



Kragten Design

Populierenlaan 51
5492 SG Sint-Oedenrode
Nederland

*Gespecialiseerd in het ontwerpen van elektriciteit
opwekkende windmolens en PM-generatoren*

ing. Adriaan Kragten

telefoon: 0413 475770
e-mail: info@kdwindturbines.nl
website: www.kdwindturbines.nl

Adriaan Kragten
Sint-Oedenrode 18-10-2016

Compensatie van korte drieventielsinstrumenten

1 Inleiding

Op drieventielsinstrumenten treedt een aanzienlijke onzuiverheid op zodra het derde ventiel met het eerste of het tweede ventiel gecombineerd wordt. De eenvoudigste manier om deze onzuiverheid te compenseren is om de combinatie van 1 + 3 zuiver te stemmen en de onzuiverheid die dan nog over blijft met embouchure te compenseren. Bepaalde tonen moeten dan behoorlijk verhoogd of verlaagd worden en dit gaat ten koste van de toonkwaliteit. Het derde ventiel kan ook niet meer alleen gebruikt worden omdat het veel te laag is. Moderne ventielinstrumenten zijn daarom vaak voorzien van een trigger op het derde ventiel waarmee bepaalde tonen verlaagd kunnen worden. Echter, het bedienen van een trigger kost tijd en de triggerpositie hangt af van de toon die gecompenseerd wordt.

Door Adriaan Kragten van constructiebureau Kragten Design zijn diverse systemen bedacht om de intrinsieke onzuiverheid van drieventielsinstrumenten te verminderen. Al op 9-2-2000 werd het rapport geschreven: "Ventielen met korte slag en compensatie voor blaasinstrumenten met hoge zuiverheid" In dit rapport wordt een idee beschreven met vierkante kunststof ventielen waarbij de ventielbuis van het derde ventiel door het eerste en het tweede ventiel loopt en er korte compensatielussen toegevoegd worden zodra ventiel 1 of 2 in combinatie met ventiel 3 wordt ingedrukt. De compensatielussen liggen binnen het ventiel. Om dit systeem te laten werken was een zeer kleine buigradius van de compensatielus in ventiel 2 nodig. Het is onzeker of dat niet ten koste gaat van de toonkwaliteit.

Op 4-10-2007, herzien 4-11-2015 werd het rapport geschreven: "De Sixel, een nieuw blaasinstrument met zes ventielen". Dit instrument heeft zes ventielen die door beide handen bediend worden. Het eerste ventiel verlaagt een halve toon, het tweede verlaagt een hele toon, het derde verlaagt anderhalve toon, enz. Dit instrument is zeer zuiver in het normale bereik en door combinatie van ventielen kan zelfs het gat tussen de grondtoon en de lage Ges overbrugd worden. Het instrument is echter tamelijk zwaar en vereist een geheel nieuwe speelwijze.

Op 13-2-2015, herzien 31-10-2015 werd het rapport geschreven: "De Quadrofoon, een nieuw blaasinstrument met vier ventielen". Bij de quadrofoon wordt het derde ventiel van normale drieventielsinstrumenten dat anderhalve toon verlaagt, vervangen door twee ventielen. Het derde ventiel verlaagt een hele toon en het vierde ventiel verlaagt een halve toon net zoals dat bij het eerste en het tweede ventiel het geval is. Het eerste en het tweede ventiel worden bediend door de wijsvinger en de ringvinger van de rechterhand net zoals dat bij drieventielsinstrumenten het geval is. Het derde en het vierde ventiel worden bediend door de wijsvinger en de ringvinger van de linkerhand. De enige onzuiverheid die hierbij optreedt, is dat de combinatie 1 + 2 iets te hoog is maar deze onzuiverheid is eenvoudig met embouchure te compenseren. Het omschakelen van een normaal drieventielsinstrument naar een quadrofoon zal waarschijnlijk maar een beperkte tijd vergen.

De rapporten over de sixel en de quadrofoon zijn te vinden op mijn website: www.kdwindturbines.nl onder het menu: "No windenergy". Het rapport "Ventielen met korte slag en compensatie voor blaasinstrumenten met hoge zuiverheid" werd niet vrijgegeven om een mogelijk geïnteresseerde fabrikant de gelegenheid te geven om op het idee octrooi aan te vragen. Ik heb in 2009 een Nederlandse fabrikant benaderd maar die zag het op dat moment niet zitten om een prototype te maken. Ik heb daarom besloten om het idee openbaar te maken maar nu ik het rapport uit 2000 nog eens doorgelezen heb wil ik het op sommige punten toch nog wat aanpassen. Dit heeft geleid tot dit nieuwe rapport "Compensatie van korte drieventielsinstrumenten".

2 Oorzaken van onzuiverheid

Om de voordelen van compensatie te kunnen aantonen is het nodig om eerst uit te leggen hoe de tonen op ventielinstrumenten worden geproduceerd. Op blaasinstrumenten met een komvormig mondstuk zoals de trompet, de bugel en de tuba kunnen zonder de ventielen te gebruiken alleen natuurtonen ofte wel hogere harmonischen van de grondtoon geblazen worden. Het gangbare bereik voor de meeste ventielinstrumenten loopt van de 2^e tot de 12^e harmonische. De hoogste harmonischen zijn alleen te blazen door zeer ervaren musici. Welke harmonische gespeeld wordt hangt af van de lipspanning of embouchure en van de stand van de lippen t.o.v. het mondstuk. De frequentie van de geproduceerde toon is evenredig met het rangnummer van de harmonische. De geproduceerde toon kan aangegeven worden door het rangnummer van de harmonische gevolgd door de naam van de toon. De volgende tonen kunnen geproduceerd worden: (1C), 2C, 3G, 4C, 5E, 6G, (7Bes), 8C, 9D, 10E, (11Fis) en 12G. De grondtoon ofte wel de 1^e harmonische kan op de meeste blaasinstrumenten met enige moeite wel geproduceerd worden maar is erg laag en klinkt lelijk omdat het mondstuk voor deze toon eigenlijk te klein is. De 7Bes is te laag en de 11Fis is veel te hoog. De te vermijden tonen staan daarom tussen haakjes.

Bij de gebruikelijke aanduiding van de tonen van een ventielinstrument staat er een nummer achter de naam van de toon. Een 2C komt overeen met een C1. Een 4C komt overeen met een C2. Een 8C komt overeen met een C3. Het voordeel van mijn aanduiding is dat gelijk klinkende tonen met verschillende vingerzetting een verschillende naam hebben. Een G1 kan los gespeeld worden maar ook met 1 + 4. Los noem ik deze toon een 3G. Met 1 + 3 noem ik deze toon een 4G.

Het is opmerkelijk dat alle moderne koperinstrumenten, uitgezonderd de trombone, gebruik maken van drie schuif- of drie draaiventielen om de zes tonen die liggen tussen de 2C en de 3G te kunnen spelen. Ventiel 1, 2 en 3 worden bediend door respectievelijk de wijsvinger, de middelvinger en de ringvinger van de rechterhand (met uitzondering van de hoorn die linkshandig bespeeld wordt). Een ingedrukt ventiel voegt een stukje ventielbuis toe aan de hoofdbuislengte waardoor de toon lager wordt. De volgende verlagingen worden veroorzaakt door een ingedrukt ventiel en door combinaties van ingedrukte ventielen: Ventiel 1 verlaagt een hele toon. Ventiel 2 verlaagt een halve toon. Ventiel 3 verlaagt anderhalve toon als de ventielstembuis geheel ingedrukt is. Bij een optimaal afgestelde ventielstembuis wordt de toon echter te laag en ventiel 3 wordt daarom normaal niet alleen gebruikt. Ventiel 1 + 2 verlaagt anderhalve toon. Ventiel 2 + 3 verlaagt twee tonen. Ventiel 1 + 3 verlaagt twee-en-een-halve toon. Ventiel 1 + 2 + 3 verlaagt drie tonen.

Een gevolg van het gebruik van slechts drie ventielen en een onzuiver derde ventiel is dat er dus twee of drie ventielen gecombineerd moeten worden voor een verlaging van meer dan twee halve tonen maar dit heeft een belangrijk nadeel. Een combinatie van ventielen kan namelijk niet zuiver zijn als alle ventielen op zich zuiver zijn. Immers, de door een bepaald ventiel toegevoegde lengte die correct is met betrekking tot de hoofdbuislengte is te kort als de hoofdbuislengte al door een ander ventiel verlengd is.

Om de onzuiverheid voor de lage tonen te minimaliseren worden de ventielstembuizen van drieventielsinstrumenten zonder triggers normaal zodanig afgesteld dat 1 zuiver is, 2 zuiver is en 1 + 3 zuiver is. Dit heeft echter als gevolg dat 1 + 2, 0,6 % te hoog is, 2 + 3, 0,9 % te laag is en dat 1 + 2 + 3, 1,4 % te hoog is. Een afwijking van 6 % komt overeen met een halve toon dus een afwijking van 1,4 % komt overeen met ongeveer een kwart van een halve toon wat behoorlijk veel is. Een te hoge toon is met de embouchure gemakkelijker te verlagen dan dat een te lage toon te verhogen is. Het 0,6 % te hoog zijn van de combinatie 1 + 2 is daarom gemakkelijk met de embouchure te compenseren. Het 0,9 % te laag zijn van de combinatie 2 + 3 is ongeveer even moeilijk met de embouchure te compenseren als het 1,4 % te hoog zijn van de combinatie 1 + 2 + 3 waardoor de gegeven afstelling optimaal is voor een instrument zonder triggers.

Wanneer het instrument voorzien is van een trigger op het derde ventiel kan het derde ventiel wel zuiver zijn. Een trigger op het derde ventiel verlengt de stembuis van het derde ventiel als de trigger met een vinger van de linker hand ingedrukt wordt. Voor een zuivere combinatie van 2 + 3 moet de trigger een klein beetje ingedrukt worden. Voor een zuivere combinatie van 1 + 3 moet de trigger wat meer ingedrukt worden. Voor een zuivere combinatie van 1 + 2 + 3 moet de trigger maximaal ingedrukt worden. Ik heb zelf onlangs een nieuwe Yamaha YFH 631S bugel met een trigger op het derde ventiel gekocht. Ik vind het lastig dat de mate van indrukken afhangt van de toon die gecompenseerd moet worden en ik heb daarvoor de volgende oplossing gevonden.

De trigger is voorzien van een veer die de ventielbuis altijd in de kortste stand drukt. Het derde ventiel kan daarom alleen maar afgesteld worden als er buisjes tussen de ventielbuis en de aanslagen geplaatst wordt. Ik heb daarvoor twee dunne aluminium buisjes gebruikt die om beide poten van de U-vormige ventielbuis zitten. De buisjes zijn zo lang (6 mm) dat de combinatie 2 + 3 iets te laag is en dat de combinatie 1 + 3 iets te hoog is. De onzuiverheid van deze ventielcombinaties is dan nog gemakkelijk met embouchure te compenseren. De combinatie 1 + 2 + 3 is dan echter veel te hoog en hiervoor wordt de trigger maximaal ingedrukt. De combinatie 1 + 2 + 3 treedt alleen op voor de 3Des en de 2Ges en het heeft mij relatief weinig tijd gekost om de triggerbediening voor de combinatie van deze tonen als een automatisme te laten gebeuren. Maar de bediening van de trigger kost tijd en ik zou liever een instrument hebben waarmee de compensatie automatisch zou gebeuren.

Ventielinstrumenten zijn behalve door combinatie van ventielen ook onzuiver door afwijkingen van bepaalde natuurtonen. De 7^e en de 11^e harmonische zijn daarom niet bruikbaar maar de 5^e en de 10^e harmonischen die wel gebruikt worden, zijn 0,8 % te laag. Hierbij wordt er vanuit gegaan dat de gelijkzwevende stemming zuiver is. Een onzuiverheid van een bepaalde natuurtoon kan versterkt of juist verminderd worden door de onzuiverheid van een bepaalde ventielcombinatie.

Er zijn nog meer oorzaken van onzuiverheid zoals bijvoorbeeld een verkeerd mondstuk, verstoringen van de stroombuis door bijvoorbeeld waterkleppen of een onjuiste toename van de diameter van de hoofdbuis in de richting van de beker, maar er wordt vanuit gegaan dat het instrument zodanig ontworpen is dat deze effecten verwaarloosd mogen worden.

In de volgende hoofdstukken wordt een kort drieventielsinstrument met compensatie van het derde ventiel vergeleken met een normaal drieventielsinstrument zonder trigger waarvoor het derde ventiel zo afgesteld is dat 1 + 3 zuiver is. Uitgegaan wordt van de lengte van de hoofdbuis behorende bij een Bes-trompet of een Bes-bugel. Het drieventielsinstrument met compensatie is uitgevoerd met rechthoekige kunststof ventielen met afgeronde hoeken en de compensatielussen zijn in de ventielen 1 en 2 ondergebracht. De ventielbuis van het tweede ventiel is ook in het ventiel ondergebracht (zie technische beschrijving in hoofdstuk 4).

3 Berekening van de ventielbuislengtes

Voor een bepaalde harmonische is de frequentie of toonhoogte omgekeerd evenredig met de buislengte. Volgens de gelijkzwevende stemming is voor verlaging van een halve toon een nieuwe buislengte l nodig die een factor $2^{1/12}$ ofte wel 1,0595 groter is dan de oorspronkelijke buislengte L . Voor verlaging van twee halve tonen is een nieuwe buislengte l nodig die een factor $2^{2/12} = 1,1225$ groter is. Voor verlaging van drie halve tonen is een nieuwe buislengte nodig die een factor $2^{3/12} = 1,1892$ groter is, enz. Voor een verhoging met een halve toon geldt dezelfde factor $2^{1/12}$ alleen moet de buislengte dan met deze verhouding ingekort worden.

Voor 0 tot 6 halve tonen verlaging werd de theoretische buislengte l berekend als functie van L en uitgezet in tabel 1. Door aanliggende waarden van l van elkaar af te trekken vinden we de stapsgewijze theoretische lengtetoeename m die ook vermeld wordt in tabel 1. Door l te verminderen met de oorspronkelijke buislengte L vinden we de totale theoretische lengtetoeename n die ook vermeld wordt in tabel 1. L , l , m en n worden weergegeven in figuur 1.

verlaging	theoretische buislengte l	stapsgewijze theor. lengtetoeename m	totale theoretische lengtetoeename n
geen	$l_0 = 1,0000 L$	$m_0 = 0$	$n_0 = 0$
1 halve toon	$l_1 = 1,0595 L$	$m_1 = 0,0595 L$	$n_1 = 0,0595 L$
2 halve tonen	$l_2 = 1,1225 L$	$m_2 = 0,0630 L$	$n_2 = 0,1225 L$
3 halve tonen	$l_3 = 1,1892 L$	$m_3 = 0,0667 L$	$n_3 = 0,1892 L$
4 halve tonen	$l_4 = 1,2599 L$	$m_4 = 0,0707 L$	$n_4 = 0,2599 L$
5 halve tonen	$l_5 = 1,3348 L$	$m_5 = 0,0749 L$	$n_5 = 0,3348 L$
6 halve tonen	$l_6 = 1,4142 L$	$m_6 = 0,0794 L$	$n_6 = 0,4142 L$

tabel 1 Verloop van l , m en n als functie van de verlaging

Aan het verloop van m is goed te zien dat de vereiste lengtetoeename steeds groter wordt naarmate de buislengte al toegenomen is door een eerdere verlenging. Met drie gewone ventielen is het niet mogelijk om de totale theoretische lengtetoeename te realiseren die voor een perfecte zuiverheid vereist is.

Een oplossing is compensatie van het derde ventiel. Hierbij loopt de stembuis van het derde ventiel door compensatielussen in het eerste en het tweede ventiel waardoor extra stukjes ventielbuis worden bijgeschakeld. Doordat deze stukjes buis een korte lengte moeten hebben is deze methode bij het gebruik van normale ventielen alleen geschikt voor lange en dus lage instrumenten. Een nadeel van compensatie voor normale ventielen is ook dat de ventielen langer en behoorlijk zwaar worden en dat het versnellen en het vertragen van deze ventielen meer kracht kost dan voor ongecompenseerde ventielen. Wanneer de ventielen echter van een lichte kunststof gemaakt worden kan dit effect geneutraliseerd worden.

Om met drie ventielen en compensatielussen in het eerste en het tweede ventiel een maximale zuiverheid te realiseren moeten de ventielstembuizen een bepaalde lengte hebben. De volgende afstelling blijkt het beste resultaat op te leveren: Ventiel 1 zuiver. Ventiel 2 zuiver. Ventiel 2 + 3 zuiver. Ventiel 1 + 3 zuiver. In het oorspronkelijke rapport uit 2000 werd er van uit gegaan dat ook ventiel 3 zuiver is. Dit heeft echter als nadeel dat de combinatie van $1 + 2 + 3$, 0,6 % te hoog wordt. Wanneer de ventielbuis van ventiel 3 met een lengte Δl verkort wordt, moeten beide compensatielussen met een lengte Δl verlengd worden om de combinaties $2 + 3$ en $1 + 3$ zuiver te houden. De combinatie $1 + 2 + 3$ wordt daardoor met een lengte Δl verlengd. Het is dus mogelijk om $1 + 2 + 3$ zuiver te krijgen door de ventielbuis van een zuiver ventiel 3 met de juiste lengte Δl in te korten.

Ventiel 3 wordt daardoor wat te hoog maar dat is geen probleem omdat alleen ventiel 3 geen voorkeursvingerzetting is. Er werd daarom nu gekozen voor ventiel 1 + 2 + 3 zuiver.

De toegevoegde lengte van de ventielstembuizen 1, 2 en 3 wordt respectievelijk a, b en c genoemd. De toegevoegde lengte van de compensatielus in ventiel 1 wordt d genoemd. De toegevoegde lengte van de compensatielus in ventiel 2 wordt e genoemd. De totale werkelijke lengtetoeename wordt o genoemd. De totale werkelijke buislengte wordt p genoemd.

De waarden voor a, b, c, d en e worden bepaald m.b.v. tabel 1 en de aangenomen afstellingen. a, b, c, d en e worden ook weergegeven in figuur 1 voor de verderop in dit hoofdstuk berekende waarde van L. In figuur 1 heeft het linker plaatje betrekking op een traditioneel instrument met drie ventielen. Het middelste plaatje geeft de theoretisch vereiste verlengingen weer en het rechter plaatje geeft de verlengingen weer voor een drieventielsinstrument met compensatielussen in ventiel 1 en ventiel 2. De figuren zijn op schaal getekend maar wel met rechte buizen.

Ventiel 1 zuiver geeft dat $a = n_2 = 0,1225 \text{ L}$.

Ventiel 2 zuiver geeft dat $b = n_1 = 0,0595 \text{ L}$.

Ventiel 2 + 3 zuiver geeft dat $b + c + e = n_4 = 0,2599 \text{ L}$.

Ventiel 1 + 3 zuiver geeft dat $a + c + d = n_5 = 0,3348 \text{ L}$.

Ventiel 1 + 2 + 3 zuiver geeft dat $a + b + c + d + e = n_6 = 0,4142 \text{ L}$

Dit geeft:

$$c + e = n_4 - n_1 = 0,2599 \text{ L} - 0,0595 \text{ L} = 0,2004 \text{ L} \quad (1)$$

$$c + d = n_5 - n_2 = 0,3348 \text{ L} - 0,1225 \text{ L} = 0,2123 \text{ L} \quad (2)$$

$$c + d + e = n_6 - n_2 - n_1 = 0,4142 \text{ L} - 0,1225 \text{ L} - 0,0595 \text{ L} = 0,2322 \text{ L} \quad (3)$$

Dit zijn drie vergelijkingen met drie onbekenden c, d en e. Vergelijking (3) geeft:

$$c + e = 0,2322 \text{ L} - d \quad (4)$$

$$c + d = 0,2322 \text{ L} - e \quad (5)$$

$$\begin{aligned} (1) + (4) \text{ geeft: } & 0,2004 \text{ L} = 0,2322 \text{ L} - d \\ \text{ofte wel } & d = 0,2322 \text{ L} - 0,2004 \text{ L} \\ \text{ofte wel } & d = 0,0318 \text{ L} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} (2) + (5) \text{ geeft: } & 0,2123 \text{ L} = 0,2322 \text{ L} - e \\ \text{ofte wel } & e = 0,2322 \text{ L} - 0,2123 \text{ L} \\ \text{ofte wel } & e = 0,0199 \text{ L} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} (1) + (7) \text{ geeft: } & c = 0,2004 \text{ L} - 0,0199 \text{ L} \\ \text{ofte wel } & c = 0,1805 \text{ L} \end{aligned} \quad (8)$$

Voor een verlaging van drie halve tonen is 1 + 2 de voorkeursvingerzetting. De verlenging bij drie halve tonen verlaging is daarom a + b. Vanwege de aangenomen afstelling geldt daarom:

$o_1 = n_1 = 0,0595 \text{ L}$, $o_2 = n_2 = 0,1225 \text{ L}$, $o_3 = a + b = 0,1820 \text{ L}$, $o_4 = n_4 = 0,2599 \text{ L}$, $o_5 = n_5 = 0,3348 \text{ L}$ en $o_6 = n_6 = 0,4142 \text{ L}$.

Daarom geldt: $p_1 = l_1 = 1,0595 \text{ L}$, $p_2 = l_2 = 1,1225 \text{ L}$, $p_3 = L + o_3 = 1,1820 \text{ L}$,

$p_4 = l_4 = 1,2599 \text{ L}$, $p_5 = l_5 = 1,3348 \text{ L}$ en $p_6 = l_6 = 1,4142 \text{ L}$.

Wanneer voor drie halve tonen verlaging alleen ventiel 3 gebruik wordt is de verlenging c. In dit geval geldt dat $o_3 = c = 0,1805 \text{ L}$ en dat $p_3 = L + o_3 = 1,1805 \text{ L}$.

Tot nu toe werden de ventielbuislengtes berekend als functie van de theoretische lengte van de hoofdbuis L. De lengte van de hoofdbuis L kan op diverse manieren bepaald worden. Het lijkt voor de hand te liggen om de hoofdbuis van een bestaande bugel of trompet nauwkeurig op te meten. Echter, het blijkt dat de conische boring en de beker eideffecten veroorzaken waardoor de grondtoon aanzienlijk lager is dan op grond van de opgemeten buislengte verwacht mag worden. Een veel nauwkeuriger resultaat wordt verkregen als de buislengte van het derde ventiel opgemeten wordt en die lengte dan te gebruiken om L mee te berekenen. De metingen werden in eerste instantie uitgevoerd aan mijn oude Yamaha YFH 631 bugel (zonder triggers). Eerst werd m.b.v. een keyboard gecontroleerd of het derde ventiel met ingeschoven ventielstembuis precies drie halve tonen verlaging geeft. Dit blijkt niet het geval te zijn. De toon is iets te laag. Voor het normale gebruik is dit niet erg omdat het derde ventiel niet alleen gebruikt wordt. De stembuis van dit ventiel moet zelfs nog ongeveer 13 mm uitgetrokken worden om 1 + 3 zuiver te laten klinken. Maar de bugel is hierdoor niet geschikt voor de meetproeven.

De metingen werden verder uitgevoerd aan een Getzen 300 trompet waarvan een volledig ingeschoven stembuis van het derde ventiel wel een zuivere verlaging van drie halve tonen oplevert. Omdat beide instrumenten in Bes staan wordt er vanuit gegaan dat de ventielbuizen van een trompet en een bugel voor eenzelfde verlaging even lang zijn. Vervolgens werd de lengte van de ventielbuis opgemeten over het hart van de buis. Hier werd de lengte van de twee ventielboringen aan toegevoegd waar de lucht doorloopt als het ventiel ingedrukt is. De lengte van de ventielboring waar de lucht doorloopt als het ventiel niet is ingedrukt werd hier weer vanaf getrokken. De totale lengte blijkt 280 mm te zijn. In tabel 1 is te zien dat $n_3 = 0,1892 L$ voor een zuiver 3^e ventiel. Dit geeft dat $L = 280 / 0,1892 = 1480$ mm.

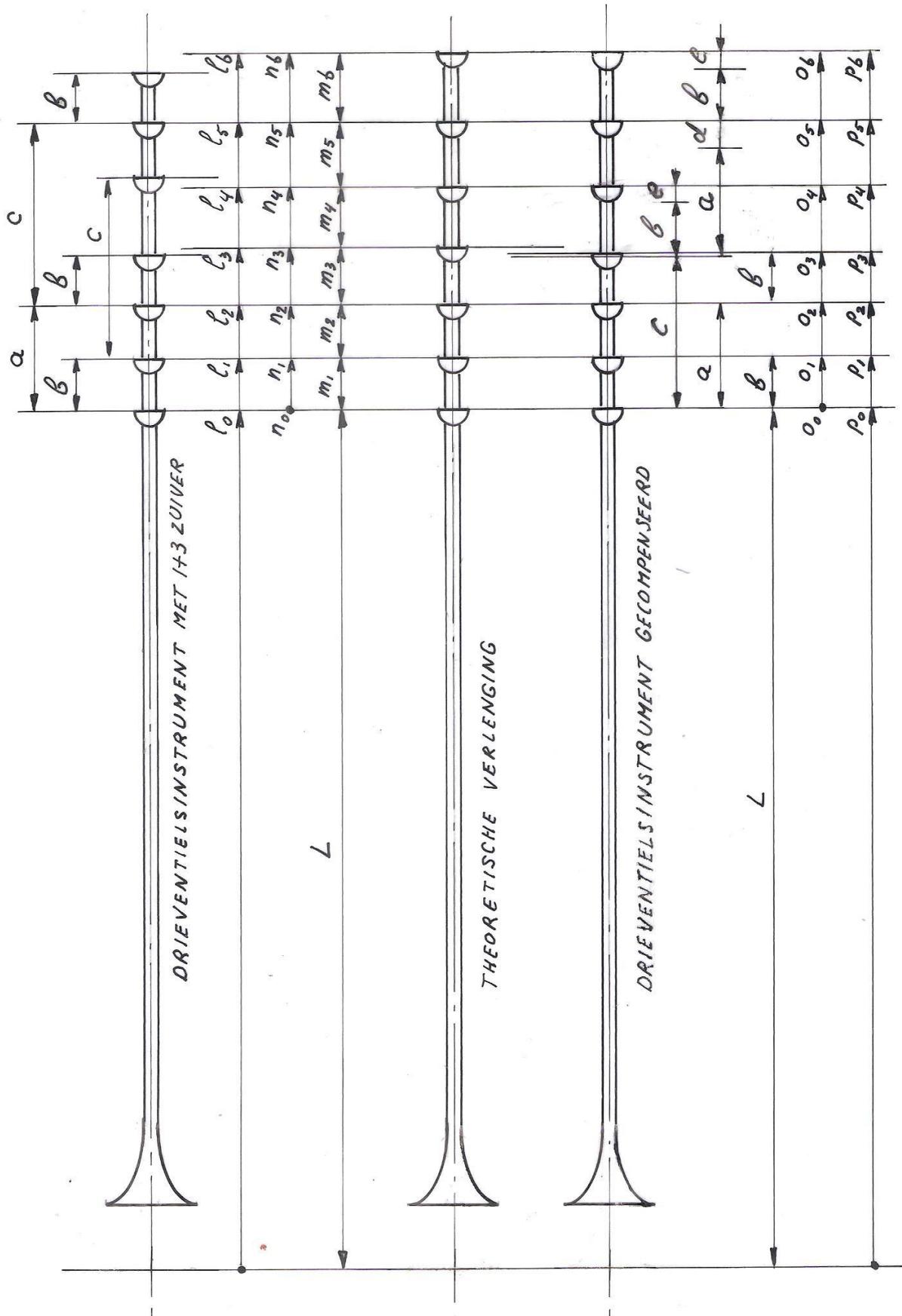
Een andere manier is om L te bepalen op basis van de vereiste frequentie f van de 2^e harmonische C. Voor de 2^e harmonisch C bevinden zich in de buis twee knopen wat inhoudt dat de golflengte λ gelijk is aan de buislengte L. Omdat een trompet in Bes staat klinkt een toon die voor een trompet als C genoteerd wordt gelijk aan de Bes van een piano. Een piano A heeft een frequentie van 440 Hz of een factor 2 hoger of lager. Een Bes is een halve toon hoger dan een A en heeft daardoor een frequentie die een factor $2^{1/12} = 1,05946$ hoger is dan een A. Dit komt neer op een frequentie van 466,164 Hz of een factor 2 hoger of lager. De frequentie van de 2^e harmonische C van een trompet blijkt een factor 2 lager te zijn wat inhoudt dat de frequentie 233,082 Hz is. De golflengte λ wordt gegeven door de formule:

$$\lambda = v / f \quad (\text{m}) \quad (9)$$

Hierin is v de geluidssnelheid. De geluidssnelheid is ongeveer 340 m/s voor droge lucht van 15 °C. Echter de gemiddelde temperatuur van de lucht in een trompet is hoger dan 15 °C en de lucht is verzadigd met waterdamp. Door mij werd de luchttemperatuur t.p.v. het middelste ventiel gemeten nadat er een poos op het instrument geblazen was. Deze temperatuur blijkt ongeveer 25 °C ofte wel 298 °K te zijn. De geluidssnelheid v wordt gegeven door de formule:

$$v = 64,2 \sqrt{(\kappa * T / d)} \quad (\text{m/s}) \quad (10)$$

Formule 10 werd verkregen van een medewerker van de afdeling akoestiek van de afdeling Natuurkunde van de TU-Eindhoven. κ een constante die voor lucht 1,40 bedraagt. T is de luchttemperatuur in °K. d is de relatieve dichtheid van lucht t.o.v. waterstof (dimensieloos). Voor droge lucht bedraagt deze waarde 14,4. De absolute dichtheid ρ van droge lucht van 25 °C bedraagt 1,185 kg/m³. De absolute dichtheid van met waterdamp verzadigde lucht van 25 °C bedraagt 1,170 kg/m³. De met waterdamp verzadigde lucht is dus een factor 0,9873 lichter dan droge lucht. Daardoor is de relatieve dichtheid van met waterdamp verzadigde lucht van 25 °C ook een factor 0,9873 lager dan die van droge lucht en bedraagt daardoor 14,22.



figuur 1 Buislengtes voor een normaal drieventielsinstrument met 1 + 3 zuiver en voor een gecompenseerd drieventielsinstrument

Invulling van de gevonden waarden voor κ , T en d in formule 10 geeft dat $v = 347,74$ m/s. Invulling van de gevonden waarden voor v en f in formule 9 geeft dat $L = \lambda = 1,492$ m = 1492 mm. Deze berekende waarde op basis van de vereiste frequentie en de geluidssnelheid in de buis ligt zeer dicht bij de waarde van $L = 1480$ mm die bepaald werd op basis van de lengte van de ventielbuis van het derde ventiel.

Wanneer L bepaald werd door de werkelijke lengte van de hoofdbuis van een trompet op te meten vinden we dat $L = 1367$ mm. Dit is aanzienlijk korter dan de twee eerder berekende waarden wat betekent dat het eindeffect van de beker een grote invloed heeft. Voorlopig wordt aangenomen dat de gevonden waarde voor L op basis van de lengte van de ventielbuis van het derde ventiel juist is en dat dus geldt dat $L = 1480$ mm. In figuur 1 werd de werkelijke lengte van de hoofdbuis ook korter getekend dan L . De waarde $L = 1480$ mm zal nu gebruikt worden om de lengtes van de ventielbuizen voor een drieventielsinstrument met compensatie mee te berekenen. Tot nu toe werden de waarden van a , b , c , d en e berekend als functie van de hoofdbuislengte L . Gevonden werd dat:

$a = 0,1225 L$, $b = 0,0595 L$, $c = 0,1805 L$, $d = 0,0318 L$ en $e = 0,0199 L$. Invulling van $L = 1480$ mm geeft $a = 181,3$ mm, $b = 88,1$ mm, $c = 267,1$ mm, $d = 47,1$ mm en $e = 29,5$ mm.

De berekende waarde is de lengte die door het indrukken van een ventiel moet worden toegevoegd. Als het ventiel niet is ingedrukt loopt de lucht door een rechte boring met een lengte van 24 mm. De totale luslengte moet dus 24 mm langer zijn dan de berekende waarde. Figuur 1 is op schaal getekend voor de berekende waarden van a t/m e .

4 Technische uitvoering van een drieventielsinstrument met compensatie (zie figuur 2)

Voor de bepaling van de afmetingen van het ventielhuis en de ventielbuizen werd uitgegaan van een bouwvorm van een bugel en de buis die het mondstuk met het ventielhuis verbindt komt daarvoor uit op het eerste ventiel. Maar het is ook mogelijk om van de bouwvorm van een trompet of een cornet uit te gaan en om de buis die het mondstuk met het ventielhuis verbindt uit te laten komen op het derde ventiel.

Met de huidige machines moeten een rechthoekig ventiel en een rechthoekige boring in het ventielhuis met de benodigde nauwkeurigheid en gladheid gemaakt kunnen worden. Moderne ventielen worden gemaakt van een speciale roestvrij staal legering (monel) en lopen in een messing boring. De glijeigenschappen van deze materialen zijn niet zodanig dat zonder smeermiddel gewerkt kan worden en daarom moeten normale ventielen regelmatig met ventielolie gesmeerd worden.

Voor de nieuwe ventielen wordt er in eerste instantie van uitgegaan dat de boring van messing of brons is maar voor het ventiel wordt een watervaste kunststof gebruikt. Omdat de ventielen symmetrisch zijn t.o.v. een vertikaal vlak in de lengterichting van het instrument is het mogelijk om een ventiel uit twee helften op te bouwen en die samen te smelten of te lijmen. De ventielboringen kunnen in de helften aangebracht worden met een bolkopfrees. Met de huidige technologie lijkt het ook mogelijk om de ventielen op een 3D printer te maken waardoor elke vorm van de boringen in het ventiel te realiseren is. Misschien is het wel nodig om het ventiel uitwendig machinaal te bewerken om de toleranties voldoende klein te maken. Een kunststof ventiel kan niet oxideren en het kan zijn dat smering voor een kunststof ventiel niet nodig is.

Gekozen wordt voor een rechthoekige vorm van het ventiel met een dikte van 22 mm en een breedte van 24 mm en met afgeronde hoeken met een straal van 2 mm. Doordat de ventielen rechthoekig zijn kunnen zij niet roteren in de boring. Daardoor is geen voorziening nodig om dit roteren te voorkomen zoals dat bij normale ronde ventielen wel het geval is. Het ventielhuis heeft een dikte van 25 mm en de wanddikte van de zijkanten van het ventielhuis is daardoor 1,5 mm. De wanddikte van het ventielhuis tussen de ventielen is ook 1,5 mm. De hartafstand tussen de ventielen wordt daardoor 25,5 mm wat gelijk is aan de hartafstand van de ventielen een Yamaha YFH 631S bugel.

De doorsnede van de hoofdbuis van een normaal ventielinstrument is cirkelvormig en neemt vanaf het mondstuk tot het ventielblok maar beperkt toe in doorsnede. Vanaf het ventielblok neemt de doorsnede veel sneller toe, met name aan het einde waar de buis overgaat in de beker. Alle drie de ventielbuizen hebben dezelfde doorsnede die gelijk is aan de doorsnede van de hoofdbuis ter plaatse van de aansluitpunten op het ventielblok. De boringen in de ventielen zijn zeer sterk gekromd maar men probeert om ze toch zo goed mogelijk een cirkelvormige doorsnede te geven. Dit is echter niet per se nodig en op dit punt wijkt het nieuwe ventielmechanisme sterk af van het gangbare systeem.

Tijdens het blazen wordt er in de buis een longitudinale geluidstrilling geproduceerd. Dit houdt in dat de luchtdeeltjes trillen in de lengterichting van de buis. Hiervoor is het nodig dat er geen plotselinge veranderingen optreden van de grootte het doorsnedenoppervlak haaks op de buis. De vorm van het oppervlak is echter niet belangrijk. Het doorsnedenoppervlak van de ventielbuizen in dit nieuwe ventielmechanisme is ovaal. Bij de twee aansluitpunten van de hoofdbuis op het ventielblok bevinden zich twee verloopstukken waarin de ronde doorsnede van de hoofdbuis overgaat op de ovale doorsnede van de ventielbuizen en wel op een zodanige manier dat de grootte van het oppervlak ongeveer constant blijft. Voor het ventielblok van een bugel werd voorlopig gekozen voor een ovaal met een hoogte van 6 mm en een breedte van 18 mm. Dit ovaal heeft een oppervlak van ongeveer 100 mm^2 wat gelijk is aan het oppervlak van een ronde buis met een doorsnede van 11,3 mm.

Mijn Yamaha YFH 631S bugel heeft ventielbuizen met een binnendiameter van 11 mm wat neer komt op een oppervlak van ongeveer 95 mm^2 . De buigradius van de 180° bocht in een ventielbuis is ongeveer 10 mm ter plaatse van de hartlijn.

Een groot voordeel van een ovale buisdoorsnede is dat de buis scherpere bochten kan maken dan een ronde buisdoorsnede met hetzelfde oppervlak. Er wordt vanuit gegaan dat een buigradius van 6 mm t.p.v. de hartlijn toelaatbaar is. Een ander voordeel is dat de hartlijnen van twee buizen dicht bij elkaar kunnen liggen waardoor de slag kleiner kan worden. Indien tussen twee buizen een wanddikte van 2 mm aangehouden wordt, is de vereiste slag slechts 8 mm (zie figuur 1). Dit verhoogt de maximale speelsnelheid aanzienlijk. Doordat de hoogte kleiner is dan die van een ronde doorsnede maar de breedte groter, moet de ventieldikte wel wat groter zijn dan die van een normaal ventiel. Indien een dergelijk ventiel van messing of van roestvrij staal gemaakt zou worden, zoals dat voor normale ventielen gebruikelijk is, zou het echter veel te zwaar worden. Daarom wordt voor een waterbestendige kunststof zoals polypropreen gekozen. De ventielmassa wordt hierdoor ongeveer even groot als van normale ventielen hoewel het volume veel groter is. De ventielmassa van mijn Yamaha YFH 631S bugel is ongeveer 54 gram. De berekende massa van ventiel 1 is ongeveer 53 gram voor een dichtheid van $1,1 \text{ gr/cm}^3$. De ventielslag van mijn Yamaha YFH 631S is ongeveer 15 mm.

De drie nieuwe ventielen zijn uitwendig aan elkaar gelijk maar de inwendige boringen verschillen. Doordat de ventielen een tamelijk groot volume hebben is het mogelijk om de ventielbuis van ventiel 2 geheel in het ventiel onder te brengen. De ventielbuis van ventiel 1 wordt naar achteren uitgevoerd (zie figuur 2). De ventielbuis van het ventiel 3 loopt eerst omhoog en dan naar achteren door de ventielen 2 en 1. Daardoor is het mogelijk om in deze beide ventielen aan de bovenkant kleine compensatielussen aan te brengen. In ventiel 2 en 3 zit aan de bovenkant een kamer om het ventiel lichter te maken.

Een compensatielus wordt gerealiseerd door twee 90° bochten omhoog, twee verticale rechte stukken en een 180° bocht die de twee verticale stukken met elkaar verbindt. De kortste lus wordt gerealiseerd als de verticale stukken ontbreken en de 180° bocht dus direct aansluit op de twee 90° bochten. De minimale lengte van een compensatielus is dan de lengte van twee 90° bochten plus de lengte van een 180° bocht. Deze lengte is 37,7 mm voor een buigradius van de bocht van 6 mm. Als het ventiel niet is ingedrukt loopt de lucht door een rechte boring met een lengte van 26 mm. De kortste lengte die door een compensatielus kan worden toegevoegd is dus $37,7 - 26 = 11,7 \text{ mm}$. Dit is veel korter dan de berekende waarde $e = 29,5 \text{ mm}$ en een compensatielus in ventiel 2 is dus mogelijk.

Als alleen ventiel 3 ingedrukt wordt dan stroomt de lucht dus door de rechte boringen in ventiel 1 en 2. Als ventiel 3 plus ventiel 1 ingedrukt wordt dan stroomt de lucht door de compensatieluis van ventiel 1. Als ventiel 3 plus ventiel 2 ingedrukt wordt dan stroomt de lucht door de compensatieluis van ventiel 2. Als ventiel 3 plus ventiel 1 plus ventiel 2 ingedrukt wordt dan stroomt de lucht door beide compensatielussen.

De ventielen zijn aan de bovenkant voorzien van een druktoets. Omdat de ventielen van kunststof zijn en de slag klein is, is waarschijnlijk geen vilt tussen de aanslagen nodig wat de nauwkeurigheid van de uiterste standen verhoogt. Het ventielhuis is aan de boven- en de onderkant afgesloten met een messing plaat. In de bovenste plaat zitten drie gaten waar de druktoetsen doorheen lopen. De drukveer in elk ventiel steunt af tegen de onderste plaat. Doordat de slag korter is dan van een normaal ventielinstrument kunnen ook de veren die de ventielen omhoog drukken korter zijn. Elke plaat wordt met vier schroefjes tegen het ventielhuis aan geschroefd. In de onderste plaat zitten drie kleine gaten t.p.v. de drukveren en door deze gaten kan lekwater afvoeren en kan eventueel ventielolie naar binnen gespoten worden als de kunststof ventielen toch smering nodig zouden hebben.

De einden van de lussen van ventiel 1 en ventiel 3 zitten in een messing blokje dat tegen de achterkant van het ventielblok gesoldeerd wordt. Dit blokje is vertikaal gedeeld en na het frezen van de sleuven worden de delen aan elkaar gesoldeerd. Tussen dit blokje en het aansluitpunt voor de hoofdbuis is voldoende ruimte voor de duim van de linkerhand. Omdat de ventielbuis van het derde ventiel niet naar voren uitsteekt is het ventielblok aan die kant vrij waardoor er ruimte is voor alle vier de vingers van de linkerhand. Doordat er geen ventielbuizen aan de zijkant uitsteken is het instrument minder gevoelig voor beschadiging.

Tussen het mondstuk en het ventielblok zit een kort recht stukje buis dat uit komt op ventiel 1. Dit stukje buis is te verstellen in lengte om de hoofdbuis te kunnen stemmen net zoals dat bij een gewone bugel ook het geval is. De hoofdbuis loopt vanaf het derde ventiel naar voren, buigt dan 180° omlaag, loopt dan naar achteren, buigt dan weer 180° omhoog, loopt dan weer naar voren en mondt uiteindelijk uit in de beker. De hoofdbuis wordt wijder vanaf het begin van de eerste bocht. De rechterduim wordt geplaatst aan de onderkant van het laatste stuk rechte buis net zoals dat bij een gewone bugel ook het geval is.

Doordat alle ventielbuizen naar boven of naar achteren lopen zijn zij uit zichzelf condenswater afvoerend en hoeft er alleen een waterklep te zitten op de voorste bocht van de hoofdbuis. De ventielknoppen worden voorzien van het ventielnummer. Een ventiel moet zo gemonteerd worden dat de zijde met de meeste openingen naar achteren wijst. Het middelste ventiel is symmetrisch en dit kan daarom op twee manieren gemonteerd worden. De belangrijkste voordelen van het nieuwe ventielsysteem worden nu beknopt weergegeven.

- 1 Alle ventielcombinaties met het derde ventiel zijn zuiver.
- 2 Doordat de ventielslag klein is, zijn snelle ventielwisselingen mogelijk.
- 3 Doordat alle ventielbuizen de juiste lengte hebben zijn geen ventielstembuizen nodig.
- 4 Beide naar achteren uitstekende ventielbuizen van het eerste en het derde ventiel kunnen in één stevig onderdeel ondergebracht worden.
- 5 Er steken geen ventielbuizen aan de zijkant van het ventielblok uit waardoor het instrument minder kwetsbaar is.
- 6 Doordat de ventielbuis van het derde ventiel niet naar voren uitsteekt is er meer ruimte voor de vingers van de linkerhand om het ventielblok vast te houden.
- 7 Doordat de ventielen voorzien zijn van een eenvoudige groef zijn de ventielhelften te frezen.
- 8 Doordat het ventiel rechthoekig is, is geen voorziening nodig om rotatie te voorkomen.
- 9 Doordat het ventiel van kunststof is kan het niet oxideren en is minder smering nodig.
- 10 Doordat de ventielbuizen naar boven of naar achteren lopen zijn geen waterkleppen op de ventielbuizen nodig.

5 Berekening van de onzuiverheid van alle ventielcombinaties

De berekende waarden voor o en p worden opgenomen in tabel 2 samen met de al eerder berekende waarden voor l.

ventielnummer vingerzetting	verlaging	theoretische buislengte l	totale werkelijke lengtetoe name o	totale werkelijke buislengte p	afwijking (%)
	geen	$l_0 = 1,0000 \text{ L}$	$o_0 = 0$	$p_0 = 1,0000 \text{ L}$	zuiver
2	1 halve toon	$l_1 = 1,0595 \text{ L}$	$o_1 = 0,0595 \text{ L}$	$p_1 = 1,0595 \text{ L}$	zuiver
1	2 halve tonen	$l_2 = 1,1225 \text{ L}$	$o_2 = 0,1225 \text{ L}$	$p_2 = 1,1225 \text{ L}$	zuiver
1 + 2	3 halve tonen	$l_3 = 1,1892 \text{ L}$	$o_3 = 0,1820 \text{ L}$	$p_3 = 1,1820 \text{ L}$	+ 0,6
3	3 halve tonen	$l_3 = 1,1892 \text{ L}$	$o_3 = 0,1805 \text{ L}$	$p_3 = 1,1805 \text{ L}$	+ 0,7
2 + 3	4 halve tonen	$l_4 = 1,2599 \text{ L}$	$o_4 = 0,2559 \text{ L}$	$p_4 = 1,2599 \text{ L}$	zuiver
1 + 3	5 halve tonen	$l_5 = 1,3348 \text{ L}$	$o_5 = 0,3348 \text{ L}$	$p_5 = 1,3348 \text{ L}$	zuiver
1 + 2 + 3	6 halve tonen	$l_6 = 1,4142 \text{ L}$	$o_6 = 0,4142 \text{ L}$	$p_6 = 1,4142 \text{ L}$	zuiver

tabel 2 Verloop van l, o en p als functie van de verlaging voor een gecompenseerd drieventielsinstrument

De afwijking of onzuiverheid wordt bepaald door de totale werkelijke buislengte p te vergelijken met de theoretische buislengte l. Als de geproduceerde toon te hoog is, is de afwijking positief en wordt voorzien van een + teken. Als de geproduceerde toon te laag is, is de afwijking negatief en wordt voorzien van een – teken. De afwijking in procenten wordt bepaald met de formule:

$$\text{afwijking} = 100 (l - p) / l \quad (\%) \quad (11)$$

De berekende afwijkingen werd ook opgenomen in tabel 2. Voor de ventielcombinatie 1 + 2 (drie halve tonen verlaging) vinden we een afwijking van + 0,6 %. Voor alleen ventiel 3 vinden we een afwijking van + 0,7 % wat komt doordat de ventielbuis van ventiel 3 korter gemaakt werd dan voor een zuiver ventiel om de combinatie 1 + 2 + 3 zuiver te krijgen. Beide afwijkingen zijn nog gemakkelijk met embouchure te corrigeren. Hoewel alleen ventiel 3 geen voorkeursvingerzetting is, is alleen ventiel 3 voor drie halve tonen verlaging dus toch bruikbaar als iemand dit zou willen. De ventielcombinatie 1 + 2 + 3 (zes halve tonen verlaging) is perfect zuiver.

De afwijkingen worden nu vergeleken met een normaal drieventielsinstrument met optimaal afgestelde ventielstembuizen d.w.z. 1 = zuiver, 2 = zuiver en 1 + 3 = zuiver.

Voor een normaal drieventielsinstrument is te berekenen dat de afwijking voor 1 + 2 (drie halve tonen verlaging) + 0,6 % is wat gelijk is aan de afwijking van een gecompenseerd drieventielsinstrument. Voor een normaal drieventielsinstrument is te berekenen dat de afwijking voor 2 + 3 (vier halve tonen verlaging) – 0,9 % is. Een gecompenseerd drieventielsinstrument is bij deze verlaging exact zuiver wat dus aanzienlijk beter is. Voor een normaal drieventielsinstrument is te berekenen dat de afwijking voor 1 + 2 + 3 (zes halve tonen verlaging) + 1,4 % is. Een gecompenseerd drieventielsinstrument is bij deze verlaging exact zuiver wat dus ook aanzienlijk beter is. Voor een verlaging van één, twee en vijf halve tonen zijn beide instrumenten exact zuiver. De gekozen lengtes van de ventielbuizen en de compensatielussen geven dus voor alle voorkeursvingerzettingen de maximale zuiverheid die met compensatie gerealiseerd kan worden.

De afwijkingen die het gevolg zijn van de combinatie van ventielen worden nu vergeleken met de afwijkingen die het gevolg zijn van de onzuiverheid van de hogere harmonischen. De frequentie van een hogere harmonische is gelijk aan het rangnummer vermenigvuldigd met de frequentie van de grondtoon ofte wel de eerste harmonische.

Om de afwijking van de harmonischen te bepalen werd een formule gebruikt die vergelijkbaar is met formule 11. Deze formule luidt:

$$\text{afwijking} = 100 (f_{\text{harm}} - f_{\text{gelijkzw.}}) / f_{\text{gelijkzw.}} \quad (\%) \quad (12)$$

Het resultaat van de berekening wordt voor de bruikbare hogere harmonischen vermeld op de eerste regel van tabel 3. Voor de naam van de tonen wordt alleen de naam van een verlaagde toon gebruikt, dus Des in plaats van Cis. Voor alle ventielcombinaties uit tabel 2 werd de gecombineerde afwijking berekend en opgenomen in tabel 3. De afwijkingen t.g.v. beide effecten kunnen bij elkaar opgeteld worden indien rekening gehouden wordt met het teken.

ventiel	rangnummer harmonische + naam van de toon en bijbehorende procentuele afwijking										
geen	2C 0	3G +0,1	4C 0	5E -0,8	6G +0,1	8C 0	9D +0,2	10E -0,8	12G +0,1		
2	2B 0	3Ges +0,1	4B 0	5Es -0,8	6Ges +0,1	8B 0	9Des +0,2	10Es -0,8	12Ges +0,1		
1	2Bes 0	3F +0,1	4Bes 0	5D -0,8	6F +0,1	8Bes 0	9C +0,2	10D -0,8	12F +0,1		
1 + 2	2A +0,6	3E +0,7	4A +0,6	5Des -0,2	6E +0,7	8A +0,6	9B +0,8	10Des -0,2	12E +0,7		
3	2A +0,7	3E +0,8	4A +0,7	5Des -0,1	6E +0,8	8A +0,7	9B +0,9	10Des -0,1	12E +0,8		
2 + 3	2As 0	3Es +0,1	4As 0	5C -0,8	6Es +0,1	8As 0	9Bes +0,2	10C -0,8	12Es +0,1		
1 + 3	2G 0	3D +0,1	4G 0	5B -0,8	6D +0,1	8G 0	9A +0,2	10B -0,8	12D +0,1		
1 + 2 + 3	2Ges 0	3Des +0,1	4Ges 0	5Bes -0,8	6Des +0,1	8Ges 0	9As +0,2	10Bes -0,8	12Des +0,1		

tabel 3 Toonnaam en procentuele afwijking als functie van de ventielcombinatie en de gebruikte harmonische voor een gecompenseerd drieventielsinstrument.

De dik gedrukte tonen zijn voorkeursvingerzettingen omdat in dit geval het minimum aantal ventielen gebruikt wordt (uitgezonderd het gebruik van alleen ventiel 3). Bij de 5Des is te zien, dat het 0,8 % te laag zijn van de vijfde harmonische, grotendeels gecompenseerd wordt door het 0,6 % te hoog zijn van de combinatie 1 + 2.

Tabel 3 geeft aan dat de maximale verhoging van een dikgedrukte toon optreedt voor de 3E (+0,7 %) wat nog gemakkelijk met embouchureverandering te compenseren is. Tabel 3 geeft aan dat de maximale verlaging van een dikgedrukte toon optreedt voor de 5E, de 5Es, de 5D, de 10E en de 10Es die allen een verlaging van – 0,8 % hebben. Ook deze verlaging is nog goed te compenseren met embouchureverandering. Daarbij komt dat, hoewel de benodigde grepen wat gecompliceerder zijn, deze tonen nog zuiverder te spelen zijn door gebruik te maken van de 6^e en de 12^e harmonischen.

Het idee om het derde ventiel te compenseren met gebruikmaking van compensatielussen in rechthoekige kunststof ventielen is misschien ook bruikbaar voor compensatie van een vierde kwart- of kwintventiel. Een instrument met een kwintventiel wordt beschreven in mijn rapport: “Ontwikkeling van de Basbugel, ofte wel een 4-ventielsbugel met een kwintventiel ter overbrugging van het gat tussen de grondtoon C en de lage Ges” dat ook op mijn website te vinden is.

Het voordeel van een kwintventiel boven een meer gebruikelijk kwartventiel is dat er maar vier tonen tussen de 1C en de door het kwintventiel verkregen 2F liggen en dat twee van deze tonen zeer zuiver zijn als gebruik gemaakt wordt van alternatieve vingerzettingen. Maar twee tonen zijn toch aanzienlijk te hoog en met compensatie van het vierde ventiel zouden alle vier de tonen een acceptabele zuiverheid hebben en weer met de normale vingerzettingen gespeeld kunnen worden. Het is de vraag of het zinnig is om het derde en het vierde ventiel beiden te compenseren omdat dat zeer lange ventielen vereist die waarschijnlijk te zwaar worden.

6 Controle van de lengte van de getekende ventiellussen en compensatielussen

Om figuur 2 te kunnen tekenen moet voor alle lussen de lengte van de gekozen lusvorm berekend worden. In hoofdstuk 3 werd de lengte berekend die door het indrukken van een ventiel moet worden toegevoegd. Als het ventiel niet is ingedrukt loopt de lucht door een rechte boring met een lengte van 24 mm. De luslengte moet dus 24 mm langer zijn dan de berekende toe te voegen lengte. Voor de luslengte wordt dezelfde letter gebruikt als de berekende toe te voegen lengte maar met een indicie 1 van lus. Er geldt dus dat:

$$a_1 = a + 24 = 181,3 + 24 = 205,3 \text{ mm}$$

$$b_1 = b + 24 = 88,1 + 24 = 112,1 \text{ mm}$$

$$c_1 = c + 24 = 267,1 + 24 = 291,1 \text{ mm}$$

$$d_1 = d + 24 = 47,1 + 24 = 71,1 \text{ mm}$$

$$e_1 = e + 24 = 29,5 + 24 = 53,5 \text{ mm}$$

6.1 Ventiellus in ventiel 2

De ventiellus in ventiel 2 en de compensatielussen in ventiel 1 en 2 hebben een vergelijkbare vorm alleen de rechte stukken verschillen in lengte. Een lus bestaat uit twee bochten van 90° , één bocht van 180° en twee rechte stukken. De bochten hebben samen een totale lengte van 37,7 mm voor een buigstraal van 6 mm op de hartlijn. De lengte van een recht stuk van de ventiellus in ventiel 2 wordt f genoemd. Er geldt dus dat:

$$b_1 = 37,7 + 2 * f$$

$$\text{ofte wel } f = (b_1 - 37,7) / 2 = (112,1 - 37,7) / 2$$

$$\text{ofte wel } f = 37,2 \text{ mm}$$

6.2 Compensatielus in ventiel 2

De lengte van een recht stuk van de compensatielus in ventiel 2 wordt g genoemd. Er geldt dus dat:

$$e_1 = 37,7 + 2 * g$$

$$\text{ofte wel } g = (e_1 - 37,7) / 2 = (53,5 - 37,7) / 2$$

$$\text{ofte wel } g = 7,9 \text{ mm}$$

6.3 Compensatielus in ventiel 1

De lengte van een recht stuk van de compensatielus in ventiel 1 wordt h genoemd. Er geldt dus dat:

$$d_1 = 37,7 + 2 * h$$

$$\text{ofte wel } h = (d_1 - 37,7) / 2 = (71,1 - 37,7) / 2$$

$$\text{ofte wel } h = 16,7 \text{ mm}$$

6.4 Ventiellussen in ventiel 1

De ventiellussen in ventiel 1 en 3 hebben een vergelijkbare vorm alleen de rechte stukken verschillen in lengte. De rechter lus in ventiel 1 bestaat uit een bocht van 90° met een buigstraal van 6 mm, een bocht van 90° met een buigstraal van 18 mm en een recht stuk met een lengte i_r . De twee bochten hebben samen een lengte van 37,7 mm.

De waarde van i_r wordt zo gekozen dat er voldoende ruimte zit tussen de bovenkant van de bovenste 90° bocht en de daar boven gelegen rechte boring. Er werd gekozen dat $i_r = 25$ mm. Er geldt dus dat: lengte rechter lus = $25 + 37,7 = 62,7$ mm

De linker lus in ventiel 1 bestaat uit twee bochten van 90° met een buigstraal van 6 mm en een recht stuk met een lengte i_l . De twee bochten hebben samen een lengte van 18,85 mm. Het rechte stuk in de linker lus van ventiel 1 is 4 mm langer dan het rechte stuk in de rechter lus. Dus $i_l = 25 + 4 = 29$ mm. Er geldt dus dat: lengte linker lus = $29 + 18,85 = 47,85$ mm

De linker en de rechter lus in ventiel 1 hebben dus samen een lengte van $62,7 + 47,85 = 110,55$ mm. De lucht stroomt ook door de achterwand van het ventielhuis die een dikte heeft van 1,5 mm en waardoor nog 3 mm aan de totale luslengte binnen het ventielhuis wordt toegevoegd. De totale luslengte binnen het ventielhuis is dus $110,55 + 3 = 113,55$ mm.

Wanneer ventiel 1 is ingedrukt loopt de lucht ook door onderste lus die in het blokje zit dat achter tegen het ventielblok geschroefd wordt. Er geldt dat $a_1 = 205,3$ mm. Dit betekent dat er in het blokje dat achterop het ventielhuis geschroefd wordt aan de onderkant nog een lus moet zitten met een lengte van $205,3 - 113,55 = 91,75$ mm.

6.5 Ventiellussen in ventiel 3

De linker lus in ventiel 3 bestaat uit twee bochten van 90° met een buigstraal van 6 mm en een recht stuk met een lengte j_l . De twee bochten hebben samen een lengte van 18,85 mm. De waarde van j_l wordt zo gekozen dat er voldoende ruimte zit tussen de bovenkant van de ventiellus in ventiel 2 en de onderkant van de onderste rechte boring in ventiel 2. Er werd gekozen dat $j_l = 45$ mm. Er geldt dus dat: lengte linker lus = $45 + 18,85 = 63,85$ mm

De rechter lus in ventiel 3 bestaat uit een bocht van 90° met een buigstraal van 6 mm, een bocht van 90° met een buigstraal van 18 mm en een recht stuk met een lengte j_r . De twee bochten hebben samen een lengte van 37,7 mm. Het rechte stuk in de rechter lus van ventiel 3 is 4 mm korter dan het rechte stuk in de linker lus. Dus $j_r = 45 - 4 = 41$ mm. Er geldt dus dat: lengte rechter lus = $41 + 37,7 = 78,7$ mm.

De linker en de rechter lus in ventiel 3 hebben dus samen een lengte van $63,85 + 78,7 = 142,55$ mm.

6.6 Rechte boringen in ventiel 1 en 2

Wanneer ventiel 3 is ingedrukt en wanneer ventiel 1 en 2 beiden niet zijn ingedrukt loopt de lucht ook door de rechte boringen in ventiel 1 en 2. Elke boring heeft in het ventiel een lengte van 24 mm en in een wand van het ventielhuis een lengte van 1,5 mm. Er zijn totaal vier rechte boringen en totaal zes wanden die gepasseerd worden. De totale rechte lengte binnen ventiel 1 plus 2 en het ventielhuis is daarom $4 * 24 + 6 * 1,5 = 105$ mm. De totale lengte van ventiellussen in ventiel 3 en de bovenste twee rechte boringen in ventiel 1 en 2 is daarom $142,55 + 105 = 247,55$ mm. Er geldt dat $c_1 = 291,1$ mm. Dit betekent dat er in het blokje dat achterop het ventielhuis geschroefd wordt aan de bovenkant nog een lus moet zitten met een lengte van $291,1 - 247,55 = 43,55$ mm.

De afstand tussen de hartlijnen van de bovenste en de onderste rechte boring is 8 mm voor een ventielslag van 8 mm. De afstand tussen de hartlijn van de rechte hoofdboring en de rechte boring die direct boven de lussen ligt is 65 mm.

6.7 Lussen in het blokje achterop het ventielhuis

Eerder werd al bepaald dat de bovenste lus in het blokje een totale lengte moet hebben van 43,55 mm en dat de onderste lus een totale lengte moet hebben van 91,75 mm. Bij het aansluitpunt op het ventielblok liggen de hartlijnen van de boringen 8 mm uit elkaar.

Aangezien de minimum buigstraal van een bocht 6 mm is, moet er in minstens één poot van een lus een S-vormige bocht zitten. Deze S-vormige bocht zit voor beide lussen aan de bovenkant waardoor condenswater gemakkelijk afgevoerd wordt.

De S-vormige bocht sluit aan op een bocht van 180° waarvan de steekcirkel 12 mm is. De S-vormige bocht moet daarom een steekverschil van $12 - 8 = 4$ mm overbruggen. Een S-vormige bocht bestaat uit twee stukken met ieder een buigradius op de hartlijn van 6 mm. Elk stuk moet een steekverschil van 2 mm overbruggen. Te berekenen is dat een stuk daarvoor gebogen moet worden over een hoek van $48,19^\circ$. De booglengte van één stuk is dan 5,05 mm. De booglengte van een complete S-vormige bocht is dan 10,1 mm. De horizontale lengte van een S-vormige bocht is 8,95 mm

De 180° bocht heeft een booglengte van 18,85 mm en sluit aan de bovenkant kant aan op de S-vormige bocht en aan de onderkant op een recht stukje buis dat een lengte heeft van 8,95 mm als het samen valt met het einde van de S-vormige bocht. De kortst mogelijke lengte van een lus is daarom $18,85 + 10,1 + 8,95 = 37,9$ mm. Tussen de kortst mogelijk lus en het ventielblok zitten dan nog twee rechte stukjes waarvan het onderste stukje in het verlengde ligt van het rechte stukje dat al in de kortst mogelijke lus zit.

De bovenste lus moet een lengte hebben van 43,55 mm. Tussen de kortst mogelijk lus en het ventielblok zitten dan nog twee korte rechte stukjes met een lengte k_b . Voor k_b geldt:

$$k_b = (43,55 - 37,9) / 2 = 2,8 \text{ mm}$$

De onderste lus moet een lengte hebben van 91,75 mm. Tussen de kortst mogelijk lus en het ventielblok zitten dan nog twee korte rechte stukjes met een lengte k_o . Voor k_o geldt:

$$k_o = (91,75 - 37,9) / 2 = 26,9 \text{ mm}$$

7 Bescherming van het idee van een gecompenseerd drieventielsinstrument en van de nieuwe ventielvorm

In de afgelopen 200 jaar zijn er dermate veel octrooien op het gebied van ventielen verleend dat het niet te verwachten is dat een gecompenseerd drieventielsinstrument niet onder één van deze octrooien zal vallen. Deze octrooien zijn inmiddels waarschijnlijk echter allemaal verlopen. Daarbij is octrooiering een kostbare zaak. Ikzelf heb geen intentie om een prototype van een gecompenseerd drieventielsinstrument te bouwen. Dit laatste is nodig om aan te tonen dat het instrument werkelijk zo zuiver is als de berekeningen aangeven en dat de nieuwe rechthoekige kunststof ventielen gemaakt kunnen worden en bevredigend functioneren. Als iemand anders een prototype wil bouwen wil ik wel graag proberen of er op te blazen is.

Ik heb ook geen intentie om een gecompenseerd drieventielsinstrument in serie te gaan produceren als zou blijken dat het prototype goed werkt. Middels deze KD-notitie heb ik het idee alleen willen vastleggen. Deze KD-notitie kan door iedereen van mijn website www.kdwindturbines.nl gekopieerd worden.

Doordat het idee hierbij vrijgegeven wordt, kan het door niemand anders geoctrooieerd worden. Iedereen is vrij om op deze manier een gecompenseerd drieventielsinstrument te bouwen en te verkopen en hoeft daarvoor niets aan mij te betalen. Ik stel er wel prijs op om als uitvinder genoemd te worden.