DE KUCHELKLOK
UURWERK MET SLINGERGEWICHT

Peter Chevalier, Klokkengroep 's-Hertogenbosch, klokkenbouwen.nl .

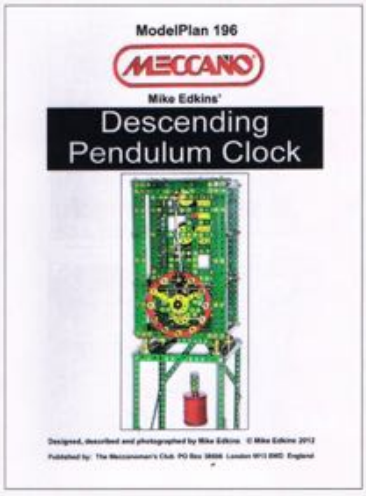
De Klokkengroep 's-Hertogenbosch is een vereniging van circa honderd amateur klokkenbouwers. Voor de leden bieden we een cursus klokkenbouwen aan die een (donder)dag per week loopt van september tot mei. Daarnaast bieden we cursussen klokken repareren basis en gevorderd aan op maandagavonden in samenwerking met Hans Beelaerts van Blokland van Belle Heure in Zeist. In onze eigen fijnmechanische werkplaats bouwen we, vaak naar eigen ontwerp, mechanische klokken. Hieronder is de beschrijving van zo'n ontwerp.

Astrid, de dochter van hobby-uurwerkmaker Philip W. Kuchel tekent hem, negen jaar oud, een vreemde klok. Bovenaan zit er weliswaar een wijzerplaat op een kastje, maar eronder hangen twee dingen die twijfelen of ze slinger of gewicht zijn. Het lijkt in ieder geval de bedoeling dat het gewicht slingert, en zo werkt een klok niet.

Philip W. Kuchel, nu emeritus hoogleraar biochemie van de universiteit van Sydney, laat dat druk-druk-druk een paar jaar rusten, maar ontwerpt eind jaren tachtig een klok die toch wèl zo werkt.

In het Horological Journal van december 1989 beschrijft hij zijn 'Descending Pendulum' klok.

In 1993 verschijnt een vertaling in 'Uhren' het 'Journal für Sammler klassischer Zeitmesser'.



Uurwerk liefhebber en -bouwer Hans Folgering uit Nijmegen merkt dat artikel op, en neemt contact op en bouwt ook zo'n klok (glas-in-lood uit ouderlijk huis wijzerplaat). Hij deelt dat met onze Klokkengroep 's-Hertogenbosch. Ons lid Wim Boon verwerkt het principe in een eigen

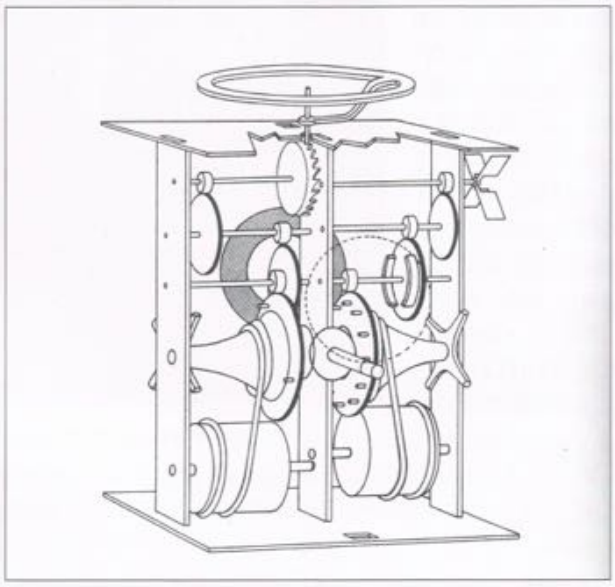
ontwerp (witte wijzerplaat). Philip bezoekt de Klokkengroep 's-Hertogenbosch in de zomer van 2019. Hij combineert dat met een bezoek aan de Rikketik in Houten, een in Australië onbekend fenomeen.

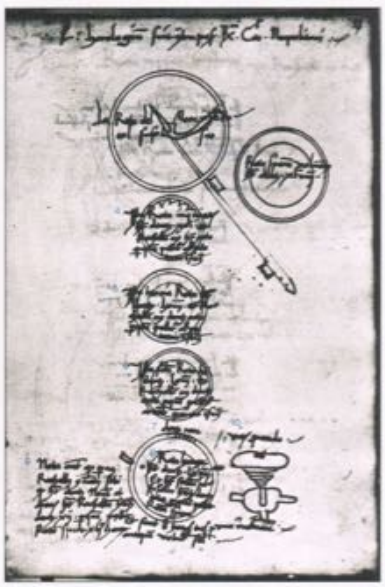
En in 2012 wordt het idee ook opgepikt door de Brit Mike Edkins die met Modelplan 196 'Descending Pendulum Clock' een Meccano versie publiceert voor de Meccanoman's Club.

Dit zijn de vier ons bekende 'slingergewicht' uurwerken. Heel misschien zijn er meer.

Sinds de uitvinding van het slingeruurwerk door Huygens kennen we uurwerken met een beheerste tijdweergave. Slingeruurwerken met een anker-échappement geven de slingeringen sprongsgewijs door aan het ankerwiel door telkens een tand door te laten. De slingertijd is gegeven door de formule $T = 2*p* \sqrt{L/g}$, met L als slingerlengte en g de versnelling van de zwaartekracht. De formule is geldig bij slingerbogen kleiner dan 3o en afwezigheid van wrijving als mechanische wrijving of luchtweerstand. Bij grotere uitslagen wordt de slingerformule gecompliceerder maar er blijft wel gelden $T = \text{constante} * \sqrt{L}$. Het energieverlies aan wrijvingen wordt gecompenseerd door met het anker telkens een impuls aan de slinger te geven (= tikje). Als het gewicht ook als slinger werkt zal bij zakkend gewicht de slingerlengte steeds groter worden en daarmee ook de slingertijd. Als de slingertijd groter wordt duurt het langer voordat het anker de volgende tand doorlaat en zal het ankerwiel langzamer gaan draaien. Om de minuut-as met constante snelheid te laten draaien moeten we die verandering van draaisnelheid compenseren.

Er zijn verschillende mechanismen bekend om verandering van draaisnelheid te compenseren. Bijvoorbeeld een riem tussen twee paar verstelbare conische schijven, met als bekende toepassing de Variomatic van DAF. Of een wrijfwieltje dat met kruisende assen op een schijf van de binnendiameter naar de buitendiameter loopt. En vele varianten van een wrijvingswieltje dat met parallelle assen over een conus of tussen twee tegengestelde conussen loopt.
En, reeds honderden jaren bekend bij uurwerkmakers, een snek. De oudst bekende snek, nu in het Germanisches National Museum in Neurenberg, komt al voor in een uurwerk van Philips de Goede van Bourgondië uit 1430. De snek had toen de functie van het corrigeren van de afnemende krachten, bij het aflopen van de veren, die in die tijd niet isotonisch waren. De oudst bekende beschrijving is van een uurwerk van de kardinaal van Napels vlak na 1480 in 'The Almanus Manuscript' zoals te zien in de uitgebreid geannoteerde uitgave van J.H. Leopold uit 1971. Dat dateert van vóór de bekende schets van Leonardo da Vinci uit 1490.



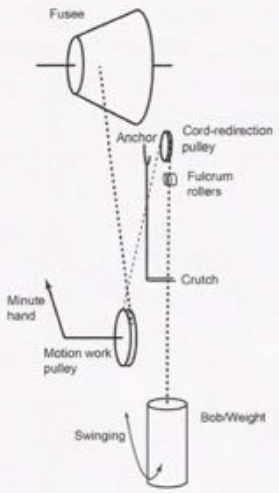


De afbeeldingen uit dit boek laten zien dat het gaat om een vroeg vermoedelijk Vlaams veer-uurwerk met dubbel veerwerk en twee snekken, één voor gaand en één voor slaand werk. In de betreffende notitie van Almanus is rechtsonder het schetsje van de snek te zien, met daaraan een opwind-kruis (een mini-kaapstander zoals waarmee je op een schip het anker hiewt).

Het mechanisme van de snek wordt gekozen voor de Kuchelklok omdat het niet alleen het meest uurwerk-eigen is, maar ook het eenvoudigst te maken. Eerst moeten de vorm en de

afmetingen van de snek bepaald worden. Er zijn verschillende manieren om die vorm af te leiden uit de beweging van het slingergewicht. Heel direct en pragmatisch is de redenering van Wim Boon die stelt **dat de dalingssnelheid van de slingersnaar constant moet zijn en dus ook de omtreksnelheid van de snek waar de snaar de snek verlaat. En dat betekent een kegelvorm voor de snek.**

De afmetingen van de snek zijn afhankelijk van de gekozen afmetingen en overbrengingen van het uurwerk. Het begint bij de volgende keuzes:

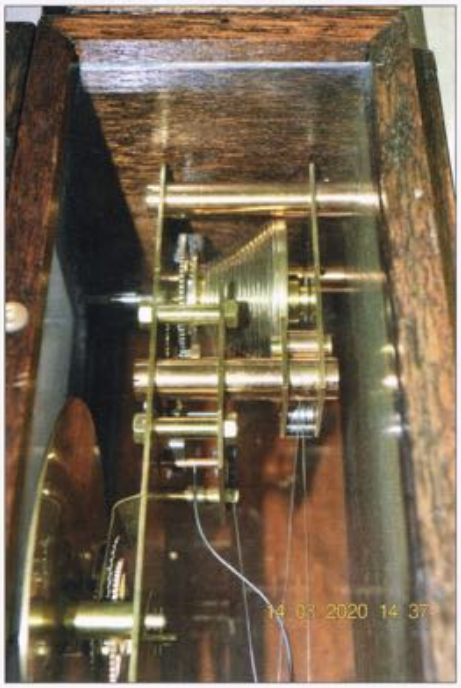


- Maximale slingerlengte 1650 mm
- Minimale slingerlengte 300 mm
- Looptijd theoretisch 33 uren (van 0 naar 1650), praktisch 27 uren (van 300 naar 1650)
- Ankerwiel 35 tanden
- Overbrenging snek naar ankerwiel 1:96
- Spoed van de kegelvormige snek 2 mm.

Een uitgebreide berekening volgt aan het einde van dit artikel, met als conclusies:

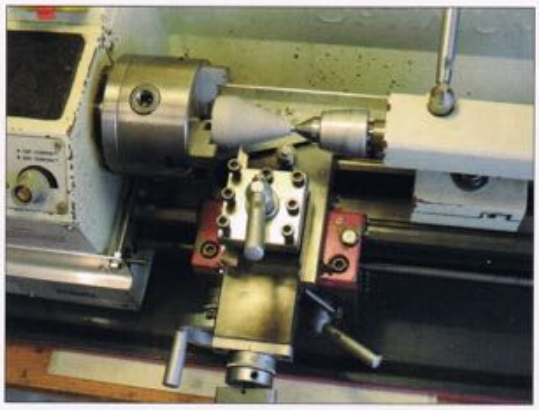
- De daalsnelheid van het gewicht is 50 mm/uur
- De grootste diameter van deze snek wordt 38,3 mm
- De halve tophoek van de snek-kegel wordt 19,2°

Het bovenstaande schema van Philip W. Kuchel van de loop van de snaar geeft een idee van de uitvoering.

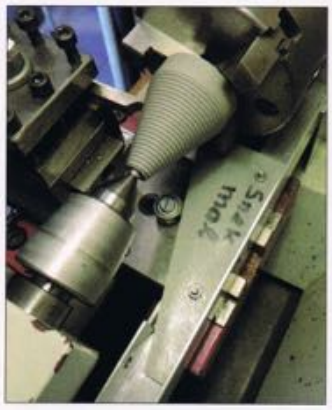


De afbeelding links laat de snek van Philip W. Kuchel zien en de afbeelding rechts die van Hans Folgering. Heel duidelijk is bij beiden de kegelvorm te herkennen, terwijl ook het forse formaat van de snekken opvalt.
Het maken van een snek in de hobbywerkplaats is niet vanzelfsprekend eenvoudig. Op YouTube zijn veel aanwijzingen te vinden als je op 'Making a Fusee' zoekt. Meestal is een vorm van kopieerdraaien nodig. En een kopieerinrichting heeft niet iedereen. De snek voor de Kuchelklok is kegelvormig en dat helpt. Wim Boon monteert een schuingestelde lineaal op zijn draaibank en neemt de spindel van de dwarsslede los. Hij kan nu eenvoudig een kegel draaien door de dwarsslede tegen de lineaal te drukken. Met de beitel in de 90 graden gedraaide bovenslede geeft hij de aanzet. De groef in de snek maakt hij net zo, maar nu met de draadsnijinrichting ingesteld op een spoed van 2 mm.

Hans Folgering maakt de kegel met de bovenslede door hem onder de halve kegelhoek te stellen. Hij snijdt vervolgens de groef door de kegel zelf als geleiding te gebruiken. Hij stelt de beitel loodrecht op de centerlijn en zet hem niet vast maar zuiver glijdend in de beitelhouder. Vervolgens stelt hij de juiste spoed in op de langsvoeding van de draaibank, en duwt hij de beitel met



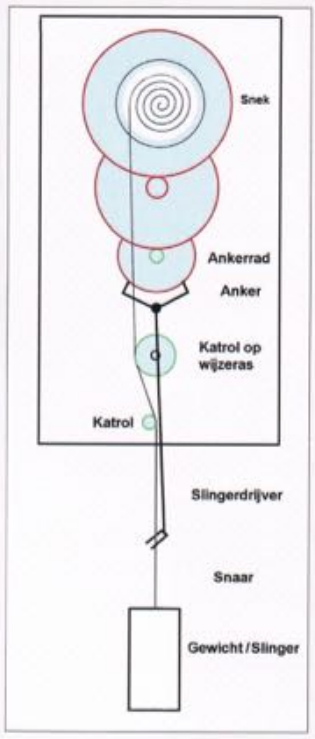
de duim tegen de snek. Met de andere hand draait hij aan een slinger op de hoofdspil de spil rond. Je moet wel een beetje gelijkmatig duwen! Hans raadt aan een kurk als duwprop te gebruiken om de duim te sparen. Op betere wijn zit een betere kurk.

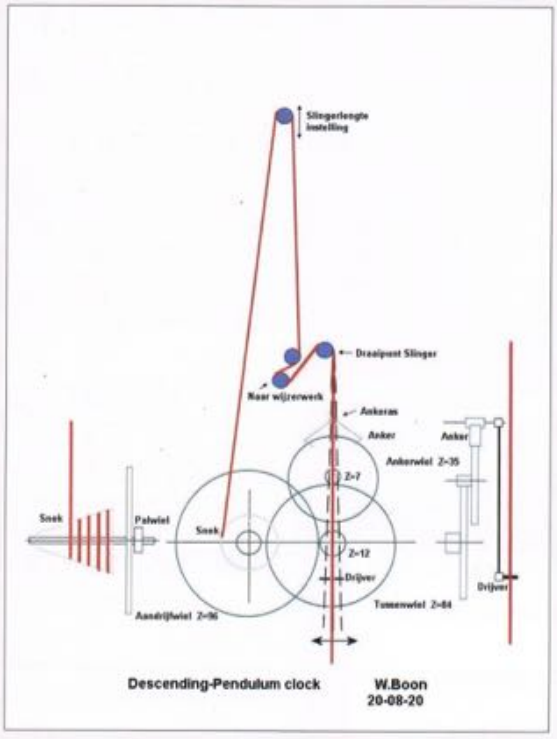


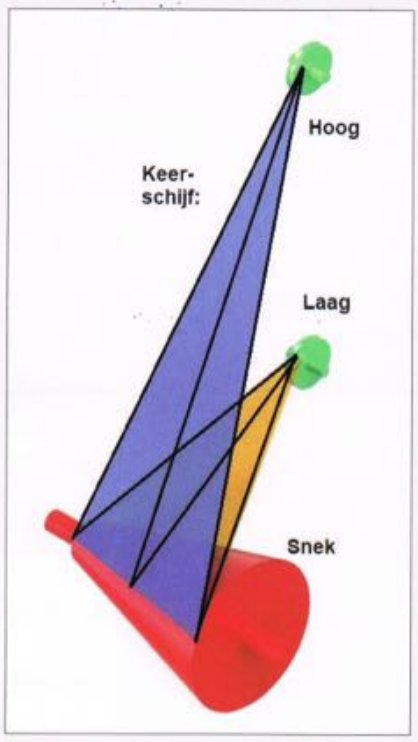
Er is een aantal constructieve bijzonderheden die elke bouwer anders oplost. Ten eerste de snaar waaraan het gewicht hangt en die om de snek gewikkeld is. Die moet goed soepel zijn omdat hij met wrijving om een kleine diameter schijf de minuut-as aandrijft. En de snaar mag nauwelijks rekken. De sterkte is niet zo'n punt. Bij de drie gebouwde Kuchelklokken blijkt een gewicht in de buurt van 600 gram voldoende om de klok aan te drijven. Philip Kuchel neemt gevlochten roestvast staaldraad met een diameter van 0,5 mm zoals dat gebruikt wordt voor de interne overbrengingen van radiografisch bestuurde vliegtuigjes. Zijn klok loopt nu ruim 30 jaar zonder problemen. Hans Folgering maakt zijn snaar met diameter 0,8 mm uit het materiaal van de bespanning van badmintonrackets. Dat loopt ook al jaren zonder problemen. Wim Boon maakt zijn snaar uit Dyneema koord van 1,25 mm diameter. Dyneema vertoont bijzonder weinig rek en heeft een treksterkte die twee keer zo hoog is als die van de sterkste staalsoorten.

De snaardikte telt mee in de bepaling van de snek-kegel en in de bepaling van de diameter van het wrijfwiel. Voor beiden geldt dat de maakmaat gelijk is aan de berekende diameters minus snaardikte.

Een aantal andere constructieve bijzonderheden is het best uit te leggen door een oorspronkelijk constructieschema van Hans Folgering te vergelijken met het constructieschema van de recente nieuwe uitvoering van Wim Boon waarmee Wim een aantal knelpunten oplost.



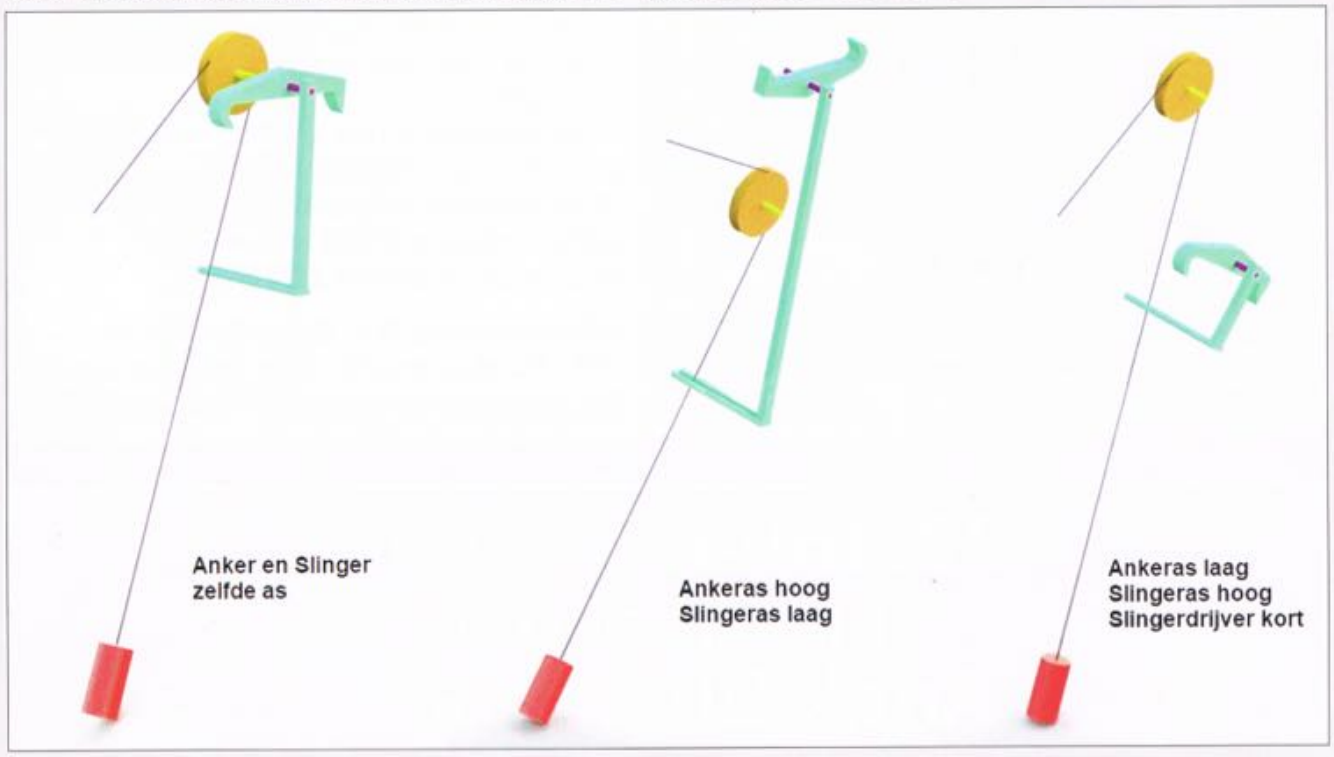




Bij het oorspronkelijke schema van de Kuchelklok valt op dat de snek eigenlijk vrij dicht bij de keerschijf van de snaar zit. Dat wil zeggen dat de hoek die de snaar maakt vanaf dat keerpunt naar de snek aanzienlijk verandert als de snaar van de kleinste diameter naar de grootste diameter van de snek afrolt. Door de wijziging van die hoek, èn door de wijziging van de hoek

loodrecht daarop waaronder de snaar de snek verlaat, is de lengte van de snaar tussen snek en keerschijf veranderlijk. En is dus de daalsnelheid van het gewicht veranderlijk. Dat verstorende effect maakt Wim Boon veel kleiner door de keerschijf veel hoger boven de snek te plaatsen.

Een ander aanzienlijk effect op de nauwkeurigheid is de positie van het ophangpunt van het slingergewicht ten opzichte van het draaipunt van de slingerdrijver/het anker. De keuze van Philip W. Kuchel is om anker en slinger om dezelfde as te laten draaien. Dat betekent dat de snaar in het verlengde van de slingerdrijver loopt, wat de wrijving beperkt. Hans Folgering houdt de anker-as hoog en de slinger-as laag. Dat maakt een eenvoudige symmetrische bouw mogelijk. Wim Boon plaatst in zijn tweede uitvoering de slinger-as hoog en de anker-as laag en hij houdt de slingerdrijver kort. De slinger-as hoog betekent een grotere uitslag van de slinger ter plekke van de gaffel van de drijver. De anker-as laag en de slingerdrijver kort betekenen een grotere hoekuitslag voor het anker. Dit werkt vooral beter bij lange slingerlengte omdat daar de hoekuitslag kleiner is en de ingreep van het anker kleiner is.



Bij het opwinden van een gewoon uurwerk 'valt heel het raderwerk stil' door een palmechanisme op de trommel. Bij de Kuchelklok zijn voor het opwinden twee palmechanismen nodig – zowel op de snek als op het wijzerwerk wat immers apart met de snaar door een wrijfwieltje wordt aangedreven.

De gaffel van de drijver verdient bijzondere aandacht. De wrijving van de snaar in de gaffel is kritischer dan bij een vaste slinger. De snaar is vaak gevlochten en dat vlechtwerk neemt onder belasting een iets kleinere diameter aan. Het vergt extra aandacht om de ruimte in de gaffel positief maar dicht bij nul te houden zodat de loze slag van het anker beperkt blijft.

Wrijving neemt het wijzerwerk mee doordat de snaar over een rol geleid wordt. Om slippen te voorkomen bouwt Hans Folgering die rol op uit een drietal gekartelde schijven tussen twee flenzen. Wim Boon kiest voor een extra leid-rol zodat de snaar over meer dan 180 graden rondom de wrijvingsrol geleid wordt.

De snaarlengte bij monteren moet precies aansluiten bij de positie op de snek. Om dat fijn te kunnen afstellen en om het uurwerk goed op tijd te zetten is er een na-regeling van de snaarlengte nodig. Philip Kuchel en Hans Folgering kiezen ervoor die lengte in te stellen waar de snaar aan het gewicht bevestigd is (zie afbeeldingen 2 en 3). Wim Boon stelt de slingerlengte in bij zijn hoge omkeerschijf. Een time-lapse opname maakt de werking van de slinger-gewichtklok mooi duidelijk.

Je ziet op de time-lapse opname hiernaast dat de uitslag van de gewichtslinger ongeacht de slingerlengte ongeveer gelijk blijft. De impuls die de slingerdrijver via de snaar aan het slingergewicht geeft wordt op een vaste relatief korte afstand onder de slingeras gegeven. Bij korte slingerlengte vertaalt zich dat een in stevige impuls op het slingergewicht. Bij grote slingerlengte vertaalt de impuls bovenin zich in een veel kleinere impuls op het slingergewicht onderin.

Overigens lopen alle drie de uitvoeringen met een nauwkeurigheid van een minuut per dag.

DE BEREKENING VAN DE SNEK.

Uitgangspunten.

De afmetingen van de snek zijn afhankelijk van de gekozen afmetingen en overbrengingen van het uurwerk. Het begint bij de volgende keuzes:

- Maximale slingerlengte 1650 mm
- Minimale slingerlengte 300 mm
- Looptijd theoretisch 33 uren bij volle kegel
- Looptijd praktisch 27 uren bij op 300 mm afgeknotte kegel
- Ankerwiel 35 tanden
- Overbrenging snek naar ankerwiel 1:96
- Spoed van de kegelvormige snek 2 mm.

Berekening.

Daalsnelheid snaar, tevens Omtreksnelheid van de snek op het punt waar de snaar loskomt van de snek bij 1650 mm in 33 uur is 1650/33 = 50 mm/uur ofwel 0,83333 mm/minuut.

Slingertijd T = 2*p*√ L/g met L is slingerlengte en g is versnelling van de zwaartekracht 9,81 m/sec2. Hier Tmax = 2*3,1416*√1,650/9,81 = 2,58 seconde en het aantal slingeringen per minuut Slmax/min = (1/T)*60 = 23,28
Tmin = 2*3,1416*√ 0,3/9,81 = 1,10 seconde en het aantal slingeringen per minuut Slmin/min = (1/T)*60 = 54,61

Snek diameter. Het aantal slingeringen per minuut (Sl/min) gedeeld door het aantal tanden van het ankerwiel is het aantal omwentelingen per minuut (Omw/min) van het ankerwiel. Dit delen door de overbrengingsverhouding snek naar ankerwiel geeft het aantal Omw/min van de snek. Uit de Omtreksnelheid en het aantal Omw/min volgt de omtrek ter plaatse en na deling door p dus de diameter. Dus de grootste snekdiameter Dmax is 0,83333/(23,28/35/96)/p = 38,27756 mm. Bij de kleinste slingerlengte 300 mm is Dmin = (300/1650)*38,27756 = 9,95955 mm.

Aantal Snekgangen van de volledige kegel: Uit Dmax en Dnul = 0 volgt Dgem = (Dmax + Dmin)/2 = 19,139. Het aantal snekgangen is snaarlengte/gemiddelde omtrek = 1650/(p*19,13878 = 27,44225.

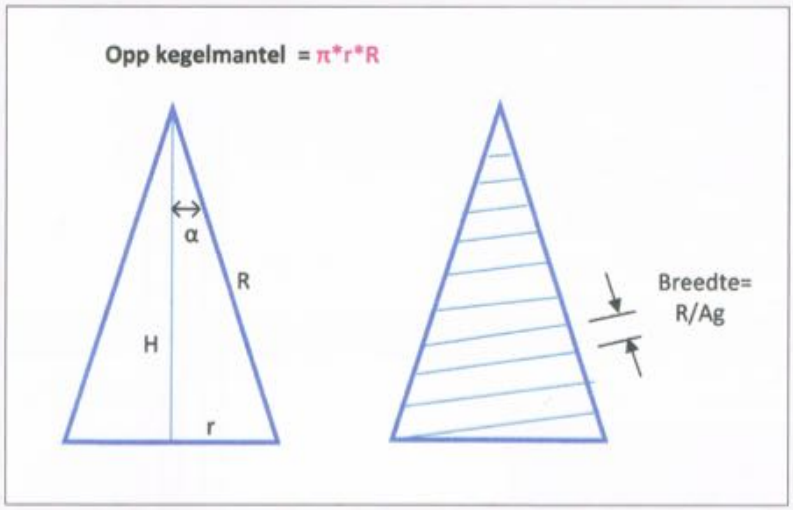
Redenering: 1 Omdat de snek vast is gekoppeld met het ankerwiel, via een tussenwiel, zal: (Omw/min) snek dus evenredig zijn met het aantal (Tanden/min) van het ankerwiel.
(Omw/min) snek dus evenredig zijn met het aantal (Sl/min) van het slingergewicht.
Dus ook (min/Omw) snek evenredig met (min/Sl) dus met (T) slingergewicht.

2 Daar de omtreksnelheid van de snek constant is namelijk 0,83333 mm/min zal (min/Omw) snek evenredig zijn met (omtrek) en dus met (D) snek.
De tijd (min/Omw) van de snek is (omtrek/omtreksnelheid).
Omtrek is (p*D) en dus recht evenredig met (D).

Conclusie: Uit de vorige twee redeneringen volgt:

DE SLINGERTIJD (T) IS RECHT EVENREDIG MET DE DIAMETER (D) VAN DE SNEK.

De vorm van de snek-kegel.



Ag = Aantal gangen van de snaar om de volle kegel.

Van de snek-kegel weten we de grootste diameter Dmax = 38,277 mm. Dat betekent dat in bovenstaande schets r = 0,5*Dmax = 19,1385 mm. We hebben eerder berekend dat het aantal snaargangen 27,44 is. We hebben de spoed van de snaar op 2 mm gesteld. Dan is de hoogte H van de kegel 27,44225*2 = 54,88451. Daar ligt de vorm van de kegel mee vast. De halve tophoek a is te bepalen uit tangens a = r/H = 19,1385/54,88451. Dat geeft a = 19,22418o.

De praktische maak-maten worden dan:

a = 19,2°
Dmax = 38,3 mm (slingerlengte 1650 mm)
Dmin = 10,0 mm (slingerlengte 300 mm)
H = 54, 9 mm.

Bij het maken van de kegel is het goed zowel een paar gangen meer als een paar gangen minder aan te houden. De paar gangen minder zijn nodig omdat de berekende kegel de vorm is die wordt beschreven door de middellijn van de om de kegel gewikkelde snaar. De echte kegel moet dus kleiner zijn en dat bereik je het eenvoudigst door de snaar op een stukje kleinere diameter te wikkelen. Voor het geval dat je overstapt op een snaar van veel kleinere dikte en voor het geval dat de aarde opeens langzamer gaat draaien pas je de Kuchelklok eenvoudig aan door de snaar op een stukje grotere diameter te wikkelen.

Met dank aan Philip W. Kuchel, Hans Folgering en Wim Boon die de slingergewicht-klokken hebben gebouwd en alle drie materiaal ter beschikking hebben gesteld en ook speciaal ontwikkeld voor dit artikel, en aan Hessel Oosten voor het maken van tekeningen.

Eventuele vragen graag naar Peter Chevalier via info@klokkenbouwen.nl .