

Rekenliniaal en rekenschijf voor viscositeiten

Nico Smalenburg

Stroperigheid

Op de veiling van de IM 2019 heb ik een aantal interessante rekenhulpmiddelen verworven, i.h.b. rekeninstrumenten voor de bepaling van de viscositeit, oftewel de stroperigheid, van vloeistoffen. In dit verschijnsel ben ik in het bijzonder geïnteresseerd omdat ik op het researchlaboratorium van de NS in Utrecht heb gewerkt. Daar hield ik mij o.a. bezig met tribologie, de wrijvingsleer.



Wat is viscositeit?

De *dynamische* viscositeit van vloeistoffen is de mate van stroperigheid. De Pa·s is de eenheid van de coëfficiënt van inwendige wrijving. Te denken valt hierbij aan diverse oliën, vetten, enzovoorts. Voorbeeldstoffen met hun viscositeit zijn: water 1.002 mPa·s, glycerine 10^3 mPa·s, pindakaas $150 \cdot 10^3 - 250 \cdot 10^3$ mPa·s.

Sommige stoffen lijken op het eerste gezicht vaste stoffen, maar vertonen toch vloeistofeigenschappen bij kamertemperatuur. Een voorbeeld is pek (bitumen) met een viscositeit van circa 10^{11} mPa·s.

Maar ook glas dat bij de verwerkingstemperatuur een viscositeit van 10^2 tot 10^4 mPa·s heeft en bij kamertemperatuur een viscositeit van circa 10^{18} tot 10^{20} mPa·s. Wat betreft het glas is dit niet helemaal zeker. De gebrandschilderde ramen in een kerk in Augsburg, aangebracht in het jaar 1050, vertonen wat uitzakkingsverschijnselen. Onderaan de ramen is het glas marginaal dikker dan bovenin. Dit is ook te zien aan het kleurverloop van het blauw in de achtergrond, die onderin donkerder is. Dit laatste kan echter bij mij ook zijn ingegeven door enige *wens*-fantasie. Zie figuur 1.

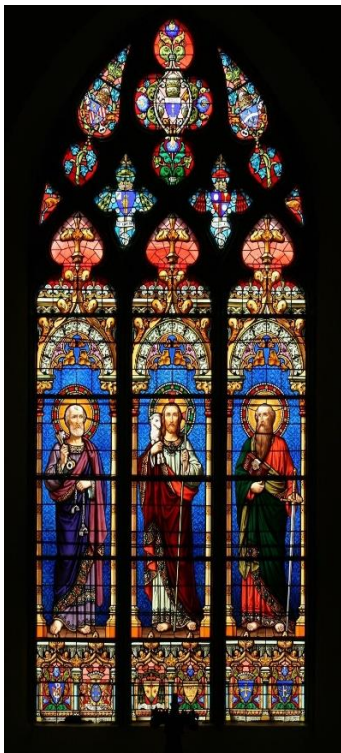


Fig.1. Gebrandschilderde ramen, circa 1050, kathedraal van Augsburg, Beieren.

Pek (bitumen), bij kamertemperatuur in gestolde vorm, heeft eveneens een zeer grote viscositeit. Indien men een trechter vult met vloeibare pek die men laat afkoelen tot kamertemperatuur, dan zal er ieder jaar gemiddeld één druppel pek uit de trechter vallen.

Het pekdruppel-experiment

Pek is een 'vloeistof' met een zeer grote stroperigheid. Er bestaan dus quasi vaste stoffen die bij nadere beschouwing toch vloeistoffen blijken te zijn.

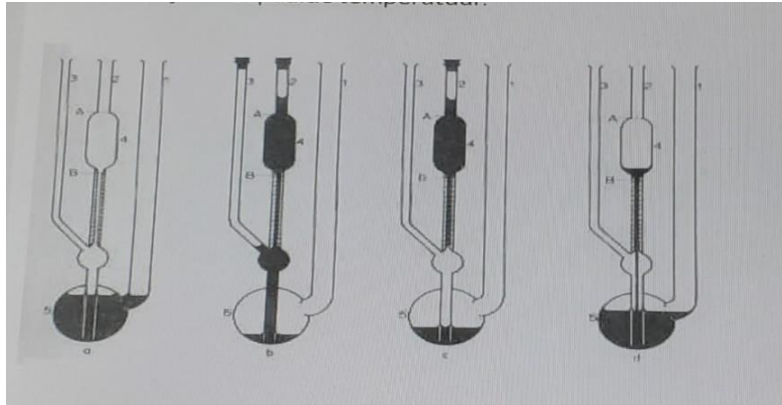
Het pekdruppel-experiment is een experiment dat de vloeibaarheid van pek over een periode van enkele jaren meet. In 1930 werd het experiment gestart en werd de stop uit een trechter, gevuld met pek getrokken. Sindsdien vormt zich telkens een druppel. De achtste druppel viel aan het einde van het jaar 2000. Natuurkundigen konden daaruit berekenen dat de viscositeit van pek circa 100 miljard keer hoger was dan die van water.

Dit experiment is opgenomen in het Guinnessbook of Records als het langst lopende experiment ter wereld. Er zit nog zeker voor 100 jaar genoeg pek in de trechter om het experiment voort te kunnen zetten.

Meting van de viscositeit

Viscositeit kan op diverse manieren worden gemeten. Ten eerste met de *capillaire viscosimeter* van *Ubbelohde*. Zie figuur 2. Hierbij wordt een bepaalde hoeveelheid vloeistof, bij een afgesproken temperatuur, door een nauwe capillair geleid. De tijd die de vloeistof daarover doet, in combinatie met de doorsnede van de capillair, is een maat voor de viscositeit. Bij dit meetprincipe is de kracht die op de vloeistof wordt uitgeoefend de zwaartekracht. Hier is sprake van *kinematische viscositeit*.

Fig. 2. Meting van de viscositeit met de Ubbelohde viscosimeter.



De tweede meetmethode gebruikt een bol die met een bepaalde snelheid door de stroperige vloeistof zakt. De tijd die de bol er over doet om over een bepaalde afstand te zakken in de vloeistof, in combinatie met de diameter en de soortelijke massa van de bol, is ook een maat voor de viscositeit. Dit is eveneens de kinematische viscositeit.

De tijd die de bol er over doet om over een bepaalde afstand te zakken in de vloeistof, in combinatie met de diameter en de soortelijke massa van de bol, is ook een maat voor de viscositeit. Dit is eveneens de kinematische viscositeit.

Een derde methode is om de torsie te meten van een druppel vloeistof onder een ronddraaiend schijfje; eveneens kinematische viscositeit.

Eenheden van viscositeit

Men onderscheidt twee soorten viscositeit. De *dynamische viscositeit* η en *kinematische viscositeit* ν . De kinematische viscositeit is de dynamische viscositeit gedeeld door de soortelijke massa van de vloeistof, dus $\nu = \frac{\eta}{\rho}$. De twee viscositeiten zijn dus evenredig.

Volgens de viscositeitswet van Newton is de dynamische viscositeit η de evenredigheidsconstante tussen de schuifspanning τ en de afschuifsnellheid (een gradiënt) van een vloeistof. Een dikke olie heeft een hoge afschuifspanning en heeft dus een grote dynamische viscositeit.

De viscositeit van een vloeistof is temperatuurafhankelijk. De mate waarin de viscositeit afneemt als functie van de temperatuur wordt de *viscositeitsindex* (VI) genoemd. De VI kan berekend worden uit de kinematische viscositeit bij 40 °C en 100 °C.

De (officiële en tegenwoordig wettelijk verplichte) SI-eenheid van dynamische viscositeit is de pascal·seconde (Pa·s), die equivalent is met $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$ of $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$.

De Pa·s noemt men (feitelijk een overbodige benaming) ook wel *poiseuille*. Niet te verwarren met de *poise*. De poise is de 10x kleinere eenheid. $1 \text{ P} = 0,1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, maar men heeft voorliefde voor $1 \text{ cP} = 1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

Gezien bovenstaande formule is de SI-eenheid van de kinematische viscositeit $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$. Die is echter in veel toepassingen een onhandig grote eenheid. Liever gebruikt men de kleinere, maar verouderde cgs-eenheid *Stokes*, $1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ en de daarvan afgeleide centistokes, $1 \text{ cSt} = 1 \text{ mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$.

Erg verwarrend is dat de kinematische en dynamische viscositeit van een vloeistof in allerlei niet-SI-eenheden en klassen worden uitgedrukt. Voorbeelden zijn graden Engler, Seconden Saybold Universal (SSU, Amerikaans) en graden Redwood I. De verschillende viscositeitseenheden kunnen via nomogrammen, en tegenwoordig applets op internet, in elkaar worden omgerekend. Zo is de dynamische viscositeit in Engler gemeten $1 \text{ }^\circ\text{E} = 7,56 \text{ mPa}\cdot\text{s}$. De SSU is het aantal seconden (eenheid s) dat 60 cm^3

olie nodig heeft om door de standaard opening van een Saybolt Universal Viscometer bij 100 °F te stromen.

Voor kinematische viscositeiten boven de 100 cSt is de omzetting van de verschillende eenheden naar de eenheid cSt voor kinematische viscositeit te bepalen volgens onderstaande evenredigheden:

- 1 SSU x 0,220 is evenredig met een kinematische viscositeit van 1 cSt = 1 mm²·s⁻¹
- 1 Redwood I x 0,2435 met 1 cSt
- 1 Graad Engler x 7,56 met 1 cSt
- 1 Saybold Furol x 2,16 met 1 cSt

De Engler-viscometer

Met de *Engler-viscometer* (Karl Engler, 1842-1925) wordt de *verhouding* van de dynamische viscositeit van een vloeistof en de dynamische viscositeit van water bij 20 °C bepaald. Ter bepaling daarvan meet men de tijd waarin 200 cm³ vloeistof bij een zekere constant gehouden temperatuur (gewoonlijk 20, 50 of 100 °C) uit een kleine opening vloeit. Deze tijd in seconden wordt gedeeld door het aantal seconden dat eenzelfde hoeveelheid water van 20 °C, in hetzelfde toestel, voor het uitvloeien nodig heeft. Die verhouding geeft, via een omrekening, de dynamische viscositeit van de vloeistof in een aantal graden Engler, aangeduid als °E.



Fig. 3. De Engler viscositeitsmeter.

De grootte van 1 cSt wordt bepaald met de viscositeitsmeter van Ubbelohde, waarbij de te meten vloeistof via een nauwe capillair bij een zeer stabiele temperatuur uitvloeit. De tijd die een bepaalde hoeveelheid vloeistof nodig heeft om door de capillair te stromen, alsmede de diameter van de capillair, zijn de factoren die de mate van kinematische viscositeit in cSt weergeeft.

Rekenlinialen van oliemaatschappijen

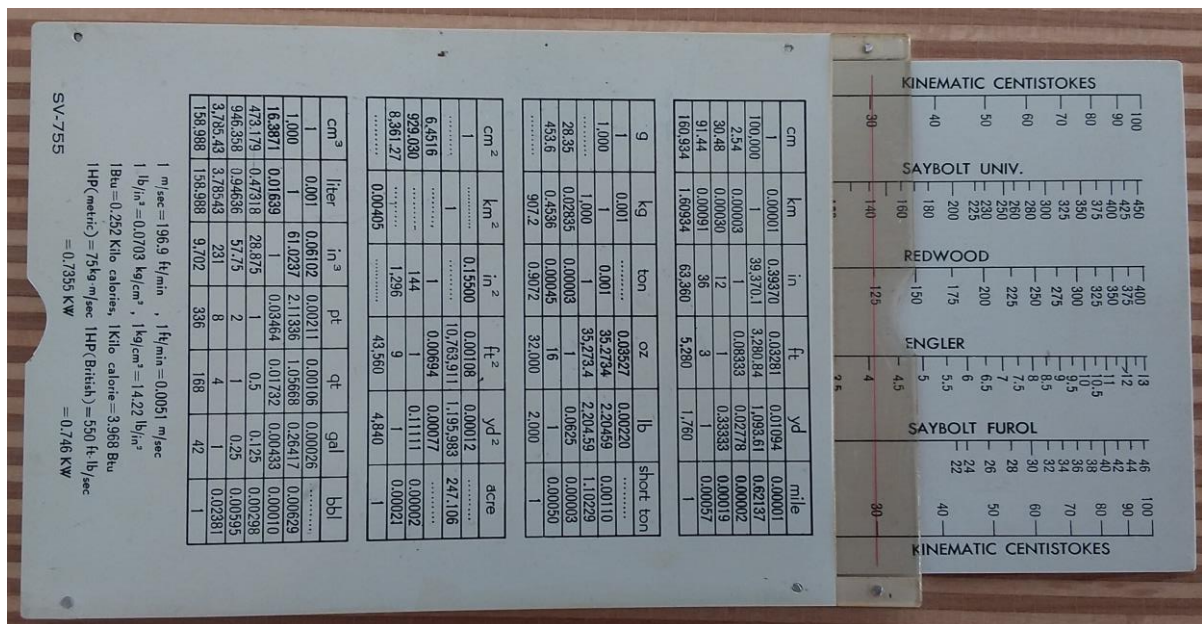


Fig. 4. Rekenkaart van Cargyle Lubricants.

Diverse oliemaatschappijen hebben, vanuit reclameoverwegingen, rekenlinialen van bepaalde merken op de achterkant voorzien van nomogrammen voor viscositeitseenheden. Soms worden de waarden van de viscositeit bij verschillende temperaturen gegeven. Figuur 4 toont een foto van een rekenkaart van Cargyle Lubricantsen. Figuur 5 toont een kleine rekenliniaal, de Grafoplex 615, met schalen K, A, B, CL, C, D en L met op de achterkant van de liniaal op zowel de tong als het lichaam viscositeit gerelateerde gegevens van Texaco.

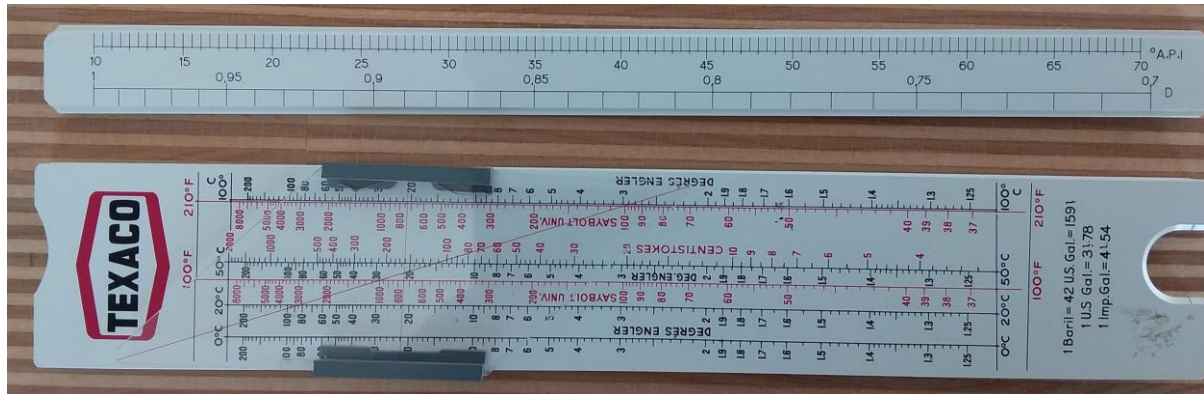


Fig. 5. Achterkant van de Graphoplex 615.

Op het nomogram van Cargyle Lubricants in figuur 4 is bijvoorbeeld af te lezen dat 30 cSt overeenkomt met 140 SSU, met 125 s Redwood I, en met circa 4 °E.

Op de achterkant van de Graphoplex 615 in figuur 5 zijn nomogrammen voor °E, SSU en cSt opgenomen voor een aantal temperaturen in °C en °F. Op de achterkant van de tong staat een schaal in A.P.I. (American Petroleum Institute) en daaraan gelieerd een schaal met soortelijke massa van olieën, lopend van 1 tot 0,7.

Replica van de Aristo 10055, Visco Calculator.

Tijdens de IM 2019 ben ik via de veiling in het bezit gekomen van enkele rekenlinialen, nomogrammen en de viscoklok van Shell (gefabriceerd door de Nederlandse firma ALRO).

Tevens heb ik foto's kunnen maken van de zeer zeldzame Visco-Calculator Aristo 10055. Hiervan heb ik een replica gemaakt op een algemene rekenliniaal van Aristo. Een moeilijkheid daarbij was dat je via een ronde lens een foto maakt van een betrekkelijk lange liniaal op een 36 mm fotoformaat, terwijl de rekenliniaal iets groter is dan de A4-lengte van 297 mm. Bij het maken van een vergroting van de schalen, krijg je dus een lichte mate van vertekening. Zie figuren 6.

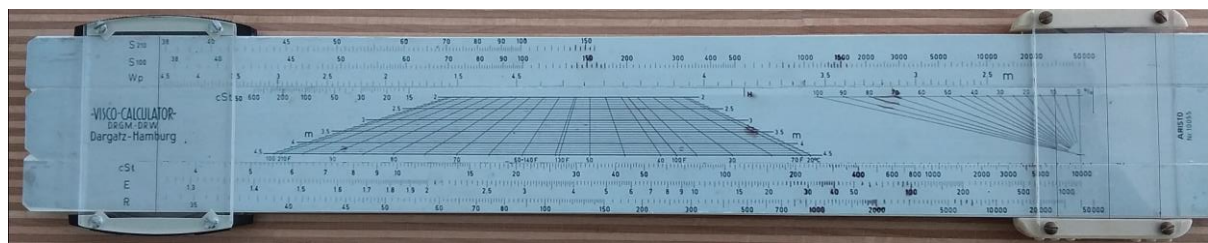


Fig. 6a. Voorkant van de Aristo 10055.

De schalen vertonen op de afdruk een zeer lichte kromming. Hierop heeft de fotograaf zo goed mogelijk een correctie doorgevoerd, zodat de schalen op de foto-afdruk nagenoeg recht lopen. Uiteraard is dat van belang in verband met het verschuiven van de schalen op de tong ten opzichte van de schalen op de rekenliniaal. Door de schalen van de foto-afdruk vervolgens zeer nauwkeurig en recht uit te snijden en deze te plakken op de tong, respectievelijk de rekenliniaal, is de replica samengesteld.

De originele Aristo is voorzien van twee speciale lopers. Hier heb ik twee lopers van andere Aristo rekenlinialen gebruikt. De haarlijnen die hierop staan komen niet helemaal overeen met de haarlijnen op lopers van de originele Aristo 10055 rekenliniaal, maar er valt goed mee te werken.

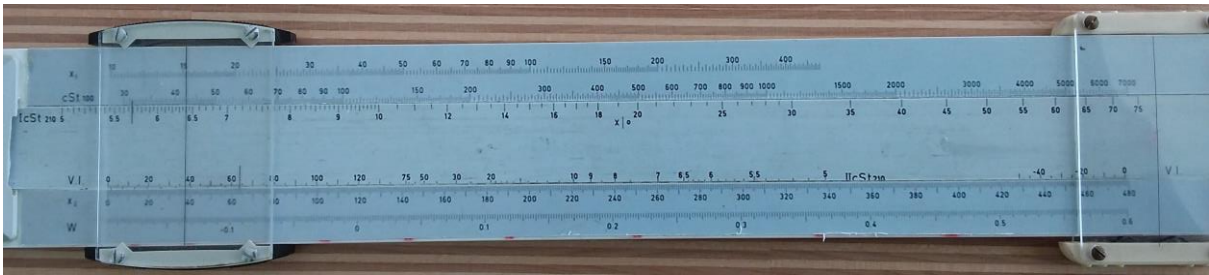


Fig. 6b. Achterkant van de Aristo 10055.

De voorzijde van de Aristo 10055 bevat de volgende log-schalen aan de bovenkant:

- S 210 (Seconden Saybolt Universal) bij 210 °F
- S 100 (Seconden Saybolt Universal) bij 100 °F
- W rho schaal

Op de tong vinden we:

- een van 600 - 15 aflopende log schaal in cSt bij 50 °C
- een gelijkbenige trapeziumvormige grafiek met temperatuurlijnen in graden °C en °F
- een waaiervormige grafiek met lineaire schaalverdeling op de X-as van 100% tot 0 %

Op de onderkant van de liniaal staan nog:

- een log-schaal in cSt
- een schaal in °E
- een schaal in graden Redwood I

De getallen op de schalen aan de boven- en onderkant van de liniaal zijn via de haarlijn in elkaar om te zetten. Bijvoorbeeld, een kinematische viscositeit van 100 s S 210 komt overeen met een kinematische viscositeit van 20,5 cSt, met 2,9 °E en met 87 s Redwood I.

Op de achterkant van de liniaal staan schalen x1, cSt 100, cSt 210, viscositeitsindex VI, x2, en W (correctiefactor voor olie op vriespuntcondities).

De Shell Viscoklok, gemaakt door ALRO

De Shell Viscoklok is eveneens een bijzondere rekenschijf vervaardigd door de Nederlandse firma ALRO. (Zie *The ALRO Catalogue*, door O.E. van Poelje).

De draaibare buitenring bevat:

- rood gedrukt de temperatuur van -20 °C tot 120 °C
- zwart gedrukt de temperatuur van 0 °F tot 240 °F

Op het centrale deel van de Viscoklok vinden we diverse schalen voor viscositeit. Van buiten naar binnen:

- een schaal van $2 \cdot 10^{-6}$ cSt tot 1,72 cSt
- een schaal van $4 \cdot 10^5$ °E tot 1,5 °E
- een schaal in Seconden Redwood I van 10^7 tot 31
- een schaal in Seconden Saybold Universal van 10^7 tot 35

Verder is deze rekenschijf uitgerust met twee cursors met haarlijnen met mm-indeling boven de temperatuur-radialen.

Voorbeeldberekeningen met de Shell Viscoklok en de Aristo 10055.

Voorbeeldberekening 1

De viscositeit van een olie is 1700 s Redwood I bij 70 °F en 1,67 °E bij 100 °C. Gevraagd wordt de viscositeit in SSU bij 100 °F en in °E bij 50 °C.

Met de Shell Viscoklok

Plaats de haarlijnen van de twee cursors op de gegeven viscositeiten. Draai de buitenring zodanig dat de haarlijnen de temperatuurlijn van 70 °F, respectievelijk de 100 °C-lijn kruisen op gelijke radii afstanden. Dat is bij beide cursors 30 mm.

Draai nu één van de cursors totdat de 100 °F de haarlijn kruist op een radius van 30 mm. Lees vervolgens de viscositeit in SSU af. Dit is 540 SSU bij 100 °F.

Draai vervolgens een cursor tot de temperatuurlijn van 50 °C samenvalt met de haarlijn op de cursor. Lees vervolgens van de °E-schaal de viscositeit van 7,5 °E bij 50 °C af.

Op de schijf zijn de temperatuurlijnen van 50 °C, respectievelijk 120 °F rechte lijnen, omdat dat de middentemperaturen zijn van de °C-schaal (0 tot 100), respectievelijk de °F-schaal (0 tot 240), en de richting van de kromme temperatuurcurves bij die temperaturen verandert. Zie figuur 7.

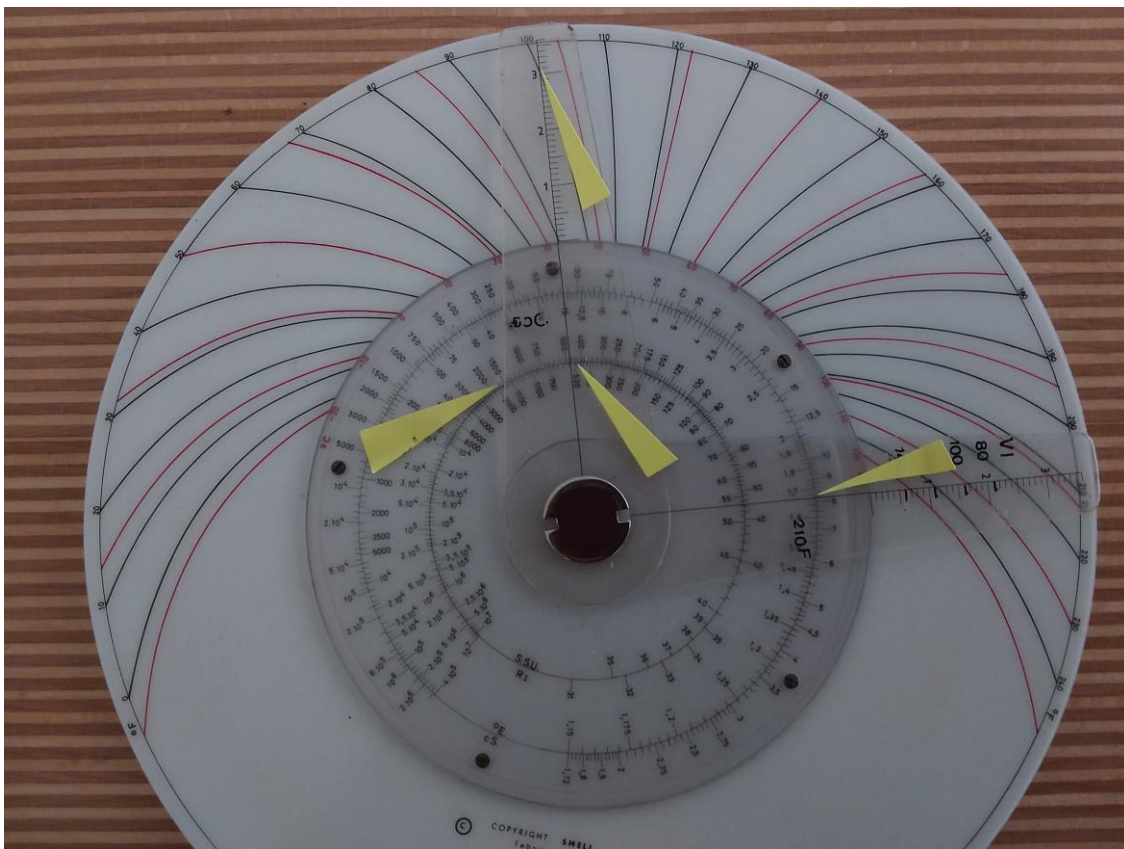


Fig. 7. Voorbeeldberekening 1 met de Shell Viscoklok.

Met de Aristo 10055

Hetzelfde voorbeeld kan ook berekend worden met de Aristo 10055. Hierbij plaats je de haarlijn van de linker cursor op 1,67 °E en de haarlijn van de rechter cursor op 1700 s R I. Verplaats de tong van de

rekenliniaal nu zodanig dat het snijpunt van de haarlijnen met de temperatuurlijnen van 100°C , respectievelijk 70°F , op gelijke hoogte in het gelijkbenige trapezium vallen. Dit is op 2 mm hoogte. Lees nu de waarde van het snijpunt van de verlengde rechte lijn van 50°C met de $^{\circ}\text{E}$ -schaal af. Dit geeft 7.5°E . De haarlijn vanaf het snijpunt met de 100°F lijn op 2 mm hoogte tot de S 100 schaal geeft als antwoord 540 SSU. Zie figuur 8.

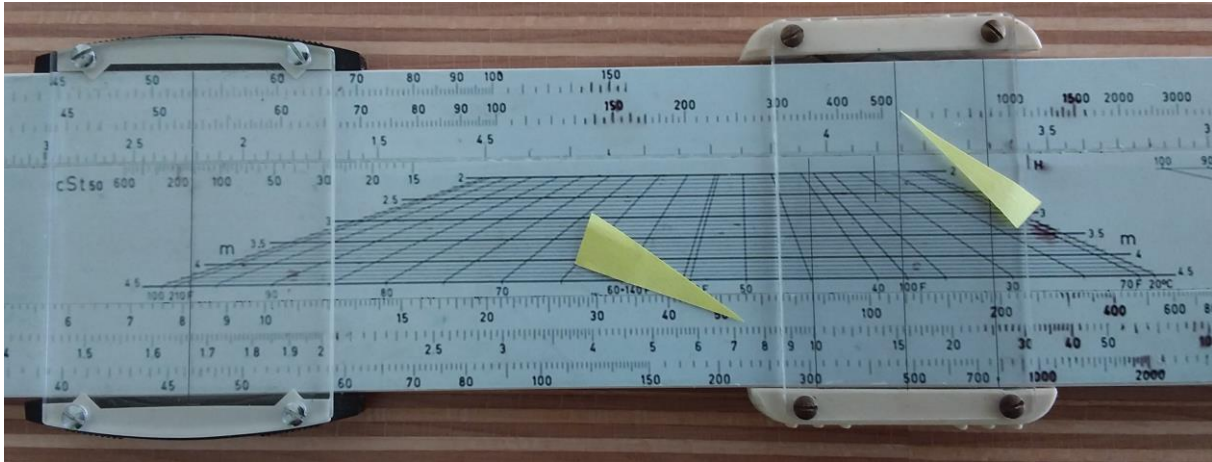


Fig. 8. Voorbeeldberekening 1 met de Aristo 10055.

Voorbeeldberekening 2

Stel dat je de beschikking hebt over de Shell Tellus hydraulische olie 27 met de volgende viscositeit: $10,5^{\circ}\text{E}$ bij 20°C en 3°E bij 50°C . Je wilt onderzoeken of deze hydraulische olie ook gebruikt kan worden in een Amerikaanse machine waarvoor een hydraulische olie in een range van 150 – 170 SSU bij 100°F is voorgeschreven.

Met de Shell Viscoklok

Zet de haarlijnen van de twee cursors op $10,5^{\circ}\text{E}$ en 3°E . Draai de temperatuurring totdat de 50°C lijn samenvalt met de haarlijn op 3°E . Lees de radius waarop de tweede haarlijn de 20°C lijn kruist. Deze radius is 16 mm.

Het snijpunt van de 100°F lijn met de haarlijn van één van de cursors op een radius van 16 mm leert dat de viscositeit van deze Shell Tellus olie 160 SSU bij 100°F heeft. Deze hydraulische olie valt midden in het voorgeschreven viscositeitsinterval en de Shell Tellus olie 27 kan dus in deze Amerikaanse machine worden gebruikt. Zie figuur 9.

Met de Aristo 10055

Dit voorbeeld kan ook berekend worden op de Visco Calculator van Aristo.

Plaats van de linker cursor de haarlijn op 3°E en de haarlijn van de rechter cursor op $10,5^{\circ}\text{E}$. Verschuif de tong zodat de 50°C lijn van het gelijkbenige trapezium samenvalt met de haarlijn over de 3°E .

Lees de hoogtelijn in het gelijkbenige trapezium die de haarlijn over de $10,5^{\circ}\text{E}$ en de 20°C lijn in het trapezium snijdt. Dit snijpunt ligt op 3,3 m.

Verschuif nu een van de cursor haarlijnen zodanig dat die samenvalt met het snijpunt van de 100°F lijn en de 3,3 m lijn in het trapezium.

Lees nu op deze haarlijn in de cursor op de S 100 schaal de viscositeit, zijnde 160 SSU/ 100°F af. Deze hydraulische olie, de Shell Tellus 27, valt midden in het voor de Amerikaanse machine voorgeschreven viscositeitsinterval en kan dus in deze machine worden toegepast.

Zie figuur 10.

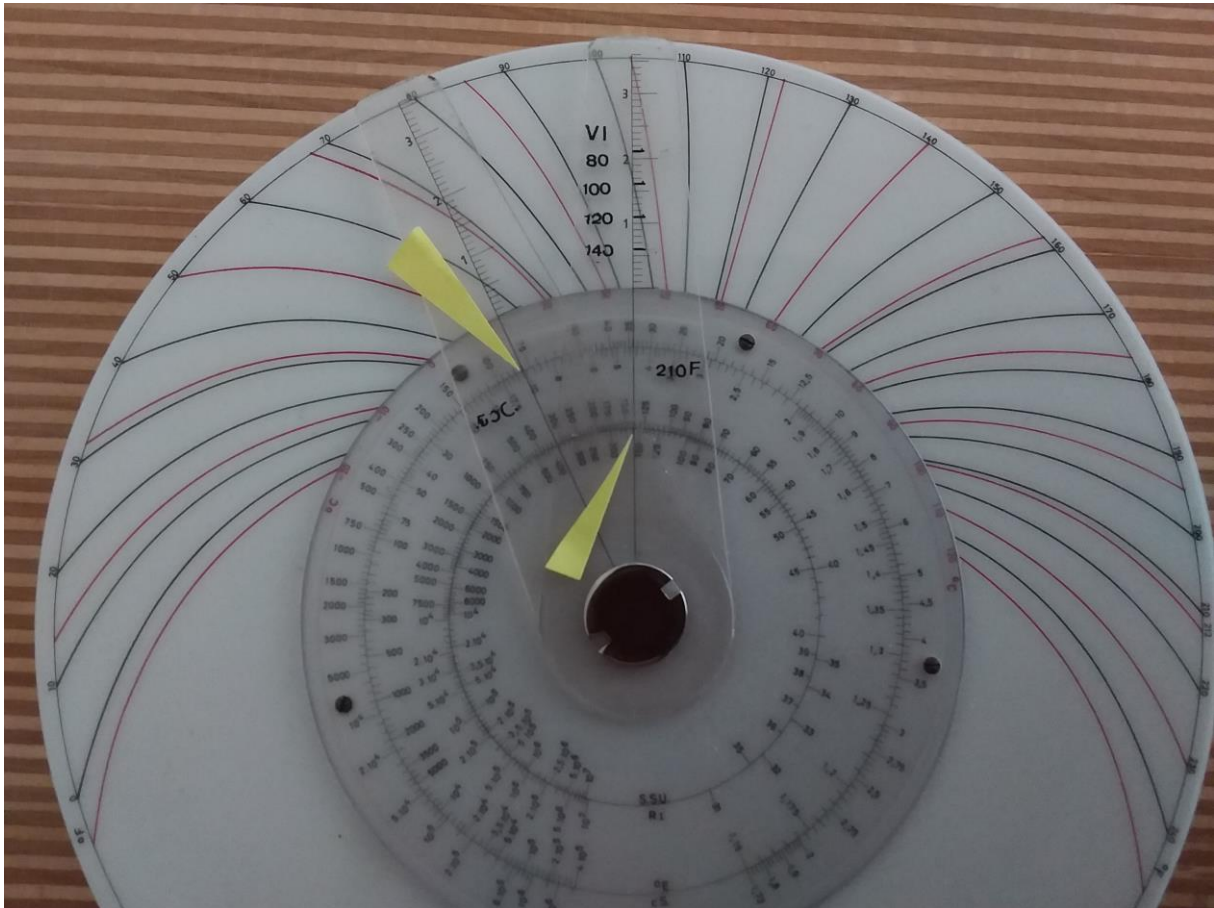


Fig. 9. Voorbeeldberekening 2 met de Shell Viscoklok.

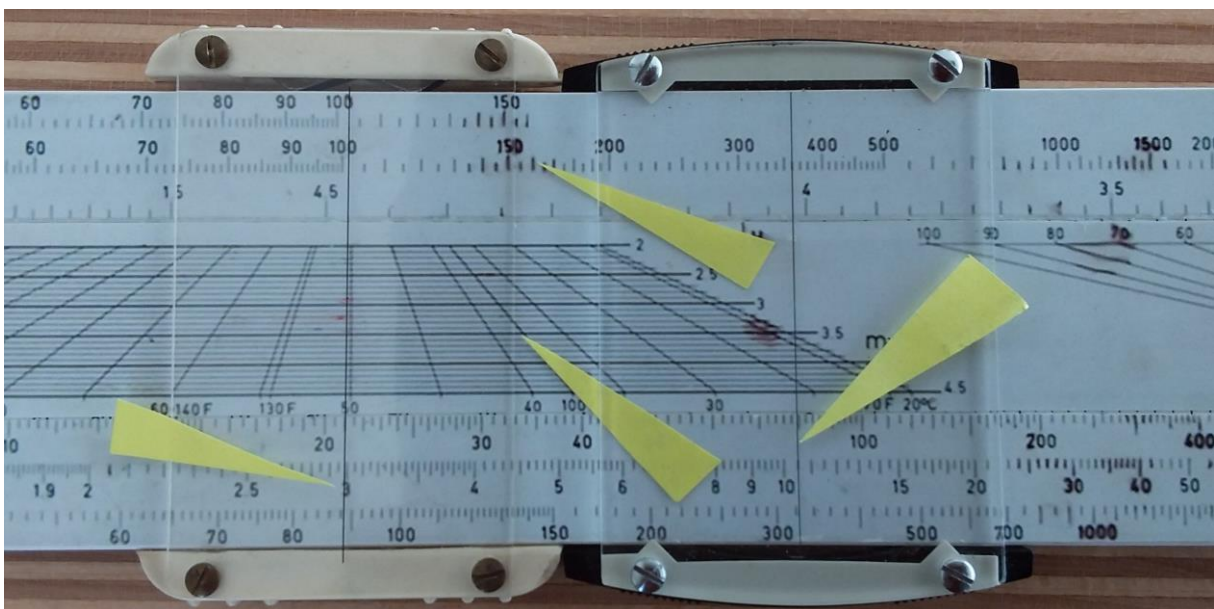


Fig. 10. Voorbeeldberekening 2 met de Aristo 10055.

Verschillende classificaties voor motorolie.

SAE staat voor Society of Automotive Engineers. Deze organisatie bepaalt de technische normen voor de automobiellindustrie, inclusief de viscositeitsklassen.

Dit van oorsprong Amerikaanse instituut werd in 1911 opgericht en heeft de viscositeitsnormen voor motorolie gestandaardiseerd.

De classificatie bestaat uit *single grade* motorolie en *multi grade* motorolie. Zo kun je gemakkelijk aflezen hoe dik de olie is en bij welke temperaturen dat het geval is. Een motorolie 5W30 heeft een dynamische viscositeit van 5 cSt bij winterse omstandigheden onder het vriespunt en 30 cSt bij bedrijfstemperatuur van 100 °C.

De ACEA is de Europese classificatie voor autofabrikanten. Deze kent drie series motorolie:

- de A-serie is voor benzinemotoren en LPG met vonkontsteking
- de B-serie is voor dieselmotoren en lichte bedrijfswagens
- de C-serie is voor de moderne auto's met uitlaatgas-behandelingsapparatuur

De API-classificatie kent de categorieën:

- de C-klasse voor dieselmotoren
- de S-klasse voor benzinemotoren
- de F-klasse voor nieuw op de markt te brengen motoren geschikt voor olie met een lagere viscositeit bij hogere temperaturen.

Deze classificatie wordt meestal toegepast in de USA en in Azië.