

**KONINKLIJK NEDERLANDS
METEOROLOGISCH INSTITUUT**

TECHNISCHE RAPPORTEN

T.R. - 27

mw. S.H. Muller

Systematische fouten ten gevolge van diverse
bewerkingsmethoden bij het bepalen van temperatuur-
verschillen met thermokoppels.

De Bilt, 1982

Publikatienummer: K.N.M.I. T.R. 27 (INSA)

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut,
Instrumentele Afdeling,
Postbus 201,
3730 AE De Bilt,
Nederland.

U.D.C.: 551.508.26 :
551.501.724

Samenvatting

Indien bij het meten van temperatuurverschillen met behulp van thermokoppels in het hele gebied van -20 tot $+40^{\circ}\text{C}$ een nauwkeurigheid van 2% gevraagd wordt, is het noodzakelijk dat de absolute temperatuur (ongeveer, $\pm 1^{\circ}\text{C}$) bekend is. Het verdient dan de voorkeur om via de software de verschilspanning met behulp van de absolute (heersende)temperatuur om te rekenen in het temperatuurverschil.

Bij de verwerking van temperatuurfluctuatietingen gebeurt dit nog in het geheel niet.

Bij de berekening van het temperatuurprofiel in Cabauw op de Burroughs in De Bilt gebeurt al wel iets in deze richting.

De volgende verbeteringen worden aanbevolen:

Wanneer zowel de absolute temperatuur op 200 m als op 0,5 m beschikbaar is, is het gemiddelde van deze twee temperaturen de beste keus als referentietemperatuur (en niet één van beiden).

De reserve referentietemperatuur 's zomers moet 20°C in plaats van 40°C zijn (zie V-306, p. 12).

Een optimale berekening van het temperatuurprofiel kan alleen plaatsvinden via een iteratieve procedure. Eerst een voorlopige berekening van het profiel met behulp van een vaste referentietemperatuur, daarna een berekening van de temperatuurverschillen voor ieder niveau met als referentietemperatuur de gevonden voorlopige waarde.

Inhoud

1. Inleiding.....	blz.	1
2. Kwadratische beschrijving thermokoppels.....		1
3. De fout in het temperatuurverschil bij gebruik van de afgeleide - TRIVDUMP.....		2
4. De "Schoen"-TFM-versterker.....		3
4.1. Het oorspronkelijke systeem.....		4
4.2. De wijzigingen in het TFM-systeem.....		5
5. <u>Conclusies - TFM-metingen</u>		7
6. Het temperatuurprofiel tussen 0 en 200 meter.....		8
6.1. t_{abs}		8
6.2. Δt		9
7. <u>Conclusies - temperatuurprofiel</u>		12
Appendix A : Parametrizing thermokoppels.....		13
Appendix B : Formules voor de foutbepaling in de kwadratische bewerking van de uitgangen van de Schoen - TFM-versterker.....		18

Belangrijkste symbolen:

A, B, C, α, β, γ	coëfficiënten om U uit t te berekenen
A', B', C', α', β', γ'	coëfficiënten om t uit U te berekenen
A'', B'', C''	gemodificeerde coëfficiënten A', B', C'
P	ingevoerde extra versterking in Schoen-TFM-versterker
q	versterking
t	temperatuur
Δt	temperatuurverschil
$\frac{\Delta \Delta t}{\Delta t} = \frac{\Delta(\Delta t)}{\Delta t}$	relatieve fout in het temperatuurverschil
U	spanning
subscripten: abs	absoluut
ber	berekend
hp	Hewlett Packard
off	offset
ref	referentie
tk	thermokoppel

Systematische fouten ten gevolge van diverse bewerkingsmethodes bij het bepalen van temperatuurverschillen met thermokoppels.

1. Inleiding

Omdat in de loop der jaren een verwarrend aantal ijktabellen, ijk-curves, versterkingsfactoren en bewerkingsmethoden gebruikt is en wordt, wordt in dit verslag een overzicht gegeven van de gevolgen van de verschillende manieren waarop op het KNMI de temperatuurverschillen berekend worden.

2. Kwadratische beschrijving thermokoppels

In alle gevallen wordt ervan uitgegaan dat de werking van een thermokoppel goed beschreven kan worden met een kwadratische benadering:

$$U(t) = At^2 + Bt + C \quad (1), \quad C = U(t=0) = -At_{\text{ref}}^2 - Bt_{\text{ref}} \quad (2)$$

met $A \cong 2$ tot $4 \times 10^{-5} \text{ mV}/^\circ\text{C}^2$, $B \cong 0,04 \text{ mV}/^\circ\text{C}$

en $t(U) = A'U^2 + B'U + C' \quad (3)$, B' én C' afhankelijk van t_{ref} .

Voor $\frac{At}{B} \ll 1$ en $\frac{AU}{B^2} \ll 1$ geldt:

$$A' \cong -\frac{A}{B^3}, \quad B' \cong \frac{1}{B} \left(1 - 2\frac{A}{B} t_{\text{ref}}\right) \quad \text{en} \quad C' = t_{\text{ref}} \cong -\frac{C}{B} \left(1 + \frac{AC}{B^2}\right) \quad (4)$$

In appendix A wordt een uitgebreidere beschrijving gegeven, met de afgeleides van $U(t)$ en $t(U)$ en getalwaarden voor de diverse parameters.

3. De fout in het temperatuurverschil bij gebruik van de afgeleide - TRIVDUMP.

Om nauwkeurig $\Delta t = t - t_{ref}$ te meten moet t_{ref} bekend zijn:

$$\Delta t_{echt} = t - t_{ref} = A'U^2 + B'(t_{ref})U \cong \frac{U}{B} \left\{ 1 - \frac{A}{B} (t+t_{ref}) \right\} \quad (5)$$

In de praktijk is dit lastig, omdat t_{ref} apart bepaald moet worden. Daarom wordt t vaak bij benadering berekend met behulp van de afgeleide bij een gekozen temperatuur t_1 :

$$\Delta t_{ber} = t - t_{ref} = U \frac{dt}{dU} \cong \frac{U}{B} (1 - 2\frac{A}{B} t_1) \quad (\text{zie appendix A}) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{De relatieve fout } \frac{\Delta \Delta t}{\Delta t} &= \frac{\Delta(\Delta t)}{\Delta t} = \frac{(t-t_{ref})_{echt} - (t-t_{ref})_{berekend}}{t-t_{ref}} \cong \\ &\cong \frac{B}{U} \Delta(\Delta t) \quad (7) \end{aligned}$$

is dan afhankelijk van de keuze voor t_1 . In tabel 1 geven we een aantal voorbeelden met een 1e orde benadering:

1. Kwadratische termen met $\frac{A^2 t^2}{B^2}$ zijn verwaarloosd;
2. In 0^e orde geldt: $U = Bt + C$, $C = -B t_{ref}$, $\frac{U}{B} = t - t_{ref}$

tabel 1 Relatieve fouten voor verschillende keuzes van t_1

geval	1	2	3	4	5
t_1	t_1	0°C	t_{ref}	t	$\frac{t+t_{ref}}{2}$
$\frac{\Delta \Delta t}{\Delta t}$	$\frac{A}{B}(t_1 - t + t_1 - t_{ref})$	$\frac{A}{B}(t+t_{ref})$	$\frac{A}{B}(t_{ref} - t)$	$\frac{A}{B}(t - t_{ref})$	0
in le orde	als $t \cong t_{ref}$: $\frac{2A}{B}(t_1 - t)$				
t of t_{ref} nodig?	nee	nee	ja	ja	ja

Indien een verkeerde keus voor de parametrizing gemaakt wordt (echte parameters α, β ; berekend met A, B), dan levert dit in 1^e orde een extra relatieve fout op van $\frac{B-\beta}{B}$.

De gevallen 3, 4 en 5 zijn alleen bedoeld om gevoel voor de mogelijke fouten te krijgen. In de praktijk zijn deze keuzes onzinnig; omdat we toch t_{ref} (en/of t) nodig hebben, kunnen we beter de exacte berekening uitvoeren.

Het verwerkingsprogramma TRIVDUMP heeft als waarde voor de afgeleide $\frac{dt}{dU} = 25^{\circ}\text{C}/\text{mV}$. Hierbij wordt uitgegaan van een versterking in de hardware van het thermokoppelsignaal van 3192×4 maal.

Bij berekening van de referentietemperatuur wordt gebruik gemaakt van de Driedonks ijking voor het gemodificeerde NTC signaal (zie § 4.1) dat $3125 \times$ versterkt is.

Het hangt nu van de ijkcurve van het thermokoppel (appendix A) af, met welke t_1 dit correspondeert. Voor een chromel-alumel koppel (zoals de laatste jaren gebruikt wordt), levert de Omega-curve een t_1 van 13°C en de Kohsiek-curve een t_1 van 23°C .

De fouten $\frac{\Delta\Delta t}{\Delta t}$ zijn:

$$\text{Omega} : 1 \times 10^{-3} \times (12^{\circ}\text{C}-t), \left(\frac{\Delta\Delta t}{\Delta t}\right) < 0,02 \text{ als } -8 < t < 32^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Kohsiek} : 1,5 \times 10^{-3} \times (22^{\circ}\text{C}-t), \left(\frac{\Delta\Delta t}{\Delta t}\right) < 0,02 \text{ als } 7 < t < 37^{\circ}\text{C}$$

De relatieve fout is des te groter naarmate t meer van t_1 verschilt. Voor $t > t_1$ is Δt_{echt} kleiner dan $\Delta t_{berekend}$.

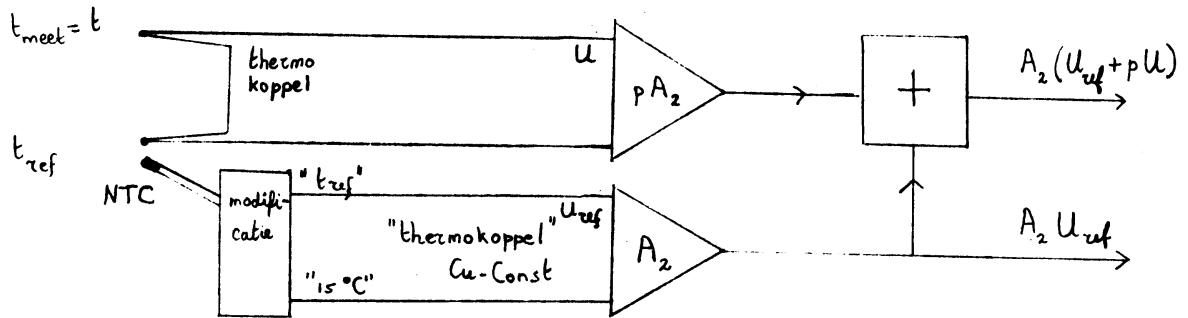
4. De "Schoen" - TFM-versterker.

Door Schoen is jaren geleden een ingenieus systeem gemaakt (de TFM-versterker) waarbij reeds als hardware t_{ref} met Δt gecombineerd werd. Helaas is dit systeem in de loop der jaren steeds ad hoc gewijzigd, zodat er nu systematische fouten optreden die vroeger tot in de 1^e orde nul waren.

We zullen nu eerst een beschrijving van het oorspronkelijke TFM-systeem geven en daarna kijken naar de fouten die ontstaan zijn door de verschillende wijzigingen.

4.1. Het oorspronkelijke systeem

Fig. 1. Het blokschema (in het oorspronkelijke systeem was $p=1$, tegenwoordig $p=1,021$)



Het NTC-signaal, waarmee t_{ref} bepaald wordt, wordt zodanig gemodificeerd dat het zich gedraagt als een Cu-Const thermokoppel (voor de Schoenparameters, zie appendix A) met een referentie temperatuur van 15°C . (N.B. In werkelijkheid is de temperatuurcoëfficiënt nog steeds negatief na modificatie). Zowel het thermokoppel als het gemodificeerde NTC-signaal worden versterkt, oorspronkelijk beiden $3125 \times 4 = 12.500$ maal. (Een factor twee versterking van het thermokoppelsignaal komt meestal tot stand door het gebruik van een thermozuil van 2 thermokoppels). Als uitgangsspanning zijn de som (eigenlijk dus het verschil) van beide versterkte signalen en het versterkte NTC-signaal beschikbaar. Wanneer nu beide spanningen via de kwadratische benadering (rekening houdende met de versterking A_2) naar temperaturen omgerekend worden, krijgen we door aftrekking een verschiltemperatuur die, onafhankelijk van t of t_{ref} , in 1^e orde gelijk is aan het ware verschil. In appendix B is dit nader uitgewerkt.

4.2. De wijzigingen in het TFM-systeem

Het elegante systeem uit de vorige paragraaf is tegenwoordig geenszins meer aanwezig. Schoen zelf is begonnen met improviseren, toen hij de versterker wilde aanpassen aan manganin-constantaan thermokoppels. Daarom werd een factor p ingevoerd van 1,021 zodat $pA_2 = 3192 \times 4$. Dit is niet de juiste manier om de versterker aan te passen. Het is eigenlijk nodig, maar meer werk, om de modificatie van de NTC te wijzigen.

Hoewel de manganin-constantaankoppels nooit gebruikt zijn, is ongeveer vanaf 1977 tot heden de versterking van het thermokoppelsignaal 3192×4 en van het NTC-signaal 3125×4 . Men is echter wel van het gebruik van Cu-const thermokoppels afgestapt en overgegaan op chromel-alumel. Dit introduceert fouten, omdat de ijkcurves van thermokoppels en van gemodificeerd NTC-signaal nu niet gelijk zijn. Een complicatie bij het berekenen van de fouten is het in omloop zijn van verschillende ijkcurves voor chromel-alumel thermokoppels (zie appendix A).

Aparte foutschattingen zijn nodig voor de metingen van Henk de Bruin. Deze zijn met een "enkele TFM spriet" uitgevoerd, waarbij door Arie Unlandt een extra verzwakking was geïntroduceerd, die de versterking 3192×4 weer tot 3125×4 terugbracht.

In appendix B wordt een uitdrukking afgeleid voor de fouten die we ten gevolge van de verschillende wijzigingen maken. In tabel 2 wordt een overzicht gegeven van de fouten onder verschillende omstandigheden.

De gevallen 1 en 2 zijn van toepassing op de metingen van Henk de Bruin. Uit de laatste kolom blijkt duidelijk dat het wenselijk is om de versterkingsfactor 3192 weer wat terug te draaien, indien op de in deze paragraaf beschreven manier temperatuurverschillen bepaald worden. Nauwkeurige inlichtingen over de Schoen-TFM-versterker zijn te krijgen bij Arie Unlandt en te vinden in de Schoen-paperassen.

tabel 2.

Fouten bij gebruik van verkeerde thermokoppels en verkeerde versterkingsfactoren in de Schoen TFM-versterker met $t \cong t_{ref}$ ($|t-t_{ref}| \leq 5^{\circ}C$),
Berekening met Schoen Cu-const parameters.

geval	$\frac{\Delta \Delta t}{\Delta t}$ (echt-ber)	p	pA_2	juiste parameters thermokoppel (app.A)	geen fout $\frac{\Delta \Delta t}{\Delta t} = 0$	fouten kleiner dan 2% $\frac{\Delta \Delta t}{\Delta t} < 0,02$
1.	$10^{-3} (^{\circ}C^{-1})_t -0,01$	1	3125x4	Kohsiek	$t=10^{\circ}C$	$-10 < t < 30^{\circ}C$
2.	$1,5 \times 10^{-3} (^{\circ}C^{-1})_t -0,03$	1	3125x4	Omega	$t=20^{\circ}C$	$5 < t < 30^{\circ}C$
3.	$10^{-3} (^{\circ}C^{-1})_t -0,03$	1,021	3192x4	Kohsiek	$t=30^{\circ}C$	$10 < t < 50^{\circ}C$
4.	$1,5 \times 10^{-3} (^{\circ}C^{-1})_t -0,05$	1,021	3192x4	Omega	$t=33^{\circ}C$	$20 < t < 50^{\circ}C$

5. Conclusies - TFM metingen

Vergelijking van de resultaten aan het eind van § 3 met tabel 2 in § 4.2 leert ons dat beide methodes (TRIVDUMP en de onvolmaakte Schoen-versterker) ongeveer even grote fouten geven. Het is echter zaak om een goede keuze te doen voor respectievelijk dt/dU en p . Tabel 3 geeft een overzicht van keuzemogelijkheden voor verschillende centrale temperaturen bij gebruik van de ijking van Kohsiek en Monna.

tabel 3

t_{centrum}	$\frac{\Delta\Delta t}{\Delta t} = 0$	Geschikte keuzes voor p en voor $\frac{dt}{dU}$			lengtetraject met $\frac{\Delta\Delta t}{\Delta t} < 0,02$
		10	20	30	
p (Schoen-versterker)		1	1,01	1,021	40°C
$\frac{dt}{dU}$ (TRIVDUMP)($p=1,021$)		25,07	25,07	24,71	30°C

Het kiezen van dt/dU is een eenvoudige ingreep in het TRIVDUMP programma. Wel moeten we eraan denken dat de totale versterkingsfactor pA_2 (op dit moment 4×3192) geheel wordt weggewerkt. Bij ingrepen in de hardware om p te veranderen moet TRIVDUMP gewijzigd worden.

Het veranderen van p om voor de Schoen-bewerking een gunstige keuze toe doen is minder eenvoudig. (Eigenlijk moet er iets nog veel moeilijkers: de modificatie van de NTC moet worden aangepast aan een chromel-alumel thermokoppel). p kan veranderd worden door rechtstreeks ingrijpen in de Schoen-versterker, of door een versterker erachter op de manier van Arie Unlandt. Deze versterker moet het gemodificeerde NTC-sigitaal en de som hiervan met het thermokoppelsigitaal nog eens combineren op een zodanige manier dat de versterking van het NTC-sigitaal ongewijzigd blijft en alleen de versterking van het thermokoppelsigitaal verandert. Overigens verdient het sterke aanbeveling om de exacte berekening uit te voeren (m.b.v. U én U_{ref}), indien een voldoende grote computer aanwezig is, om deze twee signalen in de software te combineren.

6. Het temperatuurprofiel tussen 0 en 200 meter

Ook de temperaturen op verschillende hoogtes worden met thermokoppels gemeten. Zowel op 0,5 m als op 200 m wordt ten opzichte van 0°C (Zeref-kast) gemeten: t_{abs} . Verder worden de temperatuurverschillen tussen de niveaus 0,5, 2, 10, 20, 40, 80, 120, 160 en 200 m gemeten: Δt .

6.1. t_{abs}

Het omrekenen van de gemeten spanning naar t_{abs} is 's winters relatief eenvoudig, omdat U_{tk} alleen versterkt wordt en de referentie temperatuur bekend is. Maar in verband met range-problemen wordt 's zomers een offset spanning bij de thermokoppelspanning gevoegd. We krijgen dan:

$$U_{hp} = q(U_{tk} + U_{off}) \quad \text{met } q \text{ de gebruikte versterking} \quad (8)$$

$$t - t_{ref} = A''U_{hp}^2 + B''U_{hp} + C'' = A' U_{tk}^2 + B'U_{tk} \quad (9)$$

A' en B' zijn coëfficiënten uit tabel A'.

Voor t_{abs} geldt: $C' = t_{ref} = 0^\circ\text{C}$ (Zeref)

Met de formules 4 (op p.1) en 9 volgt:

$$A'' = \frac{-A}{q^2 B^3} \quad (10)$$

$$B'' = \frac{1}{qB} \left(1 - 2\frac{A}{B} t_{ref}\right) + 2\frac{A}{q^2 B^3} (qU_{off}) \quad (11)$$

$$C'' = \frac{-A}{q^2 B^3} (qU_{off})^2 - \frac{1}{qB} \left(1 - 2\frac{A}{B} t_{ref}\right) (qU_{off}) \quad (12)$$

De versterkte offset spanning (qU_{off}) in de absolute temperatuurmeting is 's zomers -4 Volt en 's winters 0V. De formules 10, 11 en 12 laten zien dat we bij gebruik van een offsetspanning niet alleen een andere constante maar ook een andere lineaire coëfficiënt moeten gebruiken.

Tijdens controles van de temperatuurverschillen met behulp van waterbaden is het vermoeden gerezen dat de gebruikte thermokoppelijking niet helemaal goed is. Daarom is in de zomer van 1982 met iets andere ijkfactoren gewerkt. De verschillen zijn echter zeer klein, zodat het verstandiger is om in 1983 toch weer gebruik te maken van de Driedonks ijking (tabel A1). De nieuwe metingen kunnen dan gemakkelijker direct met de oude vergeleken worden. Bovendien worden dan op de HP in Cabauw dezelfde coëfficiënten gebruikt als

bij de verwerking van de ponsband van de digitale registratie uit Cabauw op de Burroughs in De Bilt (zie tabel 4 en verslag V 306 p. 5 en p. 11). Deze ponsband-registratie zal in 1983 niet meer gebruikt worden. Alle berekeningen van t_{abs} vinden dan op de HP in Cabauw plaats. In tabel 4 worden de coëfficiënten gegeven die in 1983 gebruikt zullen worden.

6.2. Δt

Bij het meten van Δt wordt altijd dezelfde offset (-4 Volt) gebruikt, omdat zowel 's zomers als 's winters de temperatuursverschillen tijdens inversies 's nachts nooit zo groot zijn als de verschillen die overdag kunnen ontstaan.

We kunnen echter toch niet met één set (gemodificeerde) coëfficiënten volstaan als we tamelijk grote fouten willen vermijden. Immers de coëfficiënten B' en C' (en dus ook B'' en C'' - met offset) zijn afhankelijk van de referentietemperatuur.

Het elegantste is om op iteratieve wijze te werk te gaan. Eerst bepalen we het temperatuurprofiel met een gekozen B'' en C'' (b.v. voor 10°C). Daarna gebruiken we de voor iedere hoogte berekende temperaturen om opnieuw voor elke gemeten spanning het temperatuurverschil uit te rekenen. Dit ingewikkelde systeem waarbij voor elk verschil een andere t_{ref} gebruikt wordt, wordt echter zelfs niet in het Burroughs verwerkingsprogramma in De Bilt gebruikt.

Hier (in De Bilt) wordt t_{ref} als volgt gekozen:

eerste keus: t_{200}

tweede keus: $t_{0,5}$

derde keus: 's winters 0°C, 's zomers 40°C (zie V-306, p. 12).

Omdat een keuze van t_{ref} die 10°C verkeerd is al een systematische fout van 0,05°C voor $\Delta t \neq 0$ geeft (deze grote fout is een gevolg van de offset van 2°C (vergelijk § 3)) is dit een wat merkwaardige selectie.

Ten eerste loopt het verschil $t_{200} - t_{0,5}$ vrij vaak tot 10°C op. Een keuze van $(t_{200} + t_{0,5})/2$ als referentietemperatuur leidt tot kleinere fouten (maar wel tot een andere soort systematische fout). Ten tweede is de keuze voor een t_{ref} van 40°C voor 's zomers wel erg hoog. Ten opzichte van $t_{\text{ref}} = 20^{\circ}\text{C}$ geeft $t_{\text{ref}} = 40^{\circ}\text{C}$ vrijwel altijd voor alle Δt 's een fout van $0,1^{\circ}\text{C}$ meer (d.w.z. voor de som van alle Δt 's een fout die 1°C groter is). In verslag V-306, p.12 dient de reservekeuze dus ZOWI/20 i.p.v. ZOWI/10 te worden.

Op de HP in Cabauw bestaat niet de mogelijkheid om met de werkelijke referentie temperatuur rekening te houden. Tot nu toe werden 's zomers en 's winters verschillende coëfficiënten gebruikt. Omdat bij experimenten soms kunstmatig temperatuurverschillen van meer dan 2°C worden gemaakt, werd wel een kwadratische term gebruikt.

In 1983 zal de digitale registratie uitgeschakeld zijn en zal ook het temperatuurprofiel via de HP naar De Bilt gestuurd worden.

Helaas worden niet de spanningen, maar de door de HP berekende temperaturen overgestuurd. Voor de absolute temperatuur (t_{200} en $t_{0,5}$) is dit geen bezwaar, omdat de HP de juiste berekening uitvoert.

Bij de berekening van Δt willen we echter graag gebruik maken van de mogelijkheden die de Burroughs biedt om met de omgevingstemperatuur rekening te houden. We moeten dan uit de door de HP berekende Δt weer de spanning berekenen. Om de berekening eenvoudig en overzichtelijk te houden, zal in 1983 de volgende procedure gebruikt worden. Op de HP wordt alleen een lineaire en een constante coëfficiënt voor een vaste referentietemperatuur van 10°C (zie tabel 4) gebruikt. In de Burroughs vindt het volgende plaats:

$$U_{\text{hp}} = \frac{t_{\text{hp}} - C''(10^{\circ}\text{C})}{B''(10^{\circ}\text{C})} \quad (13)$$

$$\Delta t_{\text{echt}} = A'' U_{\text{hp}}^2 + B''(t_{\text{ref}}) U_{\text{hp}} + C''(t_{\text{ref}}) \quad (14)$$

met $t_{\text{ref}} = \frac{t_{200} + t_{0,5}}{2}$; A'' , $B''(t_{\text{ref}})$ en $C''(t_{\text{ref}})$ volgen uit formule 10 t/m 12.

Het nadeel van dit eenvoudige systeem is dat er vrij grote fouten kunnen optreden in het op de HP berekende profiel. Wanneer we op de HP ten behoeve van experimenten het juiste profiel willen weten, moeten we zelf de coëfficiënten invoeren die bij de heersende temperatuur horen. Als hulpmiddel worden in tabel 4 de coëfficiënten gegeven van $t_{ref} = -15^{\circ}\text{C}$ tot $+30^{\circ}\text{C}$ in stappen van 5°C . Wanneer grote temperatuurverschillen optreden is het verstandig om wel de kwadratische term mee te nemen. Bij de maximale spanning (10V) is de fout $0,03^{\circ}\text{C}$. Per Δt lijkt de kwadratische fout verwaarloosbaar klein ($\Delta t < 2^{\circ}\text{C}$: fout $< 0,005^{\circ}\text{C}$), maar de fout in de som van alle Δt 's kan dan toch nog $0,04^{\circ}\text{C}$ zijn. Daarom wordt in de Burroughs (formule 14) de kwadratische term wel meegenomen.

tabel 4

Coëfficiënten voor berekening van t_{abs} en t op de HP in Cabauw

	q V/mV	qU_{off} V	A'' $^{\circ}\text{C}/\text{V}^2$	B'' $^{\circ}\text{C}/\text{V}$	C'' $^{\circ}\text{C}$	t_{ref} $^{\circ}\text{C}$
t_{abs} zomer	10	-4	-0.00808	2.544	10.306	0
t_{abs} winter	10	0	-0.00808	2.609	0	0
Δt standaard	50	-4	0	0.5068	2.032	10
Δt	50	-4	-0.0003	0.5378	2.156	-15
Δt	50	-4	-0.0003	0.5316	2.132	-10
Δt	50	-4	-0.0003	0.5254	2.107	-5
Δt	50	-4	-0.0003	0.5192	2.082	0
Δt	50	-4	-0.0003	0.5130	2.057	5
Δt	50	-4	-0.0003	0.5068	2.032	10
Δt	50	-4	-0.0003	0.5006	2.008	15
Δt	50	-4	-0.0003	0.4944	1.983	20
Δt	50	-4	-0.0003	0.4882	1.958	25
Δt	50	-4	-0.0003	0.4820	1.933	30

7. Conclusies-temperatuurprofiel

Met zorg moeten in Cabauw 's zomers en 's winters de juiste coëfficiënten (tabel 4) ingevoerd worden.

Bij de verwerking in De Bilt moet de reserve referentietemperatuur 's zomers 20°C i.p.v. 40°C zijn. Dit betekent dat in V-306, p. 12 ZOWI/20 i.p.v. ZOWI/10 gebruikt moet worden.

Verder verdient het de voorkeur om wanneer zowel t_{200} als $t_{0,5}$ beschikbaar zijn, $(t_{200} + t_{0,5})/2$ als referentietemperatuur te gebruiken.

Appendix A

Parametrizing thermocouples

Thermocouples give a certain voltage when temperature and temperature difference are given. This phenomenon is in the meteorological area very good to describe with a quadratic approximation:

$$U(t) = At^2 + Bt + C \quad (\text{App. 1})$$

$\frac{\text{mV}}{^\circ\text{C}} \quad \frac{\text{mV}}{^\circ\text{C}^2} \quad \frac{\text{mV}}{^\circ\text{C}} \quad \text{mV}$

whereby $C = U(t=0) = -At_{\text{ref}}^2 - Bt_{\text{ref}}$ (App. 2)

or $U(t) = A(t^2 - t_{\text{ref}}^2) + B(t - t_{\text{ref}})$ (App. 3)

Since the voltages are additive, we can choose for C, thus for the reference temperature, any desired value.

We can turn the relationship between U and t around, so that we can determine the voltage differences at a known reference temperature from the actual temperature.

This turning around must for every choice of $C(t_{\text{ref}})$ happen!

The inverse relationship, again in quadratic approximation:

$$t(U) = A'U^2 + B'U + C' \quad (\text{App. 4})$$

with (if $\frac{A}{B} t \ll 1$ and $\frac{A}{B^2} U \ll 1$)

$$A' \cong -\frac{A}{B^3}$$

$$B' \cong \frac{1}{B} \left(1 + 2 \frac{AC}{B^2}\right) = -\frac{1}{B} \left\{1 - 2 \frac{A}{B} t_{\text{ref}} - 2 \frac{A^2}{B^2} t_{\text{ref}}^2\right\} \cong \frac{1}{B} \left(1 - 2 \frac{A}{B} t_{\text{ref}}\right) \quad (\text{App. 5})$$

$$C' = t_{\text{ref}} \cong -\frac{C}{B} \left(1 + \frac{AC}{B^2}\right)$$

In tabel A1 geven we de op het KNMI in het verleden en heden gebruikte parameterwaardes.

Voor het berekenen van temperatuurverschillen wordt vaak gebruik gemaakt van de afgeleide $\frac{dt}{dU}$.

We kunnen $\frac{dt}{dU}$ zowel uit (App. 4) als uit (App. 1) afleiden:

$$\text{Uit App. 1: } \frac{dt}{dU} \cong \frac{1}{\frac{dU}{dt}} = \frac{1}{2At+B} \cong \frac{1}{B} \left\{ 1 - 2\frac{A}{B}t + 4\frac{A^2}{B^2}t^2 \right\} \quad (\text{App. 6})$$

$$\text{Uit App. 2: } \frac{dt}{dU} = 2A'U + B' = \frac{1}{B} \left\{ 1 - 2\frac{A}{B^2}(U-U(t=0)) \right\} \quad (\text{App. 7})$$

$$U - U(t=0) = At^2 + Bt \quad (\text{App. 8})$$

$$\text{App. 7 + App. 8 : } \frac{dt}{dU} = \frac{1}{B} \left\{ 1 - 2\frac{A}{B}t - 2\frac{A^2}{B^2}t^2 \right\} \quad (\text{App. 9})$$

Voor $\frac{A}{B}t \ll 1$ leveren App. 6 en App. 9 in 1^e orde hetzelfde resultaat:

$$\frac{dt}{dU} = \frac{1}{B} \left(1 - 2\frac{A}{B}t \right) \quad (\text{App. 10})$$

In fig. A1 is de temperatuur afhankelijkheid van $\frac{dU}{dt} = 2At+B$ uitgezet.

tabel A1: Parameters voor kwadratische benadering van thermokoppels. Bij afleiding uit een tabel van thermokoppel spanningen die eigenlijk een decimaal te weinig geeft, moeten geschikte punten worden gekozen! Precisie 0,1°C.

naam ijkcurve	referentiepunten (indien uit tabel)	$A(t^2)$ mV/°C ²	$B(t)$ mV/°C	$A'(U^2)$ °C/mV ²	$B'(U)$ $B'=B'(t_{ref})$ °C/mV	t_{ref} °C	afkomstig uit of te verkrijgen bij
Chromel Alumel							
Omega	U (40)=1,611	$2,0 \cdot 10^{-5}$	0,0395	-0,325	25,32	0	Omega boek zie tabel A2
	U (11)=0,437				25,00	15	
	U (-8)=-0,314						
Kohsiek	-	$2,75 \cdot 10^{-5}$	0,03875	-0,446	25,81	0	WR 80-4
					25,25	15	
Koper-Constantaan							
Omega	U (20)=1,555	$4,0 \cdot 10^{-5}$	0,0387	-0,683	25,85	0	Omega boek zie tabel A3
	U (17)=0,669				25,05	15	
	U (-8)=-0,307						
Schoen	-	$4,53 \cdot 10^{-5}$	0,03845	-0,797	26,01	0	paperassen van Schoen
Driedonks					25,08	15	
	-	$4,55 \cdot 10^{-5}$	0,03833	-0,808	26,09	0	WR 80-3
					25,14	15	
Brown	U (28)=1,112	$4,4 \cdot 10^{-5}$	0,0385	-0,776	25,99	0	Arie Unlandt "Flevo"
	U (18)=0,707				25,08	15	
	U (-6)=-0,229						

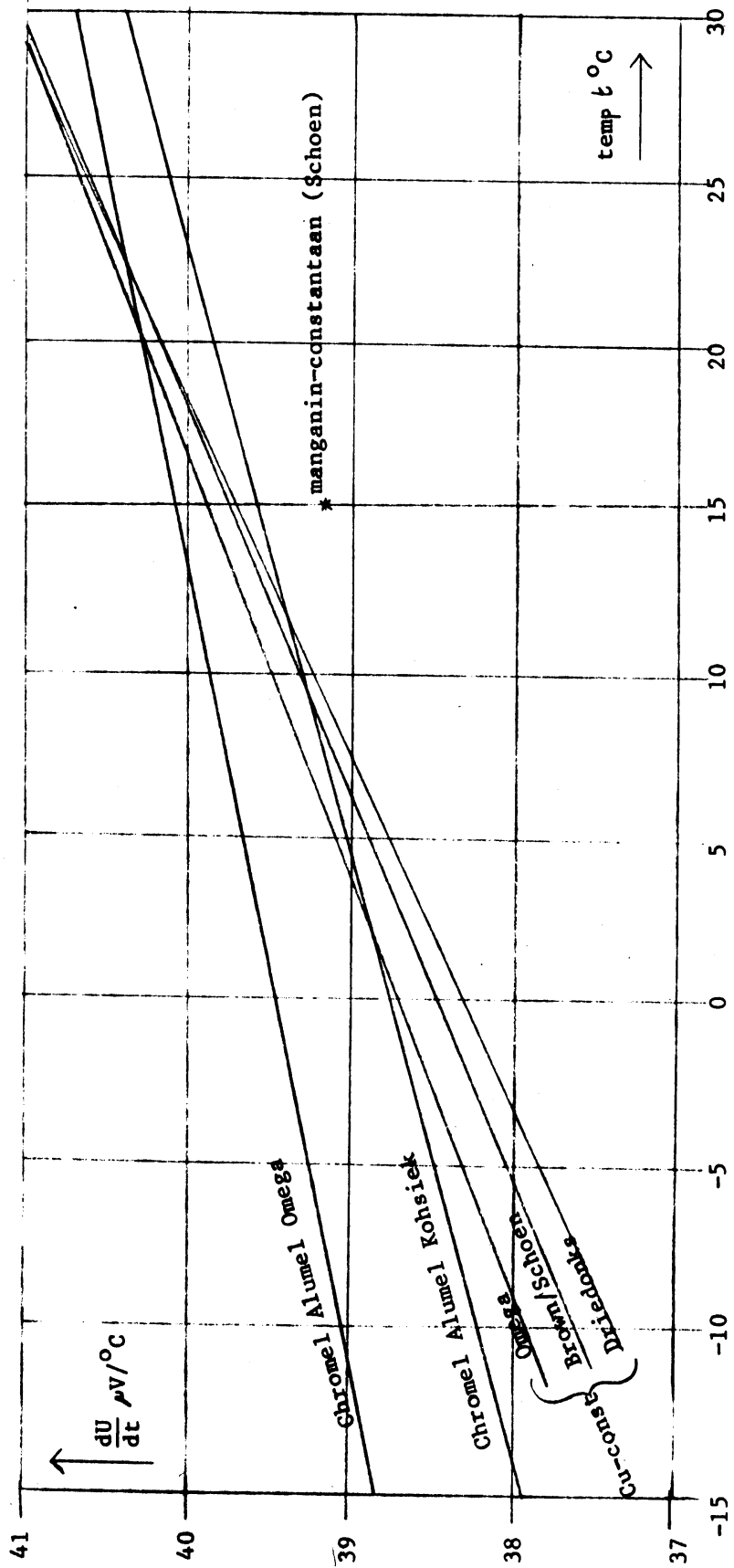
tabel A2: Thermospanning van chromel-alumel volgens het Omega
Temperature Measurement Handbook in °C t.o.v. 0°C

DEG C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	DEG C
THERMOELECTRIC VOLTAGE IN ABSOLUTE MILLIVOLTS												
-90	-3.262	-3.274	-3.305	-3.337	-3.368	-3.399	-3.430	-3.461	-3.492	-3.523	-3.553	-90
-80	-2.920	-2.953	-2.985	-3.018	-3.050	-3.082	-3.115	-3.147	-3.179	-3.211	-3.242	-80
-70	-2.586	-2.620	-2.654	-2.687	-2.721	-2.754	-2.788	-2.821	-2.854	-2.887	-2.920	-70
-60	-2.243	-2.277	-2.312	-2.347	-2.381	-2.416	-2.450	-2.484	-2.518	-2.552	-2.586	-60
-50	-1.889	-1.925	-1.961	-1.996	-2.032	-2.067	-2.102	-2.137	-2.173	-2.208	-2.243	-50
-40	-1.527	-1.563	-1.600	-1.636	-1.673	-1.709	-1.745	-1.781	-1.817	-1.853	-1.889	-40
-30	-1.156	-1.193	-1.231	-1.268	-1.305	-1.342	-1.379	-1.416	-1.453	-1.490	-1.527	-30
-20	-0.777	-0.816	-0.854	-0.892	-0.930	-0.968	-1.005	-1.043	-1.081	-1.118	-1.156	-20
-10	-0.392	-0.431	-0.469	-0.508	-0.547	-0.585	-0.624	-0.662	-0.701	-0.739	-0.777	-10
0	0.000	-0.039	-0.079	-0.118	-0.157	-0.197	-0.236	-0.275	-0.314	-0.353	-0.392	0
DEG C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	DEG C
0	0.000	0.039	0.079	0.119	0.158	0.198	0.238	0.277	0.317	0.357	0.397	0
10	0.397	0.437	0.477	0.517	0.557	0.597	0.637	0.677	0.718	0.758	0.798	10
20	0.798	0.838	0.879	0.919	0.960	1.000	1.041	1.081	1.122	1.162	1.203	20
30	1.203	1.244	1.285	1.325	1.366	1.407	1.448	1.489	1.529	1.570	1.611	30
40	1.611	1.652	1.693	1.734	1.774	1.817	1.858	1.899	1.940	1.981	2.022	40
50	2.022	2.064	2.105	2.146	2.188	2.229	2.270	2.312	2.353	2.394	2.436	50
60	2.436	2.477	2.519	2.560	2.601	2.643	2.684	2.726	2.767	2.809	2.850	60
70	2.850	2.892	2.933	2.975	3.016	3.058	3.100	3.141	3.183	3.224	3.266	70
80	3.266	3.307	3.349	3.390	3.432	3.473	3.515	3.556	3.598	3.639	3.681	80
90	3.681	3.722	3.764	3.805	3.847	3.888	3.930	3.971	4.012	4.054	4.095	90
100	4.095	4.137	4.178	4.219	4.261	4.302	4.343	4.384	4.426	4.467	4.508	100
110	4.508	4.549	4.590	4.632	4.673	4.714	4.755	4.796	4.837	4.878	4.919	110
120	4.919	4.960	5.001	5.042	5.083	5.124	5.164	5.205	5.246	5.287	5.327	120
130	5.327	5.368	5.409	5.450	5.490	5.531	5.571	5.612	5.652	5.693	5.733	130
140	5.733	5.774	5.814	5.855	5.895	5.936	5.976	6.016	6.057	6.097	6.137	140

tabel A3: Thermospanning van Koper-Constantaan volgens het Omega
Temperature Measurement Handbook in °C t.o.v. 0°C

DEG C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	DEG C
THERMOELECTRIC VOLTAGE IN ABSOLUTE MILL VOLTS												
-90	-3.089	-3.110	-3.147	-3.177	-3.206	-3.235	-3.264	-3.293	-3.321	-3.350	-3.378	-90
-80	-2.788	-2.810	-2.849	-2.879	-2.909	-2.939	-2.970	-2.999	-3.029	-3.059	-3.089	-80
-70	-2.475	-2.507	-2.539	-2.570	-2.602	-2.633	-2.664	-2.695	-2.726	-2.757	-2.788	-70
-60	-2.152	-2.185	-2.218	-2.250	-2.283	-2.315	-2.348	-2.380	-2.412	-2.444	-2.475	-60
-50	-1.819	-1.853	-1.886	-1.920	-1.953	-1.987	-2.020	-2.053	-2.087	-2.120	-2.152	-50
-40	-1.475	-1.510	-1.544	-1.579	-1.614	-1.648	-1.682	-1.717	-1.751	-1.785	-1.819	-40
-30	-1.121	-1.157	-1.192	-1.228	-1.263	-1.299	-1.334	-1.370	-1.405	-1.440	-1.475	-30
-20	-0.759	-0.796	-0.830	-0.867	-0.903	-0.940	-0.976	-1.013	-1.049	-1.085	-1.121	-20
-10	-0.383	-0.421	-0.458	-0.496	-0.534	-0.571	-0.608	-0.646	-0.683	-0.720	-0.757	-10
0	0.000	-0.039	-0.077	-0.116	-0.154	-0.193	-0.231	-0.269	-0.307	-0.345	-0.383	0
DEG C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	DEG C
0	0.000	0.039	0.078	0.117	0.156	0.195	0.234	0.273	0.312	0.351	0.391	0
10	0.391	0.430	0.470	0.510	0.549	0.589	0.629	0.669	0.709	0.749	0.789	10
20	0.789	0.830	0.870	0.911	0.951	0.992	1.032	1.073	1.114	1.155	1.196	20
30	1.196	1.237	1.279	1.320	1.361	1.403	1.444	1.486	1.528	1.569	1.611	30
40	1.611	1.653	1.695	1.738	1.780	1.822	1.863	1.907	1.950	1.992	2.035	40
50	2.035	2.078	2.121	2.164	2.207	2.250	2.294	2.337	2.380	2.424	2.467	50
60	2.467	2.511	2.555	2.599	2.643	2.687	2.731	2.775	2.819	2.864	2.908	60
70	2.908	2.953	2.997	3.042	3.087	3.131	3.176	3.221	3.266	3.312	3.357	70
80	3.357	3.402	3.447	3.493	3.538	3.584	3.630	3.676	3.721	3.767	3.813	80
90	3.813	3.859	3.906	3.952	3.998	4.044	4.091	4.137	4.184	4.231	4.277	90
100	4.277	4.324	4.371	4.418	4.465	4.512	4.559	4.607	4.654	4.701	4.749	100
110	4.749	4.796	4.844	4.891	4.939	4.987	5.035	5.083	5.131	5.179	5.227	110
120	5.227	5.275	5.324	5.372	5.420	5.469	5.517	5.566	5.615	5.663	5.712	120
130	5.712	5.761	5.810	5.859	5.908	5.957	6.007	6.056	6.105	6.155	6.204	130
140	6.204	6.254	6.303	6.353	6.403	6.452	6.502	6.552	6.602	6.652	6.702	140

fig. A1: De afgeleide $\frac{dU}{dt} = 2At + B$ voor de verschillende parameters die in tabel A1 gegeven worden.



Appendix B

Formules voor de foutbepaling in de kwadratische bewerking van de uitgangen van de Schoen-TFM-versterker.

We maken gebruik van het blokschema (fig. 1, § 4.1.).

A, B, A', B' zijn parameters zoals in formules 1 t/m 4, waaraan de gemodificeerde NTC-spanning voldoet en waarmee de berekening uitgevoerd wordt (de Schoen-parameters uit tabel A1).

$\alpha, \beta, \alpha', \beta'$ zijn de echte parameters van het thermokoppel.

We nemen aan dat de versterking A_2 op de juiste manier wordt weggewerkt.

$$t_{ber} = A' (pU + U_{ref})^2 + B' (pU + U_{ref}) + 15^\circ C$$

$$t_{ref} = A' U_{ref}^2 + B' U_{ref} + 15^\circ C$$

$$\Delta t_{ber} = t_{ber} - t_{ref} = A' p^2 U^2 + 2A' pU U_{ref} + B' pU$$

$$\Delta t_{echt} = t_{echt} - t_{ref} = \alpha' U^2 + \beta' U \text{ waarbij } U \cong B(t - t_{ref})_{ber} \text{ en } U_{ref} \cong B(t_{ref} - 15^\circ C)$$

met formules 1 t/m 4 krijgen we:

$$\frac{\Delta t_{echt} - \Delta t_{ber}}{\Delta t} = \frac{\Delta \Delta t}{\Delta t} = \left(\frac{p^2 A}{B^3} - \frac{\alpha}{\beta^3} \right) \beta^2 (t - t_{ref}) + 2B \left(\frac{Ap}{B^2} - \frac{\alpha}{\beta^2} \right) t_{ref} + \frac{B}{\beta} - p$$

$$\text{als } \alpha = A \text{ en } \beta = B : \frac{\Delta \Delta t}{\Delta t} \cong (p^2 - 1) \frac{A}{B} (t - t_{ref}) + 2(p - 1) \frac{A}{B} t_{ref} + 1 - p \cong 1 - p$$

$$\rightarrow p = 1 : \frac{\Delta \Delta t}{\Delta t} = 0 ; p = 1,02 : \frac{\Delta \Delta t}{\Delta t} = - p,02$$

Als $\alpha \neq A$ en $\beta \neq B$ kunnen we (met $p = 1$) eenvoudig voor een aantal gevallen de fout uitrekenen. Het resultaat hiervan wordt gegeven in tabel 2 (§ 4.2.) met: A, B = Schoen Cu-const parameters,

α, β = chromel-alumel parameters van Kohnsiek of Omega.

Geraadpleegde literatuur

- Schoen, S. Handgeschreven dagboeken
(niet gepubliceerd) De Bilt
- Nieuwendijk, P.A.T. en J.G. van der Vliet
Beschrijving van het programmapakket t.b.v. de routine-
registratie te Cabauw.
KNMI V-306, De Bilt, 1978
- Kohsiek, W. en W.A.A. Monna
A fast response psychrometer
KNMI WR 80-4, De Bilt, 1980
- Driedonks, A.G.M., P.A.T. Nieuwendijk and C.J. Goes
A set of computer programs to process turbulence data
measured at the 200 m mast at Cabauw
KNMI WR 80-3, De Bilt, 1980
- Omega temperature measurement handbook,
1982.