

**KONINKLIJK NEDERLANDS
METEOROLOGISCH INSTITUUT**

TECHNISCHE RAPPORTEN

T.R. - 21

P.C.T. van der Hoeven

Eigenschappen en wederwaardigheden van de nog steeds
in gebruik zijnde Becker-comparator van Krecke

De Bilt, 1982

Publikatienummer: K.N.M.I. T.R. 21 (FM)

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut,
Fysisch Meteorologisch Onderzoek
Postbus 201,
3730 AE De Bilt,
Nederland

U.D.C.: 551.508.49 :

551.5(09)

Eigenschappen en Wederwaardigheden van de nog steeds in gebruik zijnde Becker-comparator van Krecke.

P.C.T.van der Hoeven

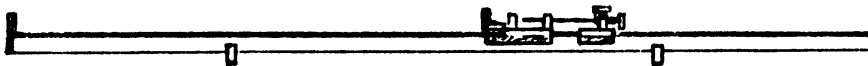
1. Korte geschiedenis.

De maker van het meetinstrument, Christopher Becker, werd in 1806 te Filsum (Hannover) geboren als zoon van een "mechanicus". Zelf was hij na zijn eerste opleiding en een leertijd in de dienst van zijn vader, van 1823 tot 1829 een leerling van von Humboldt. Van 1829 tot 1841 was hij gevestigd als instrumentmaker in Groningen, waar hij jaren lang samenwerkte met de Groninger hoogleraar S. Stratingh.

Hier bouwde hij het eerste in ons land vervaardigde en beproefde voertuig dat, gevoed door natte batterijen, aangedreven werd door "electromagnetische kracht". Tijdens proefritten legde het een afstand van meer dan 30 km. af, en trok allerwege belangstelling.

Het deed Z.M. den Koning in 1836 besluiten om hem een aanmoedigingspremie van f 600,- te schenken.

In 1841 vertrekt hij naar Arnhem waar hij een instrumentenfabriek stichtte, welke vooral bekend werd om haar belansen, elektrische apparaten en barometers. In 1854 vertrekt hij naar Amerika.



SCHAAL 1:10

Figuur 1

Het instrument hier in kwestie is een zg. "lengtecomparator" (zie fig. 1 en bijlage 1). Deze moet kort na 1841 gebouwd zijn en zal dus nog door Krecke zijn aangeschaft. Hij dient de meteorologie daarvoor al langer dan het instituut oud is. Men is in die tijd blijkbaar erg tevreden geweest met dit hulpmiddel, want tussen 1844 en 1847 wordt een serie gelijke instrumenten uitgereikt aan alle Nederlandse ijkkan-toren. Het zou die mensen best een plezier gedaan hebben wanneer ze geweten zouden hebben dat deze "Becker-comparator" niet alleen hier op het K.N.M.I., maar ook bij het ijkwezen na anderhalve eeuw nog steeds een gewaardeerd stuk van de uitrusting is.

Weliswaar heeft het vergeleken met moderne comparatoren geen erg hoge nauwkeurigheid, maar voor de meeste praktische toepassingen binnen het K.N.M.I. en het ijkwezen voldoet het aan de behoefte, en een aantal principes van lengtemeting kunnen met deze comparator bijzonder mooi gedemonstreerd worden.

Het is wel aardig om te vermelden dat INSA ook nog een in gelijke stijl gebouwde kwikbarometer in bezit heeft, eveneens van "C.Becker-Arnhem", en nog steeds bekend onder de aanduiding "Barometer van Krecke".

De Becker-comparator duikt rond 1946 op bij INSA.

In 1947 werd de staaf op verzoek van Dr. S. Hauer geverifieerd door de stichting "Meet instituut BEMETEL-TNO" te Amsterdam (ijkrapport zie bijlage 2). Daarna heeft de meetstaaf van de comparator tot 1980 in een vaste montage gediend als hoofdschaal van de primaire standaardbarometer van het K.N.M.I.

Achteraf gezien is deze bestemming ook een bijna ideale manier geweest om dit antieke ding te bewaren voor de volgende generatie. En dat zijn wij dus. In mei 1981 werden de meetstaaf en alle toebehoren door C. Werner zorgvuldig schoongemaakt, weer in de oorspronkelijke staat teruggebracht, en weer gemonteerd in de bijhorende met buitengewoon precies en degelijk vakmanschap vervaardigde djati kist, die eveneens gerestaureerd werd.

Op 29 mei 1981 werd de in de staaf ingebouwde thermometer geijkt (ijkrapport zie bijlage 3).

In januari 1982 werd de meetstaaf nogmaals geverifieerd, en feitelijk door het zelfde instituut en met dezelfde apparatuur als in 1947 (ijkrapport zie bijlage 4). Thans is dit instituut echter, met verlies van naam, een onderdeel geworden van het Van Swinden Laboratorium in Delft.

2. De comparator van Becker

De comparator van Becker heeft als belangrijkste element een driehoekige messing staaf met een afgeschuinde hoek.

Op de afgeschuinde hoek is een millimeterverdeling aangebracht over (ruim) een meter lengte. De staaf is op twee punten opgelegd, zodat de lengteverkorting door doorzakking minimaal is, en de staaf toch vrij kan uitzetten. De aflezing gebeurt met een afleesschuif met blokkeer-richting en fijninstelling. Op de schuif bevindt zich een nonius

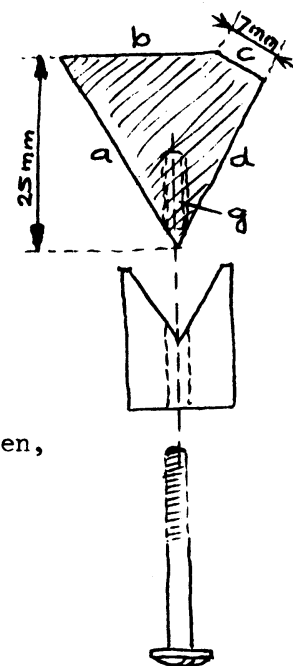
die aflezing van tiende millimeters en schatting van honderdste millimeters toelaat. Vast aan het kopeinde aan de nulzijde van de staaf, en op de afleesschuif, bevinden zich tegenover elkaar twee doken, waarmee men de lengte tussen de eindvlakken van een voorwerp kan bepalen. Voorts zijn op de afleesschuif twee tappen aangebracht. De verbindingslijn van deze tappen loopt evenwijdig aan de lengteas van de meetstaaf. Tussen de tappen kan een plat messing blokje met een zijdelings uitstekend wijzertje met streepmerkje worden gemonteerd. Dit hulpmiddel schept de mogelijkheid om andere schaalverdelingen na te meten. Men kan hierbij bijvoorbeeld denken aan de hoofdschaal van een barometer. Overigens moet men met deze laatste manier van meten voorzichtig zijn. Wanneer de staaf namelijk niet volmaakt recht is, of wanneer de geleiding van de afleesschuif wat uitgesleten raakt, gaat het wijzertje wat "kwispelen" wanneer de afleesschuif verzet wordt. Dit introduceert de zg. "Eerste-orde kantelfout van Abbe" die evenredig is met de afstand van de punt van het wijzertje tot de schaalverdeling op de staaf. Ergens in de afgelopen 140 jaar heeft men voor de K.N.M.I.-comparator nog een messing verlengstukje gemaakt dat op het wijzertje kan worden vastgeschroefd. Hierdoor wordt dit nog eens een keer of drie zo lang. Men realiseert zich dat die "eerste orde fout van Abbe" dan evenveel toeneemt.

In de messing staaf is een thermometer ingebouwd waarvan de schaalverdeling direkt de lengtecorrectie geeft.

3. Bouw van staaf en onderdelen

De vervaardiging van de meetstaaf verliep waarschijnlijk als volgt. Eerst werd de ruwe staaf gegoten, met doorsnede in de vorm van een gelijkzijdige driehoek. Dit gieten was destijds nog een bijzonder moeilijke opgave, waarbij de vorming van gietgalletjes nooit geheel te vermijden was. Vervolgens ging men (zie fig 2) de twee kopvlakken en de drie langsvlakken bewerken tot deze vlak en glad in de goede afmetingen waren gekomen. In de bewerkte vlakken treft men restanten van genoemde gietgalletjes aan.

Vervolgens koos men de beste ribbe uit en schaafde die bij, waarmee vlakje c ontstond. Ten slotte bouwde men in vlak b een thermometer in, maakte men gaten met schroefdraad (g) voor de bevestigingsschroeven, en werd op vlakje c met het voor die tijd kenmerkende vakmanschap de hoofdschaal aangebracht.



Figuur 2

Ook de meeste onderdelen van de comparator zijn in eerste instantie vervaardigd als messing gietstukken, die daarna pas tot de uiteindelijke vorm afgewerkt werden. De onderdelen zijn:

- Twee pootjes met bijbehorende schroeven voor bevestiging van de meetstaaf in de kist.
- Dook met bijbehorende schroef, vast te monteren op kopeinde staaf.
- Dook met bijbehorende schroef, vast te monteren op de afleesschuif.
- Plat messing blokje met zijdelings uitstekend wijzertje, en bijbehorend twee tappen met elk een borgmoer.
- Afleesschuif met nonius.
- Blokkeerinrichting met stelschroef voor fijninstelling van de afleesschuif.

De aanslagen van de beide doken en het zijdelings uitstekende wijzertje zijn gemaakt van gehard staal. Deze delen werden ingeklemd in hun messing dragers.

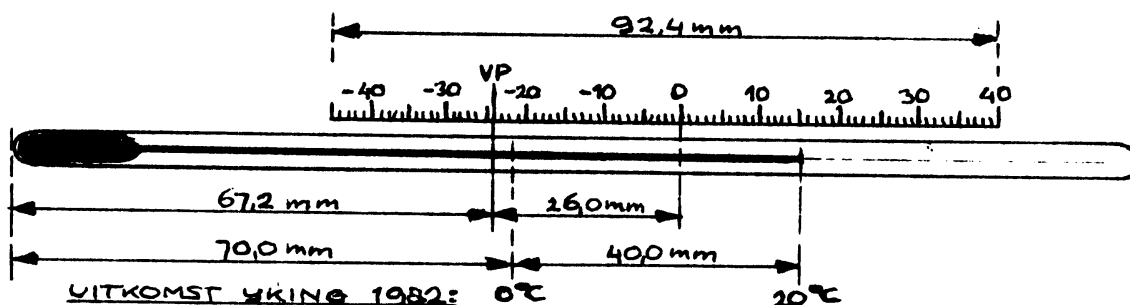
4. De ingebouwde thermometer

Werner heeft uitdrukkelijk gewaarschuwd dat de ingebouwde thermometer waarschijnlijk erg kwetsbaar geworden is.

Het glasoppervlak heeft hier en daar een wat brokkelig aanzien gekregen, en vermoedelijk zal hij erg gemakkelijk breken.

De thermometer werd schoongemaakt, voorzichtig geijkt en weer in de oorspronkelijke montage teruggezet. In principe doet men er goed aan om hem de eerstkomende tientallen jaren maar stil op zijn plaats te laten zitten.

Bij de thermometer is een schaal aangebracht waarvan direkt de op de lengtemeting toe te passen temperatuur-correctie in 0,01 mm (per meter) kan worden afgelezen. De schaal loopt van "-45" t/m "+45" (zie fig. 3). De afstand tussen deze twee eindpunten bedraagt 92,4 mm. Op de schaal staat bij -24 het vriespunt "VP" aangegeven. De afstand van VP tot het nulpunt van de schaal bedraagt 26,0 mm.



FIGUUR 3

In de oorspronkelijke montage van de thermometer is de afstand van het einde van de kwikbol tot het punt VP op de schaal 67,2 mm. Volgens de ijking van mei 1981 ligt het einde van de kwikkolom bij een temperatuur van 0°C op 70,0 mm afstand van het einde van de kwikbol. De thermometer is in zijn 140 jarig bestaan blijkbaar (door krimp van het glas) wat hoger gaan aanwijzen. Bij een temperatuurverhoging van 20,0 °C bedraagt de stijging van de kwikstand 40,0 mm. Men mag aannemen dat deze prachtig ronde waarde ook bij de bouw van de thermometer gegolden zal hebben. Deze "overbrengverhouding" wordt namelijk door een uniforme krimp van het glas niet beïnvloed.

5. Oorspronkelijk ontwerp van de meetstaaf

Bij de meetstaaf is geen certificaat uit 1845 bewaard gebleven waarin verteld wordt hoe de temperatuurcorrectie moet worden bepaald. Het is bijzonder aardig dat dit nog afgelezen blijkt te kunnen worden uit de bij de thermometer aangebrachte schaal. Dat dit nog mogelijk is komt omdat de originele thermometer nog intact gebleven is, en omdat het vriespunt VP op de schaal is aangegeven. De ijking van de thermometer is dus zondanig dat iedere $^{\circ}\text{C}$ overeenkomt met 2,00 mm. Blijkens de bij de thermometer aangebrachte schaal wordt de temperatuurcorrectie nul bij een thermometerstand die 26 mm hoger is dan $\text{VP} = 0^{\circ}\text{C}$, dus zal de staaf destijds ware millimeters aangegeven hebben bij $T_0 = 26,0/2,0\%$, dus bij:

$$T_0 = 13,0^{\circ}\text{C}$$

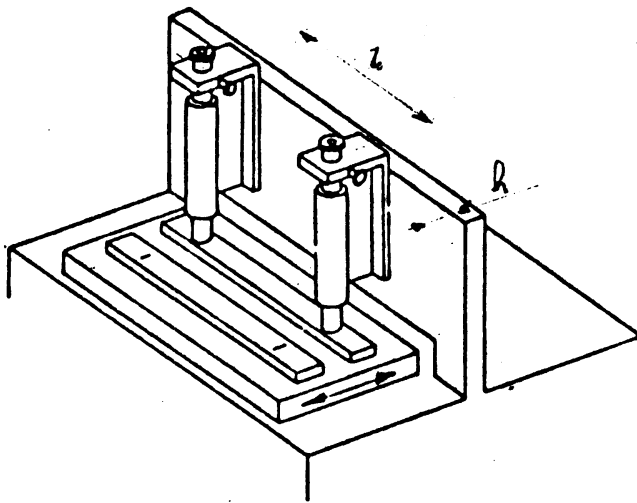
toestand 1842

Uit de tijd waarin de staaf gemaakt is zijn veel verbazend nauwkeurige bepalingen van de uitzettingscoëfficiënt β bekend. De uitzettingscoëfficiënt die Beckker voor deze messing staaf hanteerde volgt uit het feit dat hij (zie fig. 3) een uitzetting van 0,85 mm/m liet bij een temperatuurverschil van $92,4/2,00 = 46,2^{\circ}\text{C}$. Uit $0,0085 = \beta \cdot 46,2$ volgt dan:

$$\beta = 18,4 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$

toestand 1842

Het is verrassend dat dit overeenkomt met de U.C. voor messing, die sedert 1890 door de WMO (en haar voorgangers) gehanteerd wordt voor het berekenen van de temperatuurcorrectie voor de messing hoofdschalen van kwikbarometers.

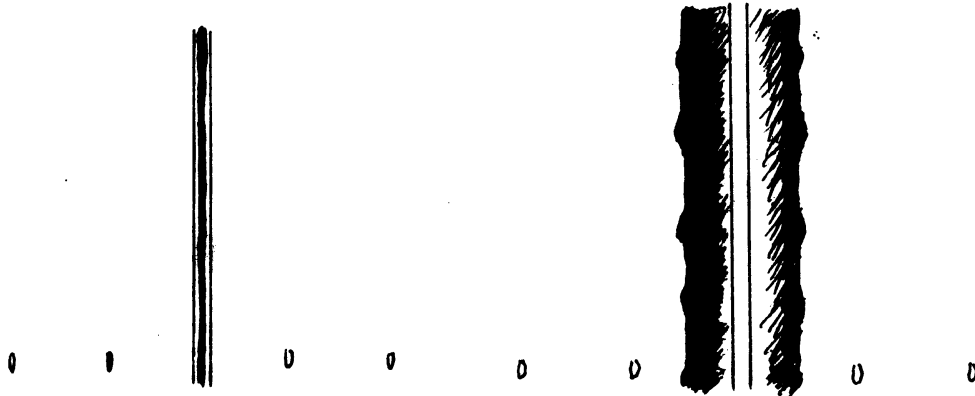


De "SIP", een zg. transversaal-comparator

6. De verifikaties van 1947 en 1982

Beide verifikaties werden uitgevoerd met dezelfde "transversaal-comparator", de "SIP" (afkorting van Société Genevoise d'Instruments Physiques). In 1947 gebruikte men hier als referentie een invar meetstaaf met $\beta = 1.10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

In 1982 werd een meetstaaf gebruikt met een uitzettingsco fфици nt $\beta = 9.10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, die opzettelijk gelijkgemaakt is aan die van het platina-iridium waarvan de internationale standaard meetstaven gemaakt zijn.



Figuur 4a

Figuur 4b

Het is een hoogst merkwaardige ervaring om door de afleesmicroscopen van de SIP de maatstrepen te bekijken. Het oculair heeft een dubbele draad door het gehele meetveld, en een hulpverdeling in tiende mm langs de onderrand. De normale werkwijze is dat men de op te meten maatstreep tussen de draden neemt (zie fig 4a).

In dat geval gaat het om verdelingen waarvan de streepjes zo dun zijn dat ze alleen bij een speciale lichtinval nog juist zichtbaar worden. De Becker heeft echter een verdeling met mooie scherpe streepjes, die gemaakt is om er vlot mee te kunnen werken met het ongewapend oog. De konsenkwentie daarvan is dat men de draden van de SIP hier precies in het midden van een "sloot" moet leggen (zie fig. 3b). De breedte van de streepjes blijkt bij rond 100 μm te liggen. Ondanks deze breedte blijken ze echter nog een paar niet geringe kwaliteiten te bezitten.

- Ze zijn allemaal nagenoeg even breed.
- De as van de streepjes ligt schitterend loodrecht op de as van de staaf.
- De randen van de streepjes blijken regelmatig genoeg te zijn om de meetdraden binnen 3 μm nauwkeurig langs het midden van de streep te kunnen leggen.



Figuur 5

In 1947 mat men de centimeterstrepen aan op ongeveer 0,6 mm verwijderd van de lijn loodrecht op de deelstrepen en in 1982 op ongeveer 1,6 mm van deze lijn. Bij beide verificaties werd bepaald wat bij een temperatuur van 20.0 $^{\circ}\text{C}$ de werkelijke afstand was tussen de nulstreep en elk van de centimeterstrepen van de Becker -2. Daar de temperatuur nooit helemaal precies op 20.0 $^{\circ}\text{C}$ kan worden gehouden, moeten alle waargenomen afstanden herleid worden tot 20.0 $^{\circ}\text{C}$. Hiervoor is het nodig om de uitzettingscoëfficiënt van de staaf te kennen. De verificatie van 1947 begint dan ook met de rapportering van de bepaling daarvan. Men vond (zie bijlage 2):

$$\beta = (18,1 \pm 0,3) \cdot 10^{-6} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$$

opgave 1947

Dit moge een wat grove uitkomst lijken, maar de bepaling laat uiteraard niet beter toe. Het is trouwens ruim mooi genoeg voor het gestelde doel. Maar aan de andere kant scheidt deze uitkomst ook geen erg goede aanleiding om af te stappen van de waarde voor β die Becker in 1842 hanteerde. Om deze reden zal hierachter blijven gelden:

$$\beta = 18,4 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

te hanteren: 1842 - heden

Nu wat de verifikaties zelf betreft.

Zowel in 1947 als in 1982 bepaalde men dus voor elke centimeterstreep de miswijzing bij een temperatuur van $20,0 \text{ } ^\circ\text{C}$. Deze afwijkingen zijn uitgezet in figuur 6. In de figuur is ook met een rechte lijn aangegeven hoe de afwijkingen in 1842 hadden moeten liggen wanneer de verdeling volmaakt naar het ontwerp was aangebracht.

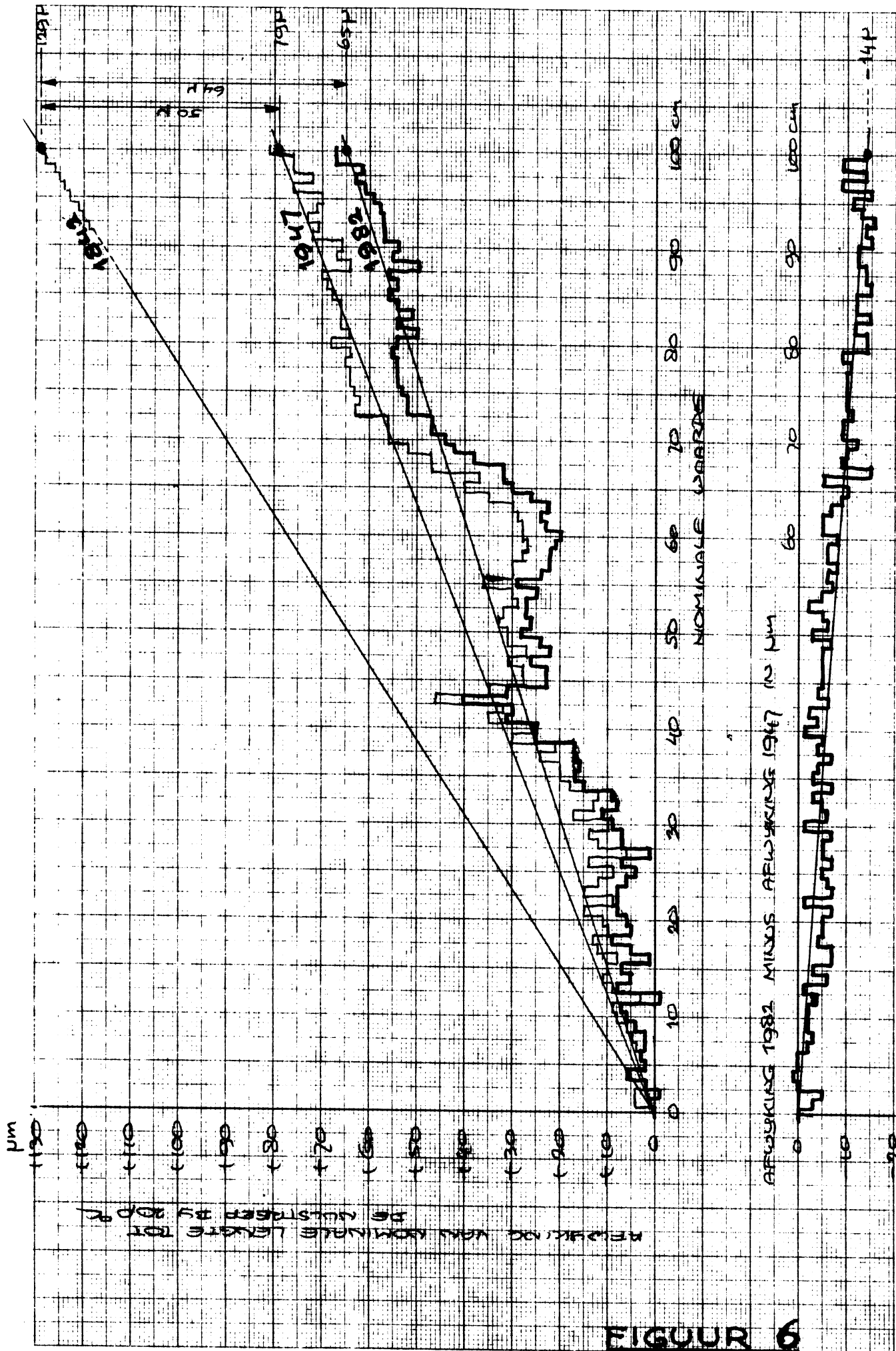
De staaf, die toen geacht werd bij $13,0 \text{ } ^\circ\text{C}$ ware millimeters aan te wijzen, zou dan bij $20,0 \text{ } ^\circ\text{C}$ op de volle meter een afwijking van

$$(20,0 - 13,0) \cdot 18,4 \cdot 10^{-6} = 129 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$
 vertoond hebben

Een eerste blik op de figuur leert dat de meetstaaf in de eerste honderdvijf jaar rond vijfhonderdste mm kromp, en afgelopen vijftiendertig jaar nog eens anderhalf honderdste mm. Op zich is zoiets normaal en meestal gevolg van een zeer langzaam en geleidelijk verlopend rekristallisatieproces in het materiaal van de staaf. Overigens is noch in 1947, noch in 1982 het verloop van de afwijkingen erg regelmatig. Daar de meetstaaf nog mooi recht blijkt te zijn, zijn deze onregelmatigheden, behalve misschien op een niet geheel gelijke verdeling van de totale krimp over de hele lengte van de staaf, waarschijnlijk minstens voor een deel terug te voeren tot onvolmaaktheden bij het aanbrengen van de millimeterverdeling.

Men realiseert zich echter dat de staaf gemaakt is voor het aflezen van tiende millimeters en het schatten van onderdelen daarvan, en dat hier op duizendste millimeters werd nagemeten.

Hij slaat daarom beslist zo'n gek figuur nog niet.



FIGUUR 6

De interpretatie van deze gegevens kan op meer dan één manier.

Hier werd er van uitgegaan dat de meetstaaf weer als hoofdschaal van een kwikbarometer zal moeten gaan dienen bij luchtdrukken tussen 700 en 800 (mm Hg)_n. Men is hier in de gelegenheid om het traject tussen 20 en 70 cm met de grootste onregelmatigheden buiten beschouwing te laten.

Het resterende deel van de verdeling blijkt men dan met goed fatsoen op honderdste millimeters te kunnen aflezen. Beide getrokken lijnen geven zodoende de (op het oog) beste aanpassing weer, aan waargenomen afwijkingen in het traject 70-100 cm.

In 1947 bedroeg bij een temperatuur van 20,0 °C de afwijking van de nominale meter t.o.v. de ware meter $79 \cdot 10^{-6}$ m.

Hieruit blijkt dat de meetstaaf "zo goed mogelijk" ware millimeters aanwees bij:

$$T_0 = 20,0 - \frac{79 \cdot 10^{-6}}{18,4 \cdot 10^{-6}}$$
$$= 15,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Toestand 1947

In 1982 bedroeg bij een temperatuur van 20 °C de afwijking van de nominale meter t.a.v. de ware meter $65 \cdot 10^{-6}$ m.

Hieruit volgt dat de meetstaaf nu dus "zo goed mogelijk" ware millimeters aanwijst bij:

$$T_0 = 20,0 - \frac{65 \cdot 10^{-6}}{18,4 \cdot 10^{-6}}$$
$$= 16,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Toestand 1982

Eén en ander betekent, dat indien de krimp van de staaf inderdaad een regelmatig verschijnsel is dat voorlopig nog voortduurt, de T_0 eerstkomende tijd elke vijf jaar met $0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ zou toenemen.

7. Aflezings ingebouwde thermometer

Blijkens de ijking van mei 1981 en het opmeten van de montage (zie bijlage 3), is de thermometer in zijn 140 jarig bestaan $70,0 - 67,2 = 2,8$ mm ofwel $1,4$ °C hoger gaan aanwijzen.

En omdat 1 schaaldeel (zie fig. 3) overeenkomt met $92,4/85 = 1,0787$ mm moet hiervoor gecorrigeerd worden met $-2,8/1,0787 = -2,6$ schaaldeel. Bovendien kromp de meetstaaf sedert zijn bouw 64 μm , ofwel bij het nameten van een ware meter krijgt men een uitkomst die 64 μm , ofwel $6,4$ honderdste mm te hoog is t.o.v. de uitkomst die men in 1842 zou hebben gekregen.

Wil men de temperatuurcorrectie van met de meetstaaf gemeten lengten direkt aflezen van de ingebouwde thermometer dan moet men met beide effecten rekening houden.

Schaalkorrectie C_s voor schaal van ingebouwde thermometer:

$$\begin{aligned} C_s &= -2,6 - 6,4 \\ &= -9,0 \text{ schaaldeel} \end{aligned}$$

Toestand 1982

Voorbeeld: Leest men op de schaal een thermometerstand "+15,2" af, dan is de toe te passen temperatuurcorrectie gelijk aan $+15,2 - 9,0 = +6,2$ honderdste mm per meter, ofwel men moet bij een gemeten lengte L^* een bedrag $6,2 \cdot 10^{-5} \cdot L^*$ optellen.

8. Het meten tussen de doken

Tussen de doken kan men de lengte van een staaf meten. Voorwaarde is dat de eindvlakken van die staaf evenwijdig zijn en loodrecht op die van de staafas staan. Men legt deze staaf, aanliggend aan de vaste dook op de meetstaaf en vervolgens schuift men de beweegbare dook voorzichtig op sluit. Daarna leest men van nonius een lengte L^{**} af. Deze aflezing moet eerst gecorrigeerd worden voor de zg. "nulpuntsfout" F_0 .

Definieert men deze fout als de waarde die men van de nonius afleest wanneer de doken tegen elkaar geschoven zijn, dan bepaalt men de "schone" aflezing L met $L^* = L^{**} - F_0$, en wanneer men L^* dan nog voor temperatuur corrigeert (zie fig. 7) krijgt men het ware aantal millimeters dat tussen de doken zit.

Na de laatste restauratie blijkt dat wanneer men bij de Becker - 2 de doken tegen elkaar schuift, ze elkaar over de volle lengte raken.

Voor de nulpuntsfout F_0 geldt:

$$F_0 = 0,00 \text{ mm}$$

Toestand jan. 1982

Overigens heeft men ook hier nog te maken met een (oncorrigeerbare) "eerste orde kantelfout van Abbe". Evengoed als het zijdelings uitstekende wijzertje, zal ook de dook op de afleesschuif wat gaan "kwispelen" wanneer de schuif over niet helemaal vlakke aanslagen verschoven wordt.

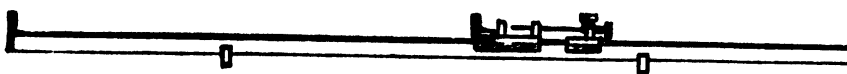
Door de mooie gedrongen bouw van de doken en hun montage vlak tegen de schaal aan, zal deze fout hier echter weinig kans krijgen om hinderlijk groot te worden.

Tenslotte is bij het opmeten van dergelijke "eindmaten" ook nog de meetdruk van belang. Elk materiaal is samendrukbaar en de doken zijn vervormbaar. Een te grote meetkracht zou ontoelaatbare fouten introduceren. Om deze reden treft men bij micrometerschroeven een slipkoppeling in de bedieningsknop aan om de meetkracht te begrenzen.

De Becker 2 heeft een dergelijke voorziening niet. Hier zal men zèlf verstandig moeten zijn en, gedecideerd werkend, elke vorm van grofheid achterwege moeten laten.

BYLAGE 1

DE BECKER-LENGTECOMPARATOR VAN KRECKE



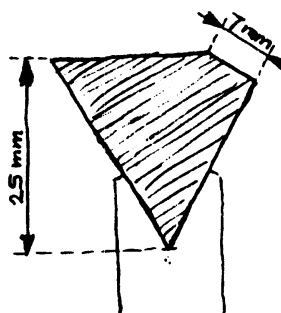
Fabrikant C.Becker, Arnhem.
 Fabrieksnummer 2

Onderdelen van de meetstaaf

1. Meetstaaf met ingebouwde thermometer. De staaf staat op twee losse voetstukjes.
2. Dook, vast te schroeven aan kopeinde nulzijde staaf.
3. Dook, vast op slede met blokkerinrichting en fijnregeling.
4. Messing blokje met zijdelings uitstekend wijzertje, met twee tappen scharnierbaar op slede te bevestigen.
5. Djäti kist waarin de meetstaaf vastgeschroefd behoort te zijn.

Technische gegevens meetstaaf

Materiaal gegoten messing
 Doorsnede driehoekig:
 Lengte blank 9 mm
 schaal 1030 mm
 blank 134 mm
 totaal 1173 mm



Hoofdschaal op staaf:
 verdeling hele millimeters
 dikte streepjes ca 0,10 mm
 bereik 0 - 1030 mm

hulpschaal op slede:
 nonius 0/10 t/m 10/10 mm
 dikte streepjes ca 0,10 mm

Schaalaflezing bij aaneengeschoven doken jan 1982:
 Nulpuntsfout $F_0 = 0,00$ mm

Ingebouwde thermometer:
 ijking 2,00 mm per °C
 Schaal temperatuurcorrectie in 0,01mm/m
 Bereik -45 t/m +40 (aflezing in 1982 te corrigeren met -9,0 schaaldeel)

Temperatuurcorrectie Becker - 1842

Lin.U.C. $\beta = 18,4 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
 Ware mm bij $T_0 = 13,0 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatuurcorrectie BEMETEL - TNO 1947

Lin.U.C. $\beta = 18,4 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
 Ware mm bij $T_0 = 15,7 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatuurcorrectie v. SWINDENLAB, 1982

Lin.U.C. $\beta = 18,4 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
 Ware mm bij $T_0 = 16,5 \text{ } ^\circ\text{C}$

BYLAGE 2

24 Maart 1947.

T.F. 1397.
leb/K.

Koninklijk Nederlandsch Meteorologisch
Instituut,

te
D E B I L T.

ter attentie van Drs. A. Hauer.

Zeer geachte Heer Hauer,

./.

Volgens telefonische afspraak met
den Heer Visser zend ik U bijgaande het meetrarport
M - 23 betreffende de contrôle van de koperen meetstaaf.
De meetstaaf in kwestie werd 13 Maart j.l. medegegeven
aan den Heer Korrens, chauffeur van Prof. Veningh Meinez.

Hoogachtend,
Prof. Dr A. Michels,
bij afwezigheid:

H. Lebesque.

MEETRAPPORT M - 23.

De Controle van een koperen meetstaaf.

Ter controle van de uitzettingscoëfficiënt, de lengte en de regelmaat der centimeterverdeelingen werd ontvangen een koperen meetstaaf, ruim één meter lang, gemerkt C. Becker - Arnhem, genummerd 2.

Bepaling van de uitzettingscoëfficiënt.

De uitzettingscoëfficiënt van het materiaal van de meetstaaf werd bepaald door vergelijking van 100 cm van de meetstaaf bij 11^o,5 en 20^o,5 C. met de S.I.P. invarmeetstaaf No. 555 op een S.I.P. lengtecomparateur. De te Parijs op het Bureau International des Poids et Mesures bepaalde correctie's en uitzettingscoëfficiënt van de invar meetstaaf werden in rekening gebracht.

Voor de uitzettingscoëfficiënt werd gevonden:

$$\alpha_{c.} = (18,1 \pm 0,3) \times 10^{-6}.$$

Bepaling van de lengte van 0 tot 100 cm en de regelmaat der centimeterverdeelingen.

Gebruikmakend van bovengenoemde invarmeetstaaf en de gevonden uitzettingscoëfficiënt van de koperen meetstaaf werden bij 20^o,00 C de afwijkingen van de nominale lengten bepaald van alle centimeterstrepen tot de 0-streep.

De afwijkingen werden bepaald op een punt van de deelstreep ongeveer 0,6 mm verwijderd van de lijn loodrecht op de deelstreep.

De afwijkingen staan vermeld in bijgaande tabel I.

De nauwkeurigheid bedraagt $\pm 2 \mu$.

Zonder het aanbrengen van correcties voor de onregelmatigheid van de verdeelingen is de meetstaaf te gebruiken voor metingen met een toegelaten fout van $\pm 0,02$ mm.

Amsterdam, 17 Maart 1947.
Meetinstituut Remetel T.N.O.

Bijlage: 1 tabel.

Bij Meetrapport M - 23.

Afwijking van de nominale lengte tot de 0-streep bij 200 C.

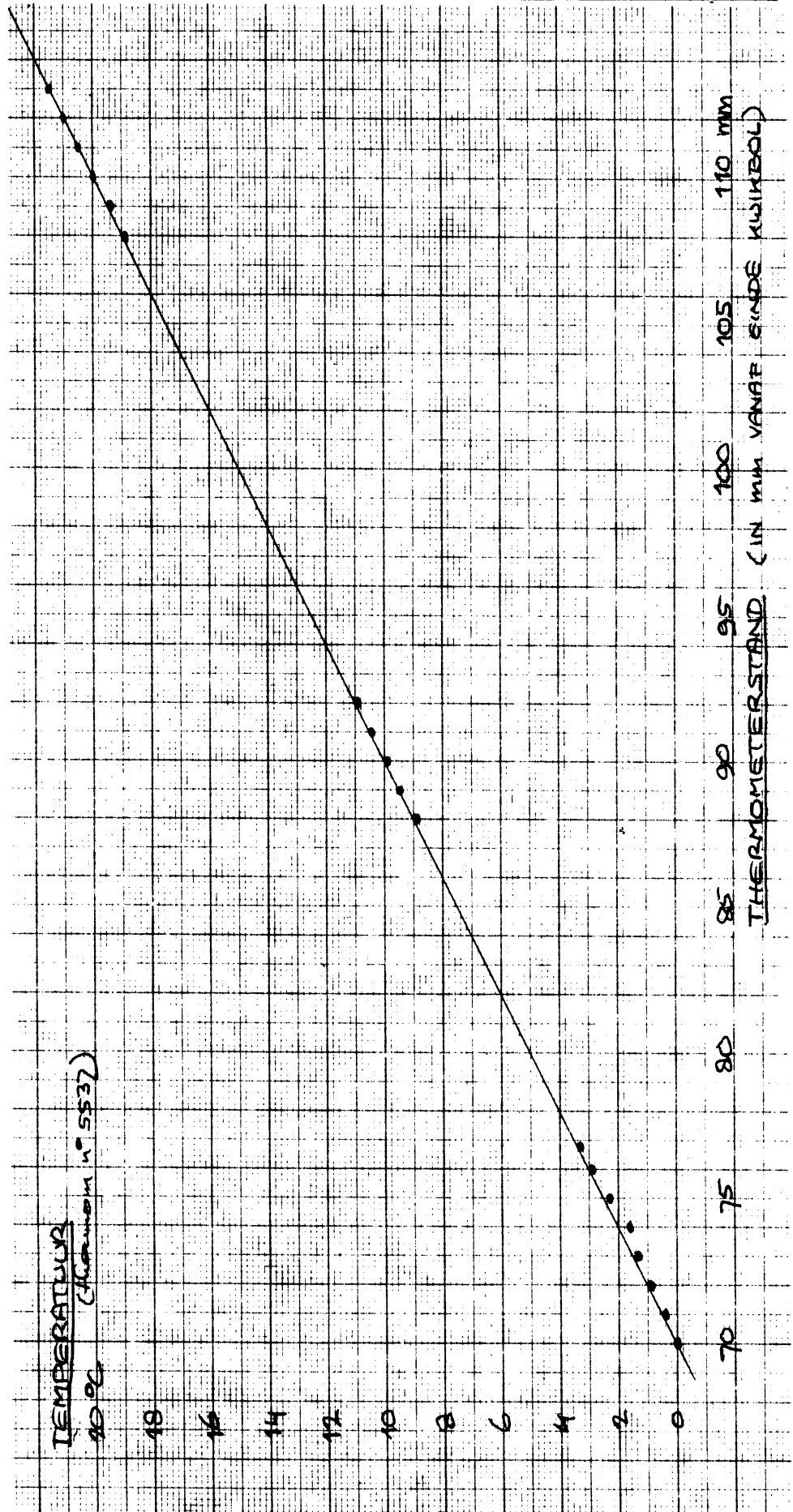
1 cm +	4 μ	36 cm +	20 μ	69 cm +	52 μ
2	4	36	20	70	56
3	2	37	24	71	56
4	5	38	21	72	56
5	2	39	30	73	63
6	3	40	26	74	62
7	4	41	35	75	63
8	5	42	32	76	64
9	6	43	46	77	64
10	8	44	35	78	65
11	9	45	28	79	64
12	3	46	28	80	68
13	9	47	31	81	64
14	11	48	27	82	66
15	10	49	31	83	66
16	8	50	31	84	66
17	12	51	33	85	68
18	13	52	32	86	69
19	10	53	29	87	70
20	11	54	30	88	64
21	15	55	36	89	67
22	9	56	30	90	66
23	15	57	30	91	72
24	12	58	28	92	71
25	9	59	27	93	73
26	14	60	28	94	71
27	6	61	28	95	70
28	12	62	29	96	76
29	14	63	30	97	72
30	10	64	35	98	76
31	17	65	40	99	76
32	13	66	37	100	81
33	12	67	47		
34	18	68	47		

BYLAGE 3

IJking ingebouwde thermometer van Meetstaaf BECKER-2 op 29 mei 1981

Als ijkthermometer fungeerde laboratoriumthermometer no. 5537 uit het ijkvat. Daarnaast werd ook de montering van de thermometer in de meetstaaf opgemeten. Uitkomsten:

- Afstand einde kwikbol tot nulpunt schaal 93,3 mm
- Afstand einde kwikbol tot punt VP op schaal 67,2 mm
- Afstand van punt VP op schaal tot nulpunt schaal 26,0 mm



Dienst
van
het
ijkwezen

BYLAGE 4

Certificaat

Nummer 99110864

Van Swinden Laboratorium VSL
Schoemakerstraat 97, Delft
Postadres: Postbus 654, 2600 AR Delft
Telefoon 015-569271

Aanvrager : Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut
Wilhelminalaan 10
DE BILT

Aangeboden : comparator van Becker
fabrikaat: C. Becker Arnhem
nr. : 2

Wijze van onderzoek : Van de op de driehoekige messing staaf aangebrachte mm verdeling werden de afstanden van alle centimeterstrepen tot de nulstreep gekalibreerd met behulp van een trans-versaalcomparator en een standaard liniaal met een lineaire uitzettings coëfficiënt van $9 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. De plaats op de deelstrepen waar de metingen werden uitgevoerd, is gelegen op de lijn, die de korte deelstrepen door midden deelt.
Van de op het schuifstuk aangebrachte nonius werden de afstanden van alle deelstrepen tot de nulstreep gemeten. Het onderzoek werd verricht in februari 1982.

Resultaten : De op bijgaand gewaarmerkt blad 2 opgenomen meetresultaten zijn herleid naar $20 \text{ } ^\circ\text{C}$. De uitzettingscoëfficiënt van de messing staaf werd gesteld op $18,1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, een waarde, die bij de verificatie, uitgevoerd door het Meetinstituut Bemetal TNO in 1947, door metingen aan de betreffende staaf werd bepaald.



Dit certificaat is afgegeven op grond van het bepaalde in artikel 1, tweede lid, van het Koninklijk besluit van 21 december 1946 (Stb. G 379) tot vaststelling van bepalingen nopens het onderzoek, bedoeld in artikel 17, vierde lid, van de IJkwet 1937 (Stb. 627). Het wordt verstrekt onder het

voorbehoud, dat de Staat deswege generlei aansprakelijkheid aanvaardt. Reproductie van het volledige certificaat is toegestaan. Gedeelten van het certificaat mogen slechts worden gereproduceerd na verkregen schriftelijke toestemming.



Gemeten maat = nominale maat + afwijking

Afwijkingen van de nominale maat tot de nulstreep bij 20 °C
 meetonzekerheid ± (1 x 10⁻⁶ L + 3 µm)

<u>Nominale maat</u>	<u>Afwijking</u>	<u>Nominale maat</u>	<u>Afwijking</u>	<u>Nominale maat</u>	<u>Afwijking</u>
<u>cm</u>	<u>µm</u>	<u>cm</u>	<u>µm</u>	<u>cm</u>	<u>µm</u>
1	+ 1	34	+ 15	67	+ 32
2	- 1	35	+ 17	68	+ 38
3	+ 2	36	+ 16	69	+ 42
4	+ 6	37	+ 17	70	+ 44
5	+ 2	38	+ 17	71	+ 47
6	+ 3	39	+ 25	72	+ 47
7	+ 2	40	+ 25	73	+ 52
8	+ 2	41	+ 31	74	+ 52
9	+ 4	42	+ 30	75	+ 53
10	+ 6	43	+ 40	76	+ 54
11	+ 7	44	+ 31	77	+ 54
12	- 1	45	+ 23	78	+ 54
13	+ 8	46	+ 23	79	+ 55
14	+ 5	47	+ 26	80	+ 54
15	+ 7	48	+ 22	81	+ 50
16	+ 1	49	+ 24	82	+ 54
17	+ 5	50	+ 28	83	+ 51
18	+ 9	51	+ 26	84	+ 54
19	+ 5	52	+ 27	85	+ 56
20	+ 6	53	+ 27	86	+ 54
21	+ 8	54	+ 25	87	+ 56
22	+ 8	55	+ 29	88	+ 50
23	+ 8	56	+ 24	89	+ 55
24	+ 6	57	+ 22	90	+ 54
25	+ 4	58	+ 22	91	+ 57
26	+ 7	59	+ 21	92	+ 57
27	+ 1	60	+ 20	93	+ 57
28	+ 7	61	+ 23	94	+ 58
29	+ 7	62	+ 24	95	+ 59
30	+ 9	63	+ 23	96	+ 61
31	+ 11	64	+ 26	97	+ 63
32	+ 8	65	+ 30	98	+ 62
33	+ 9	66	+ 32	99	+ 67
				100	+ 67

Dienst van het ijkwezen

Certificaat nr 99110864

blad 3

noniusverdeling

<u>nominale maat</u>	<u>afwijking</u>
<u>mm</u>	<u>µm</u>
0,9	- 2
1,8	- 2
2,7	- 1
3,6	- 3
4,5	- 4
5,4	+ 2
6,3	- 3
7,2	- 3
8,1	- 1
9,0	- 3



Enige rekenvoorbeelden

Wanneer men met de Becker -2 gaat werken krijgt men onmiddellijk te maken met "correcties" en "afwijkingen". Daar men hier bijzonder gemakkelijk in de war raakt, volgen hier een zestal uitgewerkte opgaven.

We gaan daarbij uit van de volgende gegevens

$$\text{Uitzettingscoëff. meetstaaf: } \beta = 18,4 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\text{Staaf toont ware mm bij } : \quad T_0 = 16,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

De temperatuur T lezen we af van een losse thermometer, en tenzij anders vermeld nemen we aan dat zowel thermometer als staaf dan in thermisch evenwicht met de luchttemperatuur verkeren.

Bij de lengtemeting lezen we steeds één of ander lengte L^* af. Dit geldt ongeacht of we nu een voorwerp meten tussen de doken (L^* direkt af te lezen van de nonius omdat nulpuntsfout $F_0 = 0,00 \text{ mm}$), of een schaal nameten met het op de slede aangebracht wijzertje (L^* verschil van twee aflezingen) of een niveauverschil meten met een kathetometer (L^* verschil van twee waarnemingen met de meetkijker).

1. Lengtemeting van een voorwerp

Leg het voorwerp tussen de doken. We nemen waar een lengte L^* en van de thermometer lezen we een temperatuur T af.

Gevraagd: Welke lengte hebben we hier tussen de doken.

Is de waargenomen temperatuur T hoger dan T_0 , dan is de staaf uitgezet, en men leest dus een te lage L^* af. De temperatuurcorrectie C_T die men bij L^* moet opstellen om de ware lengte L te krijgen is zodoende positief (een "correctie" is altijd "naar de goede toe").

Men krijgt hier:

$$L = L^* + C_T$$

waarin:

$$C_T = +\beta \cdot (T - T_0) \cdot L^*$$

$$= +0,0000184 \cdot (T - 16,5) \cdot L^*$$

2. Gevolg van fout in temperatuurmeting

Stel dat de temperatuur T_s van de meetstaaf door onvoldoende aanpassing niet gelijk is aan T :

We moesten dan corrigeren met:

$$C_{TS} = +0,0000184 \cdot (T_s - 16,5) \cdot L^*$$

We corrigeren echter met:

$$C_T = +0,0000184 \cdot (T - 16,5) \cdot L^*$$

De correctiefout $\Delta C_T = C_{TS} - C_T$ wordt dus:

$$\Delta C_T = +0,0000184 \cdot (T_s - T) \cdot L^*$$

Om te laten zien hoe groot deze fout is, geeft onderstaand tabelletje

ΔC_T voor $T_s - T$ van 0°C tot 3°C , voor $L^* = 1000$ mm.

$T_s - T$	0	1	2	3 $^\circ\text{C}$
ΔC_T voor $L^* = 1000$ mm	0,00	0,02	0,04	0,05 mm

Conclusie. Wil men dat de fout in de temperatuurcorrectie ΔC_T op de volle meter, kleiner blijft dan 0,01 mm, dan moet men de temperatuur van de staaf op beter dan $0,5^\circ\text{C}$ nauwkeurig kennen.

3. Onzekerheid over uitzettingscoëff. β

Stel dat de werkelijke U.C. van de staaf niet $0,0000184^\circ\text{C}^{-1}$ is zoals we veronderstellen, maar de in par 6 genoemde waarde van $0,0000181^\circ\text{C}^{-1}$,

We moesten dan corrigeren met:

$$C_{T\beta'} = 0,0000181 \cdot (T - 16,5) \cdot L^*$$

We corrigeren echter met:

$$C_{T\beta} = 0,0000184 \cdot (T - 16,5) \cdot L^*$$

De correctiefout $\Delta C_{T\beta} = C_{T\beta'} - C_{T\beta}$ wordt dus:

$$\Delta C_{T\beta} = 0,3 \cdot 10^{-6} \cdot (T - 16,5) \cdot L^*$$

In de tabel hieronder is de fout $\Delta C_{T\beta}$ gegeven voor $L^* = 1000$ mm en voor temperaturen T die 0°C tot 30°C afwijken van T_0 :

T - T_0	0	10	20	30 $^\circ\text{C}$
$\Delta C_{T\beta}$ voor $L^* = 1000$ mm	0,000	0,003	0,006	0,009 mm

Conclusie Pas bij werktemperaturen T die meer dan 20°C à 30°C van $T_0 = 16,5^\circ\text{C}$ vandaan liggen gaat de in par 6 genoemde onzekerheid in de bepaling van β zodanig meespelen dat dit op de volle meter een onzekerheid van 0,01 mm introduceert. Met andere woorden: van de in par 6 ter sprake gekomen onzekerheid in de bepaling van β hoeven we ons in de praktijk niets aan te trekken.

4. Nameten van een schaalverdeling op een messingdrager

We hebben op het K.N.M.I. een aantal oude kevelbarometers met een hoofdschaal in mm die is aangebracht op een messing drager. Volgens opgave van de fabriek is de temperatuur waarbij de hoofdschaal "ware millimeters" aanwijst gelijk aan 0°C . Bij de meetstaaf Becker -2 hebben we gezien dat die in zijn 140 - jarig bestaan wat gekrompen is. Het is heel goed mogelijk dat met de barometerschalen iets dergelijks gebeurd is.

Gevraagd: Zijn de barometerschalen inderdaad nog correctievrij bij 0°C ?

Stel dat we deze verificatie uitvoeren bij 0°C , dan zouden we de op de meetstaaf gemeten waarden L moeten corrigeren met:

$$C_T (0^\circ\text{C}) = 0,000184 \cdot (0,0 - 16,5) \cdot L^*$$

$$= -0,000304 \cdot L^*$$

ofwel:

L	700	720	740	760	780	800 mm
$C_T (0\text{ }^\circ\text{C})$	-0,21	-0,22	-0,23	-0,23	-0,24	-0,24 mm

Als we de nulpunten van schaal en meetstaaf naast elkaar leggen moeten we dus controleren of streepje 700 mm op de barometer tegenover $L^* = 700,21$ op de staaf ligt, 720 mm tegenover 720,22 enz. enz. Nu realiseer men zich het volgende:

Of men deze verificatie nu uitvoert bij $0\text{ }^\circ\text{C}$, $20\text{ }^\circ\text{C}$, of welke andere temperatuur dan ook, zolang staaf en barometerschaal maar dezelfde temperatuur hebben zal men streepje 700 op de barometer altijd tegenover $L^* = 700,21$ mm op de staaf moeten vinden, 720 tegenover 720,22 mm, enz. De reden daarvan is dat de messing schaal van de barometer en de messing meetstaaf na gelijke temperatuurveranderingen altijd een gelijk bedrag korter of langer geworden zijn. Hieraan kunnen de volgende twee prettige gevolgtrekkingen verbonden worden:

Conclusie 1 De Becker -2 is bijzonder geschikt voor het nameten van schalen op messing dragers. Men kan dan één simpele correctie toepassen omdat de werkteperatuur niet meer ter zake is. De enige voorwaarde is dat de temperaturen van meetstaaf en schaaldragers gelijk moeten zijn en blijven.

Conclusie 2 Past men op alle aflezingen L^* van de meetstaaf consequent de correctie $C_{T_0} = -0,000304 \cdot L^*$ toe, dan maakt men van de Becker -2 (met $T_0 = 16,5\text{ }^\circ\text{C}$) een messing meetstaaf waarvoor geldt $T_0 = 0\text{ }^\circ\text{C}$.

In formulevorm is dit laatste in een paar regels op te schrijven:
De temperatuurcorrectie voor de Becker 2 is:

$$\begin{aligned}
 C_T &= B.(T-T_0).L^* \\
 &= B.T_0.L^* + B.T.L^* \\
 &= -0,000304.L^* + 0,0000184.T.L^*
 \end{aligned}$$

①
②

- ① Een correctie die van de Becker -2 een meetstaaf met $T_0 = 0^\circ\text{C}$ maakt
- ② De gewone temperatuurcorrectie voor een messing meetstaaf waarvoor $T_0 = 0^\circ\text{C}$.

5. De Becker -2 als hoofdschaal in een hevelbarometer

Stel men gebruikt de Becker -2 als barometerschaal naast een U-buis met kwik die men aan één kant vacuum zuigt. Het op de meetstaaf waargenomen niveauverschil van beide kwikmenisci is L^* .

De temperatuur T van meetstaaf en kwik leest men af van een losse naast de opstelling gehangen thermometer.

Gevraagd: Wat is de temperatuurcorrectie van deze barometer.

De oplossing is doodsimpel. Voor een barometer met een messing hoofdschaal die ware millimeters aanwijst bij $T_0 = 0^\circ\text{C}$ geldt:

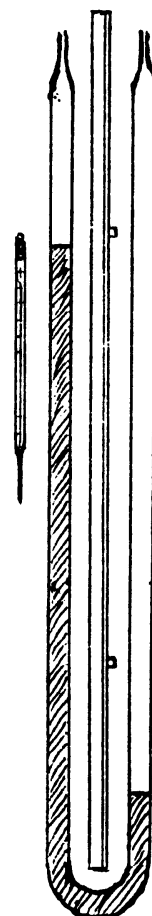
$$C_T = -\frac{\alpha - \beta}{1 + \alpha.T}.T.L^*$$

indien $T_0 = 0^\circ\text{C}$ ware

Of omdat α (= vol U.C. kwik) = 0,0001818 en $1 + \alpha.T$ vrijwel constant vlak bij 1 is wordt dit:

$$C_T = -0,0001628.T.L^*$$

indien $T_0 = 0^\circ\text{C}$ ware



Welnu, bij punt 4 zagen we hoe men van de Becker -2 een meetstaaf met $T_0 = 0^\circ\text{C}$ kan maken. Toepassing van die truc levert:

$$C_T = -0,000304.L^* - 0,0001628.T.L^*$$

temperatuurcorrectie voor hevelbarometer met de
Becker -2 als hoofdschaal

6. Gevolgen van fouten in temperatuurmeting

Stel dat de temperatuur van het kwik in de U-buis door onvoldoende aanpassing niet gelijk is aan T maar gelijk aan T_K , en de temperatuur van de meetstaaf ook niet gelijk is aan T , maar aan T_S .

Gevraagd: Welke fout maken we bij het berekenen van de temperatuurcorrectie van deze barometer.

Verwaarlozen we een tweede-orde effect (de $1 + \alpha.T_K$ in de noemer) dan hadden we moeten corrigeren met

$$C_{T'} = (-\alpha.T_K + \beta.T_S).L$$

Van de losse thermometer lezen we echter af dat "de temperatuur" gelijk is aan T en we corrigeren met:

$$C_T = (-\alpha.T + \beta.T).L$$

Bedenken we dat door een speling der natuur op een % nauwkeurig geldt dat $\beta = 0,1.\alpha$, dan wordt de fout $\Delta C_T = C_{T'} - C_T$ die we hier maken gelijk aan:

$$\Delta C_T = \alpha (-(T_K - T) + 0,1 (T_S - T)).L$$

We zouden nu graag willen dat deze fout ΔC_T kleiner blijft dan 0,01 mm of eigenlijk nog iets strakker, namelijk kleiner dan 0,01 mbar.

Werken we hier in mbar (de eenheden van ΔC_T en L^* zijn automatisch gelijk, of u nu werkt in Rijnlandse duimen, cm, mm of mbar), dan geldt voor een kolomlengte van 1000 mbar:

$$\Delta C_T = 0,18 (-(T_K - T) + 0,1.(T_S - T))$$

(geldig voor 1000 mbar)

Wil $|\Delta C_T|$ kleiner dan 0,01 mbar zijn, dan zal de temperatuurfunctie tussen de haken kleiner dan 0,05 °C moeten blijven.

Voor $T_K = T_S = T$ is hieraan voldaan. Het meest kritisch is een kleine afwijking in de temperatuur van het kwik. De term $|T_K - T|$ zal kleiner dan 0,05 °C moeten blijven. De temperatuur van de messing staaf is minder gevoelig: $0,1 \cdot |T_S - T|$ moet kleiner blijven dan 0,05 °C, ofwel $|T_S - T|$ kleiner dan 0,5 °C.

Conclusie Bij het aanbrengen van de temperatuurcorrectie op een luchtdrukmeting is de temperatuur van het kwik tien maal kritischer dan die van de messingschaal. Voor elke halve tiende °C onzekerheid omtrent de kwiktemperatuur raakt men een honderdste millibar kwijt. Men doet er daarom goed aan om hier een thermometer te gebruiken met een schaal die bij voorkeur in tiende °C verdeeld is, en deze zo te monteren dat hij goed thermisch contact met het kwik heeft.