Kragten Design **ing. Adriaan Kragten**

Populierenlaan 51
5492 SG Sint-Oedenrode
Nederland

telefoon: 0413 475770
e-mail: info@kdwindturbines.nl
website: www.kdwindturbines.nl
bank nr. : NL 72 INGB 0002062399
BTW nr.: 064460447B01
Kamer van Koophandel nr. : 17241478

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

Adriaan Kragten, Sint-Oedenrode 16-1-2008, herzien 8-2-2015

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

1 Inleiding

Op koperinstrumenten kunnen zonder de ventielen te gebruiken alleen hogere harmonischen van de grondtoon geproduceerd worden. Deze tonen, maar ook alle tonen waarvoor ventielen nodig zijn, kunnen worden aangeduid door het rangnummer van de harmonische gevolgd door de naam van de toon. Het normale bereik van een koperinstrument loopt tot de twaalfde harmonische maar er zijn mensen die op een trompet nog veel hoger kunnen spelen. De tonen uit het normale bereik zijn dan: 1C, 2C, 3G, 4C, 5E, 6G, (7Bes), 8C, 9D, 10E, (11Fis) en 12G. De grondtoon 1C is erg laag maar kan op een bugel zuiver gespeeld worden. Vanaf de 1C is het op een 3-ventielsinstrument niet mogelijk om een chromatische toonladder omhoog te spelen en de 1C wordt daarom normaal niet gebruikt. De 7Bes is te laag en de 11Fis is veel te hoog en moeten vermeden worden. Zij 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 verschillend 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.

Alle moderne koperinstrumenten maken, uitgezonderd de trombone, gebruik 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 (uitgezonderd de hoorn). 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 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 alléén 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. Dit heeft een belangrijke nadeel. Een combinatie van ventielen kan 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 3-ventielsinstrumenten 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 ongeveer 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 zeer makkelijk 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.

Voor een instrument met een trigger op het 3e ventiel is het beter om de combinatie 2 + 3 zuiver af te stemmen. De combinatie 1 + 3 is dan 0,9 % te hoog maar dit kan gecompenseerd worden, door met de trigger de stembuis van het derde ventiel een beetje te verlengen. De combinatie 1 + 2 + 3 is dan 2,2 % te hoog maar dit kan gecompenseerd worden, door met de trigger de stembuis van het derde ventiel aanzienlijk te verlengen. Het voordeel van een trigger is dus dat men zuiver kan spelen met minimale embouchurewisseling. Het nadeel is dat de trigger geen gefixeerde stand heeft en dat de bediening tijd kost.

Met drie ventielen kan dus alleen het gat tussen de 2C en de 3G overbrugd worden. Met deze drie ventielen kan ook nog een 2Ges gespeeld worden (onder de 2C) maar er blijft tussen de 1C en de 2Ges nog een gat over waar de vijf tonen 2Des, 2D, 2Es, 2E en 2F in liggen. Op een trompet heeft de grondtoon 1C sterk de nijging om te laag te zijn maar op een bugel kan de grondtoon 1C relatief gemakkelijk zuiver gespeeld worden. Ik denk dat dit komt door het relatief grote mondstuk, de lange wijde boring en de grote beker. Daardoor is het zinnig om een bugel te ontwikkelen waarmee het gat tussen de 1C en de 2Ges overbrugd kan worden.

Een bekende methode om dit te realiseren is een 4-ventielsbugel met een kwartventiel. Er zijn echter maar een paar merken, zoals Getzen en Courtois, die een 4-ventielsbugel leveren. Een kwartventiel maakt dat de theoretische buislengte van de hoofdbuis L ongeveer met een factor 4/3 verlengd wordt. De theoretische buislengte van de hoofdbuis L is de lengte die berekend kan worden op basis van de lengte van de ventielbuis van het derde ventiel. De werkelijke buislengte van het instrument is aanzienlijk korter (zie hoofdstuk 4). Voor een acceptabele stemming van de lage tonen zouden de ventielbuizen van ventiel 1, 2 en 3 daarom ook met een factor 4/3 verlengd moeten worden. Dit is echter niet het geval waardoor de toon, met name bij ventielcombinaties waarbij een groot aantal ventielen betrokken zijn, veel te hoog wordt. Om dit te compenseren is een trigger op het kwartventiel nodig met een zeer groot bereik. Het is lastig om voor deze trigger voor elke toon de juiste stand te vinden. Ik denk dat dit één van de redenen is waarom een 4-ventielsbugel met een kwartventiel niet erg gangbaar is.

Een volgens mij nieuwe methode, of in ieder geval een niet gangbare methode, om het gat tussen de 1C en de 2Ges te overbruggen, is een 4-ventielsbugel met een kwintventiel. Dit instrument wordt door mij een basbugel genoemd, analoog aan de bastrombone waarmee door combinatie van twee ventielen ook een kwint verlaagd kan worden. Men zou verwachten dat het probleem van het te hoog zijn van de ventielcombinaties bij een kwintventiel nog groter is dan bij een kwartventiel. Dit is ook zo als men de normale grepen gebruikt. Er zijn bij een kwintventiel echter afwijkende grepen mogelijk waarbij de toonafwijking maar beperkt is.

2 Beschrijving van de basbugel

Voor een 4-ventielsbugel met een kwartventiel bevindt dit ventiel zich normaal direct achter het derde ventiel en wordt het met de pink van de rechter hand bediend. Ik vind dit een ongelukkige positie omdat de pink onwillig is om onafhankelijk van de andere drie vingers te bewegen. In een discussie die ik met leden van het panel www.trompet.nl gehad heb werd ook aangegeven dat deze plaats van het vierde ventiel ongunstig is voor de stemming van de bugel in het normale bereik. Het kwintventiel wordt daarom aangebracht in de buis vlak voor het eerste ventiel. Het lijkt mij het handigst om hiervoor een draaiventiel te gebruiken dat bediend wordt door één van de vingers van de linker hand.

Welke vinger hiervoor het meest in aanmerking komt moet nog worden uitgezocht. Het kwintventiel wordt wel ventiel 4 genoemd ook al zit het voor ventiel 1.

Een kwintventiel verlengt de theoretische lengte van de hoofdbuis L ongeveer met een factor 3/2. Dit betekent dat de lengte van de ventielbuis behoorlijk lang wordt maar het lijkt mogelijk om de ventielbuis in een plat vlak binnen de hoofdbuis te leggen en wel zodanig dat de linker hand daar geen hinder van ondervindt. Er moet een waterklep aan de voorkant van de voorste bocht zitten. In eerste instantie wordt er van uitgegaan dat er een trigger op het derde en op het vierde ventiel zit. Deze triggers worden aangeduid met tr3 en tr4.

3 Berekening van de toonhoogte voor de basbugel

Voor een bepaalde harmonische is de frequentie of toonhoogte omgekeerd evenredig met de theoretische buislengte l. 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 theoretische 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 0 tot 11 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 lengtetoename m die ook vermeld wordt in tabel 1. Door l te verminderen met de oorspronkelijke buislengte L vinden we de totale theoretische lengtetoename n die ook vermeld wordt in tabel 1. L, l, m en n worden weergegeven in fig. 1.

verlaging	theoretische buislengte l	stapsgewijze theor. lengtetoename m	totale theoretische lengtetoename 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
7 halve tonen	$l_7 = 1{,}4983$ L	$m_7 = 0{,}0841$ L	$n_7 = 0{,}4983$ L
8 halve tonen	$l_8 = 1{,}5874$ L	$m_8 = 0{,}0891$ L	$n_8 = 0{,}5874$ L
9 halve tonen	$l_9 = 1{,}6818$ L	$m_9 = 0{,}0944$ L	$n_9 = 0{,}6818$ L
10 halve tonen	$l_{10} = 1{,}7818$ L	$m_{10} = 0{,}1000$ L	$n_{10} = 0{,}7818$ L
11 halve tonen	$l_{11} = 1{,}8877$ L	$m_{11} = 0{,}1059$ L	$n_{11} = 0{,}8877$ 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 lengtetoename steeds groter wordt naarmate de buislengte al toegenomen is door een eerdere verlenging. Hetzelfde verloop is te zien tussen de fretten van een gitaar. Halverwege de snaar zitten we op de 12^e^ positie. De afstand tussen deze positie en de kam op de klankkast is vergelijkbaar met de theoretische buislengte L van een ventielinstrument. Voor een halve toon verlaging moeten we deze lengte vergroten met de afstand tussen de fretten van de 11^e^ en de 12^e^ positie. Voor een hele toon verlaging moeten we deze lengte vergroten met de afstand tussen de fretten van de 10^e^ en de 12^e^ positie, enz. Voor de verlaging van 12 halve tonen, ofte wel een octaaf, krijgen we de losse snaar.

Om met vier ventielen een maximale zuiverheid te realiseren moeten de ventielstembuizen een bepaalde lengte hebben. De volgende afstelling blijkt het beste resultaat op te leveren als er een trigger op het derde en het vierde ventiel zit:

Ventiel 1 zuiver. Ventiel 2 zuiver. Ventiel 2 + 3 zuiver. Ventiel 4 zuiver. Omdat ventiel 2 + 3 zuiver afgestemd wordt is ventiel 3, indien alleen gebruikt, wat te laag. De lengte van de ventielstembuizen 1, 2, 3 en 4 wordt respectievelijk a, b, c en d genoemd. De totale werkelijke lengtetoename wordt o genoemd. De totale werkelijke buislengte wordt p genoemd. De waarden voor a, b, c en d worden bepaald m.b.v. tabel 1 en de aangenomen afstellingen. o, p, a, b, c en d worden weergegeven in het onderste plaatje van fig. 1. De plaatjes van fig. 1 zijn op schaal getekend maar wel met rechte buizen. De plaatjes gelden als beide triggers niet gebruikt worden en dus helemaal ingeschoven zijn.

Ventiel 1 zuiver geeft dat $a = n_2 = 0{,}1225$ L.
Ventiel 2 zuiver geeft dat $b = n_1 = 0{,}0595$ L.
Ventiel 2 + 3 zuiver geeft dat $b + c = n_4 = 0{,}2599$ L.
Ventiel 4 zuiver geeft dat $d = n_7 = 0{,}4983$ L.
$c = n_4 – b = 0{,}2599$ L – 0,0595 L = 0,2004 L.

De vingerzettingen voor 1 t/m 11 halve tonen verlaging en de toonnamen worden gegeven in tabel 2. Vanwege deze vingerzettingen en de aangenomen afstelling geldt:

$o_1 = b = n_1 = 0{,}0595$ L en $p_1 = l_1 = 1{,}0595$ L.
$o_2 = a = n_2 = 0{,}1225$ L en $p_2 = l_2 = 1{,}1225$ L.
$o_3 = a + b = n_2 + n_1 = 0{,}1225$ L + 0,0595 L = 0,1820 L en $p_3 = 1{,}1820$ L.
$o_4 = b + c = n_4 = 0{,}2599$ L en $p_4 = 1{,}2599$ L.
$o_5 = a + c = n_2 + n_4 – b = 0{,}1225$ L + 0,2004 L = 0,3229 L en $p_5 = 1{,}3229$ L.
$o_6 = a + b + c = n_2 + n_4 = 0{,}1225$ L + 0,2599 L = 0,3824 L en $p_6 = 1{,}3824$ L.
$o_7 = d = n_7 = 0{,}4983$ L en $p_7 = 1{,}4983$ L.
$o_8 = b + d = n_1 + n_7 = 0{,}0595$ L + 0,4983 L = 0,5578 L en $p_8 = 1{,}5578$ L.
$o_9 = a + b + d = n_2 + n_1 + n_7 = 0{,}1225$ L + 0,0595 L + 0,4983 L = 0,6803 L en $p_9 = 1{,}6803$ L.
$o_{10} = b + c + d = n_4 + n_7 = 0{,}2599$ L + 0,4983 L = 0,7582 L en $p_{10} = 1{,}7582$ L.
$o_{11} = a + b + c + d = n_2 + n_4 + n_7 = 0{,}1225$ L + 0,2599 L + 0,4983 L = 0,8807 L en $p_{11} = 1{,}8807$ L.

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

ventielnummer vingerzetting	toon-naam	verlaging	theoretische buislengte l	totale werkelijke lengtetoename o	totale werkelijke buislengte p	afwijking (%)
	2C	geen	$l_0 = 1{,}0000$ L	$o_0 = 0$	$p_0 = 1{,}0000$ L	zuiver
2	2B	1 halve toon	$l_1 = 1{,}0595$ L	$o_1 = 0{,}0595$ L	$p_1 = 1{,}0595$ L	zuiver
1	2Bes	2 halve tonen	$l_2 = 1{,}1225$ L	$o_2 = 0{,}1225$ L	$p_2 = 1{,}1225$ L	zuiver
1 + 2	2A	3 halve tonen	$l_3 = 1{,}1892$ L	$o_3 = 0{,}1820$ L	$p_3 = 1{,}1820$ L	+ 0,6
2 + 3	2As	4 halve tonen	$l_4 = 1{,}2599$ L	$o_4 = 0{,}2599$ L	$p_4 = 1{,}2599$ L	zuiver
1 + 3	2G	5 halve tonen	$l_5 = 1{,}3348$ L	$o_5 = 0{,}3229$ L	$p_5 = 1{,}3229$ L	+ 0,9
1 + 2 + 3	2Ges	6 halve tonen	$l_6 = 1{,}4142$ L	$o_6 = 0{,}3824$ L	$p_6 = 1{,}3824$ L	+ 2,2
4	2F	7 halve tonen	$l_7 = 1{,}4983$ L	$o_7 = 0{,}4983$ L	$p_7 = 1{,}4983$ L	zuiver
2 + 4	2E	8 halve tonen	$l_8 = 1{,}5874$ L	$o_8 = 0{,}5578$ L	$p_8 = 1{,}5578$ L	+ 1,9
1 + 2 + 4	2Es	9 halve tonen	$l_9 = 1{,}6818$ L	$o_9 = 0{,}6803$ L	$p_9 = 1{,}6803$ L	+ 0,1
2 + 3 + 4	2D	10 halve tonen	$l_{10} = 1{,}7818$ L	$o_{10} = 0{,}7582$ L	$p_{10} = 1{,}7582$ L	+ 1,3
1 + 2 + 3 + 4	2Des	11 halve tonen	$l_{11} = 1{,}8877$ L	$o_{11} = 0{,}8807$ L	$p_{11} = 1{,}8807$ L	+ 0,4

tabel 2 Verloop van l, o en p en de procentuele afwijking als functie van de verlaging voor een 4-ventielsbugel met een kwintventiel

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:

$$\text{afwijking} = 100\,(l - p)\,/\,l \qquad (\%) \tag{1}$$

De berekende afwijkingen werden opgenomen in de laatste kolom van tabel 2.

In tabel 2 is te zien dat de afwijkingen voor de vier laagste tonen maar gering zijn. De grootste afwijking van + 1,9 % zit in de 2E. Deze afwijking kan met de trigger op het vierde ventiel gecompenseerd worden. De 2Es heeft een afwijking van maar + 0,1 % waardoor deze toon zeer zuiver is. De afwijking in de 2D is + 1,3 %. Deze afwijking kan met de trigger op het derde ventiel of met de trigger op het vierde ventiel gecompenseerd worden. De afwijking op de 2 Des is + 0,4 %. Dit is ook nog maar weinig en dit kan makkelijk met lipspanning gecorrigeerd worden.

Het is jammer dat voor de 2E het derde ventiel niet gebruikt wordt anders zou een trigger op het vierde ventiel helemaal niet nodig zijn. Als de trigger op het vierde ventiel toch weggelaten wordt moet men de 2E 1,9 % met lipspanning laten zakken. De afstand tussen twee halve tonen is ongeveer 6 % dus 1,9 % is iets minder dan een 1/3 van een halve toonsafstand. Omdat de embouchure bij een 2E al erg los is kan het best zo zijn dat het 1,9 % laten zakken van de 2E toch wel te doen is en dat er alleen een trigger op het derde ventiel nodig is. In hoofdstuk 7 wordt aangetoond dat dit inderdaad het geval is.

Als men de trigger op het derde ventiel ook nog zou weglaten is het voor de zuiverheid in het normale bereik beter om 1 + 3 zuiver te stemmen. De stembuis van het derde ventiel wordt dan aanzienlijk langer wat daardoor leidt tot een verlaging van de 2D en de 2Des. Deze tonen moeten dan om zuiver te klinken opgedreven worden wat niet makkelijk is. Het lijkt daarom het beste om er voor een basbugel vanuit te gaan dat er in ieder geval een trigger op het derde ventiel zit.

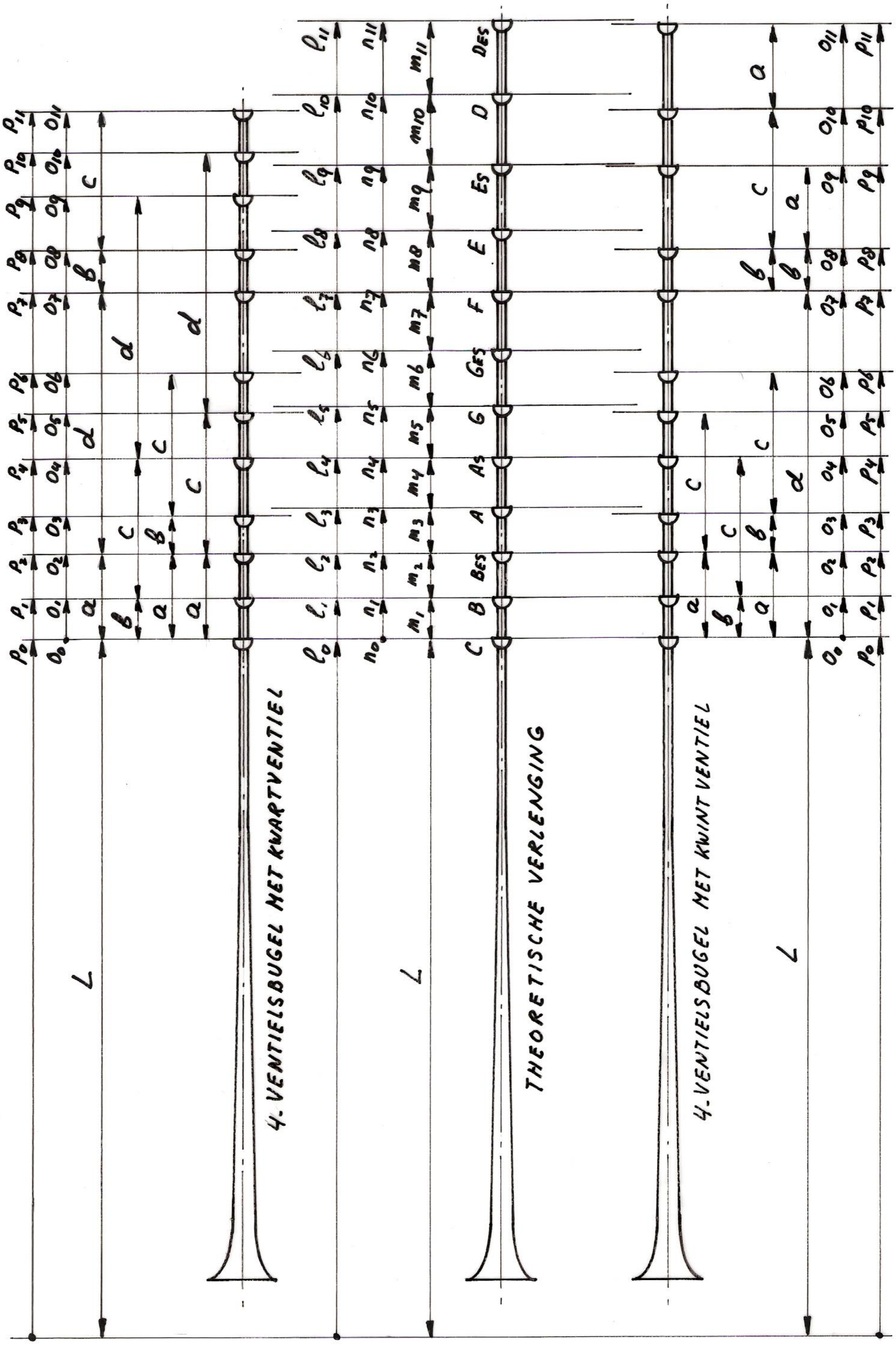
Een nadeel van de gebruikte vingerzettingen is dat zij afwijken van de vingerzettingen die nodig zijn om vanaf de 2C een chromatische toonladder omhoog te spelen. De overgang van 1C naar 2Des is nog zoals we die gewend zijn maar de 2D, de 2Es, de 2E en de F hebben een afwijkende vingerzetting. Dit zijn echter maar vier tonen en de bijbehorende vingerzettingen zijn snel aan te leren. Er zijn tenorsaxofonisten die wel een octaaf boven het normale bereik kunnen spelen en de vingerzettingen die daarvoor nodig zijn verschillen sterk van de vingerzettingen voor het lage en het middelste register maar dit blijkt voor ervaren musici toch geen bezwaar te zijn.

Dezelfde vingerzettingen zoals gegeven in de eerste kolom van tabel 1 kunnen gebruikt worden om vanaf de 1C nog een chromatische toonladder omlaag te spelen tot aan de 1Des. Deze tonen vereisen een zeer losse embouchure en het spelen van de allerlaagste tonen zal zeer lastig zijn. Maar zelfs als men niet lager kan komen dan bijvoorbeeld de 1E, dan nog wordt het bereik van de bugel door toepassing van een kwintventiel naar beneden met ruim een octaaf uitgebreid. Er vanuit gaande dat een ervaren musicus op een bugel normaal een 10E kan spelen, dan heeft het instrument daardoor een bereik gekregen van vier octaven wat toch erg interessant is.

Het moet niet zo moeilijk zijn om een prototype te bouwen waarmee de theorie getest kan worden. Men kan een bestaande normale 3-ventielsbugel modificeren. Wat helemaal makkelijk zou zijn is om van een bestaande 4-ventiels bugel de stembuis van het kwartventiel zo veel te verlengen dat dit ventiel een kwint verlaagt.

Een bastrombone kan uitgevoerd zijn met een kwartventiel en met nog een 2e ventiel dat zo lang is dat beide ventielen samen een kwint verlagen. In dit geval kunnen de vier posities tussen de 1C en de 2Ges (er even aan voorbijgaand dat een schuiftrombone klinkend genoteerd wordt) met de schuif overbrugd worden zonder dat de schuif te kort is.

In dit instrument wordt dus eigenlijk al aangetoond dat een kwintventiel werkt. Een voordeel van een schuiftrombone is natuurlijk dat voor de 2D en de 2E geen triggers nodig zijn omdat de schuif al precies op de juiste plaats gezet kan worden.



figuur 1 Buislengtes voor een 4-ventielsbugel met een kwintventiel en met een kwartventiel

4 Bepaling van de theoretisch buislengte L en berekening de ventielbuislengte van het kwintventiel

In hoofdstuk 3 wordt de ventielbuislengte van ventiel 4 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 nauwkeurig op te meten. Echter, het blijkt dat de conische boring en de beker eindeffecten 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 een 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:

$$\lambda = v / f \qquad \text{(m)} \qquad (2)$$

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:

$$v = 64{,}2 \sqrt{(\kappa * T / d)} \qquad \text{(m/s)} \qquad (3)$$

Hierin is 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/m^3. De absolute dichtheid van met waterdamp verzadigde lucht van 25 °C bedraagt 1,170 kg/m^3. 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. Invulling van de gevonden waarden voor κ, T en d in formule 3 geeft dat v = 347,74 m/s. Invulling van de gevonden waarden voor v en f in formule 2 geeft dat L = λ = 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 die bepaald werd op basis van de lengte van de ventielbuis van het derde ventiel.

Wanneer L bepaald wordt door de werkelijke lengte van de hoofdbuis op te meten vinden we voor een trompet ongeveer dat L = 1370 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.

Wanneer we de werkelijke lengte van de hoofdbuis van de Yamaha bugel opgemeten wordt vinden we ongeveer een lengte L = 1360 mm. Dit is iets korter dan de lengte van een trompet wat het gevolg kan zijn van de wijdere boring en de grotere beker. Het verschil is echter maar gering en het is lastig om de lengte nauwkeurig op te meten. Het lijkt dus toegestaan om voorlopig uit te gaan van de metingen die aan een trompet zijn uitgevoerd.

De waarde L = 1480 mm zal nu gebruikt worden om de lengte d van de ventielbuis van het kwintventiel mee te bepalen. In tabel 2 is af te lezen dat o_7 = 0,4983 L. Invulling van L = 1480 mm geeft dat o_7 = 737 mm. De berekende buislengte moet nu nog verminderd worden met de lengte van de boring in het draaiventiel omdat de stroming bij de normale stand van dit ventiel maar door één boring loopt en bij de ingedrukte stand door twee. De lengte van deze boring is ongeveer 17 mm waardoor het deel van o_7 dat buiten het ventiel uitsteekt 720 mm wordt. Dit lijkt een goede maat om mee te beginnen. Het kan zijn dat de werkelijke buislengte toch iets langer of korter moet zijn om precies een gelijkzwevende kwint als verlaging te geven maar dat merken we wel als er een prototype bebouwd wordt.

5 Bepaling van de minimale triggerslag bij gebruik van twee triggers

Het verschil tussen l en p moet met de triggers gecompenseerd kunnen worden. Een trigger is een U-vormige buis die uitgetrokken wordt. De triggerslag s is daarom de helft van l – p.

Het grootste verschil van l – p voor het normale bereik treedt op bij de 2Ges. Hiervoor geldt dat l - p = 0.0318 L. Invulling van L = 1480 mm geeft dat l – p = 47 mm. De minimale slag van tr3 is dus 23,5 mm.

Het grootste verschil van l – p voor het lage bereik treedt op bij de 2E. Hiervoor geldt dat l - p = 0.0296 L. Invulling van L = 1480 mm geeft dat l – p = 44 mm. De minimale slag van tr4 is dus 22 mm wat dus zelfs nog iets kleiner is dan de minimale slag van tr3.

6 Berekening van de toonhoogte voor een 4-ventielsbugel met een kwartventiel

Op dezelfde manier als dat in hoofdstuk 3 gedaan werd voor de basbugel worden nu de waarden van o en p berekend voor een normale 4-ventielsbugel met een kwartventiel. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de 2F die gespeeld wordt met 1 + 4 zuiver is. Het vierde ventiel is daarom, wanneer het alleen gebruikt wordt, behoorlijk wat te laag. Als het vierde ventiel op zich zuiver genomen wordt, dan worden de vijf tonen die direct boven de grondtoon C liggen, nog veel meer te hoog dan de berekende afwijkingen.

De definities van o, p, a, b, c en d zijn gelijk aan die zoals gebruikt in hoofdstuk 3 alleen is d nu de ventielbuislengte voor een kwartventiel. De vingerzettingen voor ventiel 1, 2 en 3 voor een chromatische toonladder omhoog vanaf de 1C zijn nu wel gelijk aan die voor een chromatische toonladder omhoog vanaf de 2C. Het resultaat van de berekening wordt gegeven in het bovenste plaatje van fig. 1. De plaatjes gelden als beide triggers niet gebruikt worden en dus helemaal ingeschoven zijn.

Ventiel 1 zuiver geeft dat $a = n_2 = 0{,}1225$ L.
Ventiel 2 zuiver geeft dat $b = n_1 = 0{,}0595$ L.
Ventiel 2 + 3 zuiver geeft dat $b + c = n_4 = 0{,}2599$ L.
Ventiel 1 + 4 zuiver geeft dat $a + d = n_7 = 0{,}4983$ L.
$c = n_4 – b = 0{,}2599$ L – 0,0595 L = 0,2004 L.
$d = n_7 – a = 0{,}4983$ L – 0,1225 L = 0,3758 L.

De vingerzettingen voor 1 t/m 11 halve tonen verlaging en de toonnamen worden gegeven in tabel 3. Vanwege deze vingerzettingen en de aangenomen afstelling geldt:

$o_1 = b = n_1 = 0{,}0595$ L en $p_1 = l_1 = 1{,}0595$ L.
$o_2 = a = n_2 = 0{,}1225$ L en $p_2 = l_2 = 1{,}1225$ L.
$o_3 = a + b = n_2 + n_1 = 0{,}1225$ L + 0,0595 L = 0,1820 L en $p_3 = 1{,}1820$ L.
$o_4 = b + c = n_4 = 0{,}2599$ L en $p_4 = 1{,}2599$ L.
$o_5 = a + c = n_2 + n_4 – b = 0{,}1225$ L + 0,2004 L = 0,3229 L en $p_5 = 1{,}3229$ L.
$o_6 = a + b + c = n_2 + n_4 = 0{,}1225$ L + 0,2599 L = 0,3824 L en $p_6 = 1{,}3824$ L.
$o_7 = a + d = n_7 = 0{,}4983$ L en $p_7 = 1{,}4983$ L.
$o_8 = a + b + d = n_2 + n_1 + d = 0{,}1225$ L + 0,0595 L + 0,3758 L = 0,5578 L en $p_8 = 1{,}5578$ L.
$o_9 = b + c + d = n_2 + c + d = 0{,}0595$ L + 0,2004 L + 0,3758 L = 0,6357 L en $p_9 = 1{,}6357$ L.
$o_{10} = a + c + d = n_2 + c + d = 0{,}1225$ L + 0,2004 L + 0,3758 L = 0,6987 L en $p_{10} = 1{,}6987$ L.
$o_{11} = a + b + c + d = n_2 + n_1 + c + d = 0{,}1225$ L + 0,0596 L + 0,2004 L + 0,3758 L = 0,7583 L en $p_{11} = 1{,}7583$ L.

De berekende waarden voor o en p worden opgenomen in tabel 3 samen met de al eerder berekende waarden voor l. Het gevonden verloop van o en p werd ook uitgezet in het bovenste plaatje van figuur 1.

ventielnummer vingerzetting	toon-naam	verlaging	theoretische buislengte l	totale werkelijke lengtetoename o	totale werkelijke buislengte p	afwijking (%)
	2C	geen	$l_0 = 1{,}0000$ L	$o_0 = 0$	$p_0 = 1{,}0000$ L	zuiver
2	2B	1 halve toon	$l_1 = 1{,}0595$ L	$o_1 = 0{,}0595$ L	$p_1 = 1{,}0595$ L	zuiver
1	2Bes	2 halve tonen	$l_2 = 1{,}1225$ L	$o_2 = 0{,}1225$ L	$p_2 = 1{,}1225$ L	zuiver
1 + 2	2A	3 halve tonen	$l_3 = 1{,}1892$ L	$o_3 = 0{,}1820$ L	$p_3 = 1{,}1820$ L	+ 0,6
2 + 3	2As	4 halve tonen	$l_4 = 1{,}2599$ L	$o_4 = 0{,}2599$ L	$p_4 = 1{,}2599$ L	zuiver
1 + 3	2G	5 halve tonen	$l_5 = 1{,}3348$ L	$o_5 = 0{,}3229$ L	$p_5 = 1{,}3229$ L	+ 0,9
1 + 2 + 3	2Ges	6 halve tonen	$l_6 = 1{,}4142$ L	$o_6 = 0{,}3824$ L	$p_6 = 1{,}3824$ L	+ 2,2
2 + 4	2F	7 halve tonen	$l_7 = 1{,}4983$ L	$o_7 = 0{,}4983$ L	$p_7 = 1{,}4983$ L	zuiver
1 + 2 + 4	2E	8 halve tonen	$l_8 = 1{,}5874$ L	$o_8 = 0{,}5578$ L	$p_8 = 1{,}5578$ L	+ 1,9
2 + 3 + 4	2Es	9 halve tonen	$l_9 = 1{,}6818$ L	$o_9 = 0{,}6357$ L	$p_9 = 1{,}6357$ L	+ 2,7
1 + 3 + 4	2D	10 halve tonen	$l_{10} = 1{,}7818$ L	$o_{10} = 0{,}6983$ L	$p_{10} = 1{,}6983$ L	+ 4,7
1 + 2 + 3 + 4	2Des	11 halve tonen	$l_{11} = 1{,}8877$ L	$o_{11} = 0{,}7583$ L	$p_{11} = 1{,}7583$ L	+ 6,9

tabel 3 Verloop van l, o en p en de procentuele afwijking als functie van de verlaging voor een 4-ventielsbugel met een kwartventiel

In tabel 3 is te zien dat de afwijkingen voor de vier laagste tonen snel toeneemt naarmate de toon lager is. De afwijking voor de 2E is nog gelijk aan die voor een basbugel maar de drie laagste tonen zijn aanmerkelijk te hoog. Om de afwijking van het 6,9 % te hoog zijn van de 2Des te compenseren is een trigger nodig die een verschil $l_{11} – p_{11} = 0{,}1294$ L kan compenseren. Voor L = 1480 mm geeft dit $l_{11} – p_{11} = 192$ mm. De trigger moet dan een slag kunnen maken van 96 mm wat extreem veel is en technisch en ergonomisch waarschijnlijk onmogelijk is.

Zelfs als de tr3, die een slag heeft van 23,5 mm, ook gebruikt wordt, blijft er voor de tr4 nog 72,5 mm over wat nog steeds te veel is. Wanneer er vanuit gegaan wordt dat voor de tr4 een slag van 40 mm technisch en ergonomisch nog realiseerbaar is dan moet de 2Des bij gebruik van beide triggers nog steeds extra met embouchure verlaagd worden om zuiver te klinken.

Ik denk dat met bovenstaande berekeningen afdoende aangetoond is dat het met een 3-ventielsbugel met een kwartventiel moeilijk is om vanaf de 1C een zuivere chromatische toonladder omhoog te spelen, zelfs als er een trigger op het derde en op het vierde ventiel zit. Het bedienen van twee triggers die geen vaste stand hebben en waarvan de benodigde slag afhangt van de toon die gespeeld wordt, lijkt me erg lastig.

In figuur 1 is goed te zien dat voor de basbugel, ofte wel een 4-ventielsbugel met een kwintventiel, de theoretische benodigde verlenging veel dichter benaderd wordt dan voor een 4-ventielsbugel met een kwartventiel. Een nadeel van een 4-ventielsbugel met een kwintventiel is dat voor de 2D, de 2Es, de 2E en de 2F afwijkende vingerzettingen nodig zijn maar deze afwijkende vingerzettingen zijn eenvoudig aan te leren.

7 Verificatie van de juistheid van de gebruikte theorie

Over een eerder versie van dit rapport werd gediscussieerd op het panel van www.trompet.nl. De belangrijkste kritiek had betrekking op het feit dat ik bij mijn berekeningen van de onzuiverheid alleen rekening houd met de verhouding tussen de theoretisch benodigde lengte van de ventielbuizen en de werkelijke buislengte, en met de onzuiverheid van bepaalde natuurtonen ten opzichte van de gelijkzwevende stemming. De kritiek werd ook geleverd door mensen die het rapport niet gelezen hadden wat op zich niet erg is omdat ze wel eerdere rapporten van mij over onzuiverheid gelezen hadden waarin dezelfde rekenmethode gebruikt wordt. Door Erik Veldkamp werd een zeer interessant artikel van Renold Schilke aangehaald waaruit blijkt dat er behalve de twee aspecten waarmee ik rekening houd nog veel meer factoren zijn die de zuiverheid van een instrument bepalen. In een goed ontworpen bugel zal zo goed mogelijk met al deze aspecten rekening gehouden zijn.

Mijn verweer tegen de aanval op de door mij gebruikte eenvoudige theorie is dat ik niet een heel nieuw instrument aan het ontwikkelen ben maar dat ik uitga van een goed ontworpen 3-ventielsbugel waar ik alleen een vierde kwintventiel aan toevoeg op een zodanige wijze dat dit een minimale invloed heeft op het normale bereik. Een ander argument waarom mijn theorie best bruikbaar zou kunnen zijn is dat de door Schilke beschreven aspecten mogelijk alleen maar van belang zijn voor het normale, het hoge en het zeer hoge register en dat zij voor zeer lage tonen wel eens nauwelijks invloed zouden kunnen hebben. Ook met deze stelling was men het niet eens en ik heb daarom besloten om met een eenvoudig proefje aan te tonen dat mijn eenvoudige theorie in ieder geval voor de lage tonen op een 4-ventielsbugel wel degelijk gebruikt mag worden.

Ik gebruik hiervoor mijn eigen Yamaha 631 bugel en men kan zich voorstellen dat ik er niet zo veel voor voel om dit instrument te slopen door een draaiventiel vlak voor het 1^{e} ventiel te plaatsen. Ik heb daarom besloten om geen ventiel te gebruiken maar gewoon een extra stuk buis in te voegen tussen de stembuis en het begin van de hoofdbuis. Hierdoor kan nog geen chromatische toonladder gespeeld worden van de C naar de 2C maar de zuiverheid van de vijf tonen direct boven de grondtoon kan wel gecontroleerd worden.

De stembuis heeft een buitendiameter van 11,5 mm en een binnendiameter van 10,5 mm. Een buis waar ik gemakkelijk aan kan komen is koperen buis van 12 mm waarvan de binnendiameter 10 mm is. Eén eind heb ik over een lengte van ongeveer 15 mm afgevijld tot 11,5 mm zodat het in het begin van de hoofdbuis past. Het andere eind verbind ik met de stembuis met een sok van 12 mm en ik wind om beide delen wat tape zodat de verbinding luchtdicht is.

In hoofdstuk 4 werd berekend dat om met het 4^{e} ventiel een kwint te verlagen, een stuk buis van 737 mm zou moeten worden toegevoegd en deze lengte heb ik in eerste instantie gekozen. Omdat een bugel in Bes staat heb ik mijn key board een toon lager afgesteld.

Voor de gekozen buislengte klonk een 2F nog iets lager dan een lage F van het key board. Ik heb toen nog 5 mm van de buis afgehaald zodat de toegevoegde lengte 732 mm bedraagt en toen was het OK. De fout is dus maar erg gering t.o.v. de totale theoretische buislengte die 2217 mm bedraagt. Daarna heb ik in de buis, een omhoog staande lus met vier bochten van 90° gemaakt, omdat een rechte buis zo lang is dat ik daarmee niet bij de ventielen kan komen. De sok heb ik daarna aan de buis gesoldeerd.

Vervolgens heb ik mijn bugel zo afgesteld dat 2 + 3 zuiver is, waar ik bij de berekeningen ook vanuit ben gegaan. Daarna heb ik de 2Des met 1 + 2 + 3 en de 2Es met 1 + 2 gespeeld. Deze tonen zijn zeer zuiver zoals dat uit mijn berekeningen volgt. Vervolgens heb ik de 2D met 2 + 3 en de 2E met 2 gespeeld. Deze tonen zijn wat te hoog zoals dat ook uit mijn berekeningen volgt maar de afwijking is nog makkelijk met lipspanning te corrigeren omdat de lipspanning erg los is. Een trigger op het 4e ventiel is dus niet absoluut noodzakelijk.

Hierbij is volgens mij aangetoond dat mijn eenvoudige theorie waarbij alleen naar de buislengtes gekeken wordt wel degelijk bruikbaar is voor de lage tonen, wanneer van een goed ontworpen bugel uitgegaan wordt.

Ik heb vervolgens op het instrument gespeeld met alleen gebruikmaking van de vijf tonen direct boven de grondtoon 1C om te ervaren hoe lang het duurt om te wennen aan de nieuwe vingerzettingen. Na ongeveer een kwartier was ik in staat om allerlei melodietjes te spelen waarbij deze vijf tonen gebruikt worden. Het spreekt vanzelf dat het lastiger is om deze vingerzettingen te gebruiken wanneer vlak van te voren, tonen een octaaf hoger gespeeld zijn met de normale vingerzettingen maar het moet zeker binnen een paar dagen aan te leren zijn.

Vervolgens heb ik gecontroleerd hoe het instrument stemt voor de natuurtonen die gespeeld kunnen worden met de toegevoegde buislengte van een kwintventiel. De zuiverheid van deze natuurtonen is nog heel acceptabel hoewel dat helemaal niet nodig is omdat deze tonen normaal niet gebruikt worden. De grondtoon 1F spreekt moeilijk aan maar dit komt vooral omdat de benodigde embouchure zeer los is en ik daar niet aan gewend ben. Men moet zeer laag in het mondstuk spelen maar als het eenmaal lukt is de 1F makkelijk zuiver te spelen. Als het eenmaal lukt dan is de 1E ook nog te spelen maar nog lager was voor mij momenteel eigenlijk niet meer te doen. Het lijkt dus redelijk om er van uit te gaan dat de 1E bij gebruikmaking van een normaal mondstuk in de praktijk de laagst speelbare toon is.

De volgende stap is om de proef uit te voeren met een echt 4^{e} ventiel maar het instrument hoeft nog niet zo te zijn dat dit ventiel ergonomisch goed te bedienen is. Het zou kunnen zijn dat het 4^{e} ventiel de zaak verziekt maar dit lijkt me niet voor de hand liggend. Deze proef laat ik het liefst uitvoeren door een instrumentbouwer. Met dit 4^{e} ventiel kan dan gecontroleerd worden of inderdaad goed een chromatische toonladder omhoog te spelen is vanaf de grondtoon 1C. Ook kan gecontroleerd worden of het vierde ventiel de eigenschappen in het normale bereik niet ongunstig beïnvloedt. Pas als deze proef bevredigend is verlopen heeft het zin om de vorm en bevestiging van de buis en de ergonomie van de bediening van het 4^{e} ventiel te optimaliseren. Ook zal dan beslist moeten worden of, wanneer geen trigger op het 4^{e} ventiel gebruikt wordt, het nodig is om het vierde ventiel te kunnen stemmen. Het lijkt mij dat de lengte van de stembuis van het vierde ventiel zo nauwkeurig bepaald kan worden dat stemmen van dit ventiel niet nodig is. Hierdoor hoeft de bocht niet uitgeschoven te kunnen worden en dit vergemakkelijkt de bevestiging van deze ventielbuis aan het instrument.

Ikzelf heb geen intentie om basbugels te gaan fabriceren of verkopen. Misschien kom ik er wel aan toe om van oude instrumenten een prototype te bouwen waarmee aangetoond kan worden dat het idee werkt en dat het instrument te bespelen is. Het liefst zou ik echter hebben dat een muziekinstrumentmaker dit doet. In deze KD-notitie heb ik het idee alleen willen vastleggen. Deze KD-notitie kan door iedereen bij het menu ”no wind energy” van mijn website: www.kdwindturbines.nl gekopieerd worden. Doordat het idee hierbij vrijgegeven wordt kan het door niemand geoctrooieerd worden. Iedereen is vrij om een basbugel te bouwen en te verkopen en hoeft daarvoor niets aan mij te betalen. Daarentegen wil ik ook niet financieel in de ontwikkeling investeren. Ik stel het wel op prijs om een prototype te testen en om als bedenker van de basbugel vernoemd te worden.