond (elektrotechnicus) de wet van Ohm om de hoek kijken, omdat deze een analogie laat zien met de windvoorziening

$U = I \times R$, waarin U de spanning van een bron is (accu, batterij e.d.), R is de elektrische weerstand van een circuit en I is de stroom door het circuit die ontstaat als de spanning U hierop aangesloten wordt.

Schakel ik twee gelijke weerstanden R achter elkaar, dan kun je uitrekenen ($U_r = I \times R$) dat de spanning over iedere weerstand de helft van de accuspanning U zal zijn. Zijn de weerstanden ongelijk dan zal de spanning zich ook ongelijk verdelen.



Wind analogie

Ik doe de volgende vervangingen

U wordt P, de winddruk.

I wordt Q, de hoeveelheid wind (m^3/min) die door het circuit stroomt.

R blijft R, de weerstand tegen doorstroming van een onderdeel in het circuit.

Een voorbeeldcircuit bestaat uit links de windmotor, daarna een regelbare weerstand, de regelklep en vervolgens een orgelpijp. De verbinding onderaan tussen de pijp en de windmotor is in de praktijk de buitenlucht.

De windmotor levert een bepaalde druk (P), waardoor er een hoeveelheid lucht (Q) door het circuit stroomt.

De weerstand van de regelklep zorgt ervoor dat maar een deel van de druk over de pijp valt.

Helaas is het verband tussen de drie niet zo eenvoudig als in het elektrische systeem. De volgende vergelijking is geldig: $\Delta P = C_w \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2$

Waarin:

dP = het drukverschil over een weerstand;

C_w = de weerstandscoefficiënt, die afhankelijk is van de vorm en ruwheid van het kanaal waar de wind door stroomt;

ρ = de soortelijke massa van lucht;

v^2 = de luchtsnelheid in het kwadraat.

Voor één bepaalde vorm en ruwheid van een kanaal is $C_w \cdot \frac{\rho}{2} = \text{constant (C)}$

waardoor: $dP = C \cdot v^2$

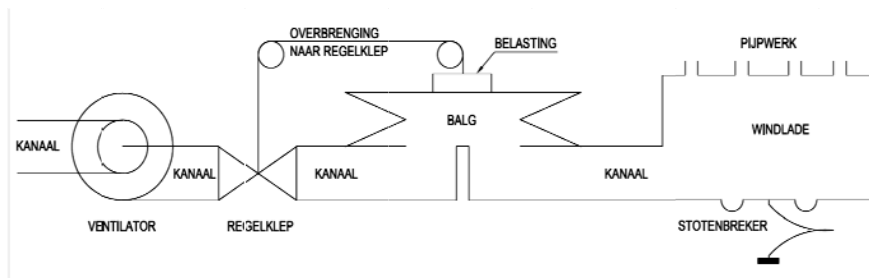
Verder geldt: $Q = v \cdot A$, waarin A = de oppervlakte van de doorsnede door het kanaal.

Zodat: $dP = \frac{C}{A^2} \cdot Q^2$

Noem: $R = \frac{C}{A^2}$ zodat: $dP = Q^2 \cdot R$ of $R = \frac{dP}{Q^2}$

Hieruit is af te leiden: $\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{A_1}{A_2} \cdot \sqrt{\frac{dP_1}{dP_2}}$

Voor A = constant geldt dan: $\frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{dP_1}{dP_2}}$

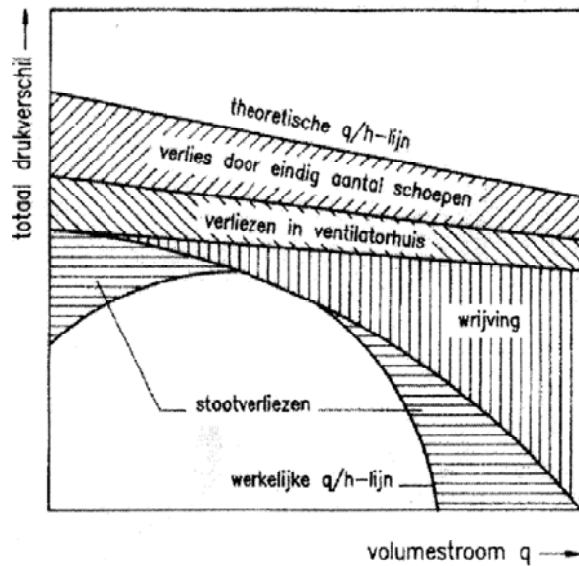


Onderdelen windvoorziening

In de praktijk zijn er veel meer onderdelen die door hun specifieke weerstand of eigenschappen van invloed zijn op de windvoorziening. Alle kanalen zijn weerstanden die in serie

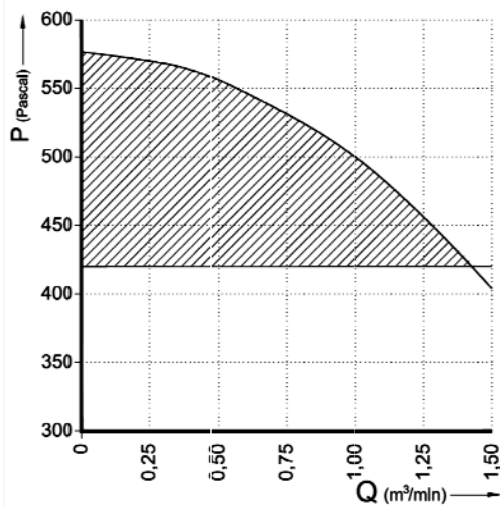
met elkaar staan. Het pijpwerk bestaat uit weerstanden die parallel staan.

De windmotor



Meestal wordt een centrifugaal ventilator gebruikt, die echter geen constante druk, onafhankelijk van de opbrengst Q levert. De oorzaken zijn weergegeven in het diagram hiernaast. Zonder maatregelen is deze windmotor daarom ongeschikt om de orgelwind te leveren.

Kies een windmotor zo dat de druk van de windmotor altijd ruimschoots hoger is dan de gewenste druk in de lade bij de maximaal benodigde Q . Het verschil valt over de regelklep. Een regelklep kan alleen regelen als er een drukverschil over valt. Denk eraan dat door weerstand in het kanaal naar en van de windmotor de effectieve druk van de windmotor bij hogere Q wordt verlaagd en het bruikbare gebied wordt verkleind.



Als voorbeeld de mini-ventola van Laukhuff. Het gearceerde is de verschilddruk die de regeling moet wegwerken.

De balg

Een balg is kortweg een flexibele zak die met lucht gevuld wordt. Deze lucht wordt onder druk gezet door de zak te belasten met een gewicht of een veer.

De zwemmerbalg die ik heb toegepast bestaat uit een raam waarbinnen het balgblad, dat aan één korte zijde scharnierend is bevestigd aan het raam, kan bewegen. Het balgblad is met een flexibele leren rand verbonden met het raam. Het leer moet breder zijn dan de opening tussen het balgblad en het raam om



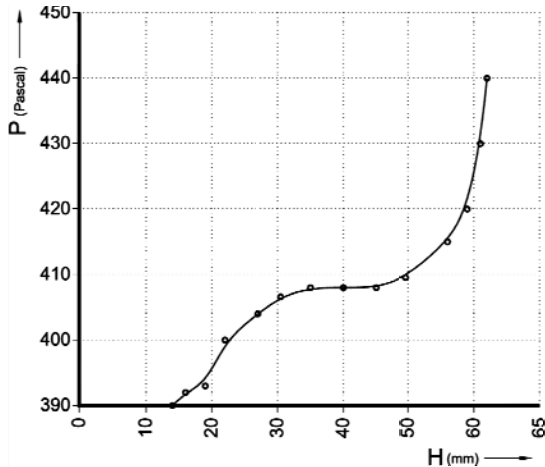
voldoende beweging van het raam mogelijk te maken.

Door het balgblad aan één zijde scharnierend te bevestigen is het blad stabiel en kan ik de druk instellen door de belasting te verschuiven. Dit bepaalt ook de mechanische belasting van het scharnierpunt.

Door meting kan ik bepalen wat de druk in de mogelijke

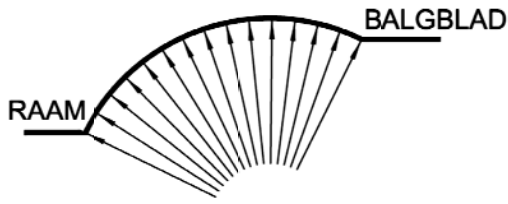
standen van de balg was.

Gegevens balg:	
Winddruk gemiddeld:	420 Pascal
Lengte balgraam:	556 mm
Breedte balgraam:	194 mm
Lengte balgblad:	526 mm
Kleinste breedte balgblad:	134 mm
Grootste breedte leren slab:	50 mm
Grootste afstand tussen balgblad en raam:	30 mm

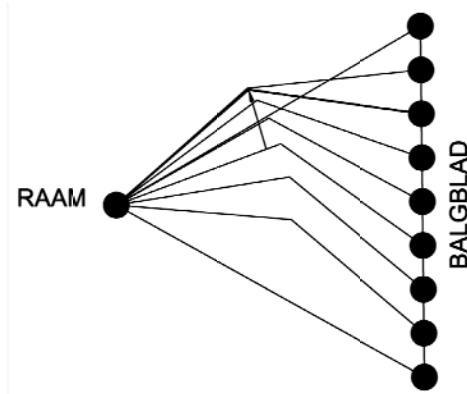


De balg belast ik met een gewicht en blaas ik geleidelijk op. Voor een aantal standen van het balgblad noteer ik de druk.

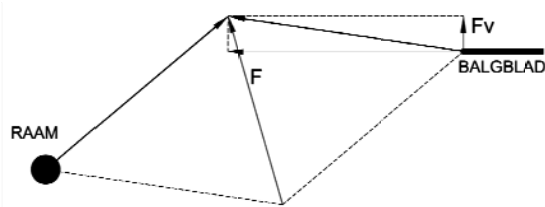
Het resultaat is een grafiek, waarin te zien is dat er een klein middengebied een traject is waar de druk constant is. Daaronder is de druk te laag en daarboven te hoog. De meetpunten zijn aangegeven.



Dit grafiek is te verklaren door te bekijken hoe de winddruk inwerkt op de leren verbinding tussen balgblad en raam. Onder invloed van de winddruk zal een flexibel reservoir zich vervormen tot een bol, denk aan een ballon, of een bolsegment, een cilinder of een cilindersegment. Met deze laatste heb ik hier te maken. Als ik een doorsnede maak ziet dat eruit als het plaatje. Links het raam, rechts het balgblad en de leren slab ertussen. Doordat de winddruk op ieder deel loodrecht inwerkt ontstaat de cirkelboog.

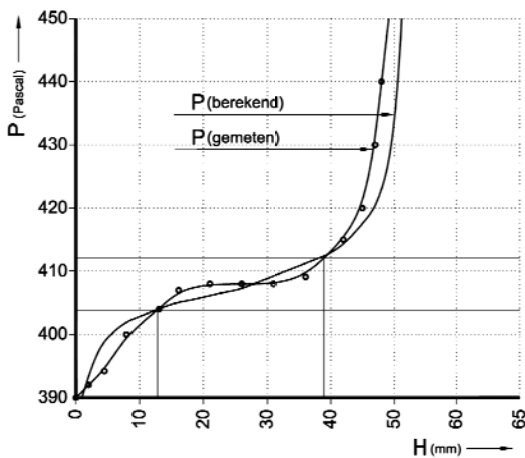


Om de berekening van de verticale kracht simpeler te maken heb ik dit benaderd volgens het diagram hiernaast. Het cirkelsegment is een touwtje geworden waarop in het midden de kracht van de winddruk aangrijpt. Je ziet dat in iedere stand tussen de twee uitersten (touwje staat strak) de vorm verandert. Ook verandert in iedere stand de richting waarin de kracht aangrijpt.



F_v is uit te rekenen met behulp van goniometrie en ontbinding/samenstelling van krachten. Zie bijgaand diagram.

Door F_v , die over het grootste gedeelte de omgekeerde richting heeft als de ballast, zal de druk in de balg afnemen. Doordat de druk lager is wordt ook kracht F lager en moet de berekening worden herhaald met deze lagere kracht F (itereren). Dit heb ik niet gedaan omdat het mij toch alleen om het middendeel van de grafiek is te doen, waar weinig variatie in de druk optreedt en omdat de vereenvoudigde berekening alleen indicatief is. Je ziet dat, als de toelaatbare variatie in de winddruk + 1% en - 1% is, het deel tussen $H = 13$ en $H = 38$ mm bruikbaar is, voor zover er geen andere verstoringen zijn.



Hoe is dit te verbeteren.

Door te zorgen dat de leren slab tussen het balgblad en het raam over een grote uitslag van het blad steeds dezelfde vorm behoud kan het gebied met constante druk vergroot worden. De catalogus van Laukhuff geeft een voorbeeld. De brede slab wordt in zijn vorm gehouden door houten schotten aan de binnen- en de buitenzijde.

Een lastig punt is het dichtmaken van de hoeken tussen de verschillende delen van de leren, in dit geval rubberen, verbinding.

Balgveren

Balgen kan ik belasten met ballast of met één of meer veren.

Belasten met een veer heeft als voordelen dat het gewicht, en daardoor het gewicht van het hele orgel, lager is. Ook heeft het dynamische voordelen, zie verderop in dit verhaal.

Het voordeel van ballast is dat het gewicht onafhankelijk is van de rijshoogte van het balgblad, afgezien van een eventuele hoek van het blad bij een keilbalg. Veren zijn wat dat betreft in het nadeel omdat ze nooit een constante kracht onafhankelijk van de stand van het balgblad leveren.

Laukhuff nr.	pond	druk bij 100mm (gram)	veerconstante (gram/mm)
1.848.01	3/4	1286	3,2
1.848.01	3/4	1454	3,4
1.848.02	5	2136	4,8
1.848.02	5	2212	5,8
1.848.02	5	2350	4,9
1.848.03	6	2297	6,7
1.848.03	6	2510	6,0
1.848.03	6	2783	8,9
1.848.04	8	3394	8,7
1.848.04	8	3500	10,2
1.848.04	8	3506	10,6
1.848.05	10	3625	10,7
1.848.05	10	3686	10,5

Het meest gebruikt zijn harmonium balgveren, bestaande uit twee toelopende bladveren die aan de brede zijde aan elkaar zijn geklonken en verkrijgbaar in verschillende sterktes.

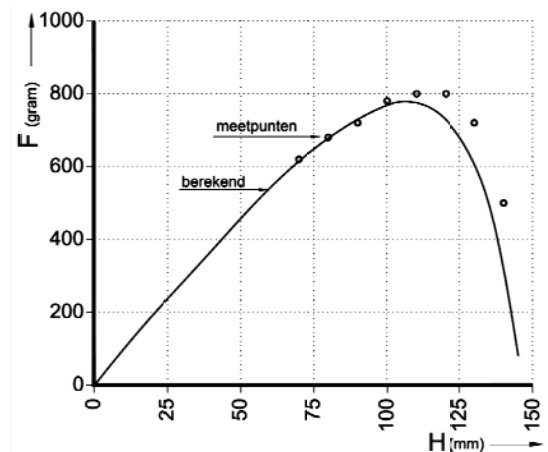
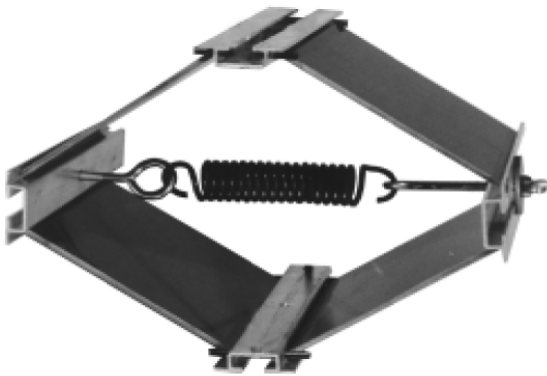
Een meting toont aan dat de veerkracht toeneemt naarmate ik ze verder indruk. Ze hebben dus een bepaalde veerconstante die over het bruikbare gebied (nagenoeg) constant is. Ook blijkt dat veren met hetzelfde catalogusnummer nogal verschillende kracht en veerconstante hebben.

Als ik een balgblad belast met één of meer van dergelijke veren dan zal bij verder inzakken van het balgblad de kracht op het balgblad afnemen en dus ook de winddruk in de balg.

Deze veren kunnen enigszins bijgesteld worden door de bladen te verbuigen.

Door een balgveer in de uitgangspositie veel of weinig ruimte tussen de bladen te geven kan ik de fout tussen minimum en maximum uitslag van de balg ook wat beïnvloeden.

Ook een door Laukhuff aangeboden "pantograaf" biedt geen soulaas. Eenvoudig kan worden uitgerekend dat zo'n veer nooit lineair kan zijn en ook een meting bevestigt dit.



De regeling met een klep

De regeling komt erop neer dat bij verschillend verbruik steeds het drukverschil tussen de druk van de windmotor en de gewenste (balg) druk door de regelklep weggewerkt wordt door zijn weerstand te veranderen. Dit wordt bereikt door de regelklep door het beweegbare balgblad tegen de luchtstroming in meer of minder dicht te drukken. Hoe verder dicht hoe hoger de weerstand.

Het voordeel is dat het een robuuste constructie is. Je kunt de windvoorziening op zijn kop houden zonder dat die in het ongereede raakt.

Het nadeel is dat er een kracht nodig is om de regelklep in de goede positie te houden en dat deze kracht niet gelijk is bij verschillende standen van de klep. Omdat deze kracht door de balg geleverd moet worden, verstoort dit de goede werking.

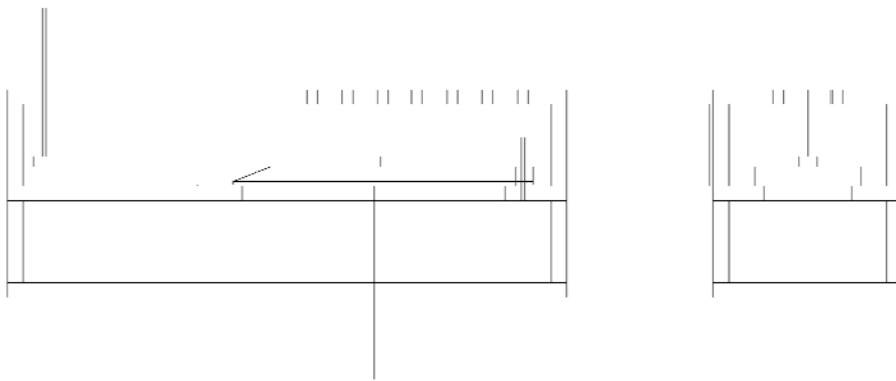


Testopstelling meting regelaars

Ik heb een opstelling nodig waarin ik snel verschillende regelkleppen kan monteren, zonder ingrijpend sloopwerk. Het is het apparaatje van de foto geworden, met een bovenste en onderst gedeelte, waartussen een plaat geklemd kan worden waarin de regelklep zit.

Verder wil ik tijdens het testen de opening van de regelklep en de kracht die nodig is om de regelklep in de juiste positie te houden meten.

De regelklep belast ik met een pen links, waarop ik extra gewicht kan schuiven en een nylon draad in het midden van de klep die door een gaatje naar onderen steekt en waaraan ik gewichtjes kan hangen.



Testen

Allereerst balanceer ik de regelklep uit, door zoveel gewicht op de pen links te schuiven dat de regelklep net opent en daarna zoveel gewicht aan de draad hang dat de klep precies in balans is. Het gewicht van de klep telt zo niet meer mee in de meting. De beweging van de klep kan ik zien door openingen voorzien van

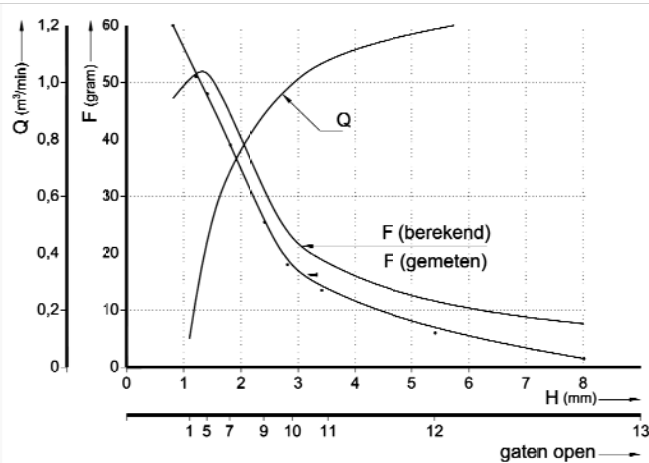
acryl glas in het bovendee van de testkast. De beweging kan ik meten met de pen links die door de bovenzijde steekt.

In de bovenzijde van de testkast heb ik een aantal gaten van 6mm diameter geboord, waarmee ik het windverbruik kan instellen door meer of minder gaten af te plakken met tape.

De druk meet ik met een Magnehelic drukmeter. Hiermee kan ik overdruk meten, maar ook verschilddruk, door hem op twee meetpunten aan te sluiten.

Vervolgens zet ik druk op het deel onder de klep en hang zoveel gewicht aan de draad dat de druk in het bovenste deel gelijk is aan de gewenste druk is. Over de klep valt nu het teveel aan druk en het gewicht dat aan de klep hangt is gelijk aan de kracht die de klep in deze stand op het balgblad zou uitoefenen. Het is van belang de druk van de windmotor te meten omdat ik geen meter heb die het windverbruik kan meten, maar wel weet ik dat een mini-ventola 1 m³/min levert wanneer zijn druk 500 Pa is. Bij een gewenste druk van 400 Pa en 10 geopende gaten is deze windmotordruk, en dus dit windverbruik bereikt is. Per gat daarom een toename van 0,1 m³/min.

Op deze manier kan ik meten hoever de verschillende regelkleppen openen en wat de kracht van de klep op de balg is voor 14 meetpunten.



Het resultaat

Windmotor: Mini-ventola
 Gekozen druk: 400 Pa
 Grootte klepopening: 17 x 150 mm

F is de kracht die de wind(druk) op de klep uitoefent. H is de opening van de klep in het midden van de klep gemeten.

Te zien is dat F afneemt naarmate H toeneemt. Een goede benadering geeft de formule $F = \text{oppervlakte klepopening} \times \text{verschuldruk (delta P of dP) over de klep}$.

Q = 100% wordt bereikt bij een klepopening van 3 mm. Wanneer de klep nog verder open gezet wordt, wordt Q niet veel groter meer. De oorzaak is de klepopening zelf, de opening waarop de klep rust, die dan meer en meer de

weerstand van het geheel bepaalt.

Ik heb een tweede klep getest met afmetingen $b \times l = 35 \times 74$ mm. De oppervlakte is gelijk aan de eerste klep, de lengte van de rand die de wind doorlaat 0,58x zo lang. Hoewel ik veronderstelde dat de lengte van de rand veel invloed zou hebben op de mate waarin de klep opengestuurd moest worden verschillen beide karakteristieke weinig.

Een poging een groter regelgebied te bereiken door de klepopening te verkleinen van heeft geen zin. Door de grotere weerstand van de klepopening kun je de vereiste Q niet meer halen.

Wanneer er geen windverbruik is moet de weerstand van de klep heel groot worden om de verschuldruk weg te regelen. Omdat een klep, voorzien is van ventielleer, altijd iets lekt lukt dit niet en zal de balgdruk stijgen tot de druk van de windmotor. Dit probleem kan verholpen worden door altijd te zorgen voor wat lek in het windverbruik. De speelventielen in de windlade lekken altijd voldoende om hier geen last van te hebben.

Eventueel kun je kiezen voor een "differentiaal klep", waarbij een deel van de klep tegen de stroming in sluit en een deel met de stroming mee, waardoor de krachten elkaar min of meer compenseren.

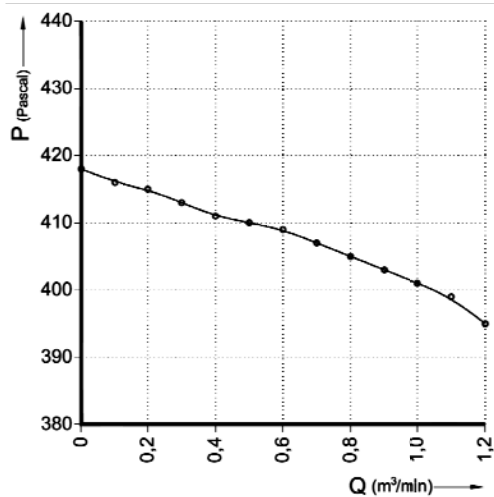
Het verband tussen H en R (de weerstand) kan ik weliswaar uitrekenen, maar door de ingewikkeldheid van het kanaal (klepopening en klep) is het moeilijk hiermee andere situaties te berekenen.

Als ik aanneem dat de vorm en ruwheid van het kanaal gelijk blijven kan ik wel enkele conclusies trekken.

Eerder heb ik de formule afgeleid $dP = \frac{c}{A^2} \cdot Q^2$

Hieruit is af te leiden $\frac{dP_1}{dP_2} = \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^2 \cdot \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2$

1. Wanneer ik wil dat de klep dezelfde Q doorlaat bij een 2x hogere dP (grotere windmotor) dan wordt $A_2 = \frac{A_1}{\sqrt{2}}$
 De klepopening kan dan $\sqrt{2}$ x kleiner worden. De kracht op de klep wordt dan ca. $\sqrt{2}$ x zo groot.
2. Moet de klep bij dezelfde dP een 2x grotere Q kunnen doorlaten dan moet de klepopening 2x zo groot worden.



Het geheel.

Nu ik de componenten die deel uitmaken van deze regeling getest heb kan ik het geheel van windmotor, balg, klepregeling en balgveren testen om te zien hoe goed dit nu eigenlijk is. Ik kan dit grotendeels al voorspellen.

Als je de gemeten (en berekende) karakteristieke van de componenten bekijkt bij een dalend balgblad, dan zie je het volgende:

1. De balg.
De verticale component van de kracht op de leren slab wordt groter. De druk in de balg wordt lager.
2. De balgveer.
De kracht van de veer wordt kleiner. De druk in de balg wordt lager.
3. De klep.
De kracht die het balgblad op de klep moet uitoefenen wordt kleiner. De druk in de balg wordt lager.

Alle krachten werken dus in dezelfde richting.

Het resultaat laat dit ook zien. De druk van 0 tot 1 m³/min neemt af van 418 tot 401 Pascal. Dat is ruim 4%.

Na ca. 1,2 m³/min is de regelklep uitgeregeld en volgt de druk de windmotor onder aftrek van de drukval over de kanalen en de opening van de regelklep.

Het voldoet, maar kan beter.

Hoe?

1. Ik kan het balgblad veel groter maken. Hierdoor is de invloed van de kracht op de regelklep kleiner. Dit is de meest effectieve oplossing;
2. Ik kan een andere plaats kiezen waarop de kracht van de klep op het balgblad aangrijpt. Dit betekent dat het balgblad meer moet bewegen en de invloed van de veer weer groter wordt.
3. Ik kan een compensatie toepassen voor de krachten die de verkeerde kant op werken. Ik moet dan zoeken naar een veer met een negatieve veerconstante. Een drukveer dus die minder kracht levert als ik hem verder indruk of een trekveer die minder kracht levert als ik hem verder uitrek. Een idee is bijvoorbeeld zoiets als de pantograaf zoals hiervoor beschreven. Het tweede deel, over de top, heeft inderdaad een negatieve veerconstante;
4. Een andere keuze van balg en/of regelaar toepassen;
5. De eerder genoemde differentiaal klep toepassen;



De balg met enkele vouw.

Het flexibele deel bestaat hier uit een samenstelling van ribben die verbonden zijn met balgpleer om ze bewegingsruimte te geven en om de balg luchtdicht te maken.

Ook hier kan het balgblad aan één zijde scharnierend zijn bevestigd.



De balg die ik voor de metingen heb gebruikt heeft onderstaande maten.

Lengte: 570 mm

Breedte: 228 mm

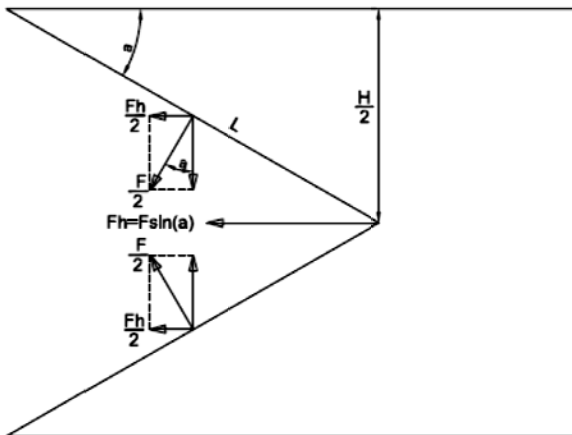
Vouddiepte: 45 mm

De balgbladen zijn aan één zijde scharnierend verbonden.

Door langzaam lucht in de balg toe te laten heb ik bij een aantal hoogtes (H) de druk (P) gemeten. Allereerst met ballast.

De karakteristiek vertoont een aflopende lijn. Naarmate de balg verder uitvouwt levert hij een lagere druk. Dit wordt veroorzaakt door de luchtdruk die ook op de vouwen inwerkt. Op zich is het wel gunstig dat de balg een iets hogere druk levert bij meer verbruik (denk aan de weerstand van het kanaal tussen balg en lade).

Verder is het zo dat bij het opblazen van de balg de druk steeds iets hoger is dan wanneer deze leegloopt. Het verschil is ca. 10 Pascal. Dit zal ook zo geweest zijn bij de zwemmerbalg, maar dat heb ik indertijd niet gemeten. De druk in de grafieken is steeds de gemiddelde druk.

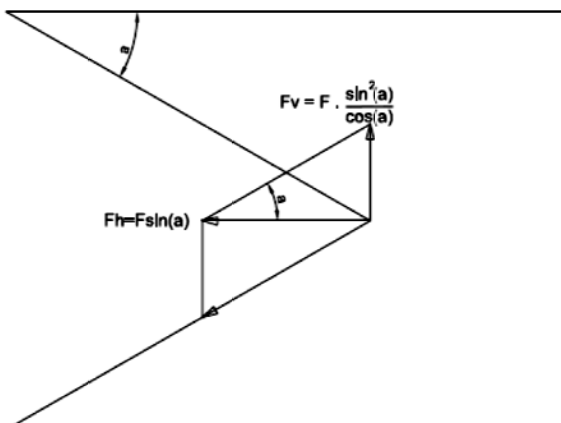


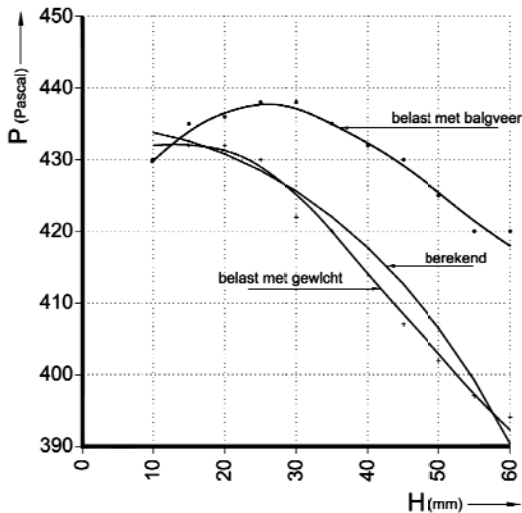
Met behulp van goniometrie en ontbinding van krachten kan ik dit bepalen wat de verticale kracht zal zijn.

In het gebied met een kleine verticale kracht, de vouwhoek is klein en/of de oppervlakte van de vouwen t.o.v. die van het balgblad is klein, is een iteratieve berekening niet nodig.

Je ziet dat de constructie met de vouwen erg lijkt op de veer met negatieve veerconstante. In plaats van een trekveer werkt hier de winddruk in de balg op de vouwen.

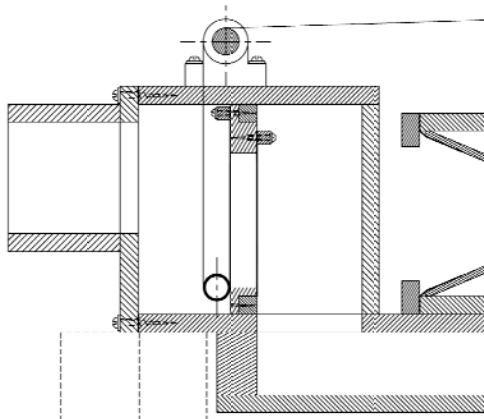
N.B. Inmiddels is over deze berekening gewijzigd inzicht ontstaan, waarover later meer.





Omdat de balg een steeds lagere druk geeft naarmate hij uitvouwt en een balgveer een steeds grotere kracht als hij door het balgblad ingedrukt wordt verwacht ik dat de toenemende omhoog gerichte kracht van de vouwen en de toenemende omlaag gerichte kracht van de veer elkaar min of meer zullen compenseren. Dit blijkt het geval te zijn, waardoor de hinder van de veerconstante van de balgveer minimaal wordt.

De berekende balgdruk en de gemeten druk met ballast en die met een balgveer staan in de grafiek.



Regeling met rolgordijn.

Een rolgordijnregeling heeft het voordeel dat het een constante kracht (statisch) op het balgblad uitoefent.

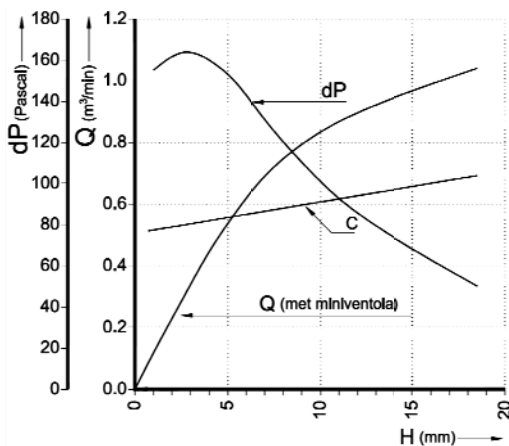
De meting.

Voor de meting heb ik geen rolgordijn gebruikt, maar een schuif die over 4 sleuven van 10 mm breed ligt.

Gewenste druk: 420 Pa.

Windmotor: Mini-Ventola

Bij ieder aantal gaten open aan de bovenzijde van de testkast heb ik de schuif zo ingesteld dat boven de schuif de gewenste druk ontstaat en heb ik de hoogte van de opening van de schuif (rolgordijn) gemeten.



Het resultaat

Je ziet dat de toename van Q minder steil verloopt dan die bij een regelklep. Door de afname van de druk van de windmotor vlak de toename nog verder af.

Met behulp van de formules en de gemeten dP en Q is R te bepalen en ook C, die in de formules als constant is aangenomen. C blijkt, zoals wel verwacht, niet constant te zijn, maar erg veel wijkt hij hier ook niet van af.

Daarom kan ik het gemiddelde constante C redelijk correcte berekeningen doen voor ander verbruik (Q) en andere windmotoren (dP).

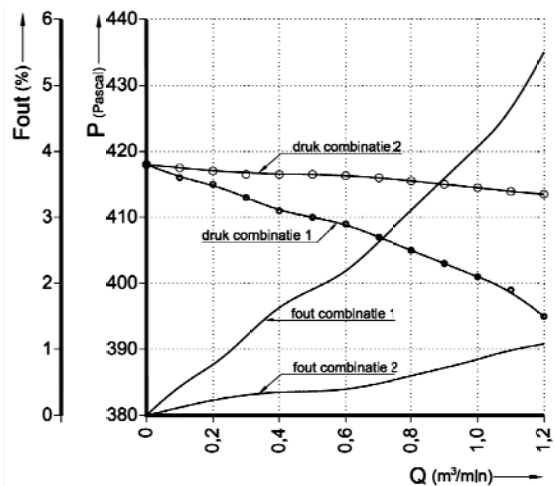
N.B. Er is geen eenheid voor C in de grafiek opgenomen.

De eenheid van C is afhankelijk van de eenheden die je voor de andere variabelen hebt gekozen, volgens SI stelsel of anders.

Ook hier geldt voor de opening van het rooster van het rolgordijn:

1. dP 2x zo groot en Q blijft gelijk, dan kan de opening $\sqrt{2}$ x kleiner zijn.
2. Q 2x zo groot en dP gelijk, dan de opening 2x zo groot.

De grootte van de opening kan ik bereiken door het rolgordijn verder te openen en/of door het aantal sleuven te vergroten.



Het geheel.

Ook voor deze combinatie (2) heb ik nu de componenten getest.

Als je de gemeten (en berekende) karakteristieke van de componenten bekijkt bij een dalend balgblad, dan zie je het volgende:

1. De balg.
De verticale component van de kracht op de vouwen wordt kleiner.
De druk in de balg wordt hoger.
2. De balgveer.
De kracht van de veer wordt kleiner.
De druk in de balg wordt lager.
3. Het rolgordijn.
De (statische) kracht door het gewicht van het rolgordijn op de balg is constant.

Het resultaat laat dit ook zien. De druk van 0 tot 1 m³/min is nagenoeg constant.

Ik heb voor beide situaties de druk en de fout in de de druk als functie van het verbruik Q in de grafiek gezet.

Je ziet dat combinatie 2 ongeveer 5x beter scoort dan combinatie 1.

Tenslotte

Ik heb door dit onderzoek veel meer inzicht gekregen in dit onderwerp. Ik hoop dat dit ook voor de lezer geldt.

Geraadpleegde publicaties, naast wat er op het internet te vinden is:

- Johan de Vries. Bouwbrief 60 en 61. Windvoorziening voor huisorgels.
- Kees de Zeeuw. Voordracht over windvoorziening.