

**KONINKLIJK NEDERLANDS
METEOROLOGISCH INSTITUUT**

TECHNISCHE RAPPORTEN

T.R. - 14

P.C.T. van der Hoeven

Beschrijving van in 1981 op het KNMI
aanwezige kwikbarometers

De Bilt, 1982

Publikatienummer: K.N.M.I. T.R. 14 (FM)

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

U.D.C.: 551.508.41

Beschrijving van in 1981 op het KNMI
aanwezige kwikbarometers

P.C.T. van der Hoeven

1. Inleiding

In tegenstelling tot de standaardwaarnemingen van temperatuur, vochtigheid en wind, die duidelijk worden beïnvloed door de aard van het oppervlak waarboven wordt gemeten, bezitten luchtdrukwaarnemingen een nagenoeg volmaakte synoptische representativiteit. Loodrecht op de isobaren gemeten, bedraagt de gemiddelde luchtdrukgradiënt op onze breedte ongeveer 2 mbar per 100 km. De door de WMO voorgeschreven meetnauwkeurigheid van 0,1 mbar is zodoende equivalent met het voorschrift de positie in tienden van graden (dus met onzekerheid van 5 km) op te geven. In de verticaal is 0,1 mbar equivalent met een hoogteverschil van 8 dm.

Men onderschatte de betekenis van de luchtdrukmeting niet. Wanneer ergens op een afgelegen punt een vast waarnemingsstation wordt opgebouwd, is de vraag naar de luchtdruk de eerste vraag die gesteld wordt. Dit gegeven moet dan van zodanige kwaliteit zijn, dat men daar te allen tijde volledig op kan vertrouwen. Vertaalt men in dezen de gevoelens van de meteoroloog in techniek, dan wil dit hier zeggen dat de instrumentele fouten beslist kleiner dan 0,3 mbar moeten blijven.

Deze eis is zwaar. Luchtdrukmetingen worden daarom steeds met grote zorg omringd. Het gebruik van zeer goede (en kostbare) meetinstrumenten is altijd verplicht geweest. Men heeft destijds een wel zeer gelukkige greep gedaan met het uitvinden van een hydrostatische balans (de ouwe trouwe kwikbarometer), waarmee de luchtdruk met grote nauwkeurigheid kan worden bepaald door middel van directe weging. Onder de handen van bekwame

Koninklijk Nederlands
Meteorologisch Instituut
Bibliotheek,
Postbus 201,
3730 AE DE BIJ.
Nederland

instrumentmakers groeide hieruit een buitengewoon stabiel precisie-instrument, waar de meteorologie zeer veel aan te danken heeft. Men kan gerust stellen, dat de boven gegeven nauwkeurigheidsnorm er zijn technisch bestaansrecht aan ontleent. Een sprekend teken waaruit blijkt hoeveel inspanning men in de meteorologische diensten altijd voor deze norm heeft overgehad, is het feit dat men de voor routinegebruik bepaald hinderlijk gecompliceerde correctieprocedures, waarmee de waargenomen kolomlengten tot gewenste luchtdrukwaarden moeten worden herleid, steeds met de grootste beslistheid heeft gehandhaafd en taai heeft verdedigd.

In dit verslag worden de kwikbarometers beschreven, die in 1981 aanwezig waren op het KNMI. En zoals reeds gezegd, is een kwikbarometer dus een hydrostatische balans, waarmee de luchtdruk wordt gemeten door deze uit te balanceren tegen het gewicht van een kwikkolom. Vanwege de uitzonderlijk grote meetnauwkeurigheid die hier gevraagd wordt, krijgt men bij deze meting ineens last van allerlei zaken waar men normaliter nooit iets van merkt.

In de eerste plaats blijkt de kwikkolom niet overal evenveel te wegen. De versnelling van de zwaartekracht varieert namelijk met de geografische breedte en met de hoogte boven zeeniveau. Dit effect is voor alle kwikbarometers gelijk en wordt beschreven in paragraaf 2.

Het metaal kwik heeft een aantal exclusieve eigenschappen, die het bij uitstek geschikt maken voor het gebruik in barometers. Het is vloeibaar, bij kamertemperatuur heeft het een bijzonder lage dampspanning (0,001 mbar bij 15° C), het is bijzonder zwaar, in een glasbuis vormt het een bolle meniscus, en het is ongelooflijk zuiver te bereiden. Daarnaast heeft het een paar minder prettige eigenschappen waarmee men terdege rekening moet houden. De eigenschap, die in de praktijk de meeste narigheid geeft, is dat de meniscus niet altijd even hoog is, zodat de capillariteitsdepressie, die hierbij optreedt, bepaald hinderlijk variabel kan zijn. De oorzaak hiervan is het ontstaan

van aanslag op de glaswand. Men kan hiertegen maar twee dingen doen: òf men kan de hoogte van de meniscus opmeten en aan de hand daarvan corrigeren, òf men moet de buis zo schoon zien te houden, dat de meniscus (redelijk) constant blijft en dan op één of andere manier een gemiddelde correctie toepassen. In paragraaf 3 wordt de capillariteitsdepressie voor verschillende buisdikten en meniscushoogten gegeven.

Een tweede hinderlijke eigenschap van kwik is dat de soortelijke massa (gezien tegen de verlangde meetnauwkeurigheid) op een verschrikkelijke manier met de temperatuur verandert. Aan de andere kant is dit verband echter weer zo prachtig gedetermineerd, dat men dit effect volledig de baas kan blijven door de temperatuur van het kwik goed op te meten.

Behalve het kwik, blijken ook de overige onderdelen van het instrument bij temperatuurveranderingen in een nog juist hinderlijke mate "werking" te vertonen en zo de meting te beïnvloeden. Ook hiervoor kan gecorrigeerd worden, indien men de temperatuur in het materiaal kent.

De in 1981 op het KNMI aanwezige barometers vallen in twee hoofdtypen uiteen, namelijk bakhevelbarometers en bakbarometers. Deze hoofdtypen worden respectievelijk in de paragrafen 4 en 5 aan de orde gesteld. In deze paragrafen treft men eerst een algemene beschrijving aan en vervolgens een beschrijving van alle aanwezige representanten.

Indien men wil, dat bij het corrigeren van de aflezingen de zuiver rekentechnische fouten "uit het zicht" blijven, moet er waanzinnig nauwkeurig gewerkt worden, d.w.z. de correcties moeten een orde nauwkeuriger worden bepaald dan de luchtdruk die men meet, en ze moeten gedisciplineerd worden verwerkt. Volgt men in dezen de aanbevelingen van de WMO, dan houdt dit in:

- bepaal eerst de "schone" kolomlengte p^* door eventuele schaalcorrecties, nulpuntcorrectie en meniscuscorrecties toe te passen;

- breng vervolgens een temperatuurcorrectie C_T aan waarin zowel de soortelijkgewichtsverandering van het kwik als de maatveranderingen van het barometermateriaal zijn verwerkt;
- breng vervolgens de gravitatiecorrectie C_g aan, en dan liefst op basis van de voor temperatuur gecorrigeerde druk $p^* + C_T$. (Gespecificeerd: bepaalt men C_g op basis van p^* in plaats van op basis van $p^* + C_T$, dan scheelt dat op onze breedte maar 0,002 mbar).

De in de paragrafen 4 en 5 gegeven correctievoorschriften zijn afgestemd op de normale barometerijkingen. Hierbij is het beslist nodig dat de luchtdruk met een nauwkeurigheid van beter dan 0,1 mbar wordt bepaald. Behalve in formulevorm, zijn alle correcties daarom ook in honderdste mm afleesbaar in grafiekvorm gegeven. Ook werden, ter vermindering van onnodige afrondingsverliezen, de temperatuurcorrectie en de zwaartekrachtcorrectie voor De Bilt steeds gezamenlijk verwerkt tot één grafiek.

Men realiseere zich dat deze grafieken stukken beter werken dan de gebruikelijke tabellen, die weliswaar ook correcties in honderdsten van millibaren kunnen geven, maar waarin dan in twee richtingen moet worden geïnterpoleerd om de juiste honderdste millibaren te verkrijgen.

Nagenoeg alle theorie, formules, tabellen en rekenvoorschriften, die in het navolgende worden gegeven, zijn ontleend aan de

International Meteorological Tables, WMO-No. 188, TP.94.

Overigens is het bijzonder aardig ook eens te bladeren in de eerste versie van dit werk, namelijk in de Table Météorologique Internationale (uitvoerige verklarende inleiding, en alle bijschriften zijn gegeven in Frans, Engels en Duits), Parijs 1890.

Het is hoogst verrassend hier al een groot aantal momenteel nog steeds door de WMO aanbevolen rekenmethoden en aanbevolen

waarden voor allerlei fysische grootheden aan te treffen. Het meest in het oog lopende verschil is eigenlijk dat men hier nog de namen en overwegingen tegenkomt van mensen, die al deze zaken zo verbazend nauwkeurig geformuleerd en opgemeten hebben.

De berekening van de temperatuurcorrectie voor bakbarometers is een omgewerkte weergave van de methode, gegeven door Middleton in zijn boek "Meteorological Instruments".

2. De zwaartekracht-correctie

De versnelling van de zwaartekracht varieert ten gevolge van de afplatting van de aarde met de geografische breedte, en bovendien met de hoogte boven zeeniveau. Nu is een druk van $1 \text{ mbar} = 100 \text{ N/m}^2$ een vaste waarde, die in directe relatie staat tot de bijzonder nauwkeurig gedefinieerde eenheden van massa, lengte en tijd (de kilogram, de meter en de seconde). Een druk behorend bij een kwikkolom van 1 mm lengte varieert daarentegen met de versnelling van de zwaartekracht en zal dus van plaats tot plaats variëren. Kwik is namelijk niet overal even zwaar.

In de loop van de vorige eeuw begon deze zaak te knellen en men wilde daarom elke op een willekeurige plaats gemeten kwikkolom kunnen herleiden tot de kwikkolom, die men onder één nader af te spreken standaardconditie g_n zou hebben gemeten. Hiervoor stelde men vast, dat dit de gemiddelde versnelling van de zwaartekracht op 45° breedte op zeeniveau zou moeten zijn. (Zie Table Météorologique Internationale, Paris 1980). De bijbehorende waarde voor g_n werd in 1891 op een bijeenkomst van de Internationale Commissie voor Maten en Gewichten vastgesteld op:

$$g_n = 9,80665 \text{ m/s}^2 .$$

Zowel in 1901 als in 1948 werd nog eens bevestigd, dat men deze waarde pertinent wilde handhaven.

Ook voor de soortelijke massa van kwik werd een standaardwaarde vastgesteld. "Natuurlijk kwik" is een mengsel van isotopen, dat niet overal in precies gelijke verhoudingen voorkomt. De variatie is echter erg klein. Als zijnde een verstandig gemiddelde, stelde men vast voor de soortelijke massa ρ_0 bij 0°C :

$$\rho_0 = 13595,1 \text{ kg/m}^3 .$$

Het verband tussen de millibar en de tot g_n en 0°C herleide millimeter kwik, aan te geven als $(\text{mm Hg})_n$, kan dan als volgt begrepen worden:

$$\begin{aligned}(1 \text{ m Hg})_n &= g_n \cdot \rho_o && \text{N/m}^2 \\ &= 133322,4 && \text{N/m}^2 \\ & \text{(of omdat } 1 \text{ mbar} = 100 \text{ N/m}^2\text{)}\end{aligned}$$

$$(1 \text{ mm Hg})_n = 1,333224 \text{ mbar}$$

Het zal duidelijk zijn, dat met deze wijze van werken een goed stuk orde geschapen werd. Mocht namelijk uit nieuwe waarnemingen blijken, dat de gemiddelde versnelling van de zwaartekracht op 45° op zeeniveau wat anders ligt, of dat het theoretisch zwaartekrachtsysteem, dat aan deze waarde is gekoppeld, wat moet worden bijgewerkt, is dat geen probleem. Men kan deze nieuwe zaken dan overnemen zonder ooit nog eens op allerlei hoogst belangrijke conversiefactoren te hoeven terugkomen.

Opmerking:

Hier is niets bijzonders aan de hand. Met de meeste eenheden is iets dergelijks gebeurd. De meter is bijv. al lang niet meer het $1/40.000.000$ e deel van de aardomtrek over de polen, de kilogram niet meer precies een dm^3 water van 4°C en feitelijk is de seconde ook al niet meer wat die honderd jaar geleden was.

Wil men nu de gemeten kolomlengte kunnen herleiden tot die, die men onder g_n zou hebben gemeten, dan moet men toch eerst g op de meetplaats zelf meten. Voor nauwkeurige luchtdrukmetingen geldt dan als beste oplossing: laat g opmeten door de Afdeling Geodesie van TH-Delft. Dit is gemakkelijker gezegd dan gedaan. Vroeger bepaalde men g via een slingerproef. Voor kleine uitwijkingen geldt hier:

$$g = \left(\frac{2\pi}{\tau}\right)^2 \cdot L \quad \text{m/s}$$

waarin

τ de slingertijd in seconden

L de effectieve lengte van de slinger in m
(bij een opgehangen puntmassa is L de lengte van de draad).

Op middelbare scholen kan men met deze formule leuk uit de voeten, maar wil men op miljoenste gaan letten, dan wordt alles buitengewoon moeilijk. Nu zijn in de gravimetrie de zgn. relatieve bepalingen veel gemakkelijker dan absolute bepalingen. Het principe is: kijk wat een gevoelige veerbalans (of een gegeven slinger) doet in een punt s met een bekende g_s en gebruik het aldus geijkte instrument voor de bepaling van g op andere punten. Voor de niveaubepaling van het geheel kan men zich dus beperken tot slechts enkele uitverkoren primaire bepalingen. Heel Europa heeft op deze manier van 1924 tot 1971 "gehangen" aan een in 1930 tot standaard verheven stel precisie-metingen te Potsdam uit het jaar 1906. Na een aantal herleidingen tot deze Potsdam-standaard, gecombineerd met de uitkomsten van eigen metingen van Vening Meinesz, was men rond 1950 van mening dat voor de barometerkelder van het KNMI moest gelden:

$$g = 9,812680 \text{ m/s}^2 . \quad (1950)$$

Het spreekt bijna vanzelf, dat men al kort na 1930 merkte dat die Potsdam-standaard toch niet helemaal goed was, maar omdat het de geodeten, geofysici en mijnbouwers (i.v.m. zaken als bepaling van de vorm van geoïde en voor de delfstofopsporing) vooral te doen is om anomalieën, liet men deze standaard met rust zolang er niet iets wezenlijk beters beschikbaar was. De doorbraak ontstond in de zestiger jaren, toen atoomklokken en interferometers nieuwe technieken mogelijk maakten. De bewegende spiegel van de interferometer (een prisma) wordt daarbij in een luchtledige cylinder verticaal omhoog geschoten en men meet zowel voor opgaande als neergaande beweging de looptijd tussen twee vastgestelde hoogten. Hieruit volgt g . Het instrument is dermate "overgevoelig", dat de vaste spiegel van de interferometer (ook een prisma) moet worden ingebouwd in de arm van een lang-periodische seismometer om de invloed van microseismen te kunnen compenseren. De uitkomst van deze proeven was dat de standaardwaarde te Potsdam 140 miljoenste m/s^2 te hoog bleek. De voor g in De Bilt in de barometerkelder in te vullen waarde daalde daarmee tot:

$$g = 9,812545 \text{ m/s}^2 \quad (1971)$$

Met de "oude waarde" krijgt men dus een zwaartekrachtcorrectie, die anderhalf honderdste millibar te hoog is.

Voor het normale stationsgebruik kan men volstaan met het aangeven van een methode om g te berekenen als functie van de geografische breedte φ , de hoogte van de barometer H (in m +NAP), en de gemiddelde hoogte van het landschap binnen een straal van 150 km rond het station H' (in m +NAP). De formule, die de WMO gebruikt, luidt:

$$g = g_{45} \left(1 - \frac{g_{\text{pool}} - g_{\text{eq}}}{2 g_{45}} \cos 2\varphi + 0,000059 \cdot \cos^2 2\varphi \right) - 3,086 \cdot 10^{-6} \cdot H + 1,118 \cdot 10^{-6} \cdot (H - H')$$

De coëfficiënten in het goniometrische deel van de formule variëren met de denkbeelden omtrent de afmetingen van de standaard-ellipsoïde, waarmee de vorm van de aarde wordt beschreven, en met de nieuwste inzichten omtrent de gemiddelde versnelling van de zwaartekracht op 45° . In tabel 1 zijn voor een aantal jaren de nieuw in zwang gekomen getallen gegeven.

Ook de termen voor de hoogtecorrectie hebben een interessante geschiedenis achter de rug maar deze te memoreren voert beslist te ver. De WMO hanteert momenteel de getallen van 1950, het zgn. "Meteorological Gravity System", en voor ons luidt de formule dus:

$$g = 9,80616 \left(1 - 0,0026373 \cdot \cos 2\varphi + 0,000059 \cdot \cos^2 2\varphi \right) - 3,086 \cdot 10^{-6} \cdot H + 1,118 \cdot 10^{-6} \cdot (H - H')$$

Voor de barometerkelder in De Bilt, met $\varphi = 52,1^\circ$ en $H = 3$ m, komt dit uit op $g = 9,81250$, en wetend wat wij nu weten, is dit een bijzonder bruikbare benadering. Het is overigens belangrijk erop bedacht te zijn, dat wanneer iemand een berekende of gemeten g levert, men moet informeren tot welke formule of tot welke meting dit teruggaat. In de wat nieuwere tabellen

pleegt men die herkomst ook op te geven. Men komt hier wel de afkorting IGSN-71 tegen, wat betekent: International Gravity Standardization Net-1971. Dit is de opvolger van het Potsdam-systeem.

Het herleiden van de onder g gemeten (en voor temperatuur gecorrigeerde) kolomlengte p^{**} naar de tot g_n herleide kolomlengte p , gebeurt dan doodsimpel met:

$$p = \frac{g}{g_n} \cdot p^{**}$$

of, omdat men hier liever met correcties werkt: $p = p^{**} + C_g$, geldt dan:

$$p = p^{**} + \left(\frac{g}{g_n} - 1\right) \cdot p^{**}$$

waarmee

$$C_g = \left(\frac{g}{g_n} - 1\right) \cdot p^{**} \quad .$$

Voor binnenlands gebruik en voor het werken in honderdste millibaren kan de zaak sterk worden vereenvoudigd. Stelt men $H-H' < 50$ m, en beperkt men de breedte φ tot het gebied tussen 50° en 54° NB, en is de (voor temperatuur gecorrigeerde) barometerstand gelijk aan p^{**} , dan geldt:

$$C_g = (0,000090 \cdot \varphi - 0,315 \cdot 10^{-6} \cdot H - 0,004090) \cdot p^{**}$$

Een prettige eigenschap van deze formule is, dat het er niets toe doet of men in mmHg dan wel in mbar werkt. Wordt p^{**} in mbar gegeven, dan krijgt men ook C_g in mbar, en bij p^{**} in mmHg krijgt men C_g in mmHg.

Tabel 1.

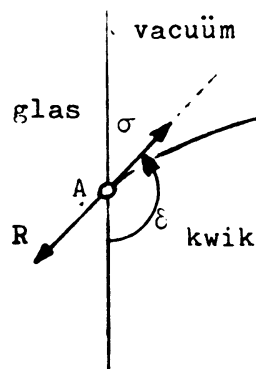
	1890	Potsdam- systeem 1930	Meteorol. Gravity syst. . 1950	1967	1980	eenh
straal equator	6 377 397	6 378 388	6 378 388	6 378 160	6 378 137	m
halve poolas	6 356 079	6 359 912	6 359 912	6 356 775	6 356 752	m
afplatting	0,003 343	0,003 367	0,003 367	0,003 353	0,003 353	-
	= 1/299	= 1/297	= 1/297	=1/298,25	=1/298,25	-
g_{45°	9,806 650	9,806 294	9,806 160	9,806 191	9,806 192	m/s ²
g_{equator}	9,781 251	9,780 490	9,780 356	9,780 318	9,780 319	m/s ²
g_{pool}	9,832 049	9,832 213	9,832 079	9,832 177	9,832 178	m/2 ²
$g_{\text{pool}} - g_{\text{eq}}$	0,050 798	0,051 723	0,051 723	0,051 859	0,051 859	m/s ²
$\frac{g_{\text{pool}} - g_{\text{eq}}}{2 g_{45^\circ}}$	0,00259	0,0026373	0,0026373	0,0026442	0,0026442	-
$g_{\text{De Bilt}}$	9,812 880	9,812 638	9,812 504	9,812 552	9,812 553	m/s ²

In meteorologie gebruikte gravitatieformule:

$$g = g_{45} \cdot \left(1 - \frac{g_{\text{pool}} - g_{\text{eq}}}{2 g_{45}} \cdot \cos 2\varphi + 5,9 \cdot 10^{-6} \cdot \cos^2 2\varphi \right) - 3,086 \cdot 10^{-6} \cdot H + 1,118 \cdot 10^{-6} (H-H')$$

3. De capillariteitsdepressie

In de glazen stijgbuis van een kwikbarometer treden drie grensvlakken op, namelijk tussen glas en vacuüm, tussen glas en kwik, en tussen kwik en vacuüm. In de verticale doorsnede hiernaast ontmoeten deze grensvlakken elkaar in punt A. Onder invloed van de vrije oppervlakte-energieën, die opgevat kunnen worden als drie oppervlaktetenspanningen, stelt het enige beweegbare grensvlak (kwik-vacuüm) zich in onder een kenmerkende hoek δ met de glaswand. De reactie R van de oppervlaktetenspanning van het kwik trekt het kwikoppervlak in de buis naar beneden. In de evenwichtstoestand geldt voor de door dit capillariteitseffect veroorzaakte drukverhoging p_c onder de meniscus



$$p_c = \frac{\pi \cdot D \cdot \sigma \cos \delta}{0,25 \cdot \pi \cdot D^2} = \frac{4 \sigma \cos \delta}{D}$$

waarin:

σ oppervlaktetenspanning van het kwik (N/m).

δ evenwichtshoek tussen kwikoppervlak en glaswand.

D diameter van de glasbuis.

Betreffende de oppervlaktetenspanning σ geeft de WMO een aantal getallen. Voor zeer zuiver kwik naast vacuüm geldt $\sigma = 0,500$ N/m. Is het kwik licht verontreinigd, dan loopt σ terug tot rond $0,400$ N/m. Voor een goed onderhouden barometer op kamertemperatuur mag men aanhouden dat σ ligt tussen $0,450$ en $0,475$ N/m. In het lage been van een hevelbarometer (kwik naast lucht) is σ in de orde van $0,430$ N/m.

De hoek δ blijkt niet alleen erg gevoelig voor het tamelijk variërend evenwicht der vrije oppervlakte-energieën, maar ook nog te worden beïnvloed door onberekenbare "kleeffecten". Hij is dan ook hinderlijk variabel en, wat erger is, hij is niet

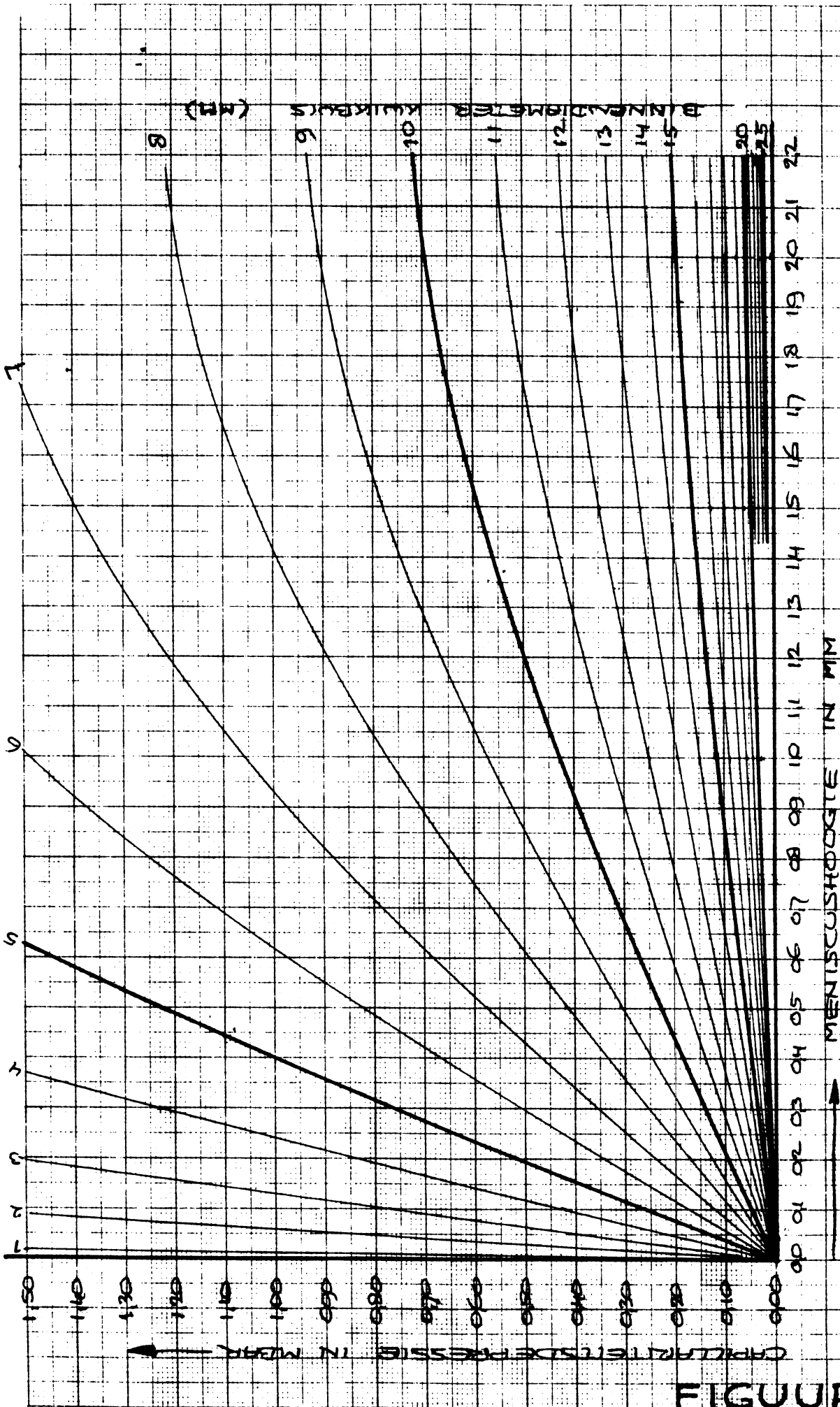
behoorlijk waar te nemen. Uitgaande van een geschatte waarde voor σ en van de diameter van de buis D , bestaat er echter een vast verband tussen de hoek δ en de vorm, en dus ook de hoogte, van de meniscus. Omgekeerd kan men, door de hoogte van de meniscus te meten, gegeven D en σ , (via δ) de capillariteitsdepressie berekenen. Deze laatste grootte is de afstand van de top van de meniscus tot de stand die het kwik bij volkomen vlakke meniscus "zou hebben aangenomen". Uitkomsten die de WMO verstrekt voor $\sigma = 0,450$ N/m en $D = 1$ mm t/m 25 mm zijn uitgezet in figuur 1. In deze figuur blijkt voor alle $D > 10$ mm te gelden dat de capillariteitsdepressies halveren wanneer men de buisdiameter 2,8 mm groter kiest.

Het is niet erg praktisch ook grafieken voor $\sigma = 0,500$ N/m en $\sigma = 0,400$ N/m te geven. Het blijkt gemakkelijker te werken met een grove methode om de capillariteitsdepressie Δp_{σ} te schatten vanuit de voor $\sigma = 0,450$ N/m af te lezen capillariteitsdepressie Δp_{450} . Stelt men:

$$\Delta p_{\sigma} = F \cdot \Delta p_{450}$$

dan is de waarde van de factor F tegen D en σ :

D in mm	σ in N/m					
	0,400	0,420	0,440	0,460	0,480	0,500
8	0,84	0,91	0,97	1,03	1,10	1,16
12	0,80	0,88	0,96	1,04	1,12	1,20
16	0,76	0,85	0,95	1,05	1,15	1,25
22	0,71	0,81	0,93	1,07	1,21	1,36



FIGUUR 1

CAPILLARITEITSDEPRESSIE IN MBAR
INDIEN OPP.SPANNING KWIJK 0.450 N/m

4. Bak-hevelbarometers

Zorgvuldig gebouwde bakhevelbarometers worden vaak als standaardinstrument gebruikt. Het bouwprincipe (zie doorsnede) is erg overzichtelijk. Aan de bovenkant van een stalen kwikvat met verstelbare leren bodem zijn twee stijgbuizen aangebracht. Eén stijgbuis van bijna een meter lang is van boven vacuüm gezogen. De tweede stijgbuis is rond 30 cm lang en staat van boven in open verbinding met de buitenlucht, of kan met een slang aan een buffervat worden aangesloten. De luchtdruk leidt men af uit het hoogteverschil van beide kwikniveaus. Het buizenstelsel zit meestal binnen een messing beschermhuls waarop ook de hoofdschaal is aangebracht. Langs de beschermhuls zijn twee verschuifbare vizieren aangebracht waarmee men de kwikstand kan overbrengen op de hoofdschaal. Het zijn schitterende precisie-instrumenten waarmee men absolute bepalingen kan verrichten, namelijk:

- is de hoofdschaal voldoende nauwkeurig aangebracht (kan opgemeten worden);
- is de lineaire U.C. van het materiaal, waarop de hoofdschaal gegraveerd is, goed bekend (kan leverancier garanderen);
- is het kwik zeer zuiver (leverancier kan de zuiverheid 20 maal hoger garanderen dan technisch nodig is);
- is de thermometer goed geijkt (kan men controleren);
- is het vacuüm in orde (kan men controleren);
- brengen de vizieren de kwikstand op eendere wijze op de hoofdschaal over (kan men controleren),

dan hoeft inderdaad verder niets of niemand u nog wat wijs te maken over luchtdruk, want die kunt u dan helemaal zelf wel bepalen. Om deze reden mogen deze barometers ook met **STANDAARD BAROMETERS** worden aangeduid. De nauwkeurigheid, die men met deze instrumenten kan behalen, ligt op beter dan 0,1 mbar.

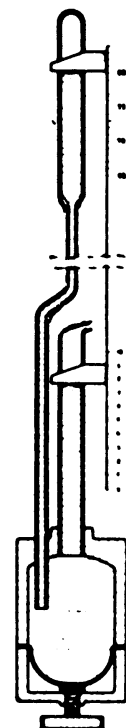


Fig. 1
Scheme of
a Standard Barometer

Corrigeren voor onvolmaakt vacuüm

Het controleren van het vacuüm en het eventueel corrigeren bij geconstateerde onvolkomenheid is in wezen doodsimpel (methode Arago).

Sluit de barometer aan op een groot vat, waarin een constante druk kan worden onderhouden, en lees af bij zo laag mogelijke kwikstand: hoge been A_1 en lage been B_1 , waaruit lengte kwikkolom $L_1 = A_1 - B_1$. Draai het kwik vervolgens zo hoog mogelijk omhoog en lees weer af: hoge been A_2 en lage been B_2 , waaruit lengte kwikkolom $L_2 = A_2 - B_2$ (indien bij constante temperatuur kan worden gewerkt, L_1 en L_2 alleen te corrigeren voor meniscusverschillen).

Indien het vacuüm in orde is, constateert men dat aan het feit dat $L_1 - L_2 = \Delta L = 0$. Is dit niet het geval, dan is

$$L_1 > L_2$$

en werd in beide gevallen een te korte kwikkolom waargenomen. Is de voor dit onvolkomen vacuüm gecorrigeerde kolomlengte L_0 , dan kan men stellen

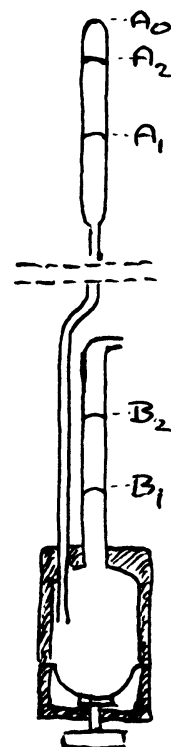
$$\begin{aligned} L_0 &= L_1 + C_1 \\ &= L_2 + C_2 \end{aligned}$$

waaruit volgt:

$$C_2 - C_1 = L_1 - L_2 = \Delta L$$

Kent men de op de (te verlengen) hoofdschaal af te lezen kwikstand A_0 , waarbij het hoge been juist helemaal met kwik gevuld zou zijn (behoort leverancier op te geven maar men kan het ook gemakkelijk zelf meten) en stelt men:

$$n = \frac{A_0 - A_1}{A_0 - A_2}$$



(dit is de verhouding van de vacuüm-volumina), dan volgt:

$$C_2 = nC_1$$

waaruit na invullen in $C_2 - C_1 = \Delta L$ volgt:

$$C_1 = \Delta L / (n-1) = \Delta L \cdot \frac{A_0 - A_2}{A_2 - A_1}$$

$$C_2 = \Delta L \cdot \frac{n}{n-1} = \Delta L \cdot \frac{A_0 - A_1}{A_2 - A_1}$$

Is de hoofdschaal in millibaren verdeeld, dan krijgt men ΔL , C_1 en C_2 ook keurig in mbar. Is de hoofdschaal in millimeters verdeeld, dan krijgt men deze grootheden in mmHg.

De temperatuurcorrectie

Conform de WMO-aanbeveling moet de temperatuurcorrectie C_T worden berekend met de formule van 1890:

$$C_T = - \frac{(\alpha - \beta)(T - T_0)}{1 + \alpha(T - T_0)} \cdot p^*$$

Hierin is:

C_T de temperatuurcorrectie.

α de Vol. U.C. van kwik $0,0001818 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

β de Lin. U.C. van het materiaal waarop de hoofdschaal gegraveerd is, $0,0000184 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

T temperatuur van kwik en schaal in $^\circ\text{C}$.

T_0 temperatuur waarbij de barometer "ware millibaren" of "ware (mmHg)n" aanwijst.

p^* de voor meniscusverschillen en eventuele vacuümfouten gecorrigeerde aflezing.

Ook hier geldt weer dat het er niets toe doet of men in mbar of in mmHg rekent. Men krijgt C_T in dezelfde eenheid als p^* . Voor het normale laboratoriumwerk in honderdste millibaren, in een ruimte die een temperatuur tussen $10 \text{ } ^\circ\text{C}$ en $30 \text{ } ^\circ\text{C}$ heeft, kan de formule vereenvoudigd worden tot

$$C_T = -0,0001628 \cdot (T - T_0) \cdot p^*$$

In figuur 2 is deze correctie uitgezet voor p^* van 680 t/m 1120 "eenheden" (mbar of mmHg) voor temperaturen van 9 t/m 33 °C.

Samenstellen van temperatuur- en zwaartekrachtcorrectie

Voor de zwaartekrachtcorrectie C_g vonden we in paragraaf 2:

$$C_g = (0,000090 \cdot \varphi - 0,315 \cdot 10^{-6} \cdot H - 0,004090) \cdot p^{**}$$

waarin conform WMO-aanbeveling

p^{**} de voor temperatuur gecorrigeerde barometerstand.

De voor temperatuur gecorrigeerde barometerstand is gelijk aan

$$\begin{aligned} p^{**} &= p^* + C_T \\ &= p^* - 0,0001628 \cdot (T - T_0) \cdot p^* \end{aligned}$$

waarin conform WMO-aanbeveling

p^* de "schone" kolomlengte, d.w.z. na toepassing van schaal-, vizier-, vacuüm- en meniscuscorrectie.

Vult men dit in en telt men er nog C_T bij op, dan krijgt men de gecombineerde temperatuur- en zwaartekrachtcorrectie $C_{T,g}$. In aanmerking genomen dat voor Nederlandse stations de som van de bij C_g tussen de haakjes geplaatste termen ongeveer 0,0006 bedraagt, dan krijgen we

$$\begin{aligned} C_{T,g} &= (0,000090 \cdot \varphi - 0,315 \cdot 10^{-6} \cdot H - 0,004090) \cdot p^* \\ &\quad - 0,0001629 \cdot (T - T_0) \cdot p^* \end{aligned}$$

Voor de barometerkelder van het KNMI in De Bilt ($\varphi = 52,1^\circ$, $H = 3$ m) komt dit uit op:

$$C_{T,g} = (0,000599 - 0,0001629 \cdot (T - T_0)) \cdot p^*$$

In de figuren 3 en 4 is deze correctie $C_{T,g}$ uitgezet voor p^* resp. 950-1050 (mbar) en 710-790 (mmHg). In feite zijn deze grafieken echter twee op gelijke schaal getekende details van één grote grafiek.

Nauwkeurigheidseis temperatuurmeting

Stel dat $T_0 = 0$ °C, en dat het kwik een temperatuur T_K heeft en de schaal een temperatuur T_S . Men verwaarlozing van een tweede-orde effect (de $1 + \alpha T$ in noemer), behoort C_T dan gelijk te zijn aan:

$$C_T = (-\alpha \cdot T_K + \beta \cdot T_S) \cdot p^*$$

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

$$C_T' = (-\alpha \cdot T + \beta \cdot T) \cdot p^*$$

Bedenken we dat door een speling van de natuur op een procent nauwkeurig geldt dat $\beta = 0,1 \cdot \alpha$, dan wordt de fout $\Delta C_T = C_T' - C_T$ die we hier maken gelijk aan:

$$\Delta C_T = \alpha \cdot (T_K - 0,1 T_S - 0,9 T) \cdot p^*$$

Bij een kolomlengte van 1000 "mbar" wordt dit

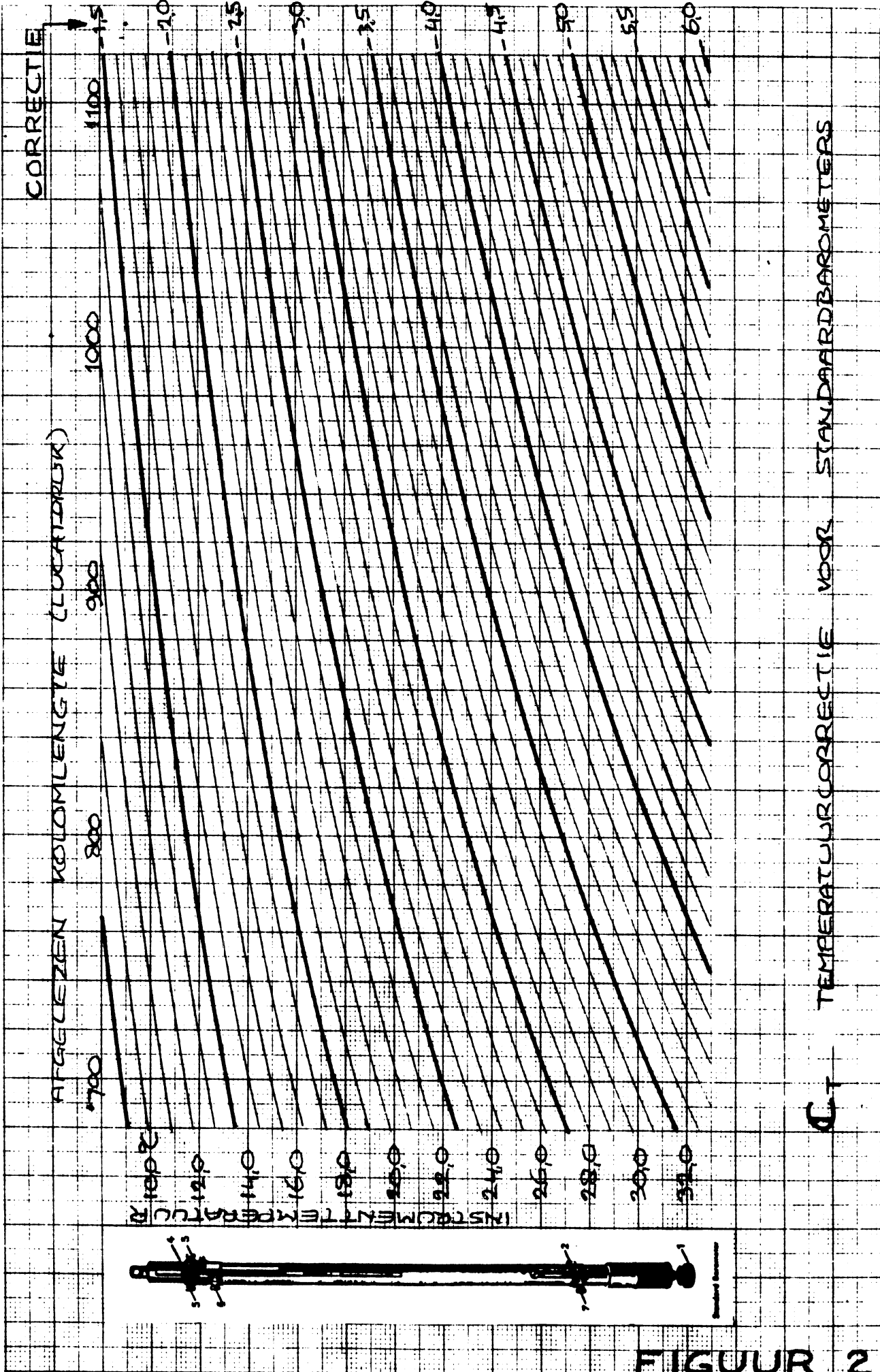
$$\Delta C_T = 0,18 (T_K - 0,1 T_S - 0,9 T) \quad \text{"mbar"}$$

Dat wil zeggen: wil men over honderdsten van millibaren gaan praten, dan moet de temperatuur van het kwik op 0,05 °C en die van de schaal op 0,5 °C vastliggen. Kortom: men moet uiterst behoedzaam werken om nog 5/100 mbar te kunnen verantwoorden. Of: wil men tienden van millibaren kunnen verantwoorden, dan moet men van de temperatuur van het kwik binnen een halve graad zeker kunnen zijn, d.w.z. men zal goed moeten zorgen dat het instrument niet bloot staat aan temperatuurwisselingen.

Verticaalstelling

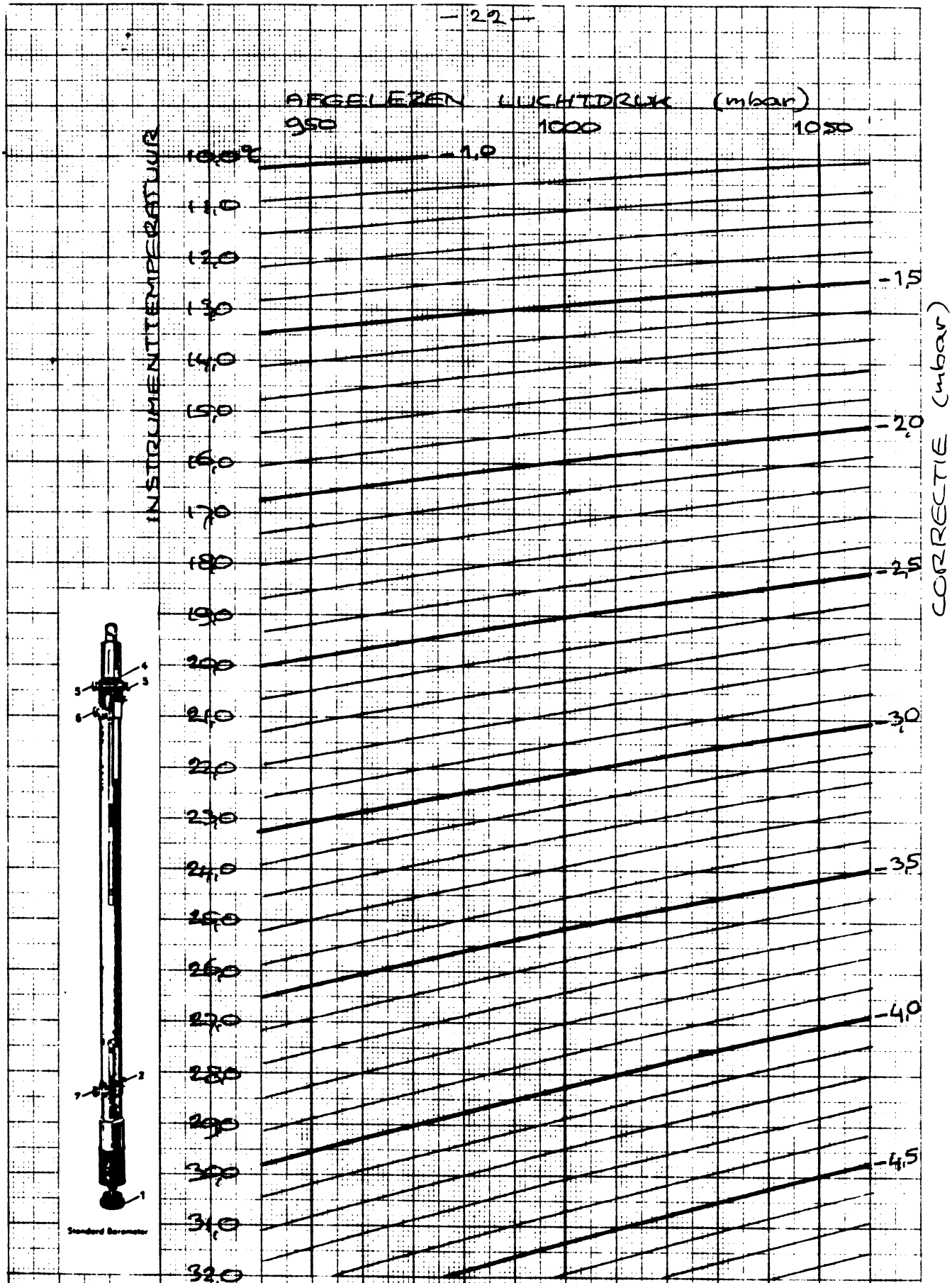
In het tabelletje hieronder is voor een aantal in promillen uitgedrukte afwijkingen van de verticaalstelling opgegeven hoe groot de fout in de aflezing is bij een barometerstand van 1000 mbar.

afwijking van verticaal	fout in de aflezing bij p = 1000 mbar
10 ‰	+0,0501 mbar
5 ‰	+0,0126 mbar
3 ‰	+0,0045 mbar
2 ‰	+0,0020 mbar
1 ‰	+0,0005 mbar



TEMPERATUURCORRECTIE VOOR STANDAARDBAROMETERS

FIGUUR 2



Standard Barometer

STANDAARD BAROMETERS

C 159 VOOR DE BILT

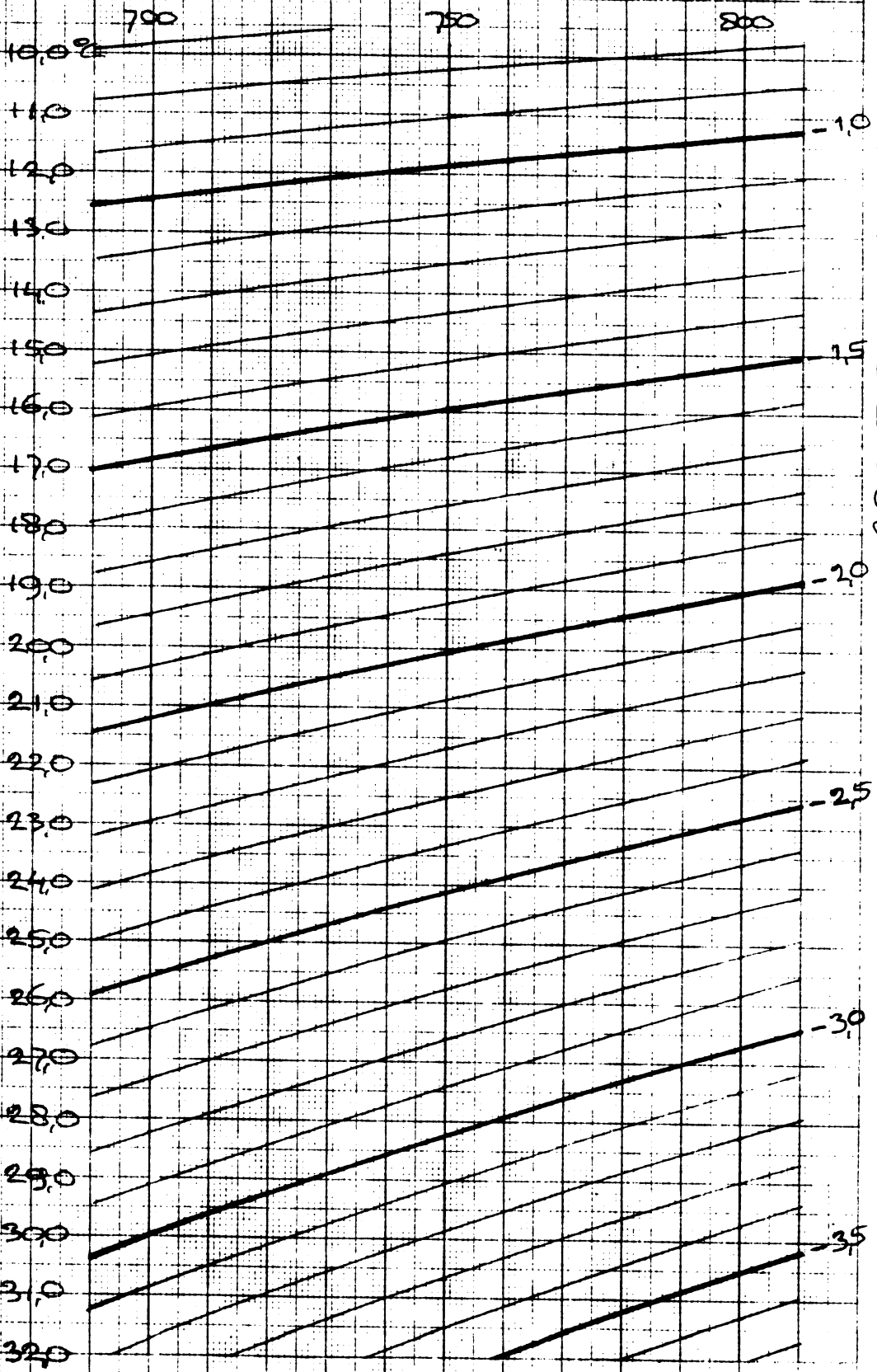
FIGUUR 3



INSTRUMENTTEMPERATUUR

AFGELEZEN LUCHTDRIJK

(mm Hg)_n



CORRECTIE (mm Hg)_n

STANDAARD BAROMETERS

VOOR DE BILT

FIGUUR 4

M Ü L L E R - B A K H E V E L B A R O M E T E R

BAKHEVELBAROMETER
MET MBAR-VERDELING

In de loop van 1981 werden door de firma Wittich en Visser twee bakhevelbarometers geleverd. Ze worden voorlopig gebruikt als standaardbarometer bij het ijken van stationsbarometers.

Standaardaanduiding bakhevelbarometer met mbar-verdeling
Fabrieksaanduiding Normalbarometer-2k
Fabrikant Dr. A. Müller, Berlin
 (treedt op voor Fuess-fabriek)

Kwikkuis:

Inwendig diameter 14 mm

Lengtebepaling van de kwikkolom:

boven: hoofdschaal	in hele mbar
bereik	865-1100 mbar
hulpschaal	nonius per 5/100 mbar
bereik	0/100 t/m 100/100 mbar
onder: hoofdschaal	in vijftallen mbar
bereik	0 t/m 140 mbar
hulpschaal	drie richtstreepjes
ware millibaren bij	$T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ $g_n = 9,80665 \text{ m/s}^2$
meting meniscus	methode Kleinschmidt
vertikaalstelling	hangende uitvoering

Thermometer:

schaalverdeling hele graden Celsius
bereik -10 t/m +50 $^\circ\text{C}$

Temperatuurcoëfficiënten:

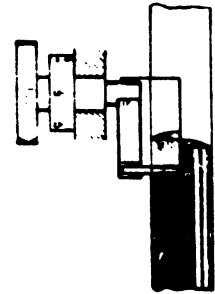
Vol. U.C. kwik $\alpha = 0,0001818 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
Lin. U.C. hoofdschaal $\beta = 0,0000184 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$



Fig. 2
Standard Barometer 2k

Overige zaken Müller-bakhevelbarometers

1. Zowel op het beneden- als op het bovenzijer is een voorziening aangebracht (draaibaar plan-parallel glasstrookje volgens Kleinschmidt), waarmee de hoogte van de meniscus kan worden gemeten.



Uit de in paragraaf 3 verstrekte gegevens blijkt dat de oppervlaktespanning voor kwik-onder-lucht vrij aanzienlijk lager is dan die voor kwik-onder-vacuüm. Dit moet beslist waar zijn, want bij deze Müller-barometers komt dit tot uiting in het feit dat de meniscus in het lage been systematisch boller blijkt te zijn dan die in het hoge been. Uit een serie van 56 waarnemingsparen kwamen voor de meniscushoogten de volgende gemiddelden te voorschijn: hoge been 1,08 mm, lage been 1,73 mm. De door de fabriek verstrekte correctietabel, die - bij gegeven meniscushoogten in hoge en lage been - samengestelde capillariteitscorrecties geeft, die symmetrisch t.o.v. de hoofd-diagonaal zijn, moet dan ook onjuist zijn.

Het blijkt echter moeilijk, alleen op grond van de WMO-opgaven (iets anders werd niet gevonden) voor hoge en lage been een representatieve waarde voor σ aan te wijzen en op grond daarvan een betere correctietabel samen te stellen. Toch zal dit moeten, en zolang niets beters bekend is zal er van worden uitgegaan dat geldt:

Hoge been: $\sigma = 0,490 \text{ N/m}$

Deze dicht tegen 0,500 liggende waarde werd gekozen, omdat het hier een barometer betreft waaraan meer dan gewone zorg is besteed. Ook de zuiverheid van het kwik zal dan wat hoger mogen worden aangeslagen. Hieruit volgt (zie slot par. 3: $F = 1,18$):

hoogte meniscus (mm)

0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
0,109	0,142	0,175	0,205	0,231	0,256	0,277	0,294
capillariteitsdepressie (mbar)							

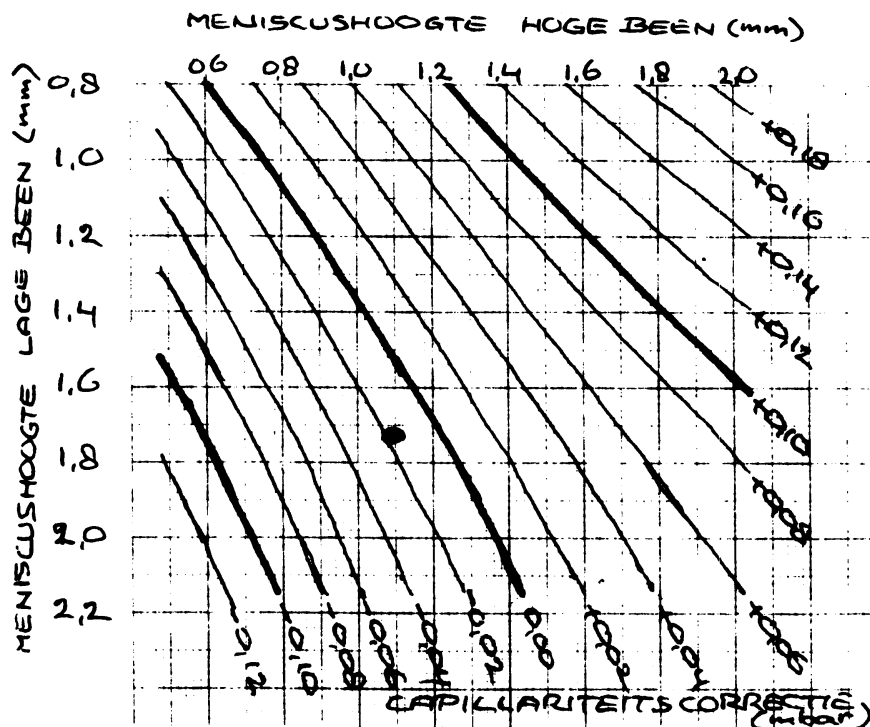
Lage been: $\sigma = 0,430 \text{ N/m}$

Mogelijk is deze waarde aan de lage kant maar de WMO noemt alleen déze waarde. Hieruit volgt (zie par. 3: $F = 0,91$):

hoogte meniscus (mm)							
0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
0,084	0,109	0,135	0,158	0,178	0,198	0,214	0,227
capillariteitsdepressie (mbar)							

Aftrekken van alle combinaties levert de in figuur 5 gegeven correctiegrafiek op. De in bovenaangehaalde waarnemingen opgetreden combinaties van meniscushoogten komen terecht in een wolkje rond het punt 1,1 (meniscus hoge been) tegen 1,7 (meniscus lage been), en liggen ongeveer 0,03 mbar dicht bij nul dan wanneer men met de "fabriekstabel" corrigeert.

2. Zowel bovenste als onderste vizier is buisvormig uitgevoerd; ze schuiven beide over de beschermhuls van de barometer (waarop ook de hoofdschaal is aangebracht). Alleen het bovenste vizier heeft een fijnregeling.
3. Het onderste vizier kan zodanig worden ontkoppeld, dat men er ook het hoge been mee af kan lezen. Hiermee kan men controleren of beide vizieren de kwikstand op gelijke wijze op de hoofdschaal overbrengen.



Figuur 5. Capillariteitscorrectie voor de Müllerbakhevelbarometers.

F U E S S - B A K H E V E L B A R O M E T E R S

BAKHEVELBAROMETER
MET MM-VERDELING

De Fuess-barometers zijn de voorgangers geweest van de nieuwe Müller-bakhevelbarometers. Tot 1980 hebben ze gediend als hulpstandaard naast een primaire standaardbarometer, waarmee ze af en toe vergeleken werden.

Standaardaanduiding bakhevelbarometer met mm-verdeling
Fabrieksaanduiding Normalbarometer
Fabrikant R. Fuess, Berlin-Steglitz

Kwikbuis

Inwendig diameter 13 mm

Lengtebepaling van de kwikkolom:

boven: hoofdschaal	in hele millimeters
bereik	650-815 mm
hulpschaal	nonius per 5/100 mm
bereik	0/100 t/m 100/100 mm
onder: hoofdschaal	in hele millimeters
bereik	-20 t/m +80 mm
hulpschaal	drie richtstreepjes
ware (mm Hg) _n bij	$T_0 = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$
	$g = 9,80665 \text{ m/s}^2$
meting meniscus	geen aparte voorziening
verticaalstelling	hangende uitvoering

Thermometer:

schaalverdeling hele $^\circ\text{C}$
bereik -30 t/m +60 $^\circ\text{C}$

Temperatuurcoëfficiënten:

Vol. U.C. kwik $\alpha = 0,0001818 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Lin. U.C. hoofdschaal $\beta = 0,0000184 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

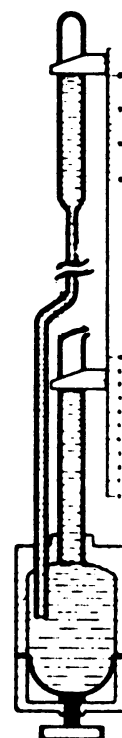


Fig 1
Scheme of
a Standard Barometer

De Fuess-151 heeft tot eind 1980 gediend als hulpstandaard naast de "primaire standaard no. 1" (zie blz. 32). Bijzonderheden zijn:

1. Het lage been van de barometer is momenteel (najaar 1981) erg vervuild. De meniscus in het hoge been is nog prachtig bol en mooi constant.
2. Er is bij deze barometer geen aparte voorziening aangebracht om de hoogte van de menisci te meten.
3. Het bovenste vizier is buisvormig uitgevoerd en schuift buitenlangs over de beschermhuls van de barometer (waarop ook de hoofdschaal is gegraveerd). De fijnregeling is bijzonder gevoelig uitgevoerd met een soort moer die om het hele vizier heen loopt.
4. Het onderste vizier schuift binnen de beschermhuls. Het heeft geen fijnregeling. Het kan worden vastgezet met een stelschroefje.
5. In de originele uitvoering kan het bovenste vizier naar de onderste meniscus worden geschoven. Door een stel slordig vervangen schroefjes (koppen steken naar buiten) is dat op dit moment niet mogelijk.
6. Buiten het afleesgedeelte is de stijgbuis veel dunner uitgevoerd en hij loopt helemaal vrij binnen de beschermhuls. Bijzonder fraai is dat de bol van de thermometer dezelfde doorsnede heeft als de stijgbuis. De temperatuur die men hiervan afleest geeft dus een mooie benadering van de temperatuur van het kwik in de stijgbuis.

De Fuess-500 heeft tot enige jaren na de oorlog als hulpstandaard gediend naast een Newman-bakbarometer met beweegbare schaal*, en de kwikbarograaf van Olland, die momenteel in de hal bij de hoofdingang staat opgesteld. Bijzonderheden zijn:

1. Algehele uitvoering grotendeels gelijk aan die van de Fuess-151. Het vacuüm is nog goed in orde, de meniscus nog erg mooi, en het lage been is ook bij deze barometer sterk vervuild.
2. De thermometer zit niet volledig binnen de huls. Het bovenvizier kan daardoor niet zonder demontage van de thermometer naar beneden worden geschoven voor controle op gelijke overbrenging van de kwikstand.

* Eind 1967 opgeknapt en als afscheidsgeschenk meegegeven aan de toenmalige DFIR

D E O L L A N D - 327.

BAKHEVELBAROMETER
MET MM-VERDELING

De "Olland-327" moet 70 à 80 jaar geleden zijn gebouwd. Vanwege het in de loop der jaren ontstaan van te veel kwikaanslag, werd er in de vijftiger jaren een nieuwe kwikbuis ingezet. Deze was vervaardigd, en met kwik gevuld, door Kon.-Leerdam. De maten waren ontleend aan tekeningen, die gemaakt zijn naar de originele buis. Deze barometer heeft waarschijnlijk ooit gediend als KNMI-standaard. De gegevens zijn:

Standaardaanduiding	bakhevelbarometer met mm-verdeling
Fabrikant	W.C. Olland, voorheen H. Olland (fabriek bestond 1896-1913)
Fabrieksnummer	327

Kwikbuis:

Inwendig diameter	13,5 mm
-------------------	---------

Lengtebepaling kwikkolom:

boven: hoofdschaal	in millimeters
bereik	440-810 mm
hulpschaal	nonius per 5/100 mm
bereik	0/100 t/m 100/100 mm
onder: hoofdschaal	in millimeters
bereik	-10 t/m 110 mm
hulpschaal	geen nonius, maar <u>drie</u> richtstreepjes

ware (mmHg) _n bij	T = 0 °C
------------------------------	----------

$$g = 9,80665 \text{ m/s}^2$$

Meting meniscus	geen aparte voorziening
-----------------	-------------------------

Verticaalstelling	hangende uitvoering
-------------------	---------------------

Thermometer:

schaalverdeling	hele graden Celsius
bereik	-10 t/m +50 °C

Temperatuurcoëfficiënt:

Vol. U.C. kwik	$\alpha = 0,0001818/^\circ\text{C}$
----------------	-------------------------------------

Lin. U.C.	$\beta = 0,0000184/^\circ\text{C}$
-----------	------------------------------------

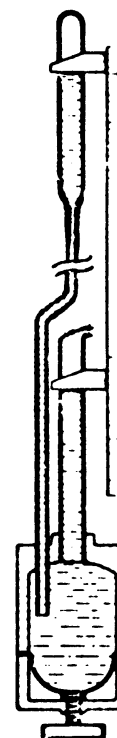


Fig 1
Scheme of
a Standard Barometer

Overige zaken Olland-327

1. Het lage been van de barometer is momenteel (najaar 1981) erg vervuild. De vorm van de meniscus in het hoge been is ook niet constant. Bij opgaand en neergaand kwikniveau varieert deze tussen respectievelijk zeer bol en helemaal plat. In het lage been treden bovendien nog allerlei grilligheden op in de aanrakingscirkel tussen kwik en glas.
2. Er is bij deze barometer geen aparte voorziening aangebracht om de hoogte van de menisci te meten.
3. Het bovenste vizier is buisvormig uitgevoerd en schuift buitenlangs over de beschermhuls van de barometer (waarop ook de hoofdschaal is gegraveerd). Voor de hoogteregeling is het vizier verbonden met een d.m.v. een stelwiel beweegbare tandbeugel, die binnen de beschermhuls loopt.
4. Het onderste vizier is veel kleiner en schuift binnen de beschermhuls. Het kan met een stelschroefje worden geblokkeerd.
5. Zoals het een instrument van goede klasse betaamt, kan het bovenste vizier worden losgemaakt van de beugel en naar het lage been worden geschoven, om te kunnen controleren of beide vizieren de kwikstand op eendere wijze op de hoofdschaal overbrengen.

PRIMAIRE STANDAARD No. 1

HEVELBAKBAROMETER MET
DIKKE BUIS EN LOSSE
MEETSTAAF (BECKER-2)

De primaire standaard "no. 1" deed dienst in de jaren 60 en 70. Hij zal worden opgevolgd door een vrijwel gelijke opstelling. In feite is het geen bakhevelbarometer, maar een hevelbarometer. Het enige verschil is dat men het lage kwikniveau niet kan instellen op een vooraf bepaalde waarde.

Standaard aanduiding: primaire standaardbarometer
Volgnummer : opstelling no, 1

Kwikbuis:

inwendig diameter 30 mm

Lengtebepaling kwikkolom:

Als hoofdschaal dient een messing meetstaaf uit de veertiger jaren van de vorige eeuw, die nog door Krecke moet zijn aangeschaft. De schaalverdeling is in hele mm, met een bereik van 0-1020 mm en momenteel (begin 1982) geldt $T_0 = 16,5^{\circ}\text{C}$.

Voor overbrenging van de kwikstanden op de meet-schaal staat een bijzonder mooie kathetometer ter beschikking, met micrometer-oculair op beide kijkers. Het is vermoedelijk een werkstuk van een onbekend gebleven KNMI-instrumentmaker uit het begin van deze eeuw. Najaar 1981 is dit instrument nagezien en opgeknapt.

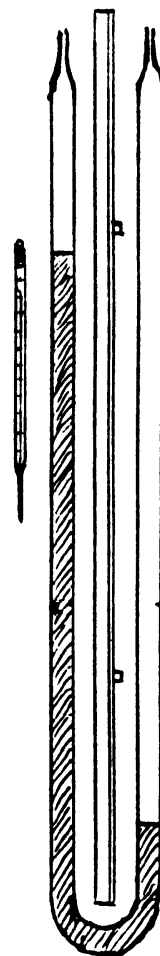
Thermometer:

Gewone stationsthermometer, die los naast de opstelling was opgehangen.

Temperatuurcoëfficiënten:

Vol. U.C. kwik $\alpha = 0,0001818^{\circ}\text{C}^{-1}$
Lin. U.C. meetstaaf $\beta = 0,0000184^{\circ}\text{C}^{-1}$

Hoewel de metingen met een uitermate omzichtig ritueel werden uitgevoerd, heeft deze opstelling toch niet geheel voldaan. Achteraf kan als belangrijkste oorzaak worden opgegeven dat de temperatuur van het kwik ondanks alle waarborgen vermoedelijk niet nauwkeurig genoeg werd bepaald.



Overige zaken Primaire Standaard

1. Als men een maat opneemt met de meetstaaf Becker-2, die momenteel ware millimeters aanwijst bij $16,5^{\circ}\text{C}$, dan zal men een uitkomst krijgen die een weinig lager is dan wanneer men diezelfde maat met een andere messing meetstaaf had opgemeten waarvoor $T_0 = 0^{\circ}\text{C}$.

Men kan van de Becker-2 een meetstaaf met $T_0 = 0^{\circ}\text{C}$ "maken" door op alle waarnemingen L^* een correctie $C_{T_0} = -\beta \cdot T_0 \cdot L^*$ toe te passen, dus:

$$\begin{aligned} C_{T_0} &= -0,0000184 \cdot 16,5 \cdot L^* \\ &= -0,000303 \cdot L^* \end{aligned}$$

2. Gebruikt men de Becker-2 als hoofdschaal van een hevelbakbarometer, dan wordt de temperatuurcorrectie:

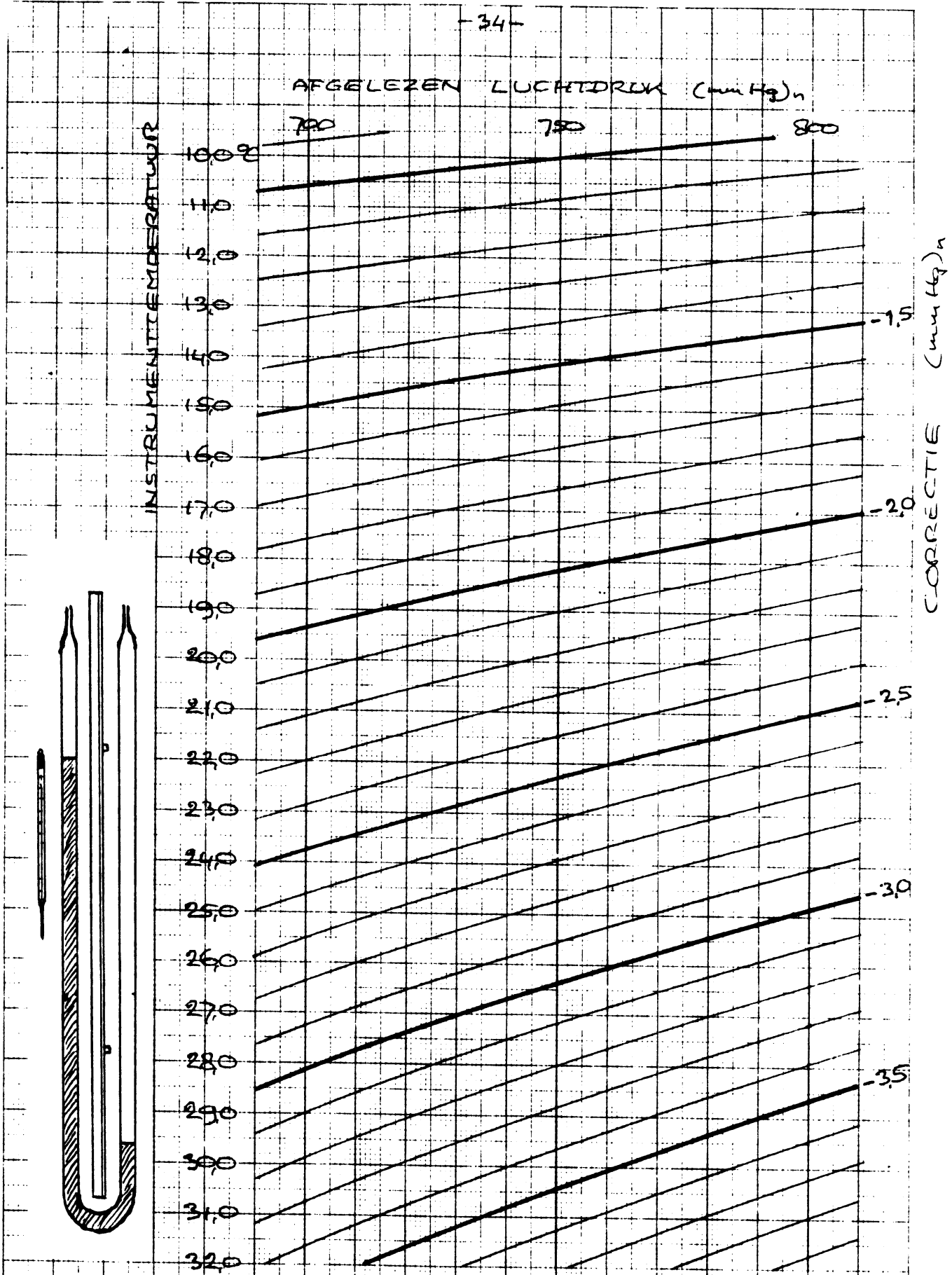
$$\begin{aligned} C_T &= C_{T_0} + \frac{0,0001818 - 0,0000184}{1 + 0,0001818 \cdot 20} \cdot T \cdot L^* \\ &= -0,000303 \cdot L^* - 0,0001628 \cdot T \cdot L^* \end{aligned}$$

waarin

L^* de afgelezen kolomlengte in mm.

3. De samengestelde temperatuur- en zwaartekrachtcorrectie voor de barometerkelder van het KNMI in De Bilt wordt dan:

$$\begin{aligned} C_{T,g} &= 0,000599 \cdot L^* - 0,000303 \cdot L^* \\ &\quad - 0,0001629 \cdot T \cdot L^* \\ &= 0,000296 \cdot L^* - 0,0001629 \cdot T \cdot L^* \end{aligned}$$



PRIMAIRE STANDAARDBAROMETER

(HOOFDSCHAAL: MEETSTAAF BECKER-2)

VOOR DE BILT

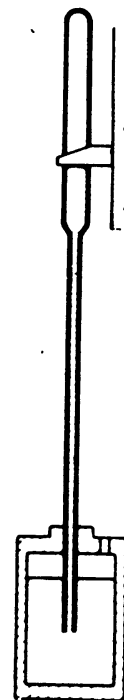
FIGUUR 6

5. Bak-barometers

Het principe van een bakbarometer is simpel. Geef het lage been (de "bak") een doorsnede, die vele malen groter is dan die van het vacuüm getrokken hoge been. Mits men er dan voor zorgt dat er niet gemakkelijk met kwik gemorst kan worden, kan men de bak verder de bak laten en alleen het hoge been afleesbaar maken, waar men, als men even in millimeters kwik denkt, het hele luchtdrukgebied vrijwel op "ware grootte" afgebeeld krijgt. En let wel: door het prijsgeven van de mogelijkheid de kwikstand in de bak waar te nemen, heeft men hier te doen met een zgn. relatief instrument.

Onder bepaalde voorwaarde kan men met een goed ontworpen en zorgvuldig gebouwde bakbarometer ook echte luchtdrukmetingen verrichten. Deze voorwaarde luidt, dat men er d.m.v. parallelmetingen tegen een standaardbarometer (zie alle barometers van paragraaf 4) voor gezorgd moet hebben dat de nulpunt-instelling van het instrument goed is afgeregeld. En daarmee krijgt men ook hier weer een buitengewoon stabiel precisie-instrument in handen, dat bovendien nog vrij gemakkelijk is te hanteren. Wil men namelijk de luchtdruk weten, dan behoeft men alleen op de langs het hoge been af te lezen kwikstand een eventueel bij de ijking aan het licht gekomen schaalcorrectie, een temperatuurcorrectie en een zwaartekrachtcorrectie toe te passen.

Is het hierboven beschreven principe gemakkelijk te overzien, naarmate men meer in details afdaalt, blijken er echter nog heel wat ingewikkelde dingen te voorschijn te komen. Om hem baas te kunnen blijven, moet men van een bakbarometer dan ook veel meer maten en materiaaleigenschappen kennen dan van de (bak-)hevelbarometer. Ook zij men erop bedacht, dat er hier nog iets op de loer ligt wat alles bederven kan. In de nulpunt-instelling van het instrument is namelijk een heel scala van zaken verdisconteerd. Deze zijn:



Scheme of a
Station Barometer

- afwijkingen in maatuitvoering en montage van beschermhuls met hoofdschaal;
- afwijkingen in maatuitvoering van het vizier;
- afwijkingen in maatuitvoering van de bak;
- gemiddelde ijkfout van de aangehechte thermometer bij de tijdens de ijking opgetreden temperaturen (of beter: gemiddelde correctiefout bij kamertemperatuur);
- de gemiddelde tijdens de ijking opgetreden capillariteitsdepressie.

Kan men van de eerste vier punten zeggen, dat deze eens en voor altijd in de barometer zijn ingebouwd, en dus onveranderlijk plegen te zijn, voor de capillariteitsdepressie is dit niet het geval. Deze is namelijk bijzonder gevoelig voor verontreiniging van het kwik. En in een jarenlang gebruik en hergebruik op de meetstations heeft het kwik alle tijd om zeer geleidelijk het één en ander op te nemen.

Is een kwikbuis nieuw en schoon en het kwik vers gezuiverd, dan zal het hoge been zowel bij stijgende als dalende luchtdruk een prachtig bolle meniscus tonen en, bijbehorend, een bijna constante capillariteitsdepressie. Men kan hier ruwweg het volgende aanhouden:

diameter hoge been	8	10	12	14	mm
hoogte meniscus bij buis en kwik schoon	1,5	1,4	1,3	1,3	mm
capillariteitsdepressie	1,05	0,55	0,31	0,19	mbar

Bij toenemende vervuiling gebeuren er een aantal dingen. In de eerste plaats verklikt de vervuiling zich in een platter worden van de meniscus. Niet zichtbaar is echter dat de capillariteitsdepressie daardoor ook afneemt en de barometer te hoog gaat aanwijzen. Bij een KNMI-stationsbarometer (diameter hoge been 8 mm) kan deze miswijzing bijna tot een millibar oplopen. Doordat deze contaminatie ook allerlei onberekenbare

"kleefeffecten" veroorzaakt, is deze miswijzing ook nog erg variabel. Voor een sterk verwaarloosde stationsbarometer wil dit zeggen: plus of min ruim een halve millibar, of, omdat de "ijklijn" bij dergelijke barometers al lang niet meer "in het midden" ligt, worden de mogelijke afwijkingen iets als een millibar alle kanten uit..... en daar gaat zo langzamerhand iedereen die ermee werken moet grote last van krijgen.

Van dit laatste hoeft men alleen maar te onthouden dat het inderdaad mogelijk is het zover te laten komen. Ziet men er echter op toe dat de barometer:

- goed gebouwd is,
- goed onderhouden is,
- goed geijkt is
- en goed behandeld wordt,

dan heeft men zonder meer een schitterend stabiel precisie-instrument tot zijn beschikking, waarmee men de luchtdruk op tienden van millibaren nauwkeurig kan meten.

Kwaliteit vacuüm

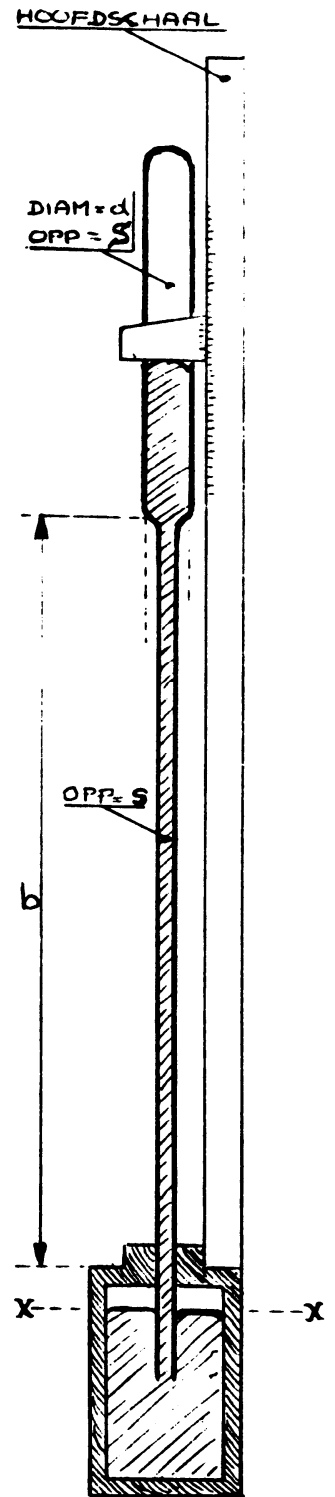
Corrigeren voor onvolmaakt vacuüm is bij een bakbarometer onmogelijk. Heeft men reden aan de kwaliteit van het vacuüm te twifelen, dan kan men daar maar één ding aan doen, en wel de barometer laten revideren.

Voor controle van het vacuüm staat alleen een grof proefje ter beschikking. Dit bestaat uit het voorzichtig laten dichtvallen ervan door de barometer scheef te houden. Hoort men daarbij een klinkend metaalachtig tikje (bijna het helder slaan van een klokje), dan is alles in orde. Valt het dicht met een tik zoals een met leer bekleed hamertje zou geven, dan is er al sprake van een kleine gasrest in het vacuüm. Stuitert de kwikkolom geluidloos als door een veer opgevangen terug, dan is het goed mis en moet de barometer nodig worden vervangen.

Bijzonder vervelend wordt het als er waterdamp in het vacuüm terecht is gekomen. Men merkt hier namelijk niets van wanneer men het laat dichtvallen, want omdat alle waterdamp daarbij door de drukverhoging condenseert, blijft de tik prachtig helder. De barometer wijst echter wél te laag aan! Bij vakkundig gevulde buizen behoort dit gebrek nooit voor te komen.

Belangrijke maten en materiaalconstanten

- d inwendig diameter van het afleesdeel van de stijgbuis in mm
- $S = 1/4 \cdot \pi \cdot d^2$ oppervlak van de doorsnede van het afleesdeel van het hoge been in mm^2
- s oppervlak van de doorsnede van het vernauwde deel van de stijgbuis in mm^2
- b lengte van het vernauwde deel van de stijgbuis boven bovenkant bakdeksel in mm
- A effectief oppervlak van de bak in mm^2
(= oppervlak van vrije kwikspiegel in bak)
- $V = v_t + v_c$ totaal kwikvolume in mm^3
- v_t kwikvolume in buis boven vlak xx (t="tube") in mm^3
- v_c kwikvolume in bak beneden vlak xx (c="cistern") in mm^3
- $v_{gt} = (S-s) \cdot b$ glasvolume van de vernauwing van de stijgbuis
- v_{gc} glasvolume van het in de kwikbak ondergedompelde "staartstuk" van de stijgbuis



		standaardwaarde
α	Vol. U.C. kwik	$0,0001818 \text{ } ^\circ C^{-1}$
β	Lin. U.C. hoofdschaal	$0,0000184 \text{ } ^\circ C^{-1}$
η	Lin. U.C. stalenbak	$0,0000100 \text{ } ^\circ C^{-1}$
γ	Lin. U.C. glazen stijgbuis	$0,0000080 \text{ } ^\circ C^{-1}$
T_0	temperatuur waarbij het instrument (mits ook $g = g_n$) "ware millibaren" aanwijst.	

Schaalcontractie-factor

Als het kwik in het hoge been een afstand Δp omlaag gaat, komt het kwikniveau in de bak $\Delta p \cdot S/A$ omhoog. En omdat de hoofdschaal voor elke kwikstand in het hoge been het verschil van beide

kwikspiegels moet aanwijzen, is de schaal een weinig samenge-
trokken. Laat men het kwik in de stijgbuis zakken van stand p^*
met niveauverschil x naar de nulstand, dan is de schaalcontrac-
tiefactor F_c (zie schets) gedefinieerd met $F_c = y_1/x$, en omdat:

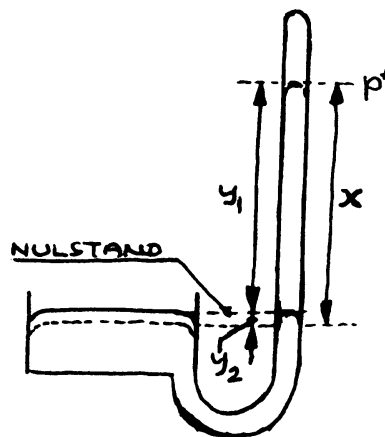
$$x = y_1 + y_2 = y_1 + y_1 \cdot \frac{S}{A} = y_1 \cdot \frac{A+S}{A}$$

wordt dus

$$F_c = \frac{A}{A+S}$$

Deze schaalcontractiefactor zal men dus moeten vinden wanneer men de schaal van een bakbarometer, waarvoor $T_0 = 0^\circ\text{C}$, ook nameet bij een temperatuur van 0°C .

Is de "ijktemperatuur" waarbij de barometer (mits weer $g = g_n$) ware millibaren of ware millimeters kwik aanwijst niet 0°C maar T_0^* , en men meet de schaal na bij die temperatuur T_0^* , dan moet de schaalcontractiefactor F_c nog worden vermenigvuldigd met een factor F_{T_0} , waardoor in dit geval:



$$F_c = \frac{A}{A+S} \cdot F_{T_0}$$

waarin:

$$F_{T_0} = 1 + (\alpha - \beta) \cdot T_0^*$$

Dit geval doet zich alleen voor bij een Engelse bakbarometer, waarvoor $T_0^* = 12^\circ\text{C}$. De factor F_{T_0} wordt hier dus 1,00196. Bij het graveren van de schaal moet hier terdege rekening mee worden gehouden. Met betrekking tot het hanteren van een nulpuntcorrectie (zie volgende twee punten) ligt F_{T_0} echter veel te dicht tegen 1 aan om er last van te hebben, en zal daarom verder buiten beschouwing worden gelaten.

Nulpuntcorrectie

Wil men het nulpunt van een bakbarometer een bedrag C_0 hoger instellen, dan moet men een hoeveelheid kwik ΔV_0 toevoegen. Daarbij komt zowel in de bak als in het hoge been het kwik omhoog en het effect tekent zich af langs een verkorte schaal. Is de schaalverdeling in $(\text{mmHg})_n$, dan geldt $\Delta V_0 = (A+S) \cdot C_0 \cdot F_c$ ofwel:

$$\Delta V_0 = A \cdot C_0 \quad \text{mm}^3$$

waarin

C_0 verlangde nulpuntcorrectie
in (mmHg)_n

ΔV_0 toe te voegen kwik in mm³

Is de hoofdschaal in millibaren, dan geldt

$$\Delta V_0 = \frac{A}{1,333224} \cdot C_0$$

waarin

C_0 verlangde nulpuntcorrectie
in mbar

ΔV_0 toe te voegen kwik in mm³

Temperatuurcorrectie

Stel dat een bakbarometer bij een temperatuur $T_1 = T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ (en $g = g_n$) de luchtdruk p correctieloos aanwijst. Gaat men de temperatuur nu vanuit deze $T_1 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ verhogen tot $T \text{ }^\circ\text{C}$, dan gaan alle materialen, die in de barometer gebruikt zijn, "werken", en het gaat er hier speciaal om wat het kwik in deze omgeving precies doet. Welnu, het volume daarvan wordt groter, waardoor de soortelijke massa naar verhouding kleiner wordt. Hoewel deze zaken een wezenlijke eenheid vormen, kan men hier in gedachten een scheiding aanbrengen:

Bereken eerst het effect van de verlaging van de soortelijke massa van het kwik: we veronderstellen hierbij dat alle volumina (kwik, glasbuis, kwikbak) constant blijven. doch de messing hoofdschaal wèl vrij kan dilateren. De kwikstand in het hoge been zal dan wat stijgen en die in de bak een heel klein beetje dalen. Langs de hoofdschaal zouden we het nieuwe niveauverschil correct hebben kunnen aflezen, ware het niet dat de schaal zelf ook wat van lengte veranderd was. De hier werkelijk af te lezen kolomlengte noemen we p^* . Daar deze situatie volledig gelijk is aan die voor bak-hevelbarometers, geldt hier dat de correctie $C_{T_1} = p - p^*$ berekend moet worden met de formule van 1890:

$$C_{T1} = - \frac{\alpha - \beta}{1 + \alpha \cdot T} \cdot T \cdot p^*$$

Laat vervolgens alle volumina hun veranderingen ondergaan. Daar de volumeverandering van het kwik steeds een veelvoud zal blijken van de volumeverandering van de ruimte waarin het bijeengehouden wordt, ontstaan hierbij telkens "kwikoverschotjes", die gezamenlijk een niet onaanzienlijke nulpuntcorrectie veroorzaken.

Hetkwik in de bak vertoont een volumevermeerdering $v_c \cdot \alpha \cdot T$ en de bak zelf $(v_c + v_{gc}) \cdot 3\eta \cdot T - v_{gc} \cdot 3\gamma \cdot T$. Het verschil Δv_c is:

$$\Delta v_c = v_c (\alpha - 3\eta) \cdot T - v_{gc} (3\eta - 3\gamma) \cdot T$$

Ook het kwik in de buis zet uit maar de buis zelf wordt wijder en de "keel" komt wat omhoog. Het verschil Δv_t wordt dan:

$$\Delta v_t = v_t (\alpha - 2\gamma) \cdot T + (S-s) \cdot b \cdot \gamma \cdot T$$

Nemen we de zaak samen en voegen we $-v_t \cdot 3\eta \cdot T + v_t \cdot 3\eta \cdot T$ toe, dan kan het totale "kwikoverschot" ΔV , dat tot een nulpuntcorrectie moet worden verwerkt, geschreven worden als:

$$\Delta V = T \cdot [(v_c + v_t) (\alpha - 3\eta) + v_t (3\eta - 2\gamma) + (S-s) \cdot b \cdot \gamma - v_{gc} (3\eta - 3\gamma)]$$

Nu is $v_c + v_t = V$ en $(S-s) \cdot b = v_{gt}$, en de correctie C_{T2} voor een nulpuntverschuiving C_0 ten gevolge van het "kwikoverschot" ΔV , is voor een barometer met millibarverdeling gelijk aan:

$$C_{T2} = - C_0 = - \Delta V \cdot \frac{1,333224}{A}$$

Vullen we dit allemaal in en sommeren we C_{T1} en C_{T2} , dan krijgen we voluit:

$$C_T = - \frac{\alpha - \beta}{1 + \alpha \cdot T} \cdot T \cdot p^* - T \cdot 1,333224 .$$

$$\left[(\alpha - 3\eta) \frac{V}{A} + (3\eta - 2\gamma) \frac{v_t}{A} + \gamma \frac{v_{gt}}{A} - (3\eta - 3\gamma) \frac{v_{gc}}{A} \right]$$

Bedenkt men nu dat $(\alpha - \beta)/(1 + \alpha \cdot T)$ praktisch gesproken constant is, en dat alle vanaf het getal 1,333224 genoemde grootheden eveneens materiaal- en instrumentconstanten zijn, dan kan de vorm worden omgezet in:

$$C_T = - \frac{\alpha - \beta}{1 + \alpha \cdot T} \cdot T \cdot (p^* + Q)$$

waarin:

$$Q = \frac{1 + \alpha T}{\alpha - \beta} \cdot 1,333224 .$$

$$\left[(\alpha - 3\eta) \frac{V}{A} + (3\eta - 2\gamma) \frac{v_t}{A} + \gamma \cdot \frac{v_{gt}}{A} - (3\eta - 3\gamma) \frac{v_{gc}}{A} \right]$$

Vullen we dan nog de standaardwaarden in voor α , β , η en γ (en $\alpha \cdot 200^\circ \text{C}$ voor $\alpha \cdot T$), dan ruimt de zaak geweldig op:

$$C_T = -0,0001628 \cdot T \cdot (p^* + Q)$$

waarin:

$$Q = 1,243 \cdot \frac{V}{A} + 0,115 \frac{v_t}{A} + 0,006 \frac{v_{gt}}{A} - 0,049 \frac{v_{gc}}{A}$$

Deze formule is vrijwel gelijk aan die voor de bak-hevelbarometers. De toevoeging van Q in de drukfactor wil kort en goed zeggen dat men voor het bepalen van de temperatuurcorrectie van een bakbarometer gewoon figuur 2 kan blijven gebruiken, alleen moet men die niet aflezen bij het punt (T, p^*) maar bij het punt $(T, p^* + Q)$. Hierin is Q een vaste waarde tussen 30 en 65 mbar, die karakteristiek is voor het gegeven instrumenttype. Grijpen we hier even vooruit op de verderop te behandelen bakbarometers:

- Voor de gewone KNMI- stationsbarometer geldt
 $V/A = 37,4 \text{ mm}$, $v_t/A = 6,1 \text{ mm}$, $v_{gt}/A = 12,9 \text{ mm}$ en
 $v_{gc}/A = 0,3 \text{ mm}$, waarmee:
$$Q = 46,5 + 0,7 + 0,9 - 0,02 = 48 \text{ mbar.}$$
- Voor de elektronische kwikbarometers van Müller geldt
 $V/A = 37,0 \text{ mm}$, $v_c/A = 17,7 \text{ mm}$, $v_{gt}/A = 0$ en
 $v_{gc}/A = 0,2 \text{ mm}$, waarmee:
$$Q = 46,0 + 2,0 + 0,0 - 0,01 = 48 \text{ mbar.}$$
- Voor de beide zware KEW-bakbarometers geldt ruwweg
 $V/A = 51 \text{ mm}$, $v_t/A = 13 \text{ mm}$, $v_{gt}/A = 0$ en $v_{gc}/A = 0,3 \text{ mm}$,
waarmee:
$$Q = 63,5 + 1,5 + 0,0 - 0,02 = 65 \text{ mbar.}$$

In alle drie getoonde gevallen is de eerste term van Q dus verreweg het belangrijkste, stelt de laatste term niets voor en blijkt tweede plus derde term ook nog een kleine bijdrage te leveren.

Is de standaardtemperatuur van het instrument T_0 geen 0°C , maar wat anders, dan moet in alle boven gegeven formules de T vervangen worden door $T - T_0$. De temperatuurcorrectie wordt dan:

$$C_T = - \frac{\alpha - \beta}{1 + \alpha(T - T_0)} \cdot (T - T_0) \cdot (p^* + Q)$$

en Q blijft eender.

Samenstelling temperatuur- en zwaartekracht correctie

Voor de zwaartekracht correctie C_g vonden we in paragraaf 2:

$$C_g = (0,000090 \cdot \varphi - 0,315 \cdot 10^{-6} \cdot H - 0,004090) \cdot p^{**}$$

waarin conform WMO-aanbeveling:

p^{**} de voor temperatuur gecorrigeerde barometerstand.

De voor temperatuur gecorrigeerde barometerstand is:

$$\begin{aligned} p^{**} &= p^* + C_T \\ &= p^* - 0,0001628 \cdot (T - T_0) \cdot (p^* + Q) \end{aligned}$$

waarin conform WMO-aanbeveling:

p^* de "schone" kolomlengte, na toepassing van de evt. bij de ijking te voorschijn gekomen schaalcorrectie.

Vult men dit in en telt men er nog eens C_T bij op, dan krijgt men de gecombineerde temperatuur- en zwaartekrachtcorrectie $C_{T,g}$. In aanmerking genomen dat voor Nederlandse stations de som van de bij C_g tussen de haakjes gegeven termen ongeveer 0,0006 bedraagt, krijgen we:

$$\begin{aligned} C_{T,g} &= (0,000090 \cdot \varphi - 0,315 \cdot 10^{-6} \cdot H - 0,004090) \cdot p^* \\ &\quad - 0,0001629 \cdot (T - T_0) \cdot (p^* + Q) \end{aligned}$$

Voor de barometerkelder van het KNMI in De Bilt ($\varphi = 52,1^\circ$ en $H = 3$ m) komt dit uit op:

$$C_{T,g} = 0,000599 \cdot p^* - 0,0001629 \cdot (T - T_0) \cdot (p^* + Q)$$

Nauwkeurigheidseis temperatuurmeting

In essentie gelijk aan die voor de bak-hevelbarometers, zie aldaar.

Verticaalstelling

Gevolg van afwijking van de verticaalstelling is gelijk aan die voor de bak-hevelbarometers, zie aldaar.

DE CASSELLA - 302

**ZWARE BAKBAROMETER
MET MBAR-VERDELING**

De Cassella-302 is gebouwd in 1947 en heeft tot het einde van de zestiger jaren gediend als substandaard bij de barometer-ijking. De ijking van deze barometer werd bewaakt met de in paragraaf 4 genoemde primaire standaard. De gegevens zijn:

Standaardaanduiding	staande bakbarometer met mbar-verdeling
Fabrieksaanduiding	test-barometer, Kew principle
Fabrikant	Cassella, London
Nummer	302 (KNMI 01-04-014-01)

Afmetingen

Inw. diameter kwikbuis	$d = 12,5 \text{ mm}^2$
Opp. doorsnede kwikbuis	$S = 122,7 \text{ mm}^2$
Eff. oppervlak kwikbak	$A = 6207 \text{ mm}^2$
Totaal kwikvolume	$V = 318644 \text{ mm}^3$
Kwikvolume kwikbuis	$V_t = 92030 \text{ mm}^3$
Glasvolume vernauwing buis	$V_{gt} = 0 \text{ mm}^3$
Glasvolume staartstuk buis	$V_{gc} = 1900 \text{ mm}^3$

Lengtebepaling kwikkolom

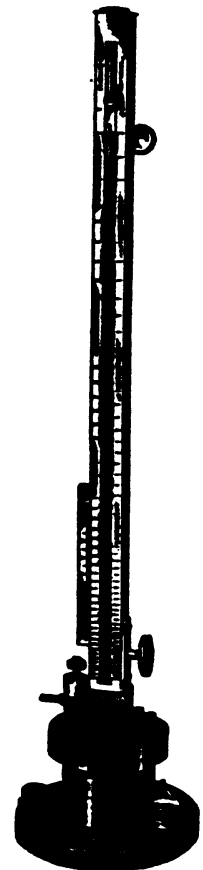
Verdeling hoofdschaal id. bereik	hele mbar 130-1095 mbar
Schaalcontractie	0,98249
Ware millibaren bij	$T_0 = 12 \text{ }^\circ\text{C}$ $g_n = 9,80665 \text{ m/s}^2$
Meting meniscus	geen voorziening
Verticaalstelling	twee waterpassen

Thermometer

Schaalverdeling	hele graden Celsius
Schaalbereik	$0 \text{ }^\circ\text{C}$ t/m $60 \text{ }^\circ\text{C}$

Temperatuurcoëfficiënten

Vol. U.C. kwik	$\alpha = 0,0001818 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
Lin. U.C. hoofdschaal	$\beta = 0,0000189 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
Lin. U.C. kwikbak	$\eta = 0,0000107 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
Lin. U.C. glas stijgbuis	$\gamma = 0,0000085 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$



Overige zaken Cassella-302

1. Schaalcontractiefactor F_c

$$F_c = \frac{6207}{6207+122,7} \cdot (1+0,0001629 \cdot 12)$$
$$= 0,98249$$

2. Nulpuntcorrectie

$$\Delta V_0 = \frac{6207}{1,333224} \cdot C_0 \text{ mm}^3$$
$$= 4656 \cdot C_0 \text{ mm}^3 \quad (= 63,3 \cdot C_0 \text{ gram})$$

Hierin is:

C_0 verlangde correctie in mbar

ΔV_0 toe te voegen kwik in mm^3 (gram)

3. Bakcorrectieterm Q

$$Q = \frac{1+0,0001818 \cdot 8}{0,0001629} \cdot 1,333224 \cdot$$

$$[0,0001497 \cdot 51,34 + 0,0000151 \cdot 14,83 + 0,0 - 0,0000066 \cdot 0,3]$$

$$Q = (63,0 + 1,8 + 0,0 - 0,0) = 65 \text{ mbar}$$

4. Temperatuurcorrectie

$$C_T = - \frac{0,0001629}{1+0,0001818 \cdot 8} \cdot (T-12) \cdot (p^*+Q)$$

$$= - 0,0001627 \cdot (T-12) \cdot (p^*+65)$$

Hierin is:

C_T temperatuurcorrectie in mbar

T instrumenttemperatuur in $^{\circ}\text{C}$

p^* "schone" kolomlengte in mbar
(= aflezing + schaalcorrectie)

5. De samengestelde temperatuur- en zwaartekrachtcorrectie, geldig voor de barometerkelder van het KNMI in De Bilt, wordt dan:

$$C_{T,g} = 0,000599 \cdot p^* - 0,0001628 \cdot (T-12) \cdot (p^*+65)$$

NEGRETTI EN ZAMBRA M/8719

ZWARE BAKBAROMETER
MET MBAR-VERDELING

Deze barometer heeft lange tijd gediend bij het ijken van de druk-elementen van de Engelse radiosonde. In het begin van de zeventiger jaren werd het instrument overgedragen aan INSA, waar men het in gebruik genomen heeft in het druk-ijklaboratorium.

Standaardaanduiding staande bakbarometer met
Fabrieksaanduiding mbar-verdeling
Fabrikant test-barometer, Kew Principle
Nummer Negretti en Zambra, London
M/8719

Afmetingen

Inw. diameter kwikbuis $d = 12,0 \text{ mm}$
Opp. doorsnede kwikbuis $S = 113,1 \text{ mm}^2$
Eff. oppervlak kwikbak $A = 7664 \text{ mm}^2$
Kwikvolume totaal $V = 185580 \text{ mm}^3$
Kwikvolume kwikbuis $v_t = 85000 \text{ mm}^3$
Glasvolume vernauwing buis $v_{gt} = 0 \text{ mm}^3$
Glasvolume staartstuk buis $v_{gc} = 600 \text{ mm}^3$

Lengtebepaling kwikkolom

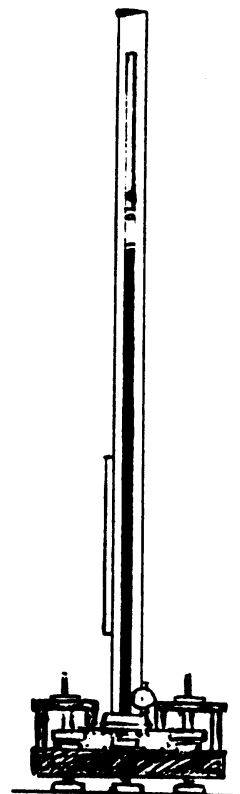
Hoofdschaal, verdeling hele millibaren
 0-1126 mbar
 nonius per 1/10 mbar
Hulpschaal 0/10 t/m 10/10
 0,98546
Ware millibaren bij $T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$
 $g_n = 9,80665 \text{ m/s}^2$
Meting meniscus geen voorziening
Verticaalstelling doosniveau

Thermometer

Schaalverdeling hele $^\circ\text{C}$
Schaalbereik -15 $^\circ\text{C}$ t/m +50 $^\circ\text{C}$

Temperatuurcoëfficiënten

Vol. U.C. kwik $\alpha = 0,0001818 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
Lin. U.C. hoofdschaal $\beta = 0,0000184 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
Lin. U.C. kwikbak $\eta = 0,0000118 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
Lin. U.C. kwikbuis $\gamma = 0,0000033 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$



Overige zaken Negretti and Zambra M/8719

1. Schaalcontractiefactor F_c

$$F_c = \frac{7664}{7664+113,1} = 0,98546$$

2. Nulpuntcorrectie

$$\begin{aligned} \Delta V_0 &= \frac{7664}{1,333224} \cdot C_0 \text{ mm}^3 \\ &= 5748 \cdot C_0 \text{ mm}^3 \quad (= 78,2 \cdot C_0 \text{ gram}) \end{aligned}$$

Hierin is:

C_0 verlangde correctie in mbar

ΔV_0 toe te voegen kwik in mm^3 (gram)

3. Bakcorrectieterm Q

Omdat hier voor η en γ niet de standaardwaarden gebruikt worden, wordt dit:

$$\begin{aligned} Q &= 1,199 \cdot 24,2 + 0,236 \cdot 11,1 + 0,027 \cdot 0 - 0,209 \cdot 0,1 \\ &= 29,0 + 2,6 + 0,0 - 0,0 \\ &= 32 \text{ mbar} \end{aligned}$$

4. Temperatuurcorrectie

Deze kan direct worden opgeschreven:

$$C_T = - 0,0001628 \cdot T \cdot (p^* + 32)$$

Hierin is:

C_T temperatuurcorrectie in mbar

T instrumenttemperatuur in $^{\circ}\text{C}$

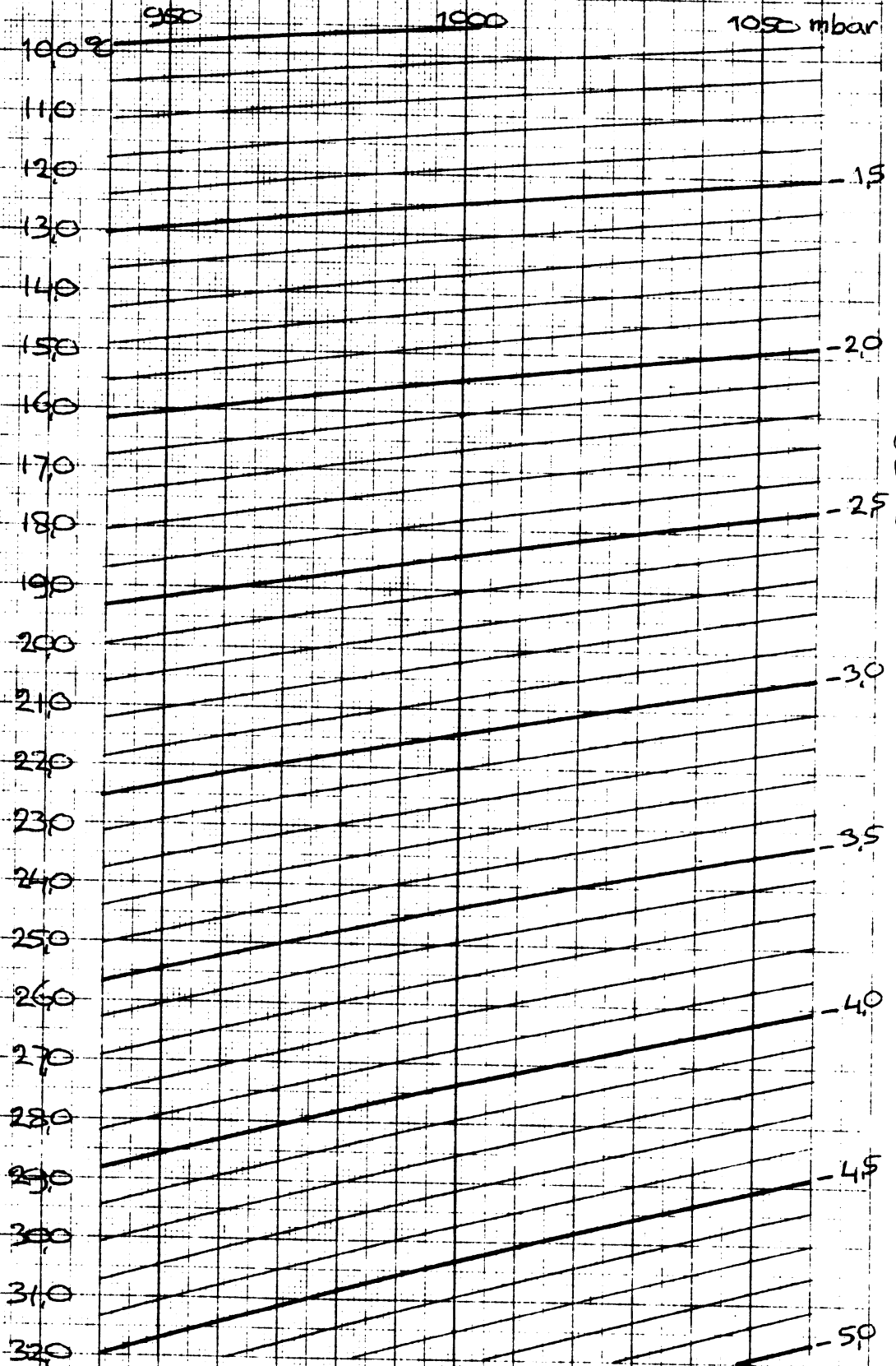
p^* "schone" kolomlengte in mbar
(= aflezing + schaalcorrectie)

5. De samengestelde temperatuur- en zwaartekrachtcorrectie, geldig voor de barometerkelder van het KNMI in De Bilt, wordt dan:

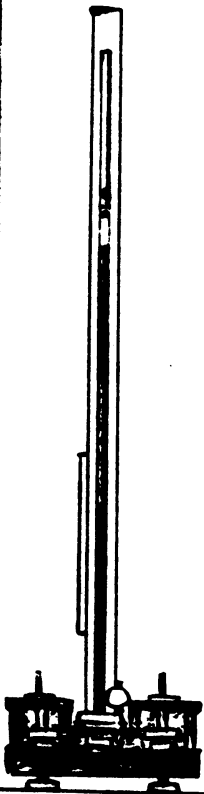
$$C_{T,g} = 0,000599 \cdot p^* - 0,0001629 \cdot T \cdot (p^* + 32)$$

AFGELEZEN LUCHTDRIJK

INSTRUMENTTEMPERATUUR



CORRECTIE (mbar)



$Q = 32$ mbar

NEGRETTI EN ZAMBRA M/8719

$C_{T, P}$ VOOR DE BILT

FIGUUR 8

K N M I - S T A T I O N S B A R O M E T E R

BAKBAROMETER
MET MBAR-VERDELING

Deze barometers worden gemaakt in twee uitvoeringen, nl. voor gebruik op schepen en voor gebruik op landstations. Het onderscheid is, dat scheepsbarometers in de stijgbuis een sterk vernauwd trakeet bezitten om het "pompen" ten gevolge van de verticale scheepsbewegingen tegen te gaan. Verder zijn alle eigenschappen gelijk.

Standaardaanduiding
Fabrieks-aanduiding
Fabrikant

bakbarometer met mbar verdeling
stationsbarometer, KNMI-model
Van Doorn, De Bilt

Afmetingen

Inw. diameter stijgbuis
Opp. doorsnede stijgbuis
Eff. oppervlakte kwikbak
Kwikvolume totaal
Kwikvolume stijgbuis
Glasvolume vernauwing buis
Glasvolume staartstuk buis

$d = 8,0 \text{ mm}$
 $S = 50,3 \text{ mm}^2$
 $A = 1925 \text{ mm}^3$
 $V = 72000 \text{ mm}^3$
 $v_t = 11690 \text{ mm}^3$
 $v_{gt} = 25000 \text{ mm}^3$
 $v_{gc} = 600 \text{ mm}^3$

Lengtebepaling kwikkolom

Hoofdschaal, verdeling
idem, bereik
Hulpschaal
idem, bereik
Schaalcontractie
Ware millibaren bij

hele millibaren
870-1090
nonius per 1/10 mbar
0/10 t/m 10/10
0,97454

Meting meniscus
Verticaalstelling

$T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$
 $g_n = 9,80665 \text{ m/s}^2$
geen voorziening
hangende uitvoering

Thermometer

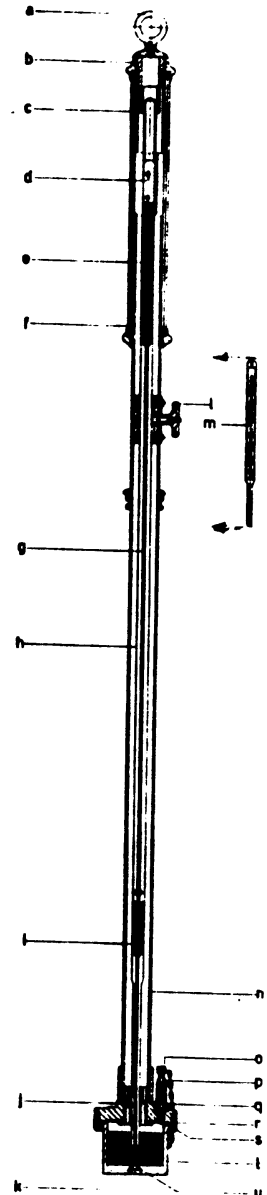
Schaalverdeling
Schaalbereik

hele $^\circ\text{C}$
 $-15 \text{ }^\circ\text{C t/m } +45 \text{ }^\circ\text{C}$

Temperatuurcoëfficiënten

Vol. U.C. kwik
Lin. U.C. hoofdschaal
Lin. U.C. kwikbak
Lin. U.C. glas stijgbuis

$\alpha = 0,0001818$
 $\beta = 0,0000184$
 $\eta = 0,0000100$
 $\gamma = 0,0000080$



Overige zaken KNMI-stationsbarometer

1. Schaalcontractiefactor F_c

$$F_c = \frac{1925}{1925+50,3} = 0,97454$$

2. Nulpuntcorrectie

$$\begin{aligned}\Delta V_0 &= \frac{1925}{1,333224} \cdot C_0 \text{ mm}^3 \\ &= 1444 \cdot C_0 \text{ mm}^3 \quad (= 19,6 \cdot C_0 \text{ gram})\end{aligned}$$

Hierin is:

C_0 verlangde nulpuntcorrectie
in mbar

ΔV_0 toe te voegen kwik in mm^3 (gram)

3. Bakcorrectieterm Q

Daar voor α , β , η en γ de standaardwaarden worden gebruikt, wordt dit:

$$\begin{aligned}Q &= 1,243 \cdot 37,4 + 0,115 \cdot 6,1 + 0,066 \cdot 12,9 - 0,049 \cdot 0,3 \\ &= 46,5 + 0,7 + 0,9 - 0,0 \\ &= 48 \text{ mbar}\end{aligned}$$

4. Temperatuurcorrectie

Deze kan direct worden opgeschreven:

$$C_T = - 0,0001628 \cdot T \cdot (p^* + 48)$$

Hierin is:

C_T temperatuurcorrectie in mbar

T instrumenttemperatuur in $^{\circ}\text{C}$

p^* "schone" kolomlengte in mbar
(= aflezing + schaalcorrectie)

5. De samengestelde temperatuur- en zwaartekrachtcorrectie, geldig voor de barometerkelder van het KNMI in De Bilt, wordt dan:

$$C_{T,g} = 0,000599 \cdot p^* + 0,0001629 \cdot T \cdot (p^* + 48)$$

AFGELEZEN LUCHTDRIJK

INSIUMENTEMPERATUUR

950

1000

1050 mbar

10,0
11,0
12,0
13,0
14,0
15,0
16,0
17,0
18,0
19,0
20,0
21,0
22,0
23,0
24,0
25,0
26,0
27,0
28,0
29,0
30,0
31,0
32,0

-1,5
-2,0
-2,5
-3,0
-3,5
-4,0
-4,5
-5,0

CORRECTIE (mbar)



Q = 48 mbar

KNMI STATIONSBAROMETER

C_{1,4} voor DE BILT

FIGUUR 9

Overige zaken Elektronische Kwikbarometer

1. Schaalcontractiefactor F_c

$$F_c = \frac{2692-63,6}{2692} = \frac{6515-153,9}{6515} = \\ = 0,97637$$

2. Nulpuntcorrectie, voor de EB11a9:

$$\Delta V_0 = \frac{2692}{1,333224} \cdot C_0 \\ = 2019 \cdot C_0 \text{ mm}^3 \quad (= 27,5 \cdot C_0 \text{ gram})$$

Nulpuntcorrectie, voor de EB11a9/14:

$$\Delta V_0 = \frac{6515}{1,333224} \cdot C_0 \\ = 4887 \cdot C_0 \text{ mm}^3 \quad (= 66,4 \cdot C_0 \text{ gram})$$

3. Bakcorrectieterm Q , voor de EB11a9:

$$Q = 1,243 \cdot 37,0 + 0,115 \cdot 17,7 + 0,066 \cdot 0 - 0,049 \cdot 0,2 \\ = 46,0 + 2,0 + 0,0 - 0,0 = 48 \text{ mbar}$$

Bakcorrectieterm Q , voor de EB11a9/14:

$$Q = 1,243 \cdot 37,0 + 0,115 \cdot 17,7 + 0,066 \cdot 0 - 0,049 \cdot 0,2 \\ = 46,0 + 2,0 + 0,0 - 0,0 = 48 \text{ mbar}$$

4. Temperatuurcorrectie, gelijk voor beide typen:

$$C_T = - 0,0001628 \cdot T \cdot (p^* + 48)$$

Hierin is:

C_T temperatuurcorrectie in mbar

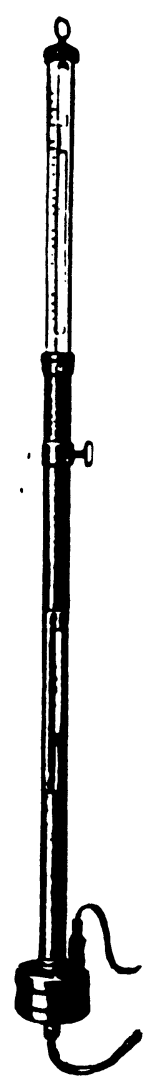
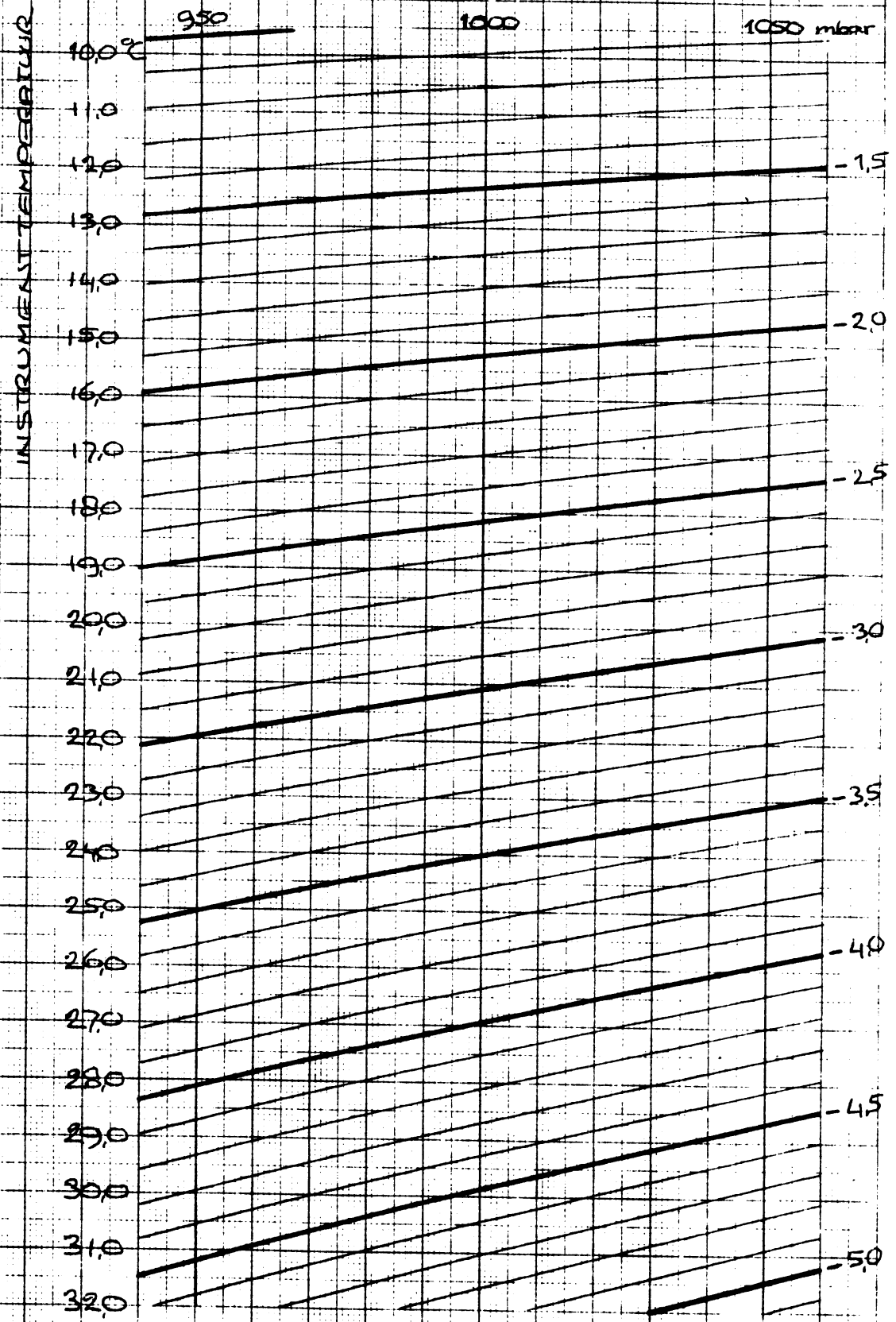
T instrumenttemperatuur in °C

p^* "schone" kolomlengte in mbar
(= aflezing + schaalcorrectie)

5. De samengestelde temperatuur- en zwaartekrachtcorrectie, geldig voor de barometerkelder van het KNMI in De Bilt, is ook gelijk voor beide typen:

$$C_{T,g} = 0,000599 \cdot p^* - 0,0001629 \cdot T \cdot (p^* + 48)$$

AFGELEZEN LUCHTDRIJK



Q = 48 mbar

DE BILT

MULLER ELECTRONISCHE KWIKBAROMETER

FIGUUR 10

6. Naschrift

Dit is een van de raarste verslagen die ik ooit heb moeten maken. Het meest in het oog lopende kenmerk is dat er hier een volstrekt abnormale nauwkeurigheid gevergd wordt. Bepaald het meest hinderlijke kenmerk is echter dat het bijzonder moeilijk blijkt zekerheid te krijgen dat alle gebruikte formules volledig vrij zijn van fouten of slordigheden. De uitkomsten blijken namelijk in hinderlijke mate gevoelig voor eventuele missers, terwijl men dit er beslist niet aan afziet. En dit laatste geldt dan speciaal voor paragraaf 5, handelend over bakbarometers.

Van de buitenlandse bakbarometers waren geen behoorlijke maten en correcties bekend, of ze waren weggeraakt. Alle leveranciers werden daarom aangeschreven voor inlichtingen. Alleen Cassella reageerde hier vlot op met de relevante opgaven. Het verslag werd toen afgemaakt, en waar de maten van andere barometers niet bekend waren, werden ze zo verstandig mogelijk geschat. Vervolgens werd ter verifiëring een Engels uittreksel van paragraaf 5 rondgestuurd met de vermelding dat we alleen van de Cassella en van de Van Doorn de maten kenden, en de rest grotendeels op gissingen berustte. Hierop kwam nog nèt op tijd (verslag was al gedrukt, maar nog niet vergaard) een uitvoerige reactie van Negretti en Zambra. Het bleek toen dat de schatting van de hoeveelheid kwik in de M/8719 niet minder dan tweemaal te hoog was geweest, waarmee in de bladzijden 48, 49 en 50 een flink aantal wijzigingen moest worden verwerkt. Nog vervelender was echter dat men eenfout aanwees in de berekening van de schaalcontractie. Die is namelijk niet gelijk aan $(A-S)/A$, maar aan $A/(A+S)$. In de praktijk komt dit neer op het verschil van 49/50 met 50/51, wat pas tot uiting komt in de vierde decimaal. Maar omdat er hier vijf decimalen nodig zijn, heeft men daar dus al echt last van. Behalve de bladzijden 48, 49 en 50, werden daarom ook nog de bladzijden 39, 45, 46 en 51, 52 hierzien, en werd dit naschrift toegevoegd. Voor de hiertoe geboden gelegenheid betuig ik gaarne mijn dank aan de heer Wittebol.

Naast de hierboven vermelde en dus reeds verwerkte wijzigingen blijven er echter ook nog een paar door de lezer aan te brengen rectificaties over:

blz. 43: " - voor beide zware KEW-barometers"
moet worden: " - voor de Cassella barometer".

blz. 54 en 55:

In feite werd bij de elektronische kwikbarometer de F_c niet berekend uit A en S, maar A werd berekend uit de hier bekende F_c en $S (= \pi d^2/4)$. Bovendien werd V geschat door het bijwerken van de bekende verhouding V/A voor de stationsbarometer 11a9, waaruit de EB 11a9 en de EB 11a9/14 werden ontwikkeld. Eén en ander voerde tot de $Q = 48$ mbar, die (erg prettig!) gelijk of vrijwel gelijk moet zijn aan de $Q = 48$ mbar, die voor de gewone KNMI-stationsbarometer geldt. De figuren 9 en 10 zijn dan ook identiek. Daar de hier aan te brengen veranderingen bepaald geen significant effect sorteren, doet men er in dit geval beter aan voorlopig alles maar zo te laten staan zoals het er nu staat. Alleen mogen op blz. 55 bij punt 1 de beide breuken achter " $F_c =$ " worden doorgestreept.