

24 NOV. 1969

KONINKLIJK NEDERLANDS
METEOROLOGISCH INSTITUUT
DE BILT

VERSLAGEN

V-221

Over de eigenschappen van omkeerthermometers

door

L. Otto

De Bilt, 1969

Kon. Ned. Meteor. inst.

De Bilt

Publikationsnummer: K.N.M.I. V 221-IV

Over de eigenschappen van omkeerthermometers

door

L. Otto

1. Inleiding

Tijdens de expeditie Navado III door Hr. Ms. Snellius werden omkeerthermometers gebruikt van het K.N.M.I. en van het Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee (N.I.O.Z.) te Den Helder. De meeste van deze thermometers waren gemaakt door de firma Yoshino Keiki Co. (Tokio), maar ook enkele thermometers van de firma Richter und Wiese (Berlijn) waren in gebruik.

Van de Japanse thermometers waren voor de aanvang van de expeditie de fabrieksijkingen beschikbaar. De Richter und Wiese thermometers waren reeds enige malen op het K.N.M.I. herijkt. Kort voor het begin van de tocht was bovendien een deel van deze thermometers geijkt door het "Fisheries Laboratory" in Lowestoft (Engeland). Na de eerste reeks waarnemingen op de transatlantische oversteek "Echo" werden al de thermometers door het "U.S. Naval Oceanographic Office" te Washington geijkt, en enkele maanden na terugkeer van Hr. Ms. Snellius door de oceanografische onderafdeling van het K.N.M.I. Gelijktijdig werden ook de meeste andere omkeerthermometers van het K.N.M.I. herijkt. Hierbij zijn enkele thermometers die nog tijdens de (oude) Snellius expeditie (1929-1930) zijn gebruikt. Sedertdien is het ijkprogramma voortgezet met een regelmaat van een ijking per jaar. Deze reeks ijkingen van thermometers van verschillende ouderdom en fabrikaat geeft de mogelijkheid meer te leren omtrent hun eigenschappen. In het volgende verslag wordt hier nader op ingegaan.

Omdat voor een zo nauwkeurig mogelijke temperatuurmeting naast een nauwkeurige ijking van de thermometers ook een goede kennis van de verschillende foutenbronnen gewenst is, is in dit verslag ook ruime aandacht besteed aan de literatuur over kantelthermometers en hun gedrag.

2. Nauwkeurigheid van temperatuurmetingen met kantelthermometers

De temperaturen, bepaald met kantelthermometers kunnen volgens Metcalf, Heezen en Stalcup (1964) een nauwkeurigheid bereiken van 0.005°C . Ook in vele lijsten van oceanografische waarnemingen worden de temperaturen tot een nauwkeurigheid van 0.005° opgegeven. Wij willen hier nagaan, of de temperatuurmetingen, en meer speciaal de nauwkeurigheid van de thermometers, aan de voorwaarden voldoen die nodig zijn om een dergelijke nauwkeurigheid te bereiken.

Alvorens in te gaan op de nauwkeurigheid van de ijkingen, is het nuttig eerst de andere bronnen van fouten in ogenschouw te nemen.

A. Fouten, optredend bij de meting zelf.

A.1. Niet aangepast zijn van de temperatuur door te kort tijdsinterval in situ, vóór de kanteling. Hierop zal hier niet nader worden ingegaan, daar dit een kwestie is van een al of niet volgen van de voorgeschreven procedure. Een minimum tijdsduur van 6 minuten wordt opgegeven in

het "Instruction Manual for Oceanographic Observations" (1955). Opge-merkt moet worden dat voor diepere thermometers in een serie deze tijd vanzelf wordt overtroffen. Bij een serie tussen 1500 en 5000 meter kantelt de onderste waterschepper na ca. 26 minuten, als de bovenste na 6 minuten kantelt.

- A.2. Niet aangepast zijn van de temperatuur door verticale bewegingen van de waterschepper met thermometers in het water, in aanwezigheid van een belangrijke verticale temperatuur gradiënt, zoals is aangegeven door Cooper (1961). Om dit effect zo klein mogelijk te houden dient gestreefd te worden naar een zo goed mogelijk verticale stand van de oceanografische draad.
- A.3. Niet aangepast zijn van de temperaturen door verticale bewegingen van het water bij belangrijke verticale temperatuur gradiënten (inwendige golven). Voor de metingen van de Snellius expeditie (1929-1930) heeft Hamaker (1941) een schatting gemaakt van de grootte van deze fout. Deze hangt vanzelfsprekend sterk af van de gelaagdheid van het water en van de diepte.
- A.4. Drukeffecten op beschermde thermometers. Hierop is gewezen door Folsom, Jennings en Schwartzlose (1959). Een constructieverandering, die dit effect zou doen verdwijnen is aangegeven door Nordstrom en Folsom (1960). Volgens Folsom c.s. moet voor normale thermometers gerekend worden op een schijnbare temperatuurstijging van 0.002° C per 1000 meter, hoewel bij ongunstig gedimensioneerde thermometers een stijging van 0.008° C per 1000 meter kan optreden.
- B. Fouten, optredend bij de aflezing van de thermometers.
- B.1. Aflezing van de thermometer, wanneer de omgevingstemperatuur nog snel verandert, zodat de afgelezen hulptemperatuur een andere is dan die, waarvoor de aanwijzing van de hoofdthermometer moet worden gecorrigeerd. In het "Instruction Manual for Oceanographic Observations" wordt voor de tijd die meestal nodig is voor het aanpassen van de thermometers 10 tot 15 minuten genoemd. De invloed van dit effect kan onbelangrijk gehouden worden door zorg te dragen dat de thermometers voor aflezing goed aan de omgevingstemperatuur zijn aangepast, en dat deze omgevingstemperatuur weinig verandert tijdens de aflezing. Een proef, die de invloed van de tijd van aanpassing heeft op het berekende eindresultaat is beschreven in een publicatie van het "Bureau d'Etudes Océanographiques de Toulon" (1962). Het bleek dat een aflezing na 5 minuten en een aflezing na 30 minuten een verschil in einduitkomst van de temperatuurberekening opleverden van maximaal 0.01° C. Vanzelfsprekend is de grootte van dit effect sterk afhankelijk van de omstandigheden.
- B.2. Afleesfout van de thermometers. Deze is vanzelfsprekend afhankelijk van de onderverdeling van de afleesschaal, die voor de beschermde thermometers doorgaans in $1/20$ of $1/10^{\circ}$ C is verdeeld, voor de onbeschermde thermometers doorgaans in $1/10$ of $1/5^{\circ}$ C. Böhnecke (1932) geeft een afleesfout van 0.010 voor de thermometers met een schaalverdeling in $1/10^{\circ}$ C, en van 0.003° C voor de thermometers met een schaalverdeling in $1/20^{\circ}$ C. Whitney (1957) schat deze fout op resp. 0.010° C en 0.005° C.

Uit bovenstaande volgt, dat er een aantal foutenbronnen zijn naast de instrumentele fouten, die ook in de gunstigste omstandigheden een onnauwkeurigheid geven van 0.003° C (afleesfout), tenzij gebruik wordt gemaakt van thermometers met een zeer fijn verdeelde schaal.

3. Thermometerijkingen

Het is gebruikelijk om de correctie van een thermometer te splitsen in een nulpuntscorrectie en een schaalverdelingscorrectie. Zoals zal blijken kan de nulpuntscorrectie met de tijd variëren, terwijl kan worden aangenomen dat de schaalverdelingscorrectie constant blijft.

Het is daarom noodzakelijk dat het nulpunt van de thermometer regelmatig wordt geijkt. Dit gebeurt in smeltend ijs, volgens een methode zoals beschreven bij Böhnecke (1932) en Whitney (1960). De nauwkeurigheid waarmee deze ijking kan gebeuren hangt sterk af van de omstandigheden, de zuiverheid van het ijs, en de nauwkeurigheid van de te gebruiken standaardthermometers. Het lijkt waarschijnlijk dat de nauwkeurigheid van deze ijking bij 0° minder snel beïnvloed zal worden door temperatuurverschillen, dankzij de sterke stabiliserende werking van een goede ijsvulling van het ijkvat, dan die van ijkingen bij andere temperaturen, nodig voor het vaststellen van de schaalverdelingscorrecties.

Het is echter mogelijk dat door verontreiniging van het ijs een nulpuntsverlaging optreedt. Er zijn dus een of meer standaardthermometers nodig om een eventuele afwijking van het nulpunt te kunnen constateren. Het nulpunt is dan bekend met de nauwkeurigheid van de standaardthermometers, die volgens Whitney (1957) $+ 0.003^{\circ}$ C bedraagt.

De nauwkeurigheid waarmee het nulpunt van de te ijken thermometer kan worden afgelezen (als gemiddeld uit een aantal waarnemingen) is volgens Whitney $+ 0.002^{\circ}$ voor thermometers met een schaal in 0.05° verdeeld, $+ 0.004$ voor thermometers met een schaal in 0.1° verdeeld en $+ 0.008$ voor thermometers met een schaal in 0.2° verdeeld. De nulpuntsijking voor deze drie typen thermometers hebben dus een toevallige fout van respectievelijk $+ 0.0035^{\circ}$, $+ 0.005^{\circ}$ en $+ 0.0085^{\circ}$.

De schaalverdelingscorrectie, die wordt verkregen door de nulpuntscorrectie van de totale correctie af te trekken, heeft een toevallige fout van respectievelijk

$+ 0.005^{\circ}$, $+ 0.007^{\circ}$ en $+ 0.012^{\circ}$.

Wanneer nu deze schaalverdelingscorrectie opnieuw met een nieuw bepaalde nulpuntscorrectie tot een totale correctie wordt samengevoegd, is de toevallige fout

$+ 0.006^{\circ}$, $+ 0.0085^{\circ}$ en $+ 0.015^{\circ}$.

Met deze nauwkeurigheid zou dus gerekend moeten worden, behalve waar de temperatuur bij het nulpunt ligt, en dus alleen de nulpuntscorrectie een rol speelt.

In feite blijken echter grotere fouten op te kunnen treden. Vergelijking tussen de ijking door vier verschillende instituten in de U.S.A. toonde onderlinge systematische verschillen tot ruim 0.03° C bij het nulpunt, en tot ruim 0.04° C bij andere temperaturen. Deze afwijkingen bleken in hoofdzaak te zijn toe te schrijven aan fouten in de gebruikte temperatuur-standaards (Martin, Bryan, Curtis en Whitney, 1968).

4. Nulpuntscorrecties, literatuurgegevens

Zoals hiervoor al gezegd, is het een reeds vaak gesignaleerd verschijnsel dat het nulpunt van thermometers in de loop der jaren verandert. Volgens Böhnecke (1932) is dit het gevolg van twee oorzaken.

1. Samentrekking van het kwikreservoir, waardoor het nulpunt stijgt. Deze verandering wordt in de loop van de tijd doorgaans steeds geringer.

2. Depressie van het nulpunt ten gevolge van een uitzetting van het glas bij sterke verwarming, die niet direct verdwijnt. Deze veranderingen kunnen slechts voor kortere tijd van belang zijn, maar bij elke meting kunnen zij een min of meer belangrijke invloed uitoefenen. Volgens Böhnecke bedraagt dit effect bij de door hem gebruikte glassoort 2954 III slechts

$0.01^{\circ} - 0.015^{\circ}$ voor 100° C temperatuurverandering, zodat in de praktijk dit effect van weinig belang zal kunnen zijn. Wel zal bij pas gefabriceerde thermometers een aanvankelijke toename van de correctie kunnen optreden die kan worden toegeschreven aan de nawerking van de hoge temperaturen die bij de fabricage zijn opgetreden.

Enkele andere auteurs hebben nog andere mogelijke oorzaken voor nulpuntsveranderingen aangegeven.

Francke (1965) geeft mechanische oorzaken (herhaaldelijk kantelen) voor een nulpuntstoename. Men moet hierbij denken aan een soort "slijtage" van het afbreekpunt van de kwikdraad. Het is niet duidelijk of dit effect alleen van belang is bij de door deze auteur onderzochte thermometers (VEB Ilmenauer Thermometerwerke Geraberg) met een van het normale type afwijkende constructie van het afbreekpunt.

Whitney (1960) noemt nog als een oorzaak van het verlopen van het nulpunt de mogelijkheid dat een aanvankelijke bij fabricage ontstane overdruk binnen de beschermhuls van een beschermde thermometer een drukeffect op de aanwijzing geeft (vergelijkbaar met het drukeffect op een onbeschermde thermometer), welk drukeffect geleidelijk zou verminderen door de vermindering van deze overdruk. Volgens deze auteur is het ook waarschijnlijker dat de nulpuntscorrectie sprongsgewijs verloopt dan continu, daar de veranderingen juist dan zullen optreden als de spanning in het glas een grenswaarde heeft bereikt.

In de literatuur vinden wij de volgende gegevens van in de praktijk geconstateerde nulpuntsveranderingen.

a. Aanvankelijke toename van de correctie bij pas gefabriceerde thermometers

Böhnecke (1932) nam dit effect waar bij 45 van de 124 thermometers die op de "Meteor" werden gebruikt. Gemiddeld was voor deze 45 thermometers de extra correctie ten gevolge van dit effect 0.015° . Het effect bereikte zijn maximum na gemiddeld $2\frac{1}{2}$ maand.

Hamaker (1941) vermeldt eveneens een aanvankelijke toename van de nulpuntscorrectie bij een aantal van de op de Snellius gebruikte thermometers.

b. Geleidelijk afnemende nulpuntscorrectie, die uiteindelijk tot een constante waarde nadert.

Böhnecke (1932) vond dit effect bij de overgrote meerderheid van de thermometers van de "Meteor". Bij de thermometers met een schaalverdeling in $1/20^{\circ} \text{ C}$ was gemiddeld de uiteindelijke extra correctie door dit effect 0.015° C , bij die met een schaalverdeling in $1/10^{\circ} \text{ C}$ was dit 0.01° C , terwijl de maximale extra correctie voor deze thermometers resp. 0.040° C en 0.03° C was. Deze verandering van de nulpuntscorrectie was na gemiddeld 4 maanden, maximaal na 8 maanden tot stilstand gekomen.

Hamaker (1941) bespreekt hetzelfde effect bij de thermometers van de Snellius expeditie. De tijdsduur, die nodig was voordat deze thermometers een ongeveer constante nulpuntscorrectie hadden, bleek hier wat langer te zijn dan de door Böhnecke gegeven waarden. De gemiddelde verandering van de correctie van oktober 1928 tot augustus 1930 bleek 0.012° C te zijn voor de thermometers met een schaalverdeling in $1/20^{\circ} \text{ C}$.

Sverdrup (1929) geeft de nulpuntscorrecties voor een 15-tal thermometers, gebruikt op de "Maud" expeditie. Van de 14 thermometers, die in de jaren 1909 en 1910 werden geijkt, bleek in 1918 van 10 thermometers de nulpuntscorrectie niet te zijn veranderd, van 3 was deze correctie met 0.01° C afgenomen, en van 1 met 0.02° C . Van deze zelfde thermometers bleek de verandering van de correctie tussen 1918 en de jaren 1922-1924 van 11 exemplaren nul te zijn, van 3 was deze -0.01 en van 1 was deze $+0.01$.

Uit deze laatste gegevens lijkt dus een zeker voortduren van de nulpuntsverschuiving voor een aantal thermometers te volgen.

Herdman en Pemberton (1958) geven de correcties voor 33 thermometers, gebruikt op de schepen "Discovery", "Discovery II" en "William Scoresby". Hun conclusies komen grotendeels overeen met die van de andere auteurs. Uit hun gegevens blijkt eveneens dat het nulpunt over zeer lange tijd kan blijven verlopen. Zo volgt uit hun gegevens voor thermometers, gemaakt in 1924 een gemiddeld verloop van 0.0012° per jaar, vrij regelmatig over de hele periode 1924 tot 1949. Het blijkt dat nieuwere thermometers sterker verlopen: thermometers uit 1938 verliepen gemiddeld 0.0022° per jaar, over de periode tot 1949, en tussen 1949 en 1953 zelfs 0.0050° per jaar.

Francke (1965) geeft tenslotte voor de door hem onderzochte thermometers (VEB Ilmenauer Thermometerwerke) een afname van de nulpuntscorrectie van niet minder dan 0.05° in het eerste jaar na de fabricage.

c. Andere variaties van de nulpuntscorrectie

Böhnecke beschrijft variaties van de nulpuntscorrectie die zijn waargenomen aan de op de "Meteor" gebruikte thermometers, die afwijken van de hierboven geschetste regels. In de eerste plaats bleek een aantal thermometers een met de tijd snel toenemende nulpuntscorrectie te hebben, die geleidelijk constant werd.

Als mogelijke oorzaak wordt genoemd een opengaan van een aanvankelijk gesloten blaasje in het glas. Verder bleken enkele thermometers een zeer onregelmatig verloop van de nulpuntscorrectie te vertonen. Hierbij moet wellicht gedacht worden aan een onnauwkeurig afbreken van de kwikdraad. Ook Herdman en Pemberton geven voor enkele thermometers een afwijkend verloop van de nulpuntscorrecties.

5. Nulpuntscorrecties van K.N.M.I. en N.I.O.Z. thermometers

In deze paragraaf zal voor een aantal beschermde en onbeschermde thermometers in het bezit van het K.N.M.I. en het N.I.O.Z. worden nagegaan hoe het verloop van de nulpuntscorrectie met de tijd geweest is. De gegevens zijn te vinden in Tabel I. Nulpuntscorrecties zijn gegeven, afgerond op 0.005° C. In totaal gaat het hier om 46 Richter und Wiese thermometers (39 beschermd, 7 onbeschermd), waarvan de oudste dateren uit 1928; 56 Yoshino thermometers (40 beschermd en 16 onbeschermd), waarvan de oudste dateert uit 1964; 2 beschermde Negretti and Zambra thermometers uit 1952 en 2 onbeschermde A. Schmidt thermometers, waarvan de fabricagedatum onbekend is.

Het ligt niet in de bedoeling om tot in bijzonderheden het verloop van het nulpunt van de thermometers te bespreken. Het verloop van het nulpunt is inderdaad in het algemeen zoals geschetst in de vorige paragraaf. De volgende bijzonderheden kunnen worden genoteerd.

1. De Richter und Wiese thermometers van de Snellius expeditie blijken, na een aanvankelijke afname van positieve en toename van negatieve correcties gedurende een uitgestrekte periode vrijwel constant te blijven. Op te merken valt, dat de thermometers waarschijnlijk niet of zelden gebruikt zijn tussen ca. 1930 en 1950, wat van invloed kan zijn geweest op het verloop van het nulpunt. Na ca. 1965 lijkt een tegengestelde verandering in het verloop van de correctie op te treden.
2. De Richter und Wiese thermometers uit de jaren 1950-1954 lijken over het algemeen een iets sterker verlopende nulpuntscorrectie te hebben, terwijl de thermometers van nog latere datum weer een stabielere nulpunt vertonen, al is hier de periode waarover het verloop kan worden onderzocht nog te klein voor definitieve conclusies. Een tegengesteld verloop van de nulpuntscorrectie is ook hier gedurende de laatste jaren voor enkele thermometers te constateren.

3. De Yoshino thermometers tonen over het algemeen gedurende de eerste tijd een sterk verloop in de nulpuntscorrectie. Dit heeft tot gevolg dat ondanks een verder goed functioneren van de thermometer de nauwkeurigheid sterk beïnvloed gaat worden door de onzekerheid in de grootte van deze correctie op het moment van de meting.

Verder is op te merken dat een aantal thermometers in november 1964 door het Fisheries Laboratory te Lowestoft geijkt werden. Deze ijkingen geven echter systematisch hogere (positieve) correcties dan overeenkomt met de algemene tendens, en een systematische fout in deze ijkingen lijkt daarom aanwezig te zijn.

De omkering van het verloop van het nulpunt bij oudere thermometers is een verschijnsel waarover geen andere gegevens werden gevonden in de literatuur. Dit verschijnsel zou nader moeten worden onderzocht. Men kan voor een verklaring denken aan een verandering in het breekpunt van de kwikdraad.

Als algemene conclusie uit de resultaten van de ijkingen lijkt ten slotte te constateren dat, mits regelmatige nulpuntsijkingen plaatsvinden, de nulpuntscorrecties van de grootte orde zijn als in paragraaf 3 aangegeven.

6. Capillair- of schaalverdelingscorrecties, literatuurgegevens

Behalve de bepaling van een nulpuntscorrectie is de bepaling van een schaalverdelingscorrectie nodig. Wij verstaan hieronder de totale correctie die bij een bepaalde temperatuur moet worden toegepast, waarvan is afgetrokken de nulpuntscorrectie. Deze schaalverdelingscorrectie wordt bepaald door:

1. de variaties van de diameter van het capillair over de lengte van de thermometer;
2. onregelmatigheden in de gegraveerde schaal; dat deze soms belangrijke vormen kunnen aannemen is aangetoond door Folsom, Schwartzlose en Jennings (1962).

Het is in dit verband ook belangrijk in welke afstanden de schaalverdeling is geijkt. Tussen de ijkpunten wordt de correctie over het algemeen lineair geïnterpoleerd. De invloed van een correctie gebaseerd op ijkingen om de 2° C, in vergelijking met die voor ijkingen om de 1° C is voor een aantal thermometers van de "Meteor" nagegaan door Hamaker (1941). Op grond hiervan zou een waarschijnlijke interpolatiefout van 0.001° C kunnen worden geschat. De meeste thermometers zijn echter met grotere temperatuurintervallen geijkt. Door Whitney (1957) wordt als interpolatiefout opgegeven voor thermometers met een schaalverdeling in 0.05°, 0.1° en 0.2° respectievelijk $\pm 0.002^\circ$, $\pm 0.004^\circ$ en $\pm 0.008^\circ$

Normaal wordt de schaalverdelingscorrectie slechts eenmaal bepaald, en verder alleen verschoven, gelijk met de verlopende nulpuntscorrectie.

Böhnecke (1932) vond dit in overeenstemming met de resultaten van een vergelijking tussen de schaalverdelingscorrecties zoals bepaald bij twee gelegenheden voor de "Meteor" thermometers.

Herdman en Pemberton (1958) bespreken voor enkele thermometers de schaalverdelingscorrecties zoals die voor verschillende jaren zijn bepaald. Volgens hen bleek, op enkele uitzonderingen na, het algemene verloop van de correcties langs de schaal per thermometer niet belangrijk met de tijd te variëren. Richter und Wiese thermometers zouden wat dit betreft minder goed constant blijven dan de thermometers van Negretti and Zambra. Uit de door hen gegeven voorbeelden is als uiterste variatie van de schaalverdelingscorrectie met de tijd een waarde van 0.05° C af te lei-

den (thermometer R. und W. 1257). Daar deze waarde wel erg groot lijkt, is er aanleiding om te denken aan fouten bij een van de schaalverdelingsijkingen.

7. Schaalverdelingscorrecties van K.N.M.I. en N.I.O.Z. thermometers

Voor een aantal thermometers beschikken wij over meerdere ijkingen van de schaalverdeling. Dit zijn in de eerste plaats thermometers die na vervanging van de gebroken hulpthermometer zijn herijkt. Het lijkt niet waarschijnlijk dat deze reparaties de schaalverdelingscorrectie beïnvloed zullen hebben, zodat een onderlinge vergelijking van deze ijkingen geoorloofd is. Verder zijn van een aantal thermometers de schaalverdelingen geijkt door het Fisheries Laboratory in Lowestoft en door Navoceano, wat een vergelijking met de fabrieksijking en een onderlinge vergelijking mogelijk maakt.

De thermometers die na reparatie zijn herijkt, nl. de nummers (R. und W.) 1856, 1651, 1947, 3751, 4833, 4881, 4903 en 4904 geven de volgende frequentieverdeling te zien voor de verschillen tussen de tweede en de eerste schaalverdelingscorrectie.

Tabel II

verschil corr.	+0.03	+0.02	+0.01	.00	-.01	-.02	-.03	-.04	-.05
aantal ijkpunten	1	2	12	19	3	3	1	-	1
gemiddeld verschil	0.000								
	σ 0.014								

Verder blijkt er geen duidelijk systematisch verschil in het verloop van de beide schaalverdelingscorrecties over het temperatuurbereik (zie fig 1).

De volgende Richter und Wiese thermometers zijn, zonder tussentijdse reparatie, herijkt door Navoceano: 1945, 4902, 4903, 4904, 5697* en 7261* (de laatste twee onbeschermd thermometers).

Het verloop van de beide schaalverdelingscorrecties van deze thermometers is uitgezet in fig. 2. Het valt op, dat de Navoceano ijking over het algemeen wat hoger ligt dan de oorspronkelijke ijking.

Van één Richter und Wiese thermometer werd de schaalverdelingscorrectie opnieuw bepaald door T.N.O. Voor deze thermometer (8864) is de schaalverdelingscorrectie

bij 10°	volgens R und W = -0.01	volgens T.N.O. = +0.03
20°	0.00	+0.03

Van een groot aantal Yoshino thermometers werd de schaalverdelingscorrectie bepaald door Navoceano. Het blijkt, dat er een duidelijk systematisch verschil is tussen deze schaalverdelingscorrectie en die welke door de fabriek werden opgegeven. Het gemiddelde verschil tussen de beide ijkingen voor deze thermometers is gegeven in fig. 3. Het lijkt er op, dat hier sprake is van systematische ijkfouten bij tenminste een van beide ijkingen, daar een dergelijk systematisch verloop van de kromme van fig. 3 als gevolg van verloop is de schaalverdelingscorrecties voor een zo groot aantal thermometers met verschillend bereik niet waarschijnlijk is.

Door het Fisheries Laboratory in Lowestoft werd een aantal thermometers geijkt (zowel Yoshino als Richter und Wiese thermometers), die later ook door Navoceano zijn geijkt.

De verschillen tussen deze ijkingen, en ook die tussen de Lowestoft ijkingen en de voorgaande fabrieksijkingen zijn belangrijk groter dan de

hiervoor gevonden verschillen tussen de fabrieksijkingen die van Navoceano. Bovendien vertonen de verschillen een duidelijk systematisch verloop, zodat men zich niet aan de indruk kan onttrekken dat er sprake is van een systematische fout in de ijkingen van Lowestoft. Reeds eerder bij de bespreking van het verloop van de nulpuntsijkingen werd geconstateerd dat de resultaten van Lowestoft niet overeenstemmen met de andere ijkpunten.

Op grond van dit vermoeden werd getracht een correctie kromme te vinden, die de extra correctie, aan te brengen op de Lowestoft ijkingen, weergeeft. Hierbij is aangenomen dat de ware nulpuntscorrectie van Lowestoft lineair in de tijd geïnterpoleerd zou liggen tussen de fabrieksijking en de Navoceano ijking, en waarbij de Navoceano-schaalverdelingscorrectie als de juiste werd aangenomen. De correctie kromme is gegeven in fig. 4.

Bovenstaande beschouwingen leiden tot de conclusie, dat niet alle schaalverdelingscorrecties een nauwkeurigheid hebben als hiervoor (paragraaf 6) aangegeven, maar dat, ten gevolge van systematische fouten bij beschermde thermometers (bereik tot ca. 30°) de fout op kan lopen tot $\pm 0.02^{\circ}$ en voor onbeschermde thermometers tot $\pm 0.045^{\circ}$.

8. Correcties hulphermometers

Evenals bij de hoofdthermometers moet ook bij de hulphermometers een nulpuntscorrectie (die variabel met de tijd kan zijn) en een schaalverdelingscorrectie (die constant kan worden geacht) worden aangebracht.

Het verloop van de nulpuntscorrecties voor de beschermde en de onbeschermde K.N.M.I. thermometers en voor de N.I.O.Z. thermometers kan worden nagegaan aan de hand van de verschillende ijkingen (tegelijk met de nulpuntsijking voor de hoofdthermometers).

Het blijkt dat het nulpunt goed constant blijft voor de meeste thermometers. Voor de Yoshino thermometers blijkt echter een relatief vrij grote nulpuntsverschuiving op te treden. Een en ander blijkt uit de volgende frekwentieverdelingen, gegeven in fig. 5.

De gemiddelde verandering van de nulpuntscorrectie van de hulphermometer is voor de eerste groep thermometers (Richter und Wiese, Negretti and Zambra) -0.01° C, voor de tweede groep (Yoshino) -0.14° C.

De schaalverdelingscorrectie is, voor zover blijkt uit vergelijking tussen de gevallen met twee ijkingen van dezelfde thermometer nauwkeurig op 0.1° C. In Tabel III is het verschil tussen de fabrieksijking en de Navoceanoijking weergegeven.

Tabel III Schaalverdelingscorrectie hulphermometers.
Correctie fabrieksijking minus correctie Navoceano
Frekwentieverdeling

	+ 0.1°	0.0	- 0.1°	- 0.2°
bij 10°	2	24	12	-
20 $^{\circ}$	2	18	17	1
30 $^{\circ}$	2	26	8	2

Bij de berekening van de temperaturen in situ met behulp van de aflezingen van de hulphermometers is het van belang de fout in het resultaat als gevolg van fouten in de hulptemperatuur te schatten. De fout in de nulpuntscorrectie is, eventueel na interpolatie, in de tijd bij een sterk verloopende correctie te stellen op $\pm 0.03^{\circ}$

De fout in de schaalverdelingscorrectie kan geschat worden, aan de hand van Tabel III, op $\pm 0.07^{\circ}$ (standaarddeviatie frekwentieverdeling).

De afleesfout in de hulptemperatuur is te schatten op $\pm 0.05^{\circ}$. We hebben dus te rekenen met een waarschijnlijke totale fout in de hulptemperatuur

van

$$\sqrt{(0.03)^2 + (0.07)^2 + (0.05)^2} = \pm 0.09^\circ$$

9. Invloed van de hulptemperatuur bij de temperatuurberekening

We gaan hierbij uit van de formules, genoemd door Keyte (1965) als de beste, nl. voor beschermde thermometers.

$$\Delta T_p = \frac{(T_p^1 - t)(T_p^1 + V_o)}{K - \frac{1}{2}(T_p^1 - t) - (T_p^1 + V_o)}$$

en v oor onbeschermde thermometers

$$\Delta T_u = \frac{(T_w - t)(T_u^1 + V_o)}{K - \frac{1}{2}(T_w - t)}$$

Differentiatie naar t (hulptemperatuur) geeft

$$\frac{\partial \Delta T_p}{\partial t} = \frac{T_p^1 + V_o}{\{K - \frac{1}{2}(T_p^1 - t) - (T_p^1 + V_o)\}^2} (-K + 2T_p^1 - t + V_o)$$

$$\frac{\partial \Delta T_u}{\partial t} = \frac{T_u^1 + V_o}{\{K - \frac{1}{2}(T_w - t)\}^2} K$$

Nu is $K = 6100^\circ$, T_p^1 en T_w variëren meestal tussen 0° en 20° , T_u tussen 0° en 60° , V_o tussen 60° en 130° voor beschermde en tussen 110° en 240° voor onbeschermde thermometers, en t tussen 0° en 30° .
Voor een normaal geval zal

$$\frac{\partial \Delta T_p}{\partial t} \approx -0,022 \text{ tot } -0,010 \quad \frac{\partial \Delta T_u}{\partial t} \approx 0,05 \text{ tot } 0,04$$

Dus een onnauwkeurigheid in de hulptemperatuur van $\pm 0.09^\circ$ geeft een fout in de berekende temperatuur voor:

beschermde thermometers : $\pm 0.002^\circ$ tot 0.001°

onbeschermde thermometers : $\pm 0.004^{50}$ tot 0.003^{50}

10. Bepaling van het thermometrische volume V_o

Het volume V_o wordt door de fabrikanten opgegeven in hele graden Celsius nauwkeurig. Dit is, voor de meeste gevallen voldoende, maar wanneer onder extreme omstandigheden een nauwkeurigheid van 0.005° C in de temperatuur wordt nagestreefd, moet een grotere nauwkeurigheid worden geëist.

Het is bovendien nuttig om de fabrieksijkingen te controleren, daar in de praktijk gevallen zijn voorgekomen waarbij deze ijking belangrijk bleek af te wijken van later gevonden waarden. Een bepaling van V_o is daarenboven vrij eenvoudig uit te voeren gelijk met de nulpuntsijkingen. De methode hiertoe is aangegeven door Hamaker (1941) en Whitney (1960).

Uit de literatuur zijn de volgende gevallen bekend van grote verschillen tussen de uitkomsten van diverse bepalingen van V_o .

Hamaker (1941) vond door 6 thermometers van de in totaal 72 thermometers van de Snellius expeditie (1929-1930) verschillen in V_o bepalingen groter dan 7° . Voor de overige thermometers was de standaardafwijking van

de verschillen in V_0 voor thermometers met een schaalverdeling in $1/20^\circ \text{C}$ 0.9°C , en voor die met een verdeling in $1/10^\circ \text{C}$ 1.8°C .

Door Martin c.s. (1968) werden verschillen gevonden in de waarden van V_0 die door verschillende instanties waren bepaald, waarbij de gemiddelde systematische afwijking (als enkele uitbijters werden verwaarloosd) 2°C bedroeg.

Voor een aantal van de op het K.N.M.I. onderzochte thermometers is meer dan één maal de waarde van V_0 bepaald. Dit is o.a. gedaan voor een stel thermometers door Navoceano, terwijl ook nog van enkele oudere thermometers van de Snellius expeditie (1929-1930) de gegevens van Hamaker bekend zijn. Daarnaast is tijdens ijkingen op het K.N.M.I. V_0 opnieuw bepaald voor een aantal thermometers. De gegevens zijn samengevat in Tabel IV.

Hieruit blijkt dat over het algemeen de waarden van V_0 voor de verschillende ijkingen goed overeenkomen. Er zijn echter een aantal gevallen met grotere verschillen in V_0 . Hierbij kan sprake zijn van ijkfouten, speciaal daar, waar V_0 slechts bepaald is aan de hand van één of twee ijkingen. In enkele gevallen lijkt dit niet zonder meer duidelijk. Het is de vraag, of wij zouden kunnen aannemen dat V_0 aan veranderingen onderhevig kan zijn. Een plotseling groter worden van V_0 , bijv. door het opengaan van een blaasje in het glas, zou ook merkbaar moeten zijn aan een plotselinge zeer sterke verandering van de nulpuntsijking, van dezelfde orde als de verandering in V_0 . Daar dit niet wordt geconstateerd, lijkt een dergelijke verklaring niet aanvaardbaar. Men kan zich verder afvragen of een verandering van de uitzettingscoëfficiënt van het glas kan optreden, die een verandering in V_0 te weeg zou kunnen brengen, daar immers V_0 geldt voor een genormaliseerde relatieve uitzettingscoëfficiënt $\frac{1}{6100}$.

Voordat een aantal langere reeksen van bepalingen van V_0 beschikbaar is, is het niet goed mogelijk hier nog verder op in te gaan.

Afgezien van deze bijzondere gevallen, zal de nauwkeurigheid waarmee V_0 bekend is, voor de meeste gevallen gesteld moeten worden op $\pm 2^\circ$.

11. Invloed van de fout in V_0 op de berekende temperatuur

Uitgaande van de formules voor de correctie voor beschermde en onbeschermde thermometers, vinden we door differentiatie naar V_0 .

$$\frac{\partial \Delta T_p}{\partial V_0} = \frac{T_p^1 - t}{\{K - \frac{1}{2}(T_p^1 - t) - (T_p^1 + V_0)\}^2} (K - \frac{1}{2}T_p^1 + \frac{1}{2}t) \quad \text{voor de beschermde}$$

en

$$\frac{\partial \Delta T_u}{\partial V_0} = \frac{T_w - t}{K - \frac{1}{2}(T_w - t)} \quad \text{voor de onbeschermde thermometers}$$

Voor een normaal geval zal

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Delta T_p}{\partial V_0} &\approx 0.005 \text{ tot } 0.000 \\ \frac{\partial \Delta T_u}{\partial V_0} &\approx 0.005 \text{ tot } 0.000 \end{aligned} \right\} \text{afhankelijk van de grootte van het verschil tussen de temperatuur in situ en de aflezingstemperatuur.}$$

Dus een onnauwkeurigheid in V_0 van 2° geeft een fout in de berekende temperatuur voor beschermde en onbeschermde thermometers van $\pm 0.010^\circ$ tot 0.000° .

12. Onnauwkeurigheid in de berekende temperatuurcorrectie

Meestal wordt voor de berekening van de temperatuur in situ gebruik gemaakt van tabellen, zoals die gegeven door LaFond (1951). Deze tabellen zijn afgerond tot op 0.01° , dus in vergelijking met een berekende temperatuurcorrectie wordt een resultaat verkregen dat maximaal $\pm 0.005^\circ$ verschilt. Bij berekening van de correctie met behulp van een correctieformule (Keyte, 1965) kan deze fout in principe tot nul worden gereduceerd.

13. Totale fout in de berekende temperatuur

In het volgende schema wordt getracht de totale waarschijnlijke fout in de temperatuur te schatten, zowel in optimistische als in pessimistische zin.

Tabel V

	Beschermd therm.				Onbeschermde therm.			
	schaal in $1/20^\circ$		schaal in $1/10^\circ$		schaal in $1/10^\circ$		schaal in $1/5^\circ$	
	opt.	pess.	opt.	pess.	opt.	pess.	opt.	pess.
afleesfout (§2, B2)	0.003	0.005	0.010	0.010	0.010	0.010	0.020	0.020
niet aangepaste temp. (§2, B1)	-	0.005	-	0.005	-	0.005	-	0.005
correctiefout (§3; §7)	0.003 ⁵	0.020	0.005	0.020	0.008 ⁵	0.045	0.015	0.045
interpolatiefout (§6)	0.002	0.002	0.004	0.004	0.004	0.004	0.008	0.008
verloop nulpunt (§5)	-	0.002	-	0.002	-	0.002	-	0.002
fout in hulp-temp. (§9)	0.001	0.002	0.001	0.002	0.003 ⁵	0.004 ⁵	0.003 ⁵	0.004 ⁵
fout in V_0 (§11)	-	0.005	-	0.005	-	0.005	-	0.005
berekeningsfout (§12)	-	0.005	-	0.005	-	0.005	-	0.005
totale fout	0.005	0.022	0.012	0.025	0.014	0.047	0.026	0.050

Uit dit overzicht blijkt, dat een nauwkeurigheid van $\pm 0.005^\circ$ alleen in bijzondere omstandigheden haalbaar is. Normaal zal de nauwkeurigheid ergens tussen de optimistische en pessimistische verwachtingen in liggen: voor beschermde thermometers met schaal in $1/20^\circ$ C ongeveer bij $\pm 0.01^\circ$, voor die met schaal in $1/10^\circ$ C bij $\pm 0.015^\circ$, voor onbeschermde thermometers met schaal $1/10^\circ$ C bij $\pm 0.03^\circ$, voor die met schaal $1/5^\circ$ C bij $\pm 0.04^\circ$.

Verder geeft dit schema een inzicht in de relatieve invloed van de verschillende foutenbronnen. Het is duidelijk dat speciaal door de invloed van fouten in de schaalverdelingscorrecties de fouten hoog kunnen oplopen.

Enkele schattingen uit de praktijk voor de nauwkeurigheid van beschermde thermometers zijn:

Böhnecke (1932)	:	schaal in 1/20° C	+ 0.008;	in 1/10	+ 0.017
Hamaker (1941)	:	idem	+ 0.009;	idem	+ 0.011
Teramoto (1958)	:	(zonder gegevens over schaal:	+ 0.010		
Wooster en Taft (1958)	:	" " " "	: + 0.020 tot		
			+ 0.016		

Bij gebruik van twee thermometers heeft de gemiddelde temperatuur een waarschijnlijke fout die $1/\sqrt{2} = 0.7$ maal zo groot is.

Als conclusie kan dus gesteld worden dat in het algemeen als gemiddelde van de resultaten van een oceanografische expeditie $\pm 0.01^\circ$ als maximum nauwkeurigheid voor de temperatuur aan te houden is.

In bijzondere gevallen, waarbij aan de thermometers en de gevolgde procedures de hoogste eisen gesteld moeten worden, is een nauwkeurigheid van $\pm 0.005^\circ$ C haalbaar (zie Metcalf, Heezen en Stalcup, 1964), en zelfs te overtreffen (Barrett, 1967).

14. Dieptebepaling met onbeschermd thermometers

De diepte van een seriewaarneming wordt bepaald met behulp van het verschil tussen de temperaturen van beschermde en onbeschermd thermometers. De formule die hiervoor wordt gebruikt is te vinden bij La Fond (1951)

$$D = 10 \frac{T_u - T_w}{\rho_m Q}$$

Hier is ρ_m (in g/cm^3) de gemiddelde dichtheid van het zeewater boven de diepte D (in m) en Q de drukcoëfficiënt van de thermometers (in graden Celsius per kg/cm^2).

Hamaker (1941) heeft gewezen op de invloed van de variatie van de zwaartekrachtscoëfficiënt g met de geografische breedte en met de diepte. De correctie die volgens hem bij de bovenstaande formule berekende diepte moet worden opgeteld is gegeven in de correctieformule.

$$C(Q, D) = 2.64 \cdot 10^{-3} D \cos 2\varphi - 1.13 \cdot 10^{-7} D^2$$

waarin φ de geografische breedte is.

Wij zullen moeten nagaan was de fouten in D kunnen zijn ten gevolge van de fout in $T_u - T_w$, in Q en in ρ_m .

15. Fout in de diepte ten gevolge van een fout in $T_u - T_w$

Differentiatie van de formule voor D naar $T_u - T_w = \Delta T$ geeft:

$$\frac{\partial D}{\partial \Delta T} = \frac{10}{\rho_m Q}$$

Nu is ρ_m ongeveer 1.03, en Q varieert normaal tussen 0.12 en 0.08 $\frac{^\circ\text{C}}{\text{kg/cm}^2}$, dus:

$$\frac{\partial D}{\partial \Delta T} \approx 80 \text{ tot } 120.$$

Op grond van de gegevens over de nauwkeurigheid van de temperatuurbe-
palingen is af te leiden wat de fout δD in de diepte zal zijn.

Voor D groter dan 2000 m is over het algemeen de temperatuur in situ dicht bij 0° , zodat de belangrijke fout in de schaalverdelingscorrectie ook in het ongunstigste geval niet in rekening hoeft te worden gebracht voor de fout in T_w . We krijgen dus

	δT_w	δT_u	$\delta \Delta T$
D < 2000 m	0.005 tot 0.025	0.014 tot 0.050	0.019 tot 0.075
D > 2000 m	0.005 tot 0.015	0.014 tot 0.050	0.019 tot 0.065

Dit geeft dus

D < 2000 m	1.5 m < δD < 9 m
D > 2000 m	1.5 m < δD < 8 m

16. Variaties van de drukcoëfficiënt Q van onbeschermden thermometers

Verschillende onderzoekers hebben zich bezig gehouden met de vraag in hoeverre de drukcoëfficiënt Q van de onbeschermden thermometers constant is onder diverse omstandigheden. De nauwkeurigheid waarmee Q bepaald kan worden ligt volgens de verschillende auteurs tussen 5×10^{-4} en $1 \times 10^{-4} \frac{C}{kg/cm^2}$.

a. Variatie van Q met de druk. Wüst (1932) deelt mede, dat voor de thermometers van de "Meteor" de drukcoëfficiënt binnen de nauwkeurigheidsgrenzen constant bleek te zijn over het bereik van 2000 tot 6000 m. diepte. Ook Herdman en Pemberton (1958) stellen, dat volstaan kan worden met één waarde van Q over het hele diepte bereik van de thermometer. De gegevens van Martin c.s. (1968) wijzen evenmin op een significante verandering van Q met de diepte.

Anderzijds vond Geissler (1942) dat voor geringe drukken (diepten tot 300 m) de waarde van Q belangrijk met de diepte afnam. Dit effect werd echter geconstateerd aan speciale thermometers met een buitengewoon hoge waarde van Q (ongeveer drie maal de normale waarde), geconstrueerd voor meting op geringe diepte. Daarom kan deze ervaring niet als maatgevend worden beschouwd. Wel is van belang te vermelden dat Whitney (1957) ook een variatie van Q met de druk vond, bij gebruik van thermometers op diepten boven 1000 m.

b. Variatie van Q met de temperatuur. Schumacher (1923) vond bij verschillende waarden van de temperatuur in situ variaties in Q. Dit effect werd echter later door Wüst (1932) niet gevonden.

c. Verandering van Q met de tijd. Het effect van de verandering van Q met de tijd is onderzocht door Wüst (1932), die constateerde dat er een afname van de waarde van Q met de tijd plaats vond, die gemiddeld $0.0004 \frac{OC}{kg/cm^2}$ bedroeg. Wüst acht het waarschijnlijk dat deze afname plaats vond tijdens de periode waarin de thermometers voor het eerst worden gebruikt, en dat hierna geen veranderingen meer optraden. Eerder reeds was een afname van Q met de tijd geconstateerd door Schumacher (1923) die tot $0.0005 \frac{OC}{kg/cm^2}$ verandering in 9 jaar vond.

De gegevens over de waarden van Q, gepubliceerd door Herdman en Pemberton (1958) tonen geen systematische afname van Q met de tijd. Het gemiddelde (absolute) verschil tussen de eerste en laatste bepaling van Q is hier $0.0002 \frac{OC}{kg/cm^2}$.

17. Gegevens over de waarde van Q bij K.N.M.I. en N.I.O.Z. thermometers

De in de vorige paragraaf genoemde mogelijkheden van een variatie van de waarde van Q met de druk en met de tijd zullen hier worden onderzocht aan de beschikbare gegevens van K.N.M.I. en N.I.O.Z. thermometers. Voor een onderzoek naar de variatie van Q met de temperatuur ontbreken de gegevens.

In alle gevallen op één na werd door de fabrikant één waarde van Q,

geldig voor het hele diepte project gegeven. Later zijn door Navoceano voor een aantal thermometers Q waarden bepaald voor verschillende diepte bereiken.

Later zijn door het K.N.M.I. verschillende vergelijkende metingen uitgevoerd om de Q waarden te bepalen. Hierbij werd gebruikt de door Navoceano bepaalde Q waarde, van de referentiethermometer, of een andere, geschikt geachte thermometercontrole met behulp van draadhoek (alleen kleine waarden) werd uitgevoerd. De resultaten van deze bepalingen zijn gegeven in Tabel IV.

Wat betreft het verloop van Q met de diepte kan gesteld worden dat vrijwel alle door Navoceano bepaalde Q waarden eenzelfde variatie vertonen (zie fig. 6). Alleen voor de thermometer nr. 5994 (Yoshino) wordt een ander verloop gegeven. Het nogal grillige verloop van Q met de diepte doet echter de vraag rijzen, of niet gedeeltelijk in dit verloop een, voor elke diepte verschillende, systematische ijkfout is begrepen. De vergelijkende metingen van augustus 1967 wijzen op een vrijwel constante waarde van Q over het hele diepte bereik. In elk geval is uit de eigen en de literatuur gegevens niet tot een bepaalde uniforme tendens voor het verloop van Q met de diepte te besluiten.

Wat betreft het verloop van Q met de tijd, lijken de gegevens van Tabel VI in zo verre te wijzen op een afname van Q met de tijd dat, afgezien van enkele uitzonderingen waarbij een fout in de bepaling mogelijk een rol speelt, de latere Q waarden lager zijn dan de waarden die door de fabriek zijn opgegeven. Nu kan dit liggen aan het feit dat de Q waarden die door Navoceano zijn gevonden te laag liggen, en dus de andere daarop betrokken relatieve bepalingen ook lagere waarden geven. Maar de gebruikelijke controle op de thermometrische diepte met behulp van dedraadhoek en de lengte van de uitgevierde lijn wijst er op, dat de gebruikte referentiewaarden inderdaad betrouwbaar zijn.

Een controle op het verloop van de waarde van Q lijkt dus gewenst. Wanneer hieraan en aan de mogelijke variatie met de diepte de nodige aandacht wordt besteed, lijkt het mogelijk dat de waarde van Q bekend is met een nauwkeurigheid tussen 10^{-4} en $5 \cdot 10^{-4} \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{kg/cm}^2}$ (zie §16). Wordt echter geen rekening met het verloop met de diepte en de tijd gehouden, dan kan de gebruikte waarde van Q tot $10^{-3} \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{kg/cm}^2}$ van de werkelijke waarde afwijken.

18. Invloed van de nauwkeurigheid van Q op de dieptebepaling

Differentiatie van de formule voor D naar Q geeft:

$$\frac{\partial D}{\partial Q} = -10 \frac{T_u - T_w}{\rho_m Q^2} = - \frac{D}{Q}$$

Voor Q tussen 0.12 en $0.08 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{kg/cm}^2}$ is dus voor het verband tussen de fouten in Q en D, respec. δQ en δD , te schrijven:

$$\frac{\delta D}{D} = \frac{\delta Q}{0.12} \text{ tot } \frac{\delta Q}{0.08}$$

Dus is met de gunstigste en ongunstigste schattingen van δQ , $0.8 \cdot 10^{-3} < \frac{\delta D}{D} < 1,25 \times 10^{-2}$.

19. Invloed van de dichtheid op de diepte bepaling

In principe is, hetzij uit de eigen waarnemingen, hetzij uit reeds eerder verzamelde gegevens over de dichtheid van het water op diverse diepten, eventueel via een iteratieve methode de nauwkeurigheid in de bepaling van ρ_m voldoende nauwkeurig uit te voeren.

Ter vereenvoudiging van de berekeningen wordt echter voor grote oceaangebieden veelal gebruik gemaakt van een enkele tabel van ρ_m tegen de diepte, ongeacht de plaats.

Om een schatting te krijgen van de fout die optreedt als we slechts één tabel voor ρ_m tegen de diepte aanhouden, kunnen we nagaan wat het maximale verschil in ρ_m is voor de diverse oceanen. Dit kan worden afgeleid van tabel 17 in het "Instruction Manual for Oceanographic Observations (1955).

De resultaten zijn gegeven in Tabel VII. In de laatste kolom is de fout te vinden die in de berekende diepte ontstaat door gebruik van een onjuiste tabel van ρ_m tegen de diepte. Deze fout is af te leiden uit de betrekking

$$\delta D = \frac{D}{\rho_m} \delta \rho_m,$$

waarbij ρ_m in de noemer ongeveer 1.03 g/cm^3 gesteld kan worden.

Tabel VII

	grootste verschil in ρ_m	fout in D	procentuele fout
500 m	$2 \cdot 10^{-4}$		
1000 m	$23 \cdot 10^{-4}$	0.1 m	0.02 %
2000 m	$17 \cdot 10^{-4}$	2.2 m	0.22 %
3000 m	$14 \cdot 10^{-4}$	3.3 m	0.16 %
4000 m	$6 \cdot 10^{-4}$	4.1 m	0.14 %
5000 m	$5 \cdot 10^{-4}$	2.3 m	0.06 %
		2.4 m	0.05 %

20. Schatting totale fout in de diepte bepaling

In het volgende schema zijn de verschillende foutenbronnen die in de diepte bepaling kunnen optreden bijeengebracht.

Tabel VIII

	500 - 1000 m		1000 - 2000 m		2000 - 6000 m	
	opt.	pess.	opt.	pess.	opt.	pess.
fout uit temp. verschil (§15)	0.12 %	1.36 %	0.06 %	0.68 %	0.02 %	0.32 %
fout uit Q (§18)	0.08	1.25	0.08	1.25	0.08	1.25
fout uit ρ_m (§19)	-	0.02	-	0.22	-	0.16
fout uit g (§14)	-	0.27	-	0.29	-	0.33
totale waarschijnlijkste fout	0.14 %	2. %	0.10 %	1.5 %	0.08 %	1.3 %

De volgende gegevens zijn in de literatuur te vinden of hieruit af te leiden over de totale nauwkeurigheid in de diepte bepaling zoals die in de praktijk wordt geconstateerd

Wüst (1933)	500-1000 m: 1.8-1.4 %; 1000-2000 m: 1.4-1.1 %, 2000 m: 1.1-0.4 %
Hamaker (1941)	2000 m: 0.25 % 1000-2000 m: 0.4 %, 2000 m: 0.25 %
Teramoto Brunean, Jerlov, Koczy (1953)	500-1000 m: 0.75-0.37 % gemiddeld 5 m

- Anon. (1955) Instruction manual for oceanographic observations (2nd ed.). U.S. Hydrogr. Office, Publ. 607
- J.R. Barrett (1967) On the precision of the -2° to 6° . Richter und Wiese reversing thermometers. Deep Sea Res., 14(2): 277
- G. Böhnecke (1932) Die Temperaturmessung an der Oberfläche und in der Tiefe. Wiss. Ergebnisse der Deutschen Atl. Expext. "Meteor" 1925-1927 Band IV, Teil 1, Abschn. D.
- L. Brunea , N.G. Jerlov, F.F. Koczy (1953) Physical and Chemical methods. Reports Swedish Deep Sea exp. 3(4)
- Bureau d'Etudes Océanographiques de Toulon, 1962. Au sujet des conditions de lecture des thermomètres à renversement. Cah. Océanogr. 14(3), p. 171-175
- L.H.N. Cooper (1961) Vertical and horizontal movements in the ocean derived from work during the IGY. Cons. Perm. Int. pour l'Explor. de la Mer, Rapp. et Procès Verb. 149 (Contrib. to Special IGY meeting 1959).
- T.R. Folsom, F.D. Jennings, R.A. Schwartzlose (1959) Effect of pressure upon the "protected" oceanographic reversing thermometer. Deep Sea Res. 5(4), p. 306-309
- T.R. Folsom, R.A. Schwartzlose, F.D. Jennings (1962) Scale errors on oceanographic mercurial thermometers. Deep Sea Res. 9 p. 219-226
- E. Francke (1965) Einige Erfahrungen mit den Tiefseekippthermometern des VEB Thermometerwerke Geraberg/Thür. Beiträge zur Meereskunde, Hft 16 p. 15-19
- H. Geissler (1942) Zur thermometrischen Tiefenmessung. Ann. der Hydrogr. U.S.W., 70(8), p. 244.
- H.C. Hamaker (1941) The oceanographic instruments and the accuracy of the temperature observations. Scientific Results of the Snellius Expedition 1929-1930. Vol II, Part 1, Chapter I
- H.F.P. Herdman, L.H. Pemberton (1958) The reliability of deep-sea reversing thermometers. Discovery Reports 29
- F.K. Keyte (1965) On the formulas for correcting reversing thermometers. Deep Sea Res. 12(2), p. 163-172
- E.C. La Fond (1951) Processing oceanographic data. U.S. Navy Hydrogr. Office, Pub. No. 614
- L. Martin, W.R. Bryan, C. Curtis en G. Whitney (1968) Standardizing calibration of deep sea thermometers. Under Sea Technology 9(4): 33-39
- W.G. Metcalf, B.C. Heezen, M.C. Stalcup (1964) The sill depth of the Mid-Atlantic ridge in the equatorial region. Deep Sea Res. 11(1) p. 1-10
- S.G. Nordstrom, T.R. Folsom (1960) Suggestion for eliminating pressure effects on protected reversing thermometers. Deep Sea Res. 6(2) p. 169
- A. Schumacher (1923) Neue Hilfstafeln für die Umkippthermometer nach Richter und Beiträge zur thermometrischen Tiefenmessung. Ann. der Hydro. U.S.W. 51(12) p 273-280

- H.U. Sverdrup (1929) The waters on the North Siberian Shelf. The Norway. North Polar Exped. "Maud" 1918-1925. Scient. Results 4 No. 2
- T. Teramoto (1958) Depth determination in oceanographic observations. Rec. of Oceanogr. Works in Japan 4(2) p. 170-185
- G.C. Whitney (1957) Factors affecting the accuracy of thermometric depth determinations. Journ. du Conseil 22(2) p. 167-173
- G.C. Whitney (1960) Procedure for and comments on ice point tests of deep see reversing thermometers. Limnol. and Oceanogr. 5(2) p. 232-235.
- Warren S. Wooster and A. Taft (1958) On the reliability of field measurements of temperature and salinity in the ocean. J. of Marine Research 17 p. 552-566
- G. Wüst (1932) Thermometrische Tiefenmessung. Wiss. Ergebnisse der Deutschen Atlant. Exped. "Meteor" 1925-1927. Band IV, Teil 1, Abschn B.
- G. Wüst (1933) Thermometric measurement of depth. Intern. Hydrogr. Review 10(2), p. 28-49

Tabel I B

* betekent: thermometer sederu lalauhue ljjaluh Sezi efua lallu

nr.	Merk													nr.
	febr. 1955	febr. 1959	jan. 1960	april 1960	febr. 1965	dec. 1965	mrt. 1966	jan. 1967	febr. 1968	mei 1968	dec. 1968			
1856				+0.02*		+0.02			+0.005				1856	
1861		-0.04		+0.01*		-0.05		-0.04	-0.025				1861	
1651						+0.005			+0.01				1651	
1874		0.00						0.005					1874	
1881													1881	
1882		0.00				-0.01		-0.045			-0.025		1882	
1906		-0.05				-0.055							1906	
1920		-0.02	-0.025										1920	
1637													1637	
1943	-0.06		-0.06										1943	
1945		-0.045	-0.05			-0.05							1945	
1946		-0.025				0.00			0.00		0.00		1946	
1947		-0.04	-0.04			-0.04					-0.035		1947	
3215		0.00				0.00					0.00		3215	
	jan. 1960	april 1960	febr. 1963	okt. 1964	febr. 1965	dec. 1965	mrt. 1966	jan. 1967	febr. 1968	mei 1968	dec. 1968			
3751		-0.01*											3751	
4784	-0.07					-0.075		-0.07	-0.06				4784	
4785													4785	
4833						-0.05		-0.04	-0.025				4833	
4881						-0.075		-0.07	-0.06				4881	
4902					-0.015	-0.01		-0.015	0.00				4902	
4903	0.00				-0.01	+0.01			+0.01				4903	
4904	-0.02				+0.03	+0.015							4904	
4905	-0.02					-0.015			0.00				4905	
4907						-0.02			0.005				4907	
5192	-0.01						0.00	-0.005	+0.01				5192	
5251	-0.06						-0.05	-0.055	-0.05				5251	
5255	-0.07					-0.065		-0.065	-0.06				5255	
5705							+0.015	+0.015	+0.015				5705	
5706							0.00	-0.005	-0.005				5706	
5707	-0.06												5707	
5708								-0.07	-0.06				5708	
6051	-0.01							0.00	+0.01				6051	
6435								-0.005	0.00				6435	
7285	+0.01						+0.01	+0.005	+0.01				7285	
7286	+0.01						+0.015	+0.01	+0.02				7286	
8861			0.00					0.00	+0.005				8861	
8863			+0.01										8863	
8864			0.00	-0.01					-0.01				8864	
11540										+0.01			11540	

Tabel I^C

Merk	nr.	1928	mei 1954	jan. 1956	febr. 1957	sept. 1958	febr. 1959	aug. 1959	jan. 1960	febr. 1965	dec. 1965	jan. 1967	febr. 1968	dec. 1968	nr.
R + W	1897	0.00				-0.01	-0.015		-0.03		-0.04	-0.025	-0.025		1897
(onbesch. therm.)	5697	0.00					-0.01		-0.02	-0.04	-0.06	-0.02	-0.005	-0.005	5697
	5699			0.00			0.00		-0.02		-0.05	-0.02	-0.045	-0.015	5699
	6091				0.00		0.00		-0.01		-0.03				6091
	6353						0.00	0.00	0.00	-0.04	-0.03	0.00	-0.015	-0.01	6353
	7261						0.00	0.00	0.00						7261
	7263								0.00			0.00			7263

Tabel I^D

Merk	nr.	mei 1964	juli 1964	sept. 1964	okt. 1964	febr. 1965	okt. 1965	dec. 1965	febr. 1966	mrt. 1966	mei 1966	jan. 1967	mei 1967	sept. 1967	febr. 1968	dec. 1968	nr.
Yoshino (besch. therm.)	4604		0.00			-0.03 ⁵				-0.04 ⁵							4604
	4610		-0.03			-0.05				-0.05 ⁵							4610
	4612		-0.01			-0.03				-0.03 ⁵							4612
	4677		-0.02			-0.04 ⁵				-0.04							4677
	5279		+0.01			0.00				-0.02							5279
	5444		-0.02			-0.05				-0.07							5444
	5841	0.00						-0.05			-0.06			-0.07 ⁵			5841
	5843	0.00						-0.08			-0.08 ⁵			-0.09 ⁵			5843
	5844	-0.02						-0.10			-0.11 ⁵			-0.12 ⁵	-0.12		5844
	5845	0.00						-0.09			-0.10			-0.10	-0.10		5845
	5848	0.00						-0.04			-0.06						5848
	5849	+0.01						-0.04			-0.05			-0.06 ⁵	-0.06 ⁵		5849
	5850	-0.01				-0.06 ⁵			-0.10		-0.09 ⁵			-0.10 ⁵	-0.10		5850
	5851	+0.01				-0.03 ⁵			-0.06 ⁵		-0.05 ⁵			-0.07	-0.06		5851
	5852	0.00				-0.05			-0.08 ⁵		-0.07 ⁵			-0.09	-0.08		5852
	5853	+0.03				0.00 ⁵			-0.03 ⁵		-0.02 ⁵			-0.03 ⁵	-0.03 ⁵		5853
	5854	0.00				-0.04 ⁵			-0.07 ⁵		-0.06 ⁵			-0.07 ⁵	-0.07 ⁵		5854
	5856	+0.04				+0.01			+0.01		+0.02			+0.01 ⁵	+0.01		5856
	5895		+0.02			-0.01 ⁵				-0.04 ⁵							5895
	5897		+0.03			-0.01			-0.03		-0.03						5897
	5898		+0.03			-0.01 ⁵			-0.02 ⁵		-0.02 ⁵						5898
	5985		0.00			-0.05 ⁵			-0.05 ⁵		-0.05 ⁵						5985
	5986		+0.02			-0.03 ⁵			-0.05 ⁵		-0.05 ⁵						5986
	5988		+0.01			-0.05			-0.07		-0.07						5988
	5989		+0.01			-0.06			-0.07		-0.07						5989
	5990		0.00			-0.06 ⁵											5990
	5991		0.00			-0.05 ⁵											5991
	5992		0.00			-0.05											5992
	6233								-0.04	-0.05		-0.02		-0.02 ⁵	-0.02 ⁵		6233
	6356								-0.09		-0.09			-0.10	-0.11		6356
	7650								+0.01		+0.00 ⁵			-0.02 ⁵	-0.02 ⁵		7650
	7652										-0.02						7652
	7772																7772
	8407										+0.01			-0.00 ⁵	-0.01		8407
	8409										+0.02			-0.06 ⁵	-0.07 ⁵		8409
	8615										0.00			-0.03 ⁵	-0.03 ⁵		8615
	9919													-0.00 ⁵	0.00		9919
	9920										+0.01			-0.00 ⁵	0.00		9920
	10504													-0.02	+0.01		10504
	10505													-0.01	+0.04		10505

Tabel I^E

Merk	nr.	mei 1964	juli 1964	okt. 1964	febr. 1965	sept. 1965	dec. 1965	febr. 1966	mrt. 1966	jan. 1967	juli 1967	febr. 1968	dec. 1968
Yoshino (onbesch. therm.)	5526	-0.04					-0.17		-0.14	-0.13		-0.15	-0.15 ⁵
	5917	0.00	0.00		-0.05				-0.06 ⁵				
	5918	0.00	0.00		-0.05				-0.05 ⁵				
	5919	0.00	0.00		-0.05				-0.07 ⁵				
	5994	-0.02	-0.02		-0.06 ⁵				-0.06				
	5995	0.00	0.00		-0.04 ⁵				-0.05 ⁵				
	5996	0.00	0.00		-0.06				-0.08				
	6037	0.00	0.00		-0.04				-0.05				
	6038	-0.02	-0.02		-0.10				-0.08				
	6039	0.00	0.00		-0.06				-0.05				
	6246			0.00									
	7336					0.00			-0.04	-0.04		-0.04 ⁵	-0.05
	7338					+0.02	0.00		-0.09	-0.09		-0.01	-0.01
	7963												
	10120										0.00	-0.03	-0.03
	10118										-0.01	-0.02	-0.01 ⁵
N + Z (besch. therm.)	3688	0.00	jan. 1953	febr. 1959	jan. 1960	dec. 1965	jan. 1967	nr.					
	3689	-0.03	-0.05	-0.04 ⁵	-0.04 ⁵	-0.11 ⁵	-0.11	3688					
				-0.08	-0.09			3689					
Schmidt fabrieke- ijking on- bekend (besch. therm.)	1086	jan. 1953	febr. 1959	dec. 1965	jan. 1967	febr. 1968	dec. 1968						
	1096	+0.05	0.00	0.00	+0.02	+0.01	-0.02 ⁵	1086					
					+0.02	+0.01		1096					

Tabel IV Waarden van Vo voor verschillende ijkingen
 Waarden tussen (): slechts 1 bepaling

	Fabr.	Snell. '29-'30	Navoc. febr.'65	K.N.M.I. '65/'66	K.N.M.I. '67	K.N.M.I. '68
1856	84					(82.7)
1861	108	106.4		105.4	(107.4)	
1651	102	102.9		(102.3)		
1874						
1881						
1882	109 ¹⁾	99.9				(94.5)
1906	108	107.9		109.0	107.3	109.2
1920	104	103.8				(102.4)
1637						
1943						
1945	128		124.3	(129.5)		
1946	134					(114.0)
1947	131 ¹⁾	124.0		121.2		
3215	92			94.3		(94.9)
3751						
4784	100			100.6	(114.8)	
4785						
4833	108			106.4	(112.5)	(106.2)
4881	80			(79.0)	(79.8)	
4902	115		109.3	109.1		(103.9)
4903	109		110.9	107.1		(108.3)
4904	110		111.2	109.6		
4905	103			102.4		100.0
4907	105			104.0		(104.5)
5192	104				104.4	104.9
5251	112				(112.4)	(112.2)
5255	106			(106.8)	(107.1)	(105.4)
3688						
3689	61			62.4	(74.8)	(58.1)
1086	103			(106.3)	(104.1)	(107.6)
1096						
5705	109				(118.7)	(116.0)
5706	109				110.5	(108.7)
5707						
5708	101				(102.0)	(100.6)
6051	116				(115.2)	(117.5)
6435	104			(105.1)	(100.7)	(102.8)
7285	100				(100.0)	
7286	96				(95.5)	(95.9)
8861	96				(96.8)	(94.4)
8863	87			(86.2)		
8864	96			(95.0)		96.6
5841	96			104.9	98.0	(98.7)
5843	92			(89.3)	(92.6)	(89.6)
5844	96			(94.3)	(97.4)	(97.4)
5845	94			(92.0)	(91.0)	(93.4)
5848	91			93.6	(95.4)	
5849	93			96.1	97.6	(99.3)
5850	98		99.5	98.6	(98.4)	(98.3)
5851	91		90.0	92.2	(92.4)	(97.1)
5852	93		91.4	92.2	(99.0)	(93.0)

1) Door Hamaker als fout gesignaleerde waarden

Tabel IV (vervolg 1)

	Fabr.	Snell. '29-'30	Navoc. febr. '65	K.N.M.I. '65/'66	K.N.M.I. '67	
5853	82		80.1	83.2	(82.3)	(83.3)
5854	86		86.1	89.4	88.8	(87.5)
5856	82		81.9	82.8	83.2	(80.9)
6233	88			88.0	91.2	(89.9)
6356	106			105.2	(107.1)	(108.5)
7650	108			106.9		
7652	99			101.1	97.1	(99.9)
7772	109			108.1		
8407	107				(104.5)	(105.7)
8409	98				97.2	(97.5)
8615	119				127.8	(112.9)
10505	111					(116.4)
9919	110					(110.0)
1897*	234	234.2		(235.3)	(245.3)	
5697*	153		154.2	150.9		
5699*	139			(137.9)	(142.1)	
6091*	122			117.2		
6353*	165				(166.5)	
7261*	161		160.3	152.7		
7263*	161				(162.5)	
5526*	108			(110.4)	(114.7)	(108.5)
6246*	114			(102)	(114.9)	(107.6)
7336*	160			166.2	(151.6)	
7338*	156			157.0		
7963*	122				(118.0)	(125.9)
10118*	130					(129.5)
9920*	113					(113.6)
10120*	129					(131.7)

Tabel IV (vervolg 2)

	Fabr.	-	Navoc. febr. '65	K.N.M.I. '65/'66	
4604	110		110.0	112.0	(106.6)
4610	99		100.4	(103.5)	
4612	101		98.0		
4677	103		104.9	103.4	
5279	81		81.4	(70.1)	
5444	85		85.0	(84.7)	
5895	80		78.8	(79.6)	
5897	80		80.6		
5898	79		79.9	(78.4)	
5985	92		93.1	(95.6)	
5986	94		92.6	(94.4)	
5981	92		(90.4)		
5988	96		97.7	(100.6)	
5989	92		90.6	96.0	
5990	95		93.7	(100.1)	
5991	108		103.8		
5992	96		97.4	(99.4)	
5917 ^{ml}	123		125.6	(126.0)	(122.3)
5918 ^{ml}	124		126.7	(176.8)	(122.5)
5919 ^{ml}	135		133.7	(129.0)	(136.5)
5994 ^{ml}	88		86.4	(95.1)	
5995 ^{ml}	80		80.0	78.2	(81.4)
5996 ^{ml}	87		87.2	(88.8)	(90.5)
6037 ^{ml}	211		209.4	(214.5)	
6038 ^{ml}	219		220.4		
6039 ^{ml}	206		203.4		
5384	108				(113.8)

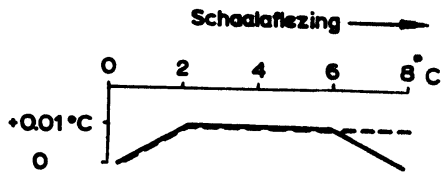
Tabel VI

Q factor (in $\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{kg/cm}^2}$) onbeschermde thermometers. Vergelijkende metingen K.N.M.I.

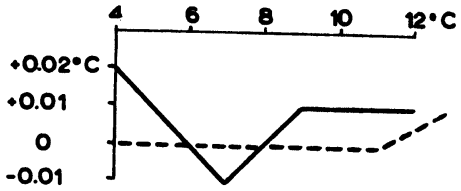
	nr.	fabrieksijking	jaar	Navoceano, febr. 1965	juli 1966	sept. 1966	aug. 1967
R + W	1897	0.0830	1958			0.0827 (1000 m)	0.0826 (1500 m)
	5697	0.0952	1954	0.0948 (1000 m)	0.0950 (500 m)		0.0824 (2700 m)
	5699	0.0950	1954	0.0946 (2000 m)			Referentie
	6091	0.1276 (1000 m) 0.1278 (1500 m) 0.1280 (2000 m)	1956	0.0942 (3000 m) 0.0946 (4000 m)	0.1274 (500 m)	Referentie	
Yoshino	6353	0.0996	1957		0.0985 (500 m)	0.0990 (1000 m)	
	7261	0.0663	1959	0.0658 (1000 m) 0.0658 (2000 m) 0.0653 (3000 m) 0.0659 (4000 m) 0.0658 (5000 m) 0.0659 (6000 m)	Referentie		
	7263	0.0724	1959		0.0735 (500 m)		
	5526	0.0982	1964		0.0974 (500 m)	0.0990 (1000 m)	0.0969 (1500 m)
	6246	0.0909	1964				0.0968 (2700 m)
	7336	0.0708	1965		0.0710 (500 m)		0.0904 (1500 m)
	7338	0.0711	1965				0.0901 (2700 m)
	7963	0.0738	1965				0.0702 (1500 m)
	10118	0.0656	1967				0.0701 (2700 m)
	10120	0.0649	1967				0.0731 (1500 m)
							0.0732 (2700 m)
							0.0650 (2700 m)
							0.0646 (2700 m)

**SCHAALVERDELINGSCORRECTIES VAN ENKELE THERMOMETERS,
VERUKT NA REPARATIE.**

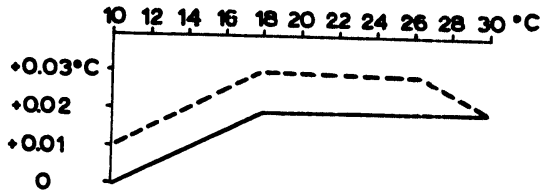
Schaalverdelingscorrectie



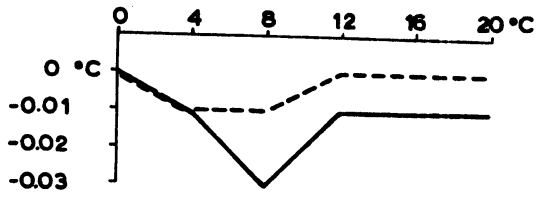
1856
 — aug. 1928
 ---- april 1960 na rep.



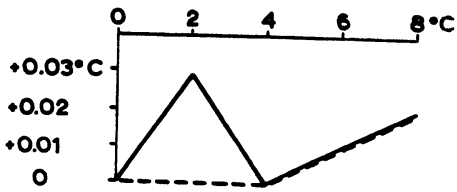
1651
 — sept. 1928
 ---- april 1960 na rep.



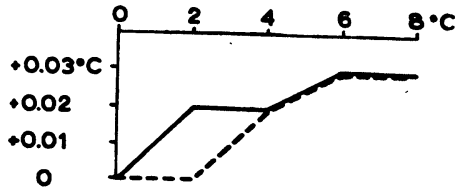
1947
 — nov. 1928
 ---- mei 1968 na rep.



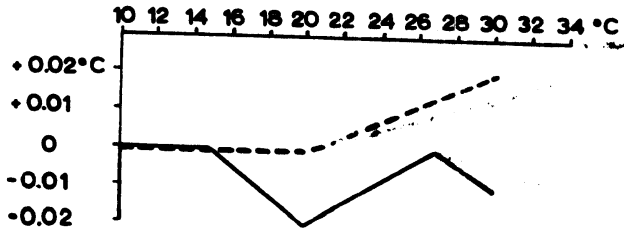
3751
 — dec. 1950
 ---- april 1960 na rep.



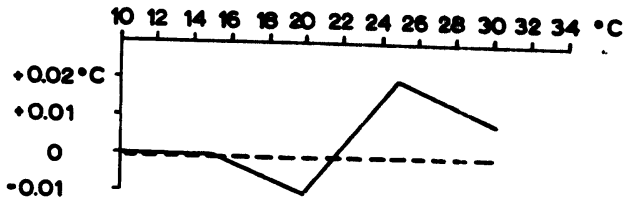
4833
 — aug. 1950(?)
 ---- mei 1953 na rep.



4881
 — aug. 1950(?)
 ---- mei 1953 na rep.

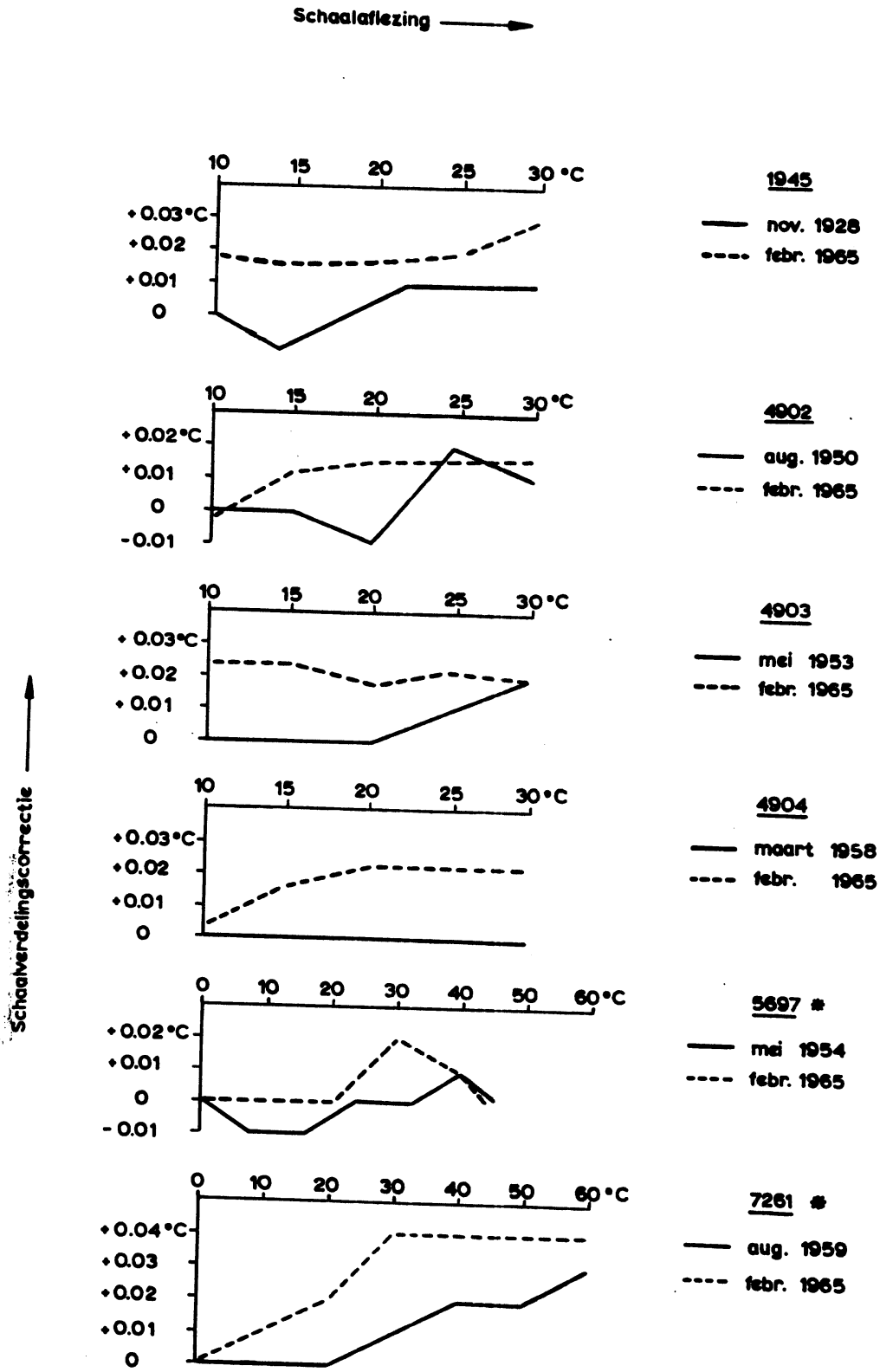


4903
 — aug. 1950
 ---- mei 1953 na rep.

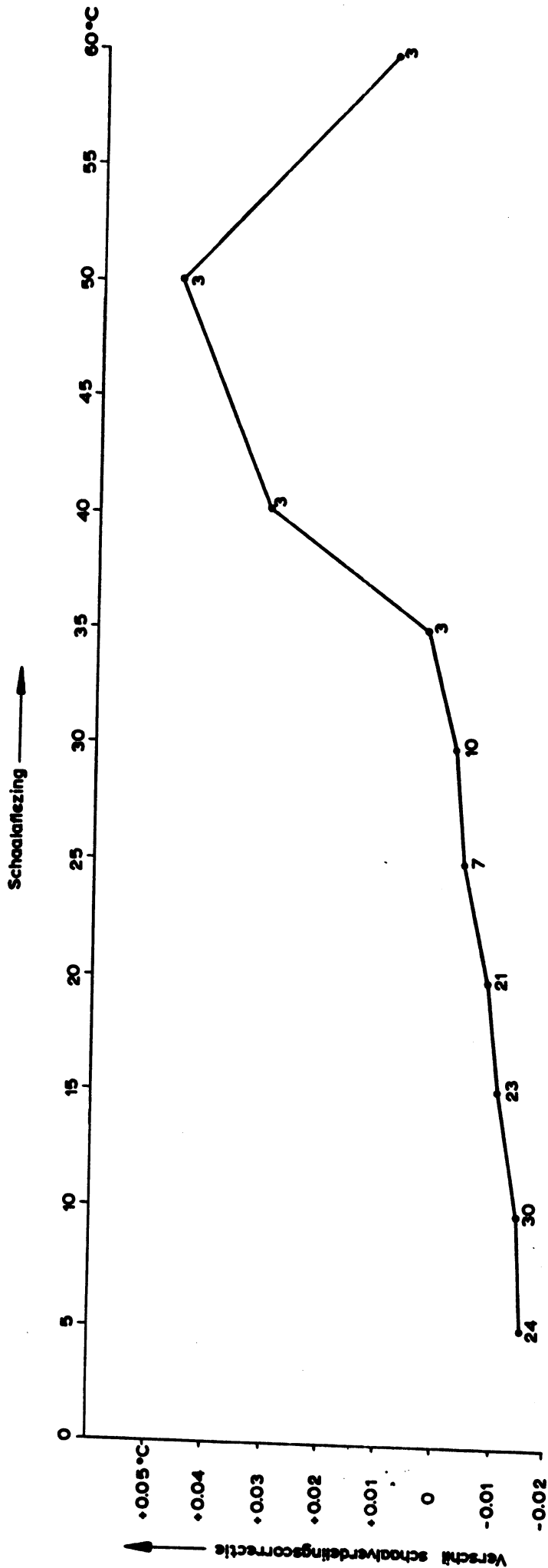


4904
 — aug. 1950
 ---- maart 1958 na rep.

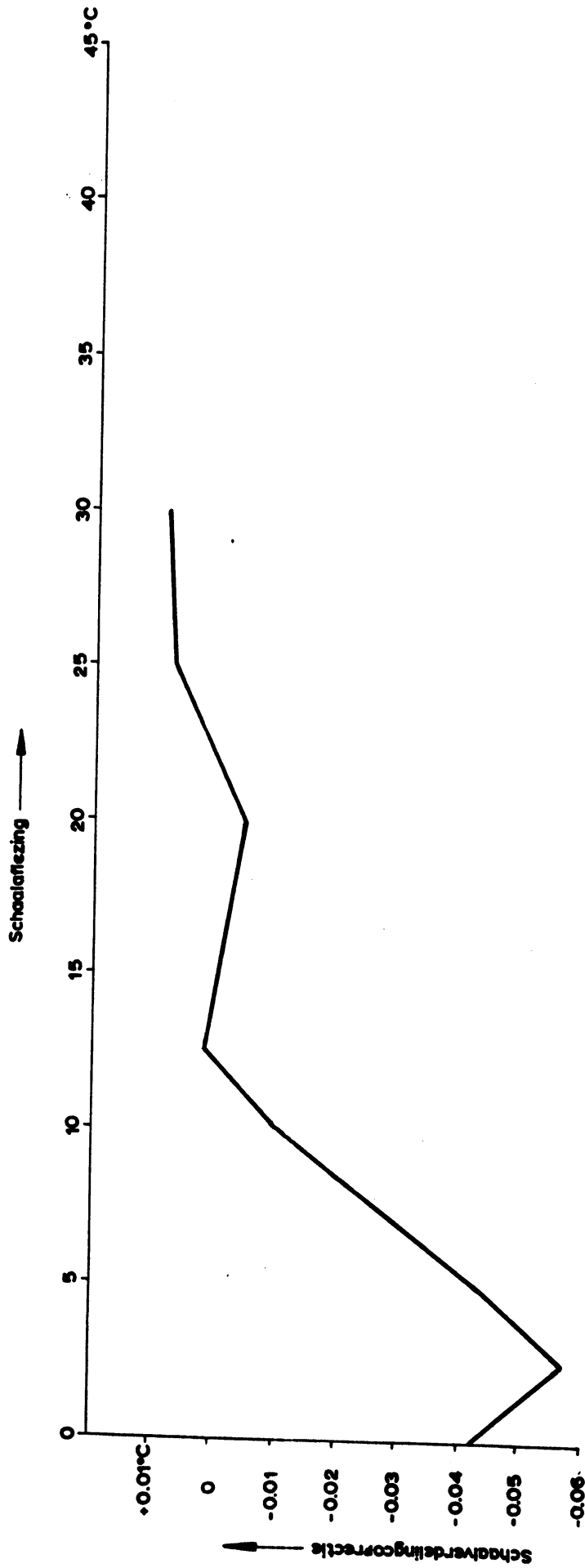
**SCHAALVERDELINGSCORRECTIES VAN RICHTER EN WIESE THERMOMETERS
MERJKT BIJ NAVOCEANO.**



Figuur 2



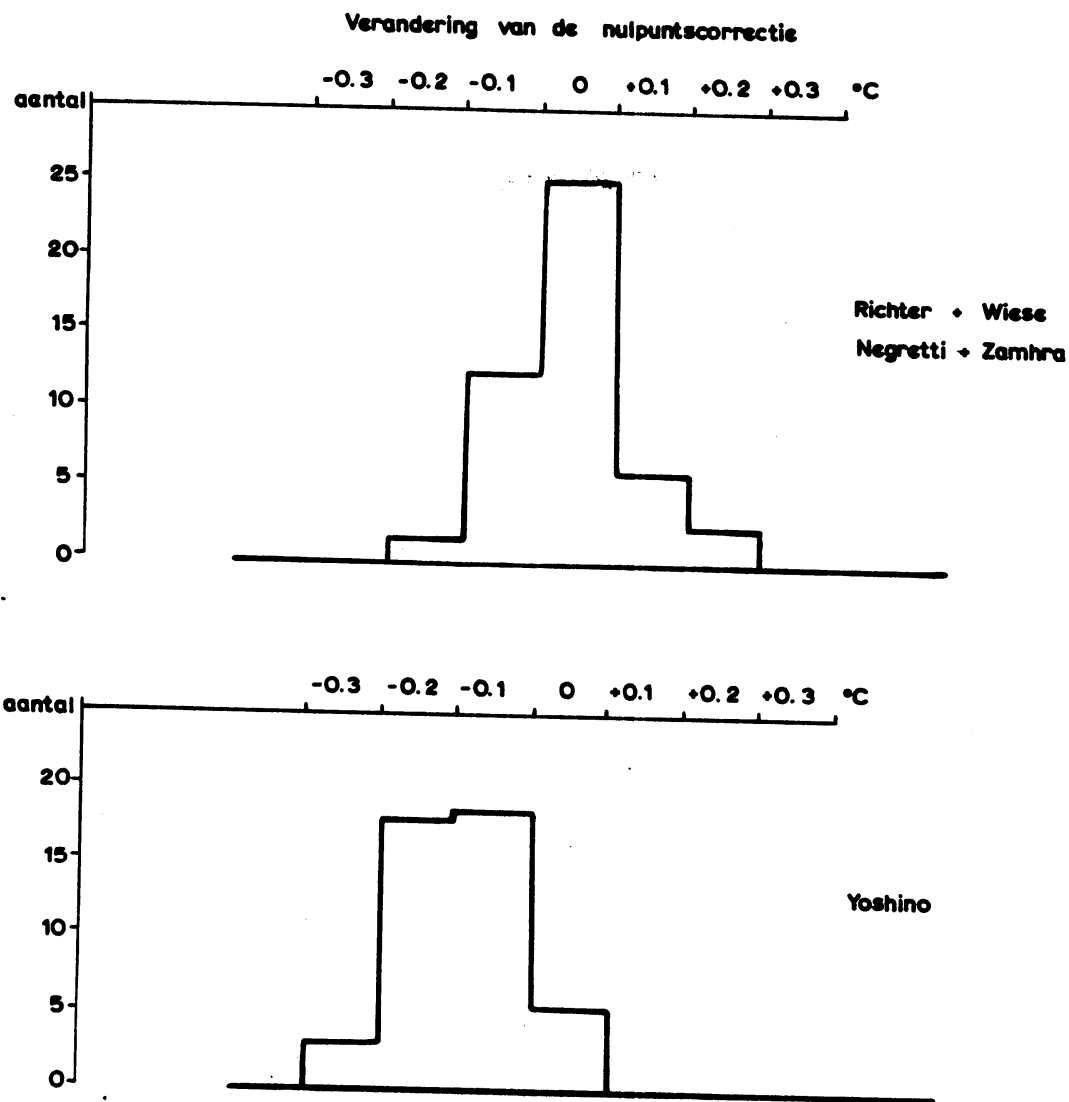
SCHAALCORRECTIE NAVOCEANO - SCHAALCORRECTIE YOSHINOTHERM. 9K CERTIFICAAT
 (AANTAL YKINGEN WAAROVER WERD GEMIDDELD PER PUNT AANGEGEVEN)



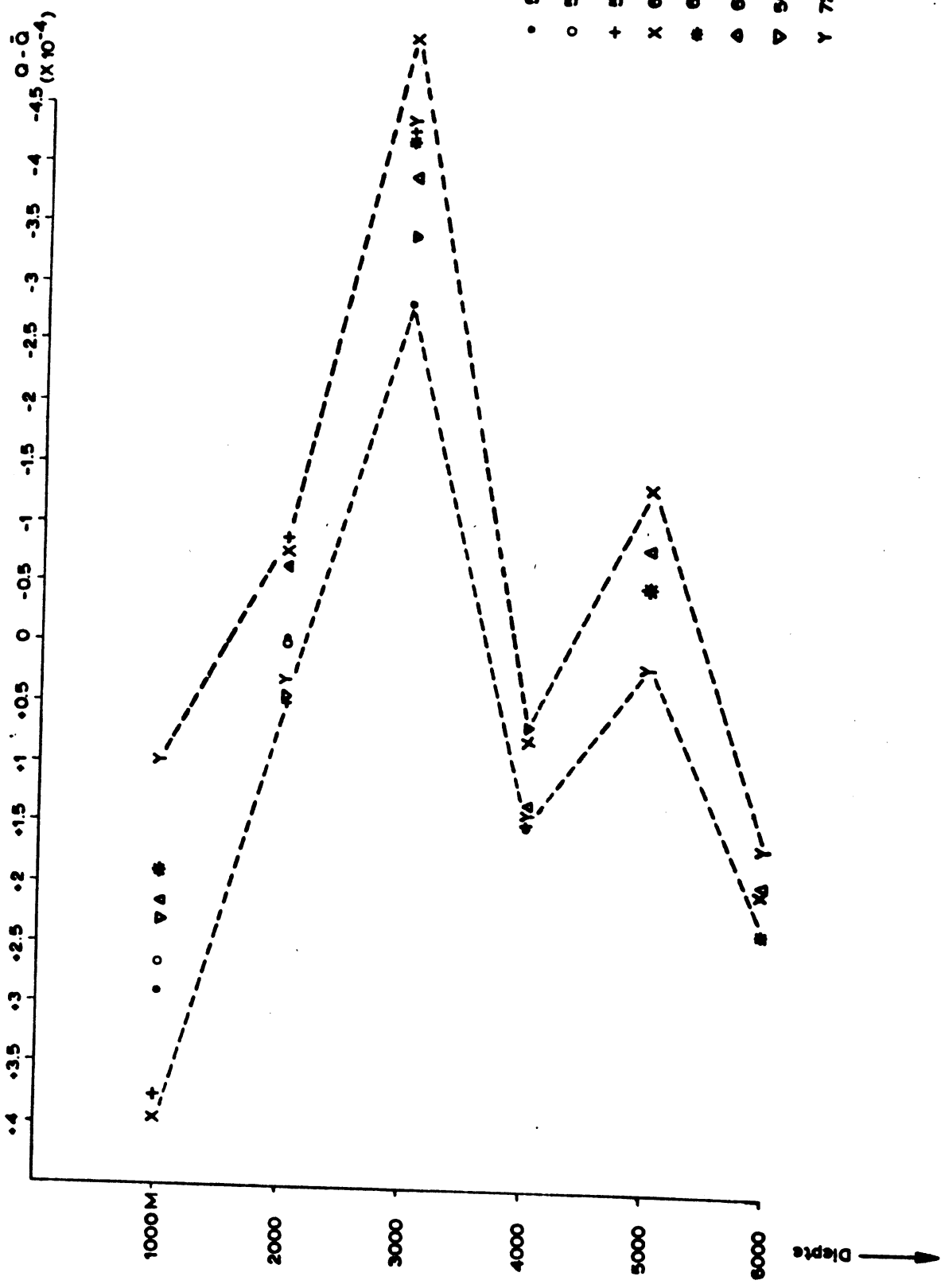
Figuur 4

EXTRA CORRECTIE OP DE CORRECTIES, OPGEGEVEN DOOR FISHERIES LABORATORY LOWESTOFT.

FREKWENTIEVERDELING VAN DE AANTALLEN GEVALLEN MET EEN BEPAALDE VERANDERING VAN EEN NULPUNTS-CORRECTIE VAN DE HULP-THERMOMETER TUSSEN TWEE YKINGEN.



Figuur 5



- 5917 Yoshino
- o 5918 "
- + 5919 "
- X 6037 "
- # 6038 "
- Δ 6039 "
- ∇ 5697 R + W
- Y 7261 "

Figuur 6

VERLOOP VAN FACTOR Q MET DIEPTE VOLGENS YKINGEN NAVOCEANO