

Berekeningen en Voorbeelden van de Toetstructuur voor Huisorgels

Inleiding

De speelaard van een (huis-)orgel wordt bepaald door alle onderdelen die in beweging worden gezet bij het indrukken van de toets en het opengaan van de speelklep zodat de orgelwind een pijp kan laten klinken. Allereerst is dat de toets zelf, dan de tractuur tussen de toets en de speelklep en tenslotte de speelklep. Al die bewegende onderdelen bij elkaar geven een orgel zijn specifieke speelaard. De speelaard van een orgel kan men beïnvloeden bij het ontwerp van het orgel. Voor bijvoorbeeld een klavecimbel- of pianoaanslag gebruikt men bijvoorbeeld een balansklavier. Voor het echte 'orgelgevoel' is een staartklavier meer geëigend. Beide systemen komen in dit excerpt aan de orde.

Hoe was het ook al weer...

Alle berekeningen aan de tractuur van een orgel zijn te herleiden tot de werking van een hefboom. Voor de hefboom geldt de volgende regel:

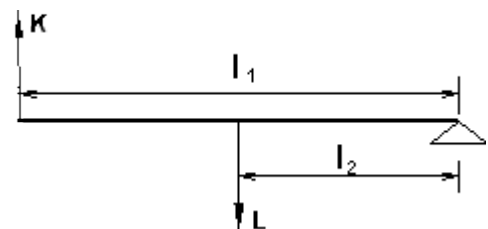
$$(*1) \quad \text{kracht} \times \text{krachtarm} = \text{last} \times \text{lastarm}$$

In figuur 1 is deze regel praktisch weergegeven. Hierbij is de berekening als volgt:

$$K \times l_1 = L \times l_2$$

Werken we deze formule uit in een getallen voorbeeld, waarbij $K =$ gevraagd, $L = 10 \text{ kg}$, $l_1 = 2 \text{ m}$, $l_2 = 1 \text{ m}$, dan is de berekening met formule 1 als volgt:

$$\begin{aligned} K \times 2 &= 10 \times 1 \\ K &= (10 \times 1) : 2 \\ K &= 5 \text{ kgf} \end{aligned}$$

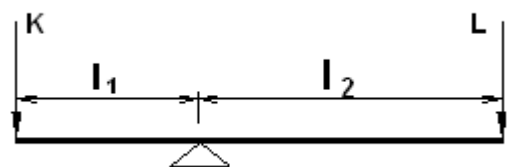


Figuur 1 Werking van de hefboom

Of in woorden: met een hefboom waarbij de krachtarm en de lastarm zich verhouden als 2 : 1 kun je met een kracht van 5 kgf een gewicht van 10 kg optillen. Dat is handig. En door het veranderen van de verhouding 'krachtarm : lastarm' kan je zelfs met minder inspanning een groter gewicht optillen.

Een andere veel voorkomende vorm van de hefboom is de wip (figuur 2). Ook hierbij geldt $K \times l_1 = L \times l_2$. Voorbeeld: als gegeven is dat $K = 100 \text{ kg}$, $L = 25 \text{ kg}$, $l_1 + l_2 = 5 \text{ m}$, wat is dan de lengte van l_1 en l_2 in geval van evenwicht? De berekening is als volgt:

$$\begin{aligned} K \times l_1 &= L \times l_2 \\ 100 \times l_1 &= 25 \times l_2 \\ 100l_1 &= 25l_2 \rightarrow l_1 = 0,25l_2 \\ l_1 + l_2 &= 5, \text{ substitutie van } l_1 \rightarrow \\ 0,25l_2 + l_2 &= 5 \rightarrow l_2 = (5 : 1,25) = 4 \text{ m} \\ l_1 &= (5 - 4) = 1 \text{ m} \end{aligned}$$



Figuur 2 Hefboomwerking bij een wip

In de praktijk komt dit voorbeeld wel voor in de speeltuin: een kind van 25 kg kan een volwassene van 100 kg opwippen mits beide op de juiste afstand van het draaipunt van de wip gaan zitten.

Tractuurberekeningen

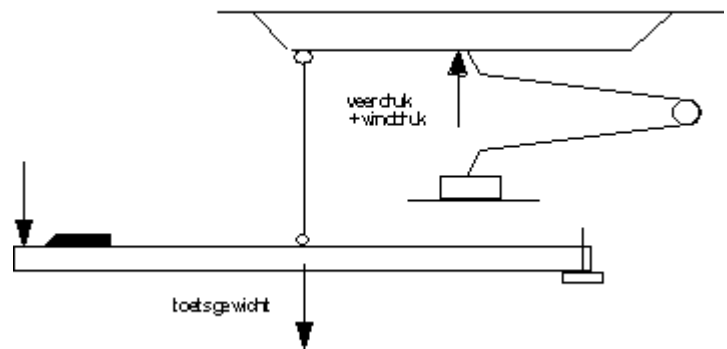
Bij de berekeningen in de volgende voorbeelden verwaarlozen we de wrijvingskrachten en het gewicht van de trekdraden en dergelijke. Ook gaan we er van uit dat de gebruikte klepveren een constante druk leveren.

Staartklavier

Voor een voorbeeldberekening van een toetsdruk is in figuur 3 een eenvoudige tractuur gegeven. Dit voorbeeld gaat uit van een staartklavier dat direct aan de speelklep hangt.

De speelklep wordt door een veer dicht gehouden. De kracht van deze veer moet minimaal gelijk zijn aan de gewichten die de klep open willen trekken. Dat zijn het gewicht van de klep zelf en het gewicht van de toets. Nemen we voor het gewicht van de klep 30 gram en voor het toetsgewicht 60 gram.

In dit voorbeeld hangt de toets aan het einde van de klep en drukt de veer in het midden. We hebben hier dus te maken met een hefboomwerking met een overzetverhouding van 2 : 1. We berekenen de trekkracht die het toetsgewicht op de veer oefent met formule 1 als volgt, als L het toetsgewicht is en K de veerdruk' daarvoor:



Figuur 3 Tractuur met staartklavier

$$\begin{aligned}L \cdot l_1 &= K \cdot l_2, \\ \text{waarin } l_1 : l_2 &= 2 : 1 \\ \text{Toetsgewicht} \cdot 2 &= \text{veerdruk}' \cdot 1 \\ 60 \cdot 2 &= \text{veerdruk} \cdot 1 \quad \rightarrow \text{veerdruk}' = (2 \times 60) = 120 \text{ gf}\end{aligned}$$

Tellen we hierbij het gewicht van de klep op die ook door de veer omhoog gehouden wordt, dan wordt de minimaal benodigde totale veerdruk: $120+30=150$ gf. Naast de veerdruk drukt ook de winddruk de klep dicht. Nemen we als voorbeeld een speelklep van 100×12 mm en een winddruk van 50 mmWk. 1 mmWk komt overeen met een druk van $0,1 \text{ gf/cm}^2$. Dit geeft een winddruk op de klep van 60 gf. Is de orgelmotor ingeschakeld dan wordt de speelklep dicht gedrukt door de veer en door de winddruk. Samen geeft dit een klepdruk van:

$$\text{klepdruk} = 150 + 60 = 210 \text{ gf}$$

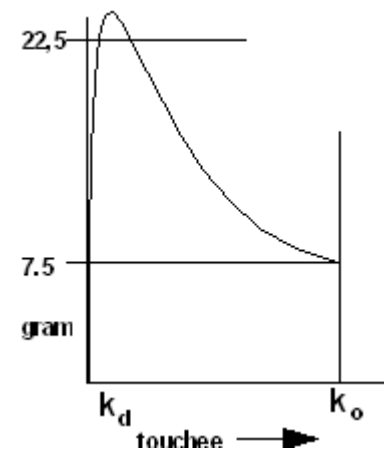
Deze klepdruk wordt uitgeoefend in het midden van de klep maar de toets trekt aan het einde van de klep zodat we ook hier te maken hebben met een hefboom met een overzetverhouding van 2 : 1. De trekkracht van de toets bepalen we als volgt:

$$\begin{aligned}\text{trekkracht} : \text{klepdruk} &= 1 : 2 \\ \text{trekkracht} &= (\text{klepdruk} : 2) = 210 : 2 = 105 \text{ gf}\end{aligned}$$

Op de toets grijpt de tractuur in het midden aan, terwijl de vinger de toets op het einde indrukt. Ook hiervoor geldt een hefboom met een overzet verhouding van 2 : 1. De druk die de vinger op de toets moet uitoefenen is dus de helft van de trekkracht. Deze is dus $105 : 2 = 52,5$ gf (k_d). Als gevolg van deze hefboom is ook de beweging van de klep gehalveerd. Gaat de toets bijvoorbeeld 10 mm naar beneden, dan zal de speelklep zich de helft hiervan, 5 mm, openen.

Is de speelklep geopend dan kunnen we de winddruk die op de speelklep wordt uitgeoefend verwaarlozen, m.a.w. alleen de veer oefent nog druk uit op de klep uit. Berekenen we nu de toetsdruk opnieuw, dan vinden we voor de toetsdruk bij geopende speelklep een druk van 37,5 gf (k_o).

Het drukverloop van het balansklavier begint vrijwel 'drukloos', waarna het zeer snel stijgt tot het punt k_d . In dit deel van de toetsbeweging wordt alle speling in de tractuur en de eventuele -bewust aangebrachte- vrije slag van de tractuur overwonnen tot dat de tractuur 'strak' staat bij k_d . Deze vrije slag ontbreekt bij het staartklavier omdat daarbij de toets via de tractuur direct aan de klep hangt en de tractuur dus steeds strak staat. De staarttoets heeft hierdoor een zeer direct contact met de speelklep. Na het punt k_d voelen we in de toets de weerstand van de speelklep. Deze verloopt via de turbulentie hobbel tot het punt k_o . Op dit punt hebben slechts een druk van 7,5 gf nodig om de toets naar beneden te houden. Deze zeer geringe waarde hebben we gevonden door de bij de berekeningen voor zowel het staartklavier als het balansklavier van dezelfde voorwaarden uit te gaan. Hierdoor zijn de grafieken van het toetsdruk verloop vergelijkbaar.



Figuur 6 Drukverloop bij een balansklavier.

Opmerkelijk verschil tussen beide systemen is de benodigde kracht van de klepveer. Bij het staartklavier is dit 150 gf en bij het balansklavier 30 gf. In de praktijk zal bij het gebruik van een balansklavier een wat zwaarder veertje worden gekozen maar dat kan lichter zijn dan bij het staartklavier, immers het veertje behoeft niet het gewicht van de toets omhoog te houden.

Vergelijken we het drukverloop van het staartklavier en het balansklavier, of anders gezegd de speelaard van de klavieren, dan is dit niet te beoordelen in goed of slecht. Spelers die een klavecimbel of piano gewend zijn zullen de speelaard van een balansklavier prefereren omdat het drukverloop hiervan het meest overeenkomt met de toetsaanslag van deze instrumenten. Bij zo'n tractuur kan de toets een stukje onafhankelijk van de speelklep bewegen doordat de toets niet direct aan de klep hangt. Door deze vrije slag kan men de toetsen licht aanraken zonder dat de speelklep geopend wordt. Organisten zullen veelal de voorkeur geven aan een staartklavier omdat dit systeem hen een direct tactiel-contact (drukgevoel) geeft met de speelklep.

Veerdruk

De druk die een veertje op de speelklep kan uitoefenen wordt bepaald door de lengte van de armen en het aantal windingen van het oogje. Des te meer windingen des te slapper is de veer, maar ook des te constanter is de veerdruk. Dat wil zeggen dat bij het indrukken van de veer de kracht min of meer gelijk blijft. Zou je bijvoorbeeld geen windingen nemen, of een halve slag zonder dat er een oogje ontstaat, dan heb je wel een sterke veer maar zonder constante veerdruk. Hoe verder je zo'n veertje indrukt hoe 'zwaarder' hij gaat. Voor toepassing als klepveer in een orgel is dat niet gunstig. Het gevolg is namelijk dat hoe verder je de klaviertoets indrukt des te meer kracht er nodig is. Dat geeft een zwaar touché. Bij de berekeningen aan de tractuur zijn we er van uit gegaan dat de veerdruk constant blijft tijdens het open gaan van de klep.

De veerdruk is, naast de lengte van de armen en het aantal windingen, ook afhankelijk van de diameter van het oogje. Maak je het oogje kleiner dan wordt het veertje stugger. Maak je daarentegen de armen langer dan wordt het veertje slapper. Een te slap veertje kan je dus 'opwaarderen' door de armen wat in te korten. Bij de huisorgels die ik tegen kwam waren de armen meestal zo'n 8 tot 10 cm en het oogje 8 tot 10 mm. Verder is het materiaal van het verendraad van belang. De meest voorkomende zijn: roestvrijstaaldraad, fosforbronsdraad en messingdraad. De PBNA-bijbel (*3) geeft hiervoor o.a. de volgende materiaalconstanten:

	E (kN/mm ²)	s (N/mm ²)
Roestvrijstaaldraad	170	800
Fosforbronsdraad	120	500
Messingdraad	100	280

E = elasticiteitsmodulus, s (sigma) = buigspanning.

De buigspanning s heeft te maken met de veerkracht van het materiaal. Het is aangegeven in Newton (*4) per mm². De tabel geeft aan dat een messingdraadje aanzienlijk dikker moet zijn dan een staaldraadje voor

dezelfde veerkracht. Let op, het gaat hierbij om de oppervlakte van de draad en niet om de doorsnede. Een staaldraadje van 1 mm Ø heeft dus evenveel veerkracht als een messingdraadje van 1,7 mm Ø. De eigenschappen van fosforbronsdraad zitten hier tussenin. De elasticiteitsmodulus heb je o.a. nodig bij het berekenen van het aantal windingen van een veertje. Het geeft aan dat roestvrijstaaldraad ($E = 170$) meer windingen toestaat dan messingdraad ($E = 100$) om een even sterk veertje te buigen.

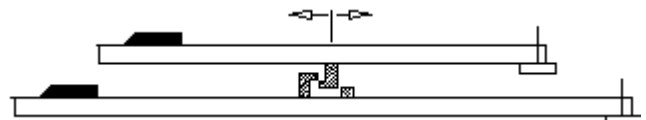
Maak eerst een paar proefveren en test deze met een brievenweger. Houdt daarbij een veerarm tegen je vinger en laat de andere tegen de brievenweger drukken. Druk dan de veer net zover in als later het orgel. Lees nu de veerdruk af op de brievenweger. Om te controleren of de veerdruk constant is druk je het veertje iets meer of iets minder in. Blijft de weegschaal ongeveer hetzelfde gewicht aangeven dan is het veertje goed. Varieert het gewicht nogal neem dan wat dikker materiaal en meer windingen voor het oogje. Bij de ideale veer is de hoek tussen de veerarmen niet meer van invloed op de veerdruk.

Klavierkoppelingen

Om de speelmogelijkheden van een (huis-)orgel te vergroten worden tussen de klavieren koppelingen aangebracht. Voorwaarden voor een goede klavierkoppeling zijn dat de gekoppelde toets geheel wordt ingedrukt en dat de speelaard niet onnodig zwaar wordt. Een eenvoudige model van een klavierkoppeling wordt weergegeven in figuur 7. Hierbij kan door middel van een verschuifbaar klavier een koppeling gemaakt worden tussen manuaal I en II, of tussen manuaal II en I.

De werking is als volgt: schuift de speler het bovenklavier van zich af, dan wordt bij het indrukken van een toets op dit klavier tevens een toets van het onderklavier ingedrukt. Trekt men het bovenklavier naar zich toe, dan trekt een ingedrukte toets van het onderklavier een toets van het bovenklavier met zich mee. In de middenstand wordt geen koppeling tot stand gebracht. Men bedient de koppeling door de bakstukken van het bovenklavier te verschuiven. Hiervoor moet men twee handen gebruiken zodat wordt voorkomen dat men met ingedrukte toetsen de koppeling bedient.

Voor een correcte koppeling is het van belang dat de toetsen elkaar voor –nagenoeg- de volledige toetsgang meenemen. Dit wordt bewerkstelligd door de toetsen op het juiste punt aan elkaar te koppelen. Berekenen we dit punt aan de hand van figuur 8. Als voorbeeld nemen we de volgende maten voor de klavieren: bovenklavier 40 cm, onderklavier 64 cm. Dit laatste klavier moet, voor een goede werking bij dit systeem van koppelen, altijd langer zijn dan het bovenklavier.



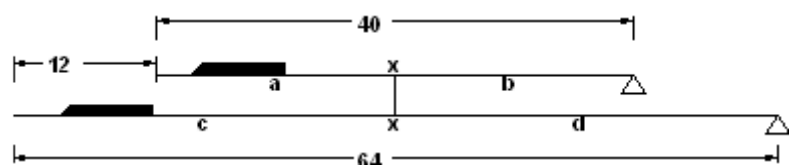
Figuur 7 Voorbeeld waarbij de manuaal-koppeling tot stand gebracht wordt door het verschuiven van het bovenklavier.

Op het punt x , waar de koppeling tot stand gebracht wordt, moet de diepgang van beide klavieren gelijk zijn. Dit bereikt men door de verhouding van de stukken a en b gelijk te maken aan de verhouding van de stukken c en d . In formule:

$$a : b = c : d$$

of ook:

$$a : l_1 = c : l_2$$



Figuur 8 Schematische weergave van figuur 7.

waarin l_1 en l_2 de lengten van de toetsen zijn. Als de ondertoetsen 12 cm voor de boventoetsen uitsteken, dan kunnen we voor stuk c ook invullen: $a + 12$. Het stuk a laat zich nu als volgt berekenen:

$$100 \cdot l_1 = k_x \cdot l_b$$

$$100 \cdot 40 = k_x \cdot 20 \text{ à } k_x = 200 \text{ gf}$$

hierin is k_x de kracht van het gekoppelde klavier op punt x . Op het gespeelde klavier neemt men dit waar als k_t . Hiervoor geldt:

$$k_t \cdot l_2 = k_x \cdot l_d$$

$$k_t \cdot 64 = 200 \cdot 32 \text{ à } k_t = 100 \text{ gf}$$

Telt men hierbij de eigen kracht van het klavier op, dan geldt voor gekoppelde klavieren een kracht van 200 gf, hetgeen gelijk is aan de som van de krachten van de afzonderlijke klavieren.

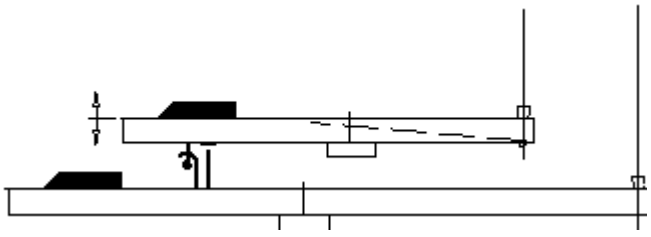
Koppelingen volgens het boekje

Oosterhof en Bouman geven in hun boek 'Orgelbouwkunde' drie voorbeelden van krachtberekening bij gekoppelde klavieren (blz. 136 e.v.). De uitkomsten zijn in twee gevallen lager en in een geval hoger dan de som van de kracht van de afzonderlijke klavieren. De oorzaak hiervan is dat het gekoppelde klavier niet over zijn gehele diepgang wordt meegenomen (lagere som), of te laat wordt meegenomen (hogere som). Als het gekoppelde klavier niet over zijn volledige diepgang wordt meegenomen, zullen ook de speelkleppen van dat klavier niet geheel worden geopend, wat als gevolg zal hebben dat "het spreken van de pijpen niet geheel naar wens zal plaatsvinden" (*Oosterhof en Bouman*). In het geval dat het gekoppelde klavier te laat wordt meegenomen zal pas in het laatste deel van de toetsgang van het gespeelde klavier de koppeling plaatsvinden. De speelkleppen van beide klavieren zullen nu wel geheel worden geopend. Het nadeel is echter dat de benodigde kracht hoger is als de som van de afzonderlijke klavieren.

Bormann geeft in zijn boekje 'Heimorgelbau' een voorbeeld van een dubbelwerkende manuaalkoppeling (blz 85). Hierbij is het bovenklavier in een draaibaar raamwerk gevat. Het scharnierpunt van dit raam ligt ongeveer op de plaats waar de tractuur aangrijpt zodat bij het op en neer bewegen van het klavierraam dit aangrijpingspunt bijna niet verandert (fig. 9).

Als het raamwerk in de onderste stand staat drukt een boventoets middels een stift ook een toets van het onderklavier in. Staat het raamwerk in de hoogste stand dan trekt een haakje op de toetsen van het onderklavier ook het bovenklavier mee. Gaan we er van uit dat Bormann's figuur in de juiste verhoudingen is getekend, dan kunnen we voor de klavieren en het koppelpunt de volgende maatvoering herleiden (fig 10).

Met behulp van formule 1 berekenen we de toetsdruk als het onderklavier ook een toets van het bovenklavier meeneemt bij een toetsdruk van 100 gf.

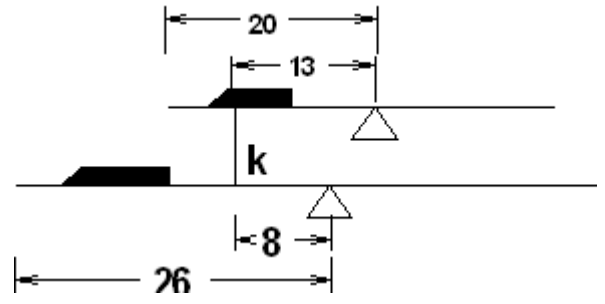


Figuur 9 Principe van de manuaalkoppeling uit Bormann's 'Heimorgelbau'.

$$100 \cdot 20 = k_k \cdot 13 \rightarrow k_k = 154 \text{ gf}$$

hierin is k_k de kracht op het koppelpunt. Dit geeft op het onderklavier een toetsdruk van (k_t):

$$k_t \cdot 26 = 154 \cdot 8 \rightarrow k_t = 47 \text{ gf}$$



Figuur 10 Maatvoering bij figuur 9.

Vermeerdert men deze kracht met de eigen toetsdruk van het onderklavier, dan vindt men voor de gekoppelde klavieren een kracht van $100 + 47 = 147$ gf. Dit is kleiner dan de som

-200 gf- van de afzonderlijke klavieren, hetgeen doet vermoeden dat de toets van het bovenklavier niet voor zijn gehele diepgang wordt meegenomen. Berekenen we de diepgang van een boventoets (l_{tb}) als deze door de koppeling wordt meegenomen door een ondertoets met formule 2, waarbij we voor de diepgang van de ondertoets 10mm (l_{to}) nemen.

$$l_{to} : l_1 = l_k : l_2$$

$$10 : 26 = l_k : 8 \quad \rightarrow l_k = 3 \text{ mm}$$

hierin is l_k de diepgang van de ondertoets op het koppelpunt. Voor de boventoets geldt dan:

$$3 : 13 = l_{tb} : 20 \quad \rightarrow l_{tb} = 4,6 \text{ mm}$$

hierin is l_{tb} de diepgang van de gekoppelde boventoets. Is de normale diepgang van de boventoets 10mm, dan wordt de boventoets in gekoppelde toestand slechts voor iets minder dan de helft meegenomen, m.a.w. ook de speelklep opent zich maar voor de helft. Dit zal zeker effect hebben op het spreken van de pijpen.

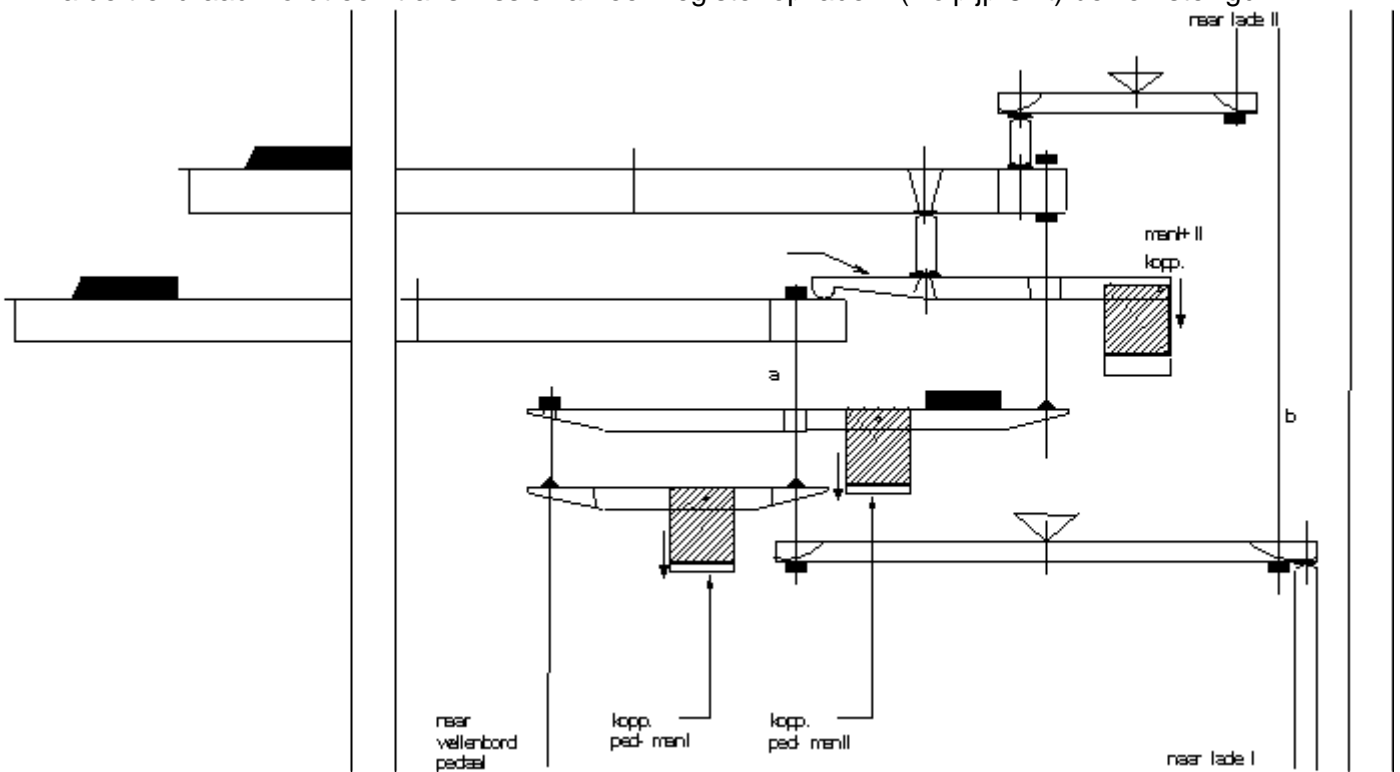
Pedaalkoppelingen

Om de speelmogelijkheden van het pedaalklavier te vergroten worden naast zelfstandige stemmen op het pedaal ook koppelingen naar de klavieren aangebracht. Bij een tweeklaviers orgel geeft dat de volgende mogelijkheden: Ped – Man I, Ped – Man II, Ped – Man I+II. Is er ook een klavierkoppeling aangebracht dan heeft het de voorkeur dat deze koppeling niet door de pedaalkoppeling wordt meegetrokken. Figuur 11 geeft hiervan een voorbeeld.

Krachtberekeningen bij pedaalkoppelingen zijn niet interessant. Meestal is de veer van de pedaaltoets al vele malen 'zwaarder' dan de kracht die nodig is om een manuaaltoets in te drukken zodat een paar honderd gram meer of minder niet zal opvallen. We laten de berekeningen hier dan ook achterwege.

Figuur 11 geeft een voorbeeld van de tractuur en koppelingen bij een huisorgel (in aanbouw). Hierin zijn alle wippen getekend die nodig zijn om de klavieren met de windladen te verbinden en koppelingen tot stand te brengen. De wippen waarbij het draaipunt door een driehoekje is weergegeven staan in spreidstand.

De wippen voor de koppelingen zijn in balkjes gemonteerd die in gleuven op en neer bewogen kunnen worden. Alle koppelingen zijn in 'Aan' stand getekend (hoge stand). De 'Uit' stand (lage stand) is door een wit vakje aangegeven. De koppeling Ped - Man I werkt onafhankelijk van de koppeling Man I – Man II. Dit wordt bereikt doordat de trekdraad a vrij door de toets op en neer kan bewegen. Om het verschil in diepgang van het pedaalklavier en de manuaalklavieren te overbruggen, zijn de wippen voor de pedaalkoppelingen in een overzet verhouding van 1 : 1,5 uitgevoerd. Bij de wippen van de koppeling Ped – Man II zijn op de korte armen kleine stukjes lood aangebracht. Deze houden de wippen naar beneden zodat ze in rust geen druk op de tractuur uitoefenen. Bij de veel kleinere wippen van de koppeling Ped – Man I is niet nodig. In dit voorbeeld heeft de tractuur van Man I een steker naar lade I en een trekdraad (b) naar lade II. Via de trekdraad wordt een transmissie van een register op lade II (Holpijp 8 vt) bewerkstelligd.



Figuur 11 Voorbeeld van tractuur en koppelingen bij een huisorgel.

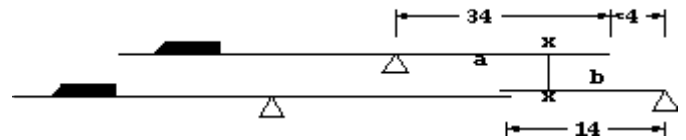
In de praktijk

In dit excerpt zijn slechts enkele voorbeelden gegeven van tractuur en koppelingen. Voor het ontwerpen van een tractuur voor het eigen (huis-)orgel is het raadzaam om de voorhanden zijnde orgelliteratuur te raadplegen. Men zal hierin echter zelden een direct toepasbaar ontwerp vinden voor de eigen specifieke situatie. Kan men uit het ene boek de tractuur en uit een ander boek een koppeling gebruiken, dan is het noodzaak het ontwerp door te rekenen op krachten en bewegingen. De in dit excerpt gegeven formules zijn daarvoor in bijna alle gevallen toereikend. De gegeven voorbeelden gaan uit van wippen waarvan de armen in het verlengde liggen van elkaar. Voor wippen waarvan de armen onder een hoek staan gelden dezelfde berekeningen. Men neemt dan voor de lengte van de arm de afstand tussen het draaipunt en het aangrijppunt.

Passen we de gegeven formules toe op het ontwerp van figuur 11. Bij dit ontwerp werd uitgegaan van bestaande klavieren (afbraak orgel). Voor de opzet van de manuaalkoppeling werd geput uit de talloze voorbeelden die *Audsley* geeft in zijn boek 'The Art of Organ-Building' (II, blz 183). Dit ontwerp gaat uit van een éénarmige wip waarvan een uiteinde rust op het uiteinde van de staart van het onderklavier. Bij de gekozen opzet schuift de koppelbalk tussen de –verlengde- bakstukken van het onderklavier op en neer om de koppeling te bedienen. Hierdoor ligt de lengte van de wip vast (fig. 12). Bij dit ontwerp is er voor gekozen om beide klavieren dezelfde diepgang te geven. Veelal kiezen orgelbouwers voor een kleinere diepgang van het tweede klavier, bijvoorbeeld 8 mm terwijl het hoofdklavier bijvoorbeeld een diepgang heeft van 10 mm.

Vinden we door berekening de plaats *x* op de wip waar deze middels een steker de toets van het bovenklavier zover omhoog drukt dat beide klavieren een even grote slag maken.

Het einde van de wippen voor de manuaalkoppeling rust op de staart van het onderklavier. Dit punt maakt dus dezelfde slag als het uiteinde van de toets van het bovenklavier. Het lijnstuk *b* van de wip zal dus dezelfde verhouding tot de totale lengte van de wip moeten hebben als het lijnstuk *a* van de toetsstaart tot de totale lengte van de toetsstaart. Hierdoor kunnen we de volgende vergelijking opstellen:



Figuur 12 Maatvoering bij figuur 11 voor de berekening van de manuaalkoppeling.

$$a : 34 = b : 14 \quad \text{of:}$$

$$14a = 34b$$

Het verband tussen *a* en *b* vinden we in de tekening als:

$$a + b = 34 + 4 = 38 \text{ cm} \quad \text{à } b = (38 - a)$$

Vullen we dit in de eerste vergelijking in, dan vinden we:

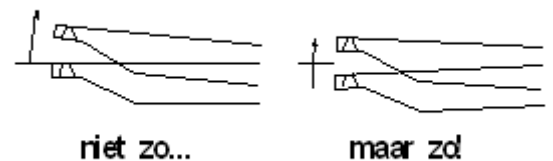
$$14a = 34 \cdot (38 - a)$$

$$14a = 1292 - 34a \quad \text{à } a = 26,9 \text{ mm en } b = (38 - 26,9) = 11,1 \text{ mm}$$

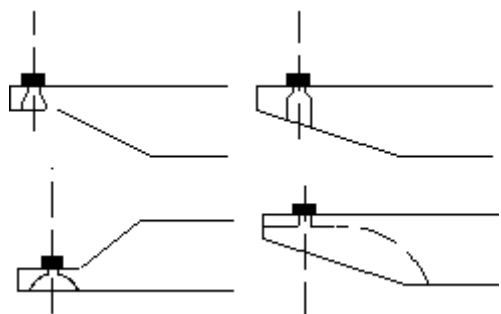
De berekening van de kracht voor het gekoppelde klavier laten we aan de lezer.

Vuistregels

Maak de armen van wippen niet te kort. Bedenk daarbij dat het uiteinde van een wip in feite een cirkelbeweging is. Er zal dus naast een op en neergaande beweging ook altijd een heen en weergaande beweging plaatsvinden. Drukt een arm van een wip direct op een toets of op een andere wip dan merk je dit als wrijving. Een tractuur kan daardoor minder soepel functioneren.



Geef trekdraden en stekers de ruimte. Op de plek waar de trekdraden en stekers aangrijpen op toetsen of wippen moet voldoende ruimte zijn voor de 'cirkelbeweging' die deze maken (figuur 13).



Teken de tractuur bijvoorbeeld uit op ware grootte. Als wippen in spreidstand staan is een tekening op ware grootte een noodzakelijk hulpmiddel voor het overnemen van de hoek waaronder de gleuven in een wippenbalk komen. Men bedenke daarbij dat, zeker als de wippen wat langer zijn, bij een enkele graad verschil in hoek de wip vele millimeters naast de beoogde plaats uitkomt. Nauwkeurigheid is hier dus geboden.

Figuur 13 Voorbeelden van het aangrijppunt van trekdraden op wippen.

Verdeel de beweging over de beschikbare wippen. Moet men middels twee wippen, of een wip en een toets, een slag vergroten c.q. verkleinen, dan heeft het de voorkeur de slag te verdelen over beide wippen. Voor bijvoorbeeld een overzetverhouding van 1 : 2 neemt men tweemaal een overzetverhouding 1 : 2 = 1 : 1,4.

*1 De berekening zou eigenlijk in Newton moeten plaatsvinden. Ter wille van de eenvoud worden alle berekeningen in dit excerpt in kg of gr uitgevoerd. Om onderscheid met gewichten te maken voegen we hieraan een f toe, dus kgf en gf.

*2 Algemene Voorschriften Orgelbouw Nederland

*3 Polytechnisch Zakboekje, Koninklijke PBNA BV, Arnhem 1983

*4 9,80665 N is gelijk aan 1 kgf