

Inleiding

Op de bijeenkomst van de bouwgroep Orgelbouw in september 2005 heb ik een verhandeling gehouden over de windvoorziening in orgels en na afloop hiervan toegezegd een stukje te schrijven voor de bouwbrief met wat aanvullingen en opmerkingen over de windvoorziening in orgels. Dit was al eens eerder ter sprake gekomen bij andere gelegenheden. Maar wat mij tot nu toe heeft weerhouden is het feit dat mijn visie nu niet direct tot bruikbare afmetingen van cancellen e.d. zal leiden. In eerste instantie men toch is aangewezen op factoren zoals die te vinden zijn in eerdere publicaties van Johan de Vries (Bouwbrieven 60 en 61) en van Peter Hoogerheide (Bb 110). Ook het artikel *Orgelwind begrijpen* in (Bb 74) van Pieter A. Visser is interessant. Omdat er toch misverstanden blijken te bestaan omtrent de begrippen als drukverschillen en luchtsnelheden, een poging om dit te verduidelijken. Met de aangegeven informatie is het wel mogelijk om na bepaling van de diverse afmetingen aan de hand van factoren, de daarbij behorende luchtsnelheden te berekenen en daaraan zijn wel conclusies te verbinden.

Factoren die de luchtsnelheid en luchtweerstand beïnvloeden

De berekening van luchtstroming laat zich enigszins vergelijken met die van elektrische stromen, de drie grootheden bij elektriciteit spanning, stroom, weerstand zijn in de andere toepassing druk, stroming en ook weer weerstand genoemd. De weerstand van een elektrische geleider laat zich heel eenvoudig omschrijven en wordt bepaald door het materiaal, lengte en doorsnede. Voor het verplaatsen van de lucht wordt gebruik gemaakt van onder andere koker-tjes slangen en buis, waarbij ook de doorsneden en lengte een rol spelen maar ook de gladheid van de wanden en de verhouding hoogte en breedte en iedere bocht, aftakking, knik is van invloed. Dit geheel laat zich veel moeilijker in een formule vangen. In beide toepassingen worden de verliezen bepaald door de weerstand te vermenigvuldigen met kwadraat van de stroom/stroming.

Het meten van de luchtsnelheid

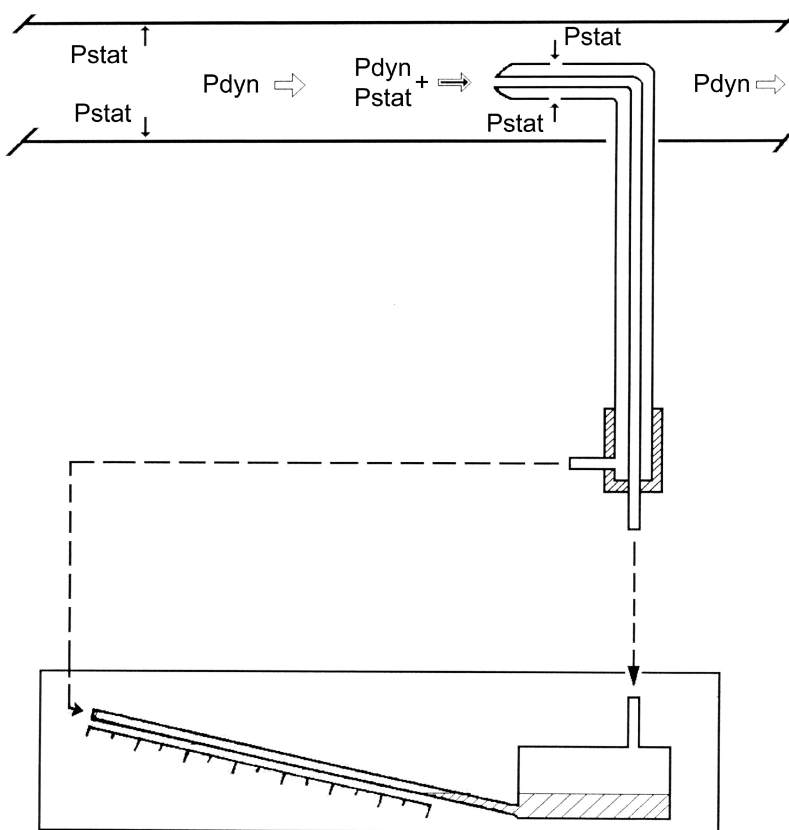
De twee meest gebruikte instrumenten om luchtsnelheid te meten zijn de thermische anemometer en de pitotbuis met een schuine buis-manometer (tegenwoordig worden hiervoor meestal elektronische drukverschilmeters gebruikt, met een meetbereik dat het drukverschil omrekent naar snelheid) De thermische anemometer is een meter met een kleine meetsonde, waarvan de werking berust op de afkoeling die ontstaat door de langsstromende (te meten) lucht van een verwarmd meetelement. In de meetsonde zit nog een meetelement om de luchttemperatuur te compenseren.

De pitotbuis met schuine buismanometer

Op de pitotbuis met de schuine buismanometer wil ik wat verder ingaan, omdat deze ons meer inzicht verschaft over statische en dynamische druk. In figuur 1 is een pitotbuis getekend met een schuine buis-manometer.

De pitotbuis bestaat uit een dunne buis met een dikkere buis daar omheen, beide aan het eind omgebogen; naar het eind toe loopt de buitenste buis rond naar de binnenste buis toe en aan elkaar vast tot een neus. De binnenste buis blijft aan de voorkant open. De buitenste buis heeft op korte afstand van de neus rondom een paar gaatjes. Aan het andere uiteinde van de buis zitten twee meetslang-aansluitingen een op de middelste dunne buis en een op de buitenste buis.

De pitotbuis is geplaatst in een luchtkanaal zodanig dat de neus tegen de stromingsrichting in is gericht en parallel aan de stromingsrichting. In een luchtkanaal waar in lucht stroomt werken twee drukken, een statische druk, die in alle richtingen werkt, en een dynamische druk, die alleen in de stromingsrichting werkt. Op de pitot buis zal aan de neus op het dunne buisje zowel de statische- als de dynamische druk worden gemeten (de totaal druk genoemd); via de gaatjes die iets verder van de neus in de buitenste buis zijn en haaks staan op de stromingsrichting, wordt de statische druk gemeten. Als de twee aansluitingen via slangen worden aan-



Figuur 1

gesloten op bv. een schuine buis manometer dan zal het aangeven drukverschil overeenkomen met de dynamische druk (P_{dyn}), waaruit dan de luchtsnelheid (v) kan worden berekend met de formule:

$$v = \sqrt{\frac{1}{2} \rho \cdot P_{dyn}}$$

hierin is ρ (rho) de soortelijke massa van lucht ($1,2 \text{ kg/m}^3$).

Een schuine buis-manometer werkt eender als de U-buis die we vaak bij orgels toegepast zien, het verschil is dat een been onder een schuine hoek is geplaatst wat tot gevolg heeft dat een kleine niveaustijging een grotere uitslag geeft (nauwkeuriger af te lezen), tevens is het andere been vervangen door een reservoir met een dusdanig groot volume dat het vullen van het schuine been onder invloed van een druk het niveau in het reservoir nauwelijks doet dalen zodat het nulpunt niet wijzigt. De speciaal voor luchtmetingen bestemde schuine buis-micromanometers hebben vaak een extra kwadratische schaal waarop direct de luchtsnelheid is af te lezen.

De natuurkundige Bernoulli heeft in een wet vastgelegd dat in een systeem van bijv. een luchtkanaal in de stromingsrichting de totaal druk niet verandert, dwz dat de som van de dynamische en statische druk gelijk blijft (drukverliezen die optreden door wrijving niet meegerekend). Dit houdt in dat op plaatsen in een systeem waar grote snelheden optreden, of grote wisselingen in snelheid, de statische druk verandert.

Het meten van een luchtsnelheid in een orgel is de praktijk erg lastig en onpraktisch, om te kunnen meten moeten er gaten worden geboord op de plaatsen waar we willen meten en zijn de meetsondes in verhouding tot de ruimten waarin moet worden gemeten vrij groot.

Een betere manier om de snelheden van de lucht te bepalen is door de benodigde luchtverbruiken te weten te komen en dan met de diameters en doorsneden van de diverse onderdelen de snelheid te bepalen. Aan de hand van de formule:

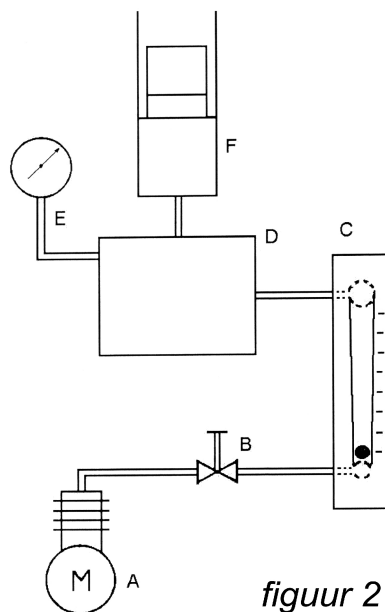
$$v = Q/a$$

$v =$ snelheid in m/sec

$Q =$ volume in m^3/sec

$a =$ doorsnede in m^2

Het uitgangspunt waar men vanuit moet vertrekken om aan het geheel te kunnen gaan rekenen, is in feite de energie die nodig is om een orgelpijp geluid te laten maken. Die energie bestaat in dit geval uit lucht, uitgedrukt in een volume (is massa) per tijdseenheid. Om met deze lucht geluid te maken moet de lucht met een bepaalde snelheid langs het bovenlabium van de orgelpijp stromen.



figuur 2

Het luchtverbruik van orgelpijpen

Om op een goede manier met luchtsnelheden te gaan rekenen, is het belangrijk om te weten hoe groot het luchtverbruik van orgelpijpen is. Hiervoor heb ik een meetopstelling gemaakt zoals aangegeven in figuur 2.

Vanaf een compressor (A) met een drukreducer (niet aangegeven op de tekening) gaat een slang naar een afsluiter (B), waarmee de luchthoeveelheid kan worden ingesteld, via een vademeter (C) naar een meetdoos (D) met een behoorlijk volume (om de invloed van de dynamische druk te minimaliseren). Op deze meetdoos is een manometer (E) aangesloten om de druk te meten en een plaats om de te meten orgelpijpen op te plaatsen.

Een vademeter is een meetinstrument waarop direct het doorstromend volume aan bv. lucht is af te lezen. Hij bestaat uit taps naar boven uitlopende buis waarin een kogeltje zit; naarmate er meer lucht doorstroomt zal het kogeltje hoger in de buis als het ware op een luchtkussentje blijven drijven; naarma-

te het kogeltje hoger komt te liggen wordt de buis breder en zal er dus meer lucht doorgaan, de hoeveelheid is dan op een schaal op de zijkant van de buis af te lezen.

De meting gaat als volgt: er wordt een orgelpijp op de meetdoos (D) geplaatst, met de afsluiter (B) wordt de druk ingesteld op de meetdoos (bv. 500 Pa) gemeten met de manometer (E), hierna kan men dan het verbruik op de vademeter (C) aflezen. Er is voor de luchttoevoer via een compressor gekozen omdat het drukverlies over een vademeter vrij groot is.

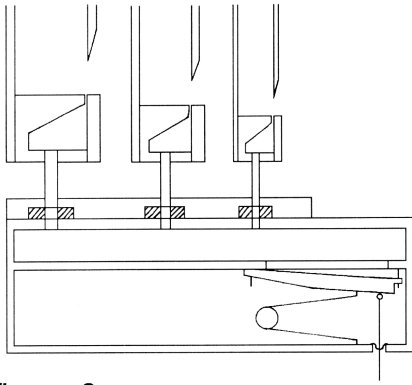
Van de registers HP8, RF4 en PR2 heb ik alle pijpen c, e, g gemeten en die uitgezet in een grafiek en van daar uit een kromme geconstrueerd. De gevonden waarden komen aardig overeen met de waarden bepaald in Bb 60/61. Maar het is interessant om deze metingen met andere pijpen nog een paar maal uit te voeren om dan tot een beter gefundeerd gemiddelde te komen.

Uit deze grafiek de waarden gehaald zoals te vinden in de tabel 1.

	HP8	RF4	PR2
C	668	476	323
F	543	391	272
c	434	298	212
f	317	221	170
c1	221	162	119
f1	153	128	85
c2	119	85	63
f2	94	63	48
c3	68	51	43

tabel 1

Met de gevonden waarden kunnen we bv. ook de gemiddelde uitstroomsnelheid in de kernspleet berekenen, door de gevonden hoeveelheden te delen door de oppervlakte van de kernspleet; de gevonden waarden liggen op ongeveer 17 m/sec . Tijdens de bijeenkomst van september hebben we dit in een proefopstelling ook met thermische anemometer gemeten, er is ook een strookje papier in deze luchtstroom gehouden en dat ging resoneren.



figuur 3

Om nu te berekenen wat de gemiddelde luchtsnelheid door de klepopening is of bv. door de cancel is, moeten we het luchtverbruik van de orgelpijpen Q (in cm^3/sec) delen door doorlaatopening van de klep (in cm^2) of de doorsnede van de cancel. De doorlaatopening van de cancel berekenen we aan de hand van de fig. 3/4. Het luchtverbruik van de orgelpijpen halen we uit tabel 1. Deze luchtsnelheden hebben we nodig bij het berekenen van de drukverliezen. Voor de afmetingen van cancellen en kleppen heb ik globaal de afmetingen aangehouden zoals die in het boek *Huisorgelbouw in beeld* zijn te vinden. De bevindingen zijn weergegeven in tabel 2.

In de tabel 2 staat de opening van het ventiel (op regel 11, en bestaat uit de gearceerde oppervlakten te zien op figuur 4, de driehoek twee maal plus het kleine rechthoekje).

Op regel 12/13 staat de opening van de cancel, te zien is dat de opening van de cancel meer afneemt dan de ventielopening, voor de luchtsnelheidsberekening houden we de kleinste van de openingen aan.

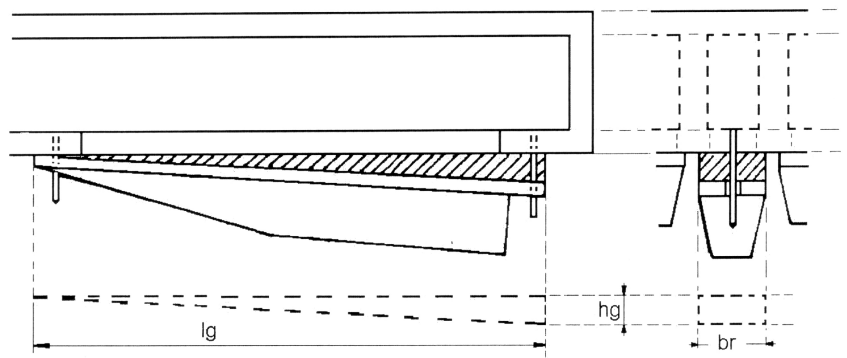
Om het eenvoudiger te houden zijn de dimensies in cm aangegeven in afwijking van het SI-eenhedenstelsel waarin alles in m moet worden aangegeven. Op regel 16 van de tabel zijn de berekende snelheden (in cm/sec) door de ventielopening gegeven.

Drukverliezen - de ζ -factor

Om nu het drukverlies (bij verschillende registraties) over het ventiel te kunnen berekenen moeten we de ζ (zeta)-factor van het ventiel weten.

De te gebruiken formule hiervoor luidt:

$$dP = \zeta \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot v^2$$



figuur 4

Om een idee te krijgen hoe groot die factor zou kunnen zijn heb ik een meting gedaan, ik heb een manometer aangesloten op plaats waar de PR2 C staat en de druk gemeten met de slepen van de HP8 en RF4 dicht en de toets C ingedrukt, daarna een meting met de slepen open, het verschil in de gemeten druk geeft de drukval over klep weer (deze is 15 Pa). Met dit drukverschil kunnen we dan met de bovenstaande formule de factor zeta (ζ) berekenen:

$$dP = \zeta \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot v^2$$

dP = drukverschil

ζ = factor zeta

ρ = soortelijke massa van lucht (1,2 kg/m^3)

v = luchtsnelheid in m/sec

De bijbehorende luchtsnelheid over de klep wordt berekend met som van de verbruiken van de C van HP8 (holpijp achtvoet) en RF4 (roerfluit viervoet), $668 + 467 \text{ cm}^3/\text{sec}$, gedeeld door de ventielopening van C (10.56 cm^2). De uitkomst is 108 cm/sec .

$$\zeta = 15 / (\frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 1,08^2) = 21,4$$

Met deze factor kunnen we dan de mogelijke drukverliezen berekenen van de mogelijke combinaties.

HP8 + RF4+PR2 (prestant tweevoet) v = wordt bij 3 stemmen 1,39 m/sec (zie tabel). dP (wordt dan) = $21,4 \cdot 0,6 \cdot 1,39^2 = 24,8 \text{ Pa}$.

We herhalen we dezelfde meting om het drukverlies te bepalen over het c, c1, c2 ventiel (zie tabel) en berekenen dan weer de factor zeta (ζ).

Een tweede formule die o.a in de ventilietechniek veel wordt toegepast om drukverliezen in luchtkanalen en slangen te berekenen, is de formule:

$$dP = \lambda L/d \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot v^2$$

λ = wrijvingsfactor; L = lengte in m; d = diameter in m.

Deze formule gaat uit van een rond kanaal; in de installatietechniek worden voor het berekenen van drukverliezen in luchtkanalen, rechthoekige kanalen en hulpstukken zoals bochten en andere vormstukken, teruggebracht tot een equivalent rond kanaal.

Voorbeeld: het drukverlies van een pvc-buis van b.v. 2 m lengte met een inwendige diameter van (2cm) 0,02m waar lucht door stroomt met een snelheid van 1m/sec zal als λ 0,04 is $dP = 0,04 \cdot 2/0,02 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 1^2 = 2,4 \text{ Pa}$. De wrijvingsfactor λ (labda) wordt uit een tabel gehaald en is een tabel waarin een omschrijving is gegeven van het toegepaste materialen.

B.v. naadloze kanalen $\lambda = 0,01$ - - 0,45
felsnaad kanalen $\lambda = 0,15$
flexibele kanalen $\lambda = 0,5$ - - 3,0

Als door dezelfde buis een twee maal snellere luchtstroom stroomt (dus 2m/sec) wordt $dP = 0,04 \cdot 2/0,02 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 2^2 = 9,6 \text{ Pa}$, dat is vier maal hoger.

In tabel 3 zijn de drukverliezen over de ventielen onder verschillende registraties naast elkaar gezet van C t/m c2. Te zien is dat het verloop van de verliezen onderling van de bas naar discant niet in een goede verhouding met elkaar staat, maar dat het maximale verlies van C-groot van 25 Pa bij gebruik van de drie stemmen zich op de grens van het toelaatbare bevindt. Voor de drukverliezen in de tabel staan de windsnelheden (v) door de ventielopening, omdat deze snelheden kwadratisch in de

regel			C	c	c1	c2
1	8-voets register	cm ³ /sec	668	434	221	119
2	4-voets register	cm ³ /sec	476	298	162	85
3	2-voets register	cm ³ /sec	323	212	119	63
4	totaal		1476	944	502	267
5	cancel hoogte	cm	3	3	3	3
6	breedte	cm	1,7	1,5	1,4	1,1
7	doorsnede	cm ²	5,1	4,5	4,2	3,3
8	gemiddelde luchtsnelheid in eerste deel van cancel	cm/sec	287	209	119	81
9	ventielopening (2x) - zijkant	cm	16*0,6	16*0,6	16*0,6	16*0,6
10	- kopkant	cm	1,6*0,6	1,4*0,6	1,3*0,6	1,1*0,6
11	ventielopening totaal	cm ²	10,56	10,44	10,38	1-,26
12	door ventiel afgedekte opening		11*1	11*0,8	11*0,8	11*0,6
13	ventielopening/cancel	cm ²	1	8,8	8,8	6,6
15	gemiddelde luchtsnelheid ventielopening/cancel					
16		cm/sec	133	107	57	40

tabel 2

tabel 3

	C	$\zeta = 21,4$	c	$\zeta = 25$	c1	$\zeta = 25$	c2	$\zeta = 30$
	v	dP	v	dP	v	dP	v	dP
4	0,45	2,6Pa	0,33	1,6Pa	0,18	0,4Pa	0,13	0,3Pa
8	0,63	5,1Pa	0,49	3,6Pa	0,25	0,9Pa	0,18	0,6Pa
8+4	1,08	15,0Pa	0,83	10,3Pa	0,44	2,9Pa	0,30	1,6Pa
8+4+2	1,39	24,8Pa	1,07	17,2Pa	0,59	5,2Pa	0,40	2,9Pa

berekening van het drukverlies voorkomen wordt de invloed steeds groter naarmate ze boven dan 1m/sec komen.

Samenvattend gaat het in dit artikel meer om de manier van berekenen dan om de gevonden uitkomsten, om b.v. meer waarde aan de gevonden luchtverbruiken te kunnen hechten moeten deze van meerdere registers worden gemeten, om tot een beter gemiddelde te komen.

Kistorgel aangeboden

Wegens gevorderde leeftijd biedt ik ter overname aan: mijn 17 jaar geleden gebouwde zeer compacte kistorgel met Gedekten 8' en 4' en een Roerfluit 2'. Bescheiden, intieme klank. Tientallen malen uitgeleend voor begeleidingen in het gebied binnen de lijn Utrecht - Tilburg - Rotterdam - Noordwijk - Amsterdam - Hilversum, aan professionals en amateurs. Zelfgebouwde windmachine op basis van een ontwerp van Roel Sinke in bijbehorend bankje. Het orgel is speelklaar, maar behoeft wel 'groot onderhoud', b.v. aan stemstoppen, ventielen, windvoorziening. Pijpen van Cimbel 1 sterk en Nasard 3' zijn van de lade genomen omdat ze nooit werden gebruikt, maar aanwezig. Er hoort ook een soliede, 57 cm hoog behandelafeltje bij en wat gereedschap. Vooral geschikt voor een liefhebber van spelen en bouwen.

Prijs 300,- Euro. Reactie naar Jan Burema, Eikbosserweg 226, 1213 SC, Hilversum, telef. 035-624 89 89, e-mail j.burema@hetnet.nl.