



Koninklijk Nederlands
Meteorologisch Instituut
Ministerie van Infrastructuur en Milieu

Nauwkeurigheid van operationele temperatuurmetingen

Jan Bijma

De Bilt, 2012 | Technical report; TR-328

Nauwkeurigheid van operationele temperatuurmetingen

Versie 1.0

Datum 16 februari 2012
Status Definitief

Inhoudsopgave

Samenvatting	2
1. Inleiding.....	3
2. Standaarden	6
3. KNMI Pt-500 sensoren.....	11
4. Kalibratie.....	14
5. SIAM	16
6. Opstelling	18
7. Meetonzekerheden.....	22
8. Foutanalyse	24
9. Samenvatting van de meetonzekerheden	25
Referenties.....	26
BIJLAGE 1 - Opstelling	27
BIJLAGE 2 - Onzekerheid van de SIAM	28
BIJLAGE 3 - Fluke 7341 ijkvat.....	29
BIJLAGE 4 - Nauwkeurigheid van de Agilent DMM 34970A.....	30
BIJLAGE 5 - IJkresultaten.....	32
BIJLAGE 6 - Zelfopwarming	35
BIJLAGE 7 - Steeleffect	39
BIJLAGE 8 - Responsie.....	42

Samenvatting

In het operationele meetnet worden temperaturen gemeten in de bodem, op 10 cm boven het maaiveld en op 150 cm boven het maaiveld.

De WMO eist een onzekerheid beter dan 0.1°C voor de gemiddelden, en 0.3 °C voor de extremen, maar geeft aan dat deze eisen niet haalbaar zijn. Men rekent daarom met onzekerheden die twee maal zo groot zijn.

In dit onderzoek zijn de factoren die de onzekerheid beïnvloeden onderzocht en gekwantificeerd. Drie invloeden zijn in kaart gebracht: de sensor, de kalibratie en de SIAM.

De onzekerheden, toe te schrijven aan de drie factoren zijn samengevat in onderstaande tabel.

	Onzekerheid (°C)
Sensor	0.10
Kalibratie	0.01
SIAM	0.03

Hoewel geen onderdeel van het onderzoek, is ook een schatting gemaakt van de invloed van de opstelling. De fouten geïntroduceerd door de opstelling (de stralingsafscherming) zijn weersafhankelijk, en hebben vooral invloed op de extremen. De invloed op de daggemiddelden is veel minder van belang. Bij de 10'-gemiddelden kunnen de fouten wel significant zijn, in de orde van 1 °C. Ook uurgemiddelden kunnen rond de dagmaxima en -minima een fout opleveren in dezelfde orde van grootte.

	Onzekerheid in de gemiddelden (°C)	Onzekerheid in de extremen (°C)
Opstelling	0.10	1.0

Het rapport behandelt alleen metingen die op de waarneemstations worden gedaan. Andere temperaturen zoals remote sensing technieken, scheeps- en vliegtuigwaarnemingen worden buiten beschouwing gelaten.

In de hoofdstukken 1-9 wordt een analyse van de verschillende foutenbronnen gemaakt. In de bijlagen staan details over de herleiding van de kwantitatieve onzekerheden. Voetnoten worden aangegeven met een nummer in superscript. Nummers tussen teksthaken [] hebben betrekking op een referentie uit de referentielijst (zie blz 26).

1. Inleiding

In het operationele meetnet worden drie temperaturen gemeten.

- luchttemperatuur op 150 cm hoogte,
- luchttemperatuur op 10 cm hoogte,
- bodemtemperaturen¹ tot op 1 m diepte.

Het operationele net voorziet niet in de meting van *ground*- of *surface* temperaturen. Ook watertemperaturen worden buiten beschouwing gelaten.

Eisen

De waarnemingen moeten voldoen aan de eisen van de Wereld Meteorologische Organisatie (WMO), die vastgelegd zijn in de *WMO Guide To Meteorological Instruments And Methods Of Observation*^[5].

Deze WMO-guide (verder aangeduid als *CIMO*²-guide) is een richtlijn, waaraan het KNMI gehouden is. Onderstaande tabel geeft een samenvatting van de eisen.

Tabel 1

Maximale onzekerheden zoals opgenomen in de WMO (CIMO) Guide

	Range	Resolution ³	Required uncertainty	Achievable uncertainty	Time-constant
Air temperature	-80..+60 °C	0.1 °C	-80..-40: 0.3 °C -40..+40: 0.1 °C +40..+60: 0.3 °C	0.2 °C	20 s
Extremes	-80..+60 °C	0.1 °C	-80..-40: 0.5 °C -40..+40: 0.3 °C +40..+60: 0.5 °C	0.2 °C	20 s

In Nederland wordt gemeten in het temperatuurbereik⁴ van -30..+40°C waarbinnen, ook voor de extremen⁵, een onzekerheid wordt geëist van 0.1 °C. De eisen zijn vastgelegd in het *KNMI Handboek Waarnemingen*^[6].

WMO maakt onderscheid tussen Level I data (de meetwaarden) en Level II data (de representatie van de al dan niet gecorrigeerde weergegeven grootte). In dit rapport beschouwen we de Level I data kwantitatief. De Level II data, waarin ook de opstellingseisen en de daarbij optredende onzekerheden een rol spelen, worden slechts globaal beschreven.

In de eisen zit een zekere discrepantie, omdat de *resolutie* gelijk is aan de vereiste *onzekerheid*. Dat houdt in dat de afrondingsfout in de presentatie (tot 0.05 °C) al voor de helft bijdraagt aan de totale toelaatbare onzekerheid. De CIMO-guide schept er geen

¹ Voor bodemmetingen zijn door de WMO geen nauwkeurigheidseisen opgesteld. Het KNMI hanteert voor bodemtemperaturen dezelfde onzekerheidsmarges als voor luchttemperaturen.

² Commission for Instruments and Methods of Observation

³ De geëiste resolutie heeft betrekking op Level II data in alfanumerieke codes (FM12,13,15 en 16). In binaire codes (o.a. BUFR) wordt sinds kort een resolutie geëist van 0.01°C. De definitie zal dan ook worden gewijzigd in "the most stringent resolution as determined in the Manual On Codes".

⁴ De 10 cm maxima kunnen in Nederland in extreme gevallen boven 40°C uitkomen. Het operationele meetsysteem is in staat om deze temperaturen buiten de geëiste range te meten (van -90..+90 °C), maar die niet met de gespecificeerde nauwkeurigheid worden gegarandeerd.

⁵ De WMO eist voor de extremen een minder stringente onzekerheid dan voor de gemiddelde temperaturen, omdat die historisch met andere instrumenten (min-max-thermometers) werden gemeten. KNMI berekent de extremen uit de zelfde metingen, en dus gelden hiervoor ook dezelfde eisen.

duidelijkheid over of de geëiste nauwkeurigheid *inclusief* of *exclusief* de afrondingsfout is gespecificeerd. Aangezien de afrondingsfout significant is, gaan we er echter vanuit dat die niet meegewogen wordt bij het bepalen van de *meetnauwkeurigheid*, maar alleen bij de bepaling van de nauwkeurigheid van Level II data.

Definities

De definities met betrekking tot de meetonzekerheden (incl. meet- en kalibratiefouten) zijn te vinden in *EA-4/02*^[2] en de *Guide to the Expression of Uncertainty*^[3] (GUM). Conform WMO-afspraken wordt bij het bepalen van de meetonzekerheid uitgegaan van een "confidence interval" van 95%. Dat wil zeggen dat minstens 95% van de waarnemingen voldoet aan de geëiste nauwkeurigheid. Bij een normaalverdeling is dat het geval als de standaarddeviatie niet groter is dan de helft van de eis ($k=2$).

Locaties

Temperatuur is een belangrijke parameter, die op vrijwel elk station wordt gemeten. Op een groot aantal stations staan meerdere opstellingen. Soms wordt er meer dan één locatie gemeten, soms zijn er redundante opstellingen ter verhoging van de bedrijfszekerheid.

Vanaf 1988 worden luchttemperaturen in het operationele meetnet gemeten met Pt-500 opnemers in schotelhutjes en SIAM's⁶. Van 1988 tot 2006 zijn er SIAM's in gebruik geweest van de eerste en tweede generatie, die qua specificaties niet van elkaar verschilden. De onzekerheid van de oude SIAM's is niet bekend, maar de ontwerp-specificatie was 0.1 °C.

Sinds 2006 wordt temperatuur gemeten met SIAM's van de derde generatie (DEGESI), die stabiel en nauwkeuriger zijn dan de oude types. De sensoren zijn onveranderd gebleven.

Voor dit rapport is aan een aantal foutenbronnen onderzoek verricht.

Ten tijde van het onderzoek zijn voorbereidingen begonnen om de KNMI Pt-500 sensor met SIAM te vervangen door een EE33 vocht/temperatuur sensor, met een Pt-1000 element. De eigenschappen van deze sensor vallen buiten de scope van dit onderzoek.

In dit rapport wordt het *huidige* temperatuurmeetsysteem beschreven, en worden alle relevante foutenbronnen en onzekerheden en hun herleidingen in kaart gebracht. Daarbij onderscheiden we verschillende invloeden waarvan een significante invloed wordt verondersteld:

- (1) *afwijkingen* van de sensor,
- (2) fouten geïntroduceerd door de *kalibratie*, en
- (3) fouten toe te schrijven aan de *elektronica* (SIAM) achter de sensor.

Verder is er nog een vierde factor:

- (4) de *opstelling* van de sensor (omgevingsinvloeden),

maar de fouten van de opstelling worden slechts gegeven ter referentie. Ze maakten feitelijk geen deel uit van het onderzoek, omdat ze niet goed kwantificeerbaar zijn.

De output van de SIAM is volledig digitaal, en *meet*-onzekerheden zijn in de verdere keten dus niet meer van belang.

⁶ SIAM = Sensor Intelligente Aanpassings Module

Onzekerheden

In de volgende hoofdstukken worden de vier aspecten nader beschouwd.

Een aantal van de onderzoeken naar de nauwkeurigheden, met name de onzekerheden rond de ijking, hebben plaatsgevonden in het kader van de ontwikkeling voor het bodemtemperatuur meetsysteem te Cabauw. De resultaten van deze onderzoeken zijn eerder gepubliceerd in 2010 in Technisch Rapport TR-313^[9].

In de loop van de jaren is de wijze van kalibreren en meten voortdurend gewijzigd. Het ijkvat werd in 2009 vervangen, en in 2011 werden procedures aangescherpt.

Dit rapport beschrijft de onzekerheden van het *huidige* meetsysteem, zoals dat gebruikt wordt vanaf eind 2011.

2. Standaarden

Om de onzekerheden van de temperatuurmetingen vast te stellen is het van belang om de standaarden en referenties goed te definiëren. In dit hoofdstuk geven we een toelichting op de gebruikte normen en herleidingstabellen.

Temperatuurschaal ITS 90

Temperatuur is een moeilijk te definiëren grootte. De fysische betekenis is "de gemiddelde chaotische bewegingsenergie per molecuul plus de beweging van atomen in moleculen." Deze is alleen met beperkte nauwkeurigheid vast te stellen met behulp van gasthermometers. Daarom wordt internationaal gewerkt met een standaardtemperatuurschaal, gebaseerd op een aantal ijkpunten die worden ontleend aan de triplepunten, smeltpunten en stollingspunten van een aantal stoffen zoals water en goud. Het kookpunt van water, ooit het referentiepunt voor de °C, behoort niet meer tot de ijkpunten van de schaal.

Omdat er regelmatig nieuwe technieken worden gevonden voor het meten van referentiepunten wordt de temperatuurschaal ook regelmatig herzien. Dat is voor het laatst gebeurd in 1948 (IPTS48⁷), 1968 (IPTS68) en 1990 (ITS90⁸). De WMO schrijft voor dat de temperaturen herleidbaar zijn naar ITS90.

Tabel 2

Referentietemperaturen van de ITS90 schaal

Equilibrium Conditions	T_{90} / K	$t_{90} / ^\circ\text{C}$
Vapor pressure of Helium	3...5	-270.15...-268.15
Triple point of equilibrium Hydrogen	13.8033	-259.3467
Vapor pressure of equilibrium Hydrogen (329 hPa) (1022 hPa)	~ 17 ~ 20.3	~ -256.15 ~ -252.85
Triple point of Neon	24.5561	-248.5939
Triple point of Oxygen	54.3584	-218.7916
Triple point of Argon	83.8058	-189.3442
Triple point of Mercury	234.3156	-38.8344
Triple point of Water	273.16	0.01
Melting point of Gallium	302.9146	29.7646
Solidification point of Indium	429.7485	156.5985
Solidification point of Tin	505.078	231.928
Solidification point of Zinc	692.677	419.527
Solidification point of Aluminum	933.473	660.323
Solidification point of Silver	1234.93	961.78
Solidification point of Gold	1337.33	1064.18
Solidification point of Copper	1357.77	1084.62

ITS90 geeft niet alleen de definitie van de ijkpunten, maar ook voorschriften hoe ze gemeten moeten worden. Meting met weerstandsonnemers van zuiver platina is daar één van.

⁷ IPTS = International Practical Temperature Scale

⁸ ITS = International Temperature Scale

Platina weerstandsthermometer standaarden volgens IEC751

Platina vindt – ondanks zijn hoge prijs – een breed toepassingsgebied in de industrie als RTD⁹. De reden daarvan is dat het materiaal lineair is over een groot gebied, en dat het toepasbaar is over een groot bereik, van -200..+850 °C. Het verband tussen weerstand en temperatuur van RTD's werd door Calendar rond 1890 vastgelegd in een kwadratische formule, die enkele decennia later door Van Dusen werd uitgebreid met een vierdemachts term, en staat sindsdien bekend als de *Calendar-Van Dusen vergelijking*.

$$R_t = R_0 + R_0 \alpha \left[t - \delta \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \left(\frac{t}{100} \right) - \beta \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \left(\frac{t}{100} \right)^3 \right]$$

De vergelijking wordt in de praktijk omgezet in een gemakkelijker hanteerbare vergelijking

$$R_t = R_0 * (1 + At + Bt^2 + C(t-100)*t^3)$$

Voor platina zijn de coëfficiënten B en C negatief. De laatste term wordt alleen toegepast in het gebied onder 0°C.

De temperatuur t wordt uitgedrukt in °C. R_0 is de weerstand bij 0.0 °C. Voor R_0 zijn verschillende standaarden in omloop. Het overgrote deel van de gangbare Pt-elementen is 100 Ω (Pt100). Voor referentiethermometers wordt doorgaans Pt1000 gebruikt. Ook Pt50, Pt200 en Pt500 worden wel gebruikt. Door het KNMI wordt om historische redenen Pt500 toegepast. Hogere weerstandswaarden hebben het voordeel dat ze bij dezelfde stroom een hogere spanning opwekken, en dus een lagere ruis hebben, of andersom dezelfde spanning bij een geringere stroom opwekken, en dus met minder vermogen. Een nadeel is echter de hogere kwetsbaarheid, omdat de platinadraad dunner is.

De coëfficiënten zijn afhankelijk van de zuiverheid van de gebruikte legering. De legering wordt in het algemeen gekarakteriseerd door de *gevoeligheid* (α). Daarmee wordt bedoeld de relatieve weerstandsverandering tussen 0° en 100°C. Voor zuiver platina, vooral gebruikt voor referentieopnemers (SPRT¹⁰), is $\alpha = 0.003925$.

Tot 1983 werden platina opnemers geleverd volgens verschillende standaarden. In Europa was dat in het algemeen de Duitse norm DIN 43760 (gebaseerd op IPTS48), maar in de USA werd gebruik gemaakt van de norm ASTM-E1137. De gedefinieerde gevoeligheid was 0.00385 (DIN) resp. 0.00392 (ASTM). Maar ook andere gevoeligheden werden gebruikt.

In 1983 werd de internationale norm IEC60751 van kracht, gebaseerd op de DIN-norm. De DIN43760 norm werd daarop voor platina sensoren¹¹ vervangen door de IEC norm, en heeft daarom nu in Duitsland het nummer *DIN EN 60751*. De IEC-norm vindt over de hele wereld ruime acceptatie, ook in de USA. In Nederland is de norm ingevoerd onder het nummer NEN-EN-IEC60751.

In de jaren na 1983 vonden drie amendementen plaats. De gevoeligheid van de standaard werd niet gewijzigd, maar de norm werd uitgebreid met test- en kalibratiemethodes. Ook werd de norm aangepast aan de nieuwe temperatuurschalen. De laatste norm is die van 2008, die in de jaren daarna ook in Nederland, Groot Brittannië en Duitsland werd overgenomen als nationale standaard.

⁹ RTD = Resistance Temperature Detector

¹⁰ SPRT=Standard Platinum Resistance Thermometer

¹¹ Voor nikkelsensoren geldt de DIN-norm nog altijd.

De huidige IEC-norm hanteert andere constantes voor de Calendar-Van Dusen coëfficiënten dan op het KNMI gebruikelijk is.

De KNMI norm dateert van 1977, op grond van gegevens van de leverancier van de toen gebruikte glaselementen type P7A (Degussa) die nog waren gebaseerd op de oude DIN-norm. Hoewel dit element in 1989 is vervangen door een keramisch element van Tempcontrol dat de nieuwe IEC-definitie volgt zijn de gebruikte coëfficiënten niet aangepast¹².

In de KNMI-standaard wordt ook de derde term weggelaten ($C=0$), omdat die in het klimatologisch gebied verwaarloosbaar is. De KNMI-standaard wordt toegepast bij de kalibratie van de sensoren en bij de omzetting van weerstand naar temperatuur in de SIAM.

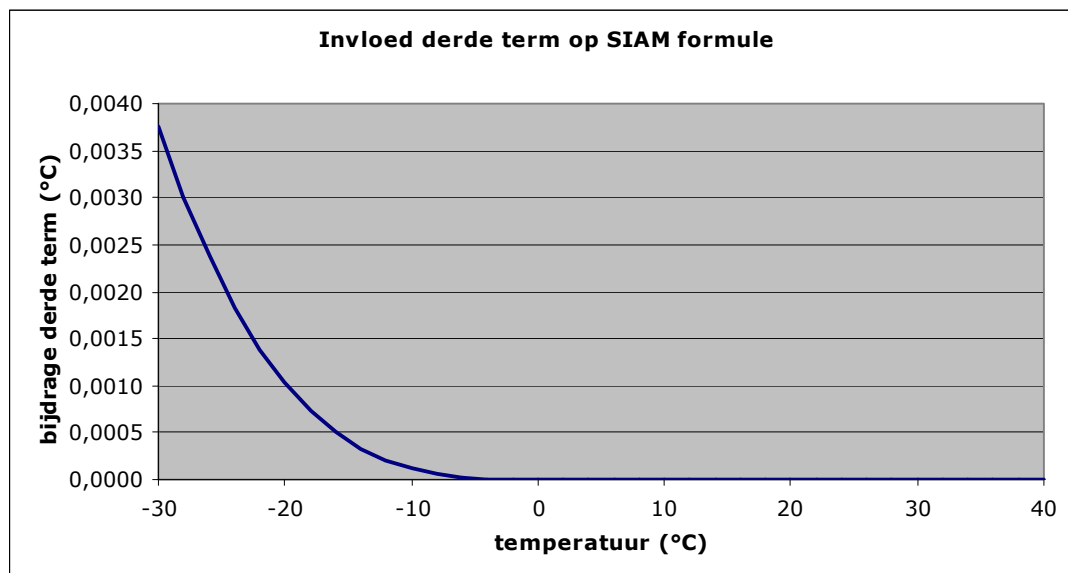
In onderstaande tabel zijn de verschillen samengevat.

Tabel 3

Verschillen tussen de toepasbare RTD normen

Norm	α	A	B	C
ASTME1137	0.00392	$0.39692 \cdot 10^{-2}$	$-0.58495 \cdot 10^{-6}$	$-0.42325 \cdot 10^{-11}$
DIN 43760	0.00385	$0.39080 \cdot 10^{-2}$	$-0.58019 \cdot 10^{-6}$	$-0.42735 \cdot 10^{-11}$
IEC 60751:2008	0.00385	$0.39083 \cdot 10^{-2}$	$-0.57750 \cdot 10^{-6}$	$-0.41830 \cdot 10^{-11}$
KNMI/Degussa 1977	0.00385	$0.390802 \cdot 10^{-2}$	$-0.580195 \cdot 10^{-6}$	$-0.42735 \cdot 10^{-11}$ ¹³

Het blijkt dus dat de KNMI-formule is gebaseerd op de oude DIN 43760 norm. Volgens DIN is de nieuwe DIN EN 60751 identiek, maar dat is niet helemaal waar, omdat de oude norm was gebaseerd op IPTS48, en de nieuwe op ITS90. Dat verklaart kleine verschillen die we zien tussen de oude norm, zoals KNMI die hanteert, en de nieuwe IEC norm. In onderstaande figuren zijn de verschillen zichtbaar gemaakt.

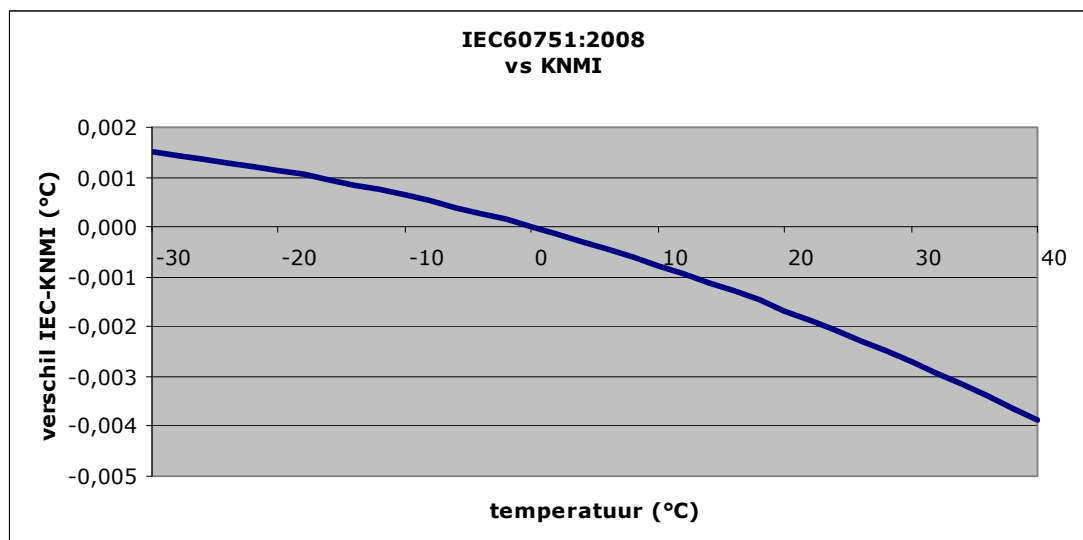


Figuur 1

De vierdemachtsterm speelt een zeer geringe rol. Alleen bij extreem lage temperaturen (<-20°C) is een verschil aanwezig van 1..3 mK. De SIAM geeft deze temperaturen iets te hoog.

¹² Merk op dat de ijkcurve van de oude glazen en de nieuwe keramische elementen niet verschilt, alleen hun specificatie, ten gevolge van de inmiddels veranderde temperatuurschaal.

¹³ De C-coëfficiënt wordt in de praktijk in de KNMI-formules op 0,0 gesteld.



Figuur 2

De KNMI formule wijkt enigszins af van de IEC60751:2008 standaard. De KNMI-formule geeft negatieve temperaturen iets te hoog, en positieve te laag. De verschillen zijn een gevolg van de toepassing van een andere temperatuurschaal. KNMI hanteert nog IPTS48, IEC hanteert ITS90. De grafiek toont het verschil tussen de formules, beide zonder de derde term.

Toleranties

De toleranties van de platinaopnemers worden door de normen ingedeeld in twee nauwkeurigheidsklassen. De oude DIN-norm onderscheidde daarbij twee klassen.

Klasse A: $\Delta t \pm(0.15 + 0.002|t|)$

Klasse B: $\Delta t \pm(0.30 + 0.004|t|)$

IEC heeft deze klassen overgenomen, maar noemt ze klasse 1 en 2, of ook wel (voor draadgewonden sensoren) W0.3 en W0.1.

In Europa worden de sensoren vaak beter gespecificeerd, waarbij gesproken wordt over 0.3 of 0.1 DIN, of liever 1/3 of 1/10 DIN. Deze terminologie houdt in dat de aangegeven tolerantie beter is dan 1/3 resp. 1/10 van de B-klasse.

De 1/3 DIN tolerantie is door de laatste IEC-release (2008) overgenomen als klasse AA. Alleen de 1/10 DIN norm voldoet in het klimatologisch bereik aan de vereiste tolerantie van 0.1°C. Deze klasse heeft een onzekerheid van

$$\Delta t \pm(0.03 + 0.0013|t|)$$

De temperatuur t is in °C. Bij +40 °C is de tolerantie 0.082 °C.

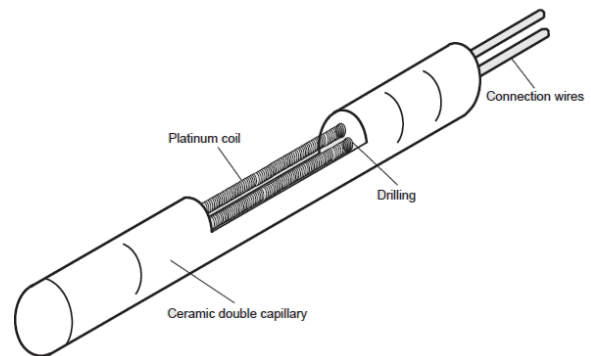
Uitvoeringsvormen

IEC 60751 onderscheidt twee verschillende uitvoeringsvormen, het F- en het W-type. Het F-type is gebaseerd op dunne-film technieken. De sensoren kunnen op die manier erg klein en goedkoop worden gefabriceerd. Je ziet ze vooral in niet-kritische industriële applicaties en in consumenten applicaties (o.a. automotive).

Voor meer kritische applicaties wordt het W-type toegepast, het draadgewonden type. Ze bestaan in twee verschillende uitvoeringen: glas en keramisch.



Figuur 3
Draadgewonden Pt-sensor in glas uitvoering.



Figuur 4
Draadgewonden Pt-senor in keramische uitvoering.

Het glazen type is buitengewoon schokbestendig, maar is niet bruikbaar over de volle meetrange tot 850 °C, omdat de platinadraad niet vrij kan uitzetten. Voor het klimatologisch bereik speelt dit echter geen rol.

Het keramische type heeft het voordeel dat de gewikkelde draad vrij hangt in een keramisch buisje, en dus vrijelijk kan uitzetten en krimpen. Er is dan geen mechanische belasting. Onder mechanische stress kan de ijking van het element gaan verlopen. De veroudering van de KNMI-sensoren is dan ook zeer klein. Het nadeel van dit type is, dat het gevoelig is voor trillingen, maar voor de KNMI-toepassing speelt dat geen rol.

3. KNMI Pt-500 sensoren

Historie

Het is niet bekend wanneer het KNMI begonnen is met temperatuurmeting met platina thermometers, maar vermoedelijk is dat al rond 1960 geweest. Er zijn in het archief nog tekeningen van Pt-sensoren uit 1957. In die jaren werd temperatuur veelal gemeten met kwikthermometers, en op een beperkt aantal stations (vliegvelden, De Bilt) met platinathermometers en hand-meetbruggen¹⁴. De platinasensoren werden in huis vervaardigd met glazen elementen type P7A van Degussa. De handmeetbruggen werden rond 1976 vervangen door een elektronische meetbrug (ontwerp Schoen). Het ontwerp werd in 1982 verbeterd door Bijma^[8]. Deze meetbruggen zijn nog op enkele plaatsen in gebruik waar gemeten wordt met SIAM's van de tweede generatie.

In 1987 is besloten de glazen elementen te vervangen door keramische elementen. De elementen zijn destijds door de firma Tempcontrol geleverd onder het typenummer Pt-500/65J. De eerste batch van 100 elementen is besteld op 13-09-1989. Op 6 juli 1990 is een tweede batch van 100 stuks besteld, waarbij een intentieverklaring is meegestuurd voor de levering van nog eens 100 stuks in december 1990. Of dat ook is gebeurd is niet meer te achterhalen. Al deze elementen hebben een tolerantie van 1/3 DIN.

Omdat die specificatie onvoldoende is voor een nauwkeurigheid van 0.1 °C over de hele meetrange zijn veel daarvan inmiddels afgekeurd.

In latere jaren werden volgens opgave van het IJKlab elementen bijbesteld met een nauwkeurigheid van 1/10 DIN, maar daarover zijn geen gegevens terug te vinden. Mogelijk gaat het om de elementen vanaf nr. 185.

In 2010 werd een deel van de thermometers omgebouwd door de firma Langkamp in Wijk bij Duurstede. Daarbij werden de elementen uit oude thermometers van het Gladheids Meld Systeem van Rijkswaterstaat ingebouwd in bestaande capillairs.

Deze sensoren zijn destijds gemaakt bij Tempcontrol op basis van KNMI-specificaties. De daarin gebruikte elementen zijn vermoedelijk ook gespecificeerd op 1/3 DIN, want de ijkcurves komen overeen met die van oudere KNMI-sensoren. Een deel van de afgekeurde sensoren is inmiddels voorzien van een element uit een GMS-sensor, en weer opnieuw in gebruik genomen. Glaselementen worden sinds 1989 niet meer toegepast. Alle elementen zijn nu van het draadgewonden keramische type.

De verschillende elementen zijn ingebouwd in de volgende sensoren:

Jaar van aanschaf	Specificatie	Nrs	Toepassing
1989,1990	1/3 DIN	01.02.203.001-01.02.203.185	Luchttemperaturen ¹⁵
		01.01.050.002-01.01.050.060	Bodemnaalden
2005 ¹⁶	1/10 DIN	01.02.203.186-01.02.203.210	Luchttemperaturen
2010 (uit GMS)	1/3 DIN	01.02.203.212-01.02.203.231	Luchttemperaturen

¹⁴ De hand-meetbruggen bestonden uit Wheatstonebruggen van het fabriekaat Bleeker. De weerstandsdecades werden met de hand zo ingesteld dat de brug in balans was. De ingestelde weerstandswaarde werd met behulp van tabellen omgezet in een temperatuur.

¹⁵ Een aantal afgekeurde sensoren uit deze reeks is nu voorzien van een GMS-element.

¹⁶ Het is niet zeker dat deze serie inderdaad heeft bestaan. Mogelijk waren dit nog resten van de in 1990 aangeschafte batch van 1/3 DIN elementen.

Onzekerheden

De onzekerheden in de ijkcurve van de Pt-500 sensoren zijn onderdeel van de kalibratieprocedure. De afwijkingen die hierbij optreden worden gekwantificeerd bij de kalibratie. Fabrieksspecificaties spelen dus geen rol in de vaststelling van de onzekerheid. Niettemin worden ze hier volledigheidshalve wel vermeld.

De IEC 60751 norm (in Europa vaak aangeduid met EN-60751) gaat uit van een verband tussen weerstand en temperatuur volgens de Callendar-Van Dusen vergelijking. (Zie hoofdstuk 2).

$$R_t = R_0 * (1 + At + Bt^2)$$

De vierdemachts term van de IEC-formule wordt door het KNMI niet gebruikt, omdat de bijdrage daarvan verwaarloosbaar is. (Zie hoofdstuk 2)

IEC hanteert standaard coëfficiënten voor A en B. KNMI gebruikt enigszins verouderde coëfficiënten volgens de oude norm DIN43760, maar het verschil is kleiner dan 0.002°C. De coëfficiënten worden zowel bij de meting (door de SIAM^[10]) als bij de kalibratie gebruikt¹⁷.

$$A = 0.00390802$$
$$B = -0.000000580195$$

De absolute nauwkeurigheid die hiermee bereikt kan worden is in het klimatologisch bereik niet groter dan 0.10 °C.

De *specificaties* van de sensoren zijn echter van ondergeschikt belang, omdat significante *afwijkingen* bij de kalibratie aan het licht komen. Sensoren met afwijkingen groter dan 0.10 °C worden afgekeurd.

Veroudering

Omdat er gebruik gemaakt wordt van keramische elementen, die alleen gebruikt worden in het zeer beperkte klimatologische bereik, is de veroudering uiterst gering.

De bewaartermijn voor ijkresultaten is 3 jaar. Historische kalibratiedata zijn daarom nog maar beperkt aanwezig, zodat het lastig is de veroudering van de elementen te kwantificeren (zie BIJLAGE 5 - IJkresultaten).

Uit de ijkresultaten is de veroudering dus niet vast te stellen. Uit de literatuur^[19] echter is op te maken dat veroudering alleen een rol speelt als het element wordt onderworpen aan mechanische stress. Stress treedt op wanneer het element te lijden heeft van mechanische (trillingen) of thermische (krimpen en uitzetten) belasting. In de KNMI-situatie is er van beide feitelijk geen sprake. De thermische belasting is gering, omdat er over een beperkt temperatuurbereik wordt gemeten. De literatuur spreekt over thermische stress wanneer er hoge temperaturen (>300°C) worden gemeten. De gebruikte keramische elementen zijn bovendien niet bijster gevoelig voor thermische stress, omdat de platinadraad vrijelijk kan krimpen en uitzetten. Glaselementen hebben hier meer hinder van.

We kunnen de veroudering (long term drift) daarom verwaarlozen over de relatief korte periode tussen twee ijkingen (<38 maanden).

¹⁷ Procedureel is er geen *expliciete* borging dat in de kalibratiesoftware en de SIAM-firmware dezelfde coëfficiënten worden gebruikt. Er is echter wel een *impliciete* borging, omdat de SIAM's worden gecontroleerd met *dummysensoren* die gekalibreerd worden op dezelfde wijze en met dezelfde kalibratiemiddelen, waarmee ook de sensoren worden gekalibreerd.

Verloop

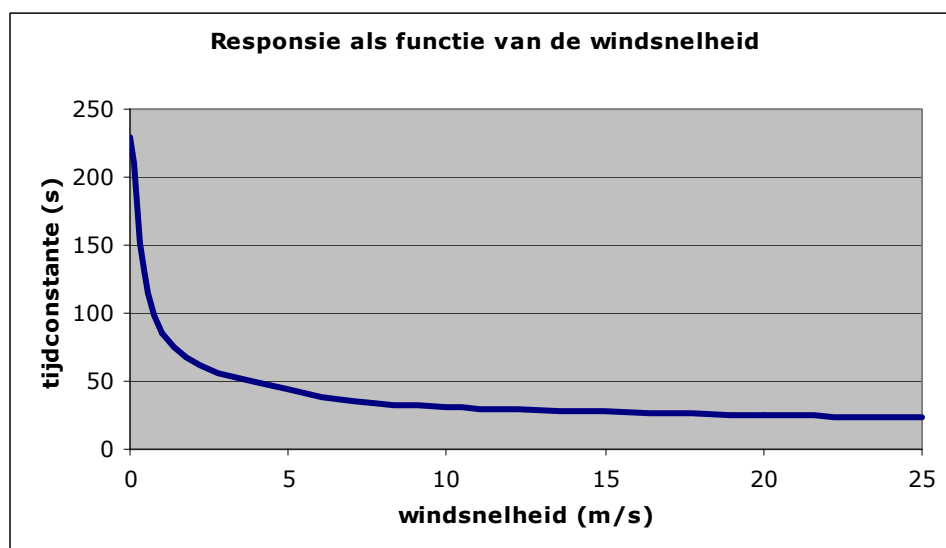
Verloop is iets anders dan veroudering van het *element*. De eigenschappen van de *sensor* wijzigen dan als gevolg van vervuiling of defecten. De gevolgen van vervuiling zijn lastig te meten, omdat nauwkeurig meten alleen kan in het ijkvat. Omdat daar gemeten wordt in ethanol lost het vuil op de sensor vermoedelijk onmiddellijk op. De invloed van vervuiling is alleen vast te stellen in lucht. Metingen in de klimaatkamer zijn echter niet nauwkeurig genoeg om invloed van vervuiling vast te stellen.

Verloop door defecten is in het verleden vaak voorgekomen, meestal door vochtproblemen t.g.v. onvoldoende afdichting. Met de huidige sensoren komt het probleem vrijwel niet meer voor.

Responsie

De sensoren zijn volgens overlevering zodanig ontworpen, dat de responsie in de orde is van de vereiste middelingstijden¹⁸.

De responsie van de sensor is echter in hoge mate afhankelijk van de warmteoverdracht van de lucht naar de sensor, en dus van de windsnelheid. Door windtunnelmetingen is de responsie als functie van de windsnelheid bepaald (BIJLAGE 8- Responsie).



Figuur 5

Het blijkt dat de tijdconstante van de sensor bij lage windsnelheid zeer hoog is, tot enkele minuten. Vanaf 1 m/s is de responsie in de orde van 60 seconden. Bij zeer hoge windsnelheden neemt dat af tot ca 30 seconden.

Omdat de luchttemperatuur bij lage windsnelheden in het algemeen stabiel is, is de responsie van de sensor hier van weinig belang.

Grote temperatuurgradiënten komen vooral voor bij buienfronten, waarbij de temperatuur zeer snel kan dalen. Dat gaat echter gepaard met hoge windsnelheden. Niettemin zal bij deze verschijnselen de temperatuur enigszins achter gaan lopen, wat kan leiden tot een overschatting in de orde van een graad¹⁹.

Op de gemiddelden en extremen²⁰ heeft de geringe responsie nauwelijks invloed.

¹⁸ De vereiste responstijd is volgens de CIMO-guide 20 seconden.

¹⁹ In extreme situaties kan de temperatuur bij de passage van een buienfront wel 8 °C dalen in minder dan 2 minuten. De overschatting die een gevolg is van een trage sensor is naar schatting ongeveer 1 °C.

²⁰ Extremen zijn gedefinieerd als de minimum en maximumwaarde van het lopende 1-minuut gemiddelde van de temperatuur. De SIAM bepaalt daarom de extremen ook uit de 1-minuutwaarden, en niet uit de 12"-samples.

4. Kalibratie

Alle Pt-500 sensoren worden regelmatig geijkt. De ijktermijn is 38 maanden. Bij de kalibratie in het ijklaboratorium worden de thermometers in een geroerd ethanolbad gehangen van een bekende temperatuur. De temperatuur van het bad wordt gemeten met een ASL referentiethermometer. Het vat en de gebruikte referentiethermometer zijn zeer nauwkeurig. Zowel homogeniteit als referentie zijn gespecificeerd binnen 2 mK. De weerstand van de sensoren wordt gemeten met een Agilent digitale multimeter type 34970A. De multimeter wordt jaarlijks geijkt.

IJKvat Fluke 7341

Het toegepaste bad is een Fluke 7341 ijkvat (Hart Scientific). De weerstanden van de sensoren worden gemeten bij temperaturen tussen -15 en +35 °C met tussenstappen van 5 °C, met het automatisch meetprogramma van het ijklab. Het beperkte ijkbereik is gebaseerd op historische gronden, want het oude ijkvat was niet goed in staat om te meten bij -20 °C (onvoldoende menging) en +40°C (teveel verdamping). In de bijlagen (BIJLAGE 3 - Fluke 7341 ijkvat) zijn de details opgenomen van de eigenschappen van het ijkvat. Hieruit blijkt dat de stabiliteit en de homogeniteit van het bad zeer goed zijn, en geen fouten introduceren groter dan 2 mK.

Referentiethermometers ASL F250 mkII en F500.

De beide referentiethermometers worden jaarlijks gekalibreerd bij VSL. De afwijking wordt gecompenseerd in de kalibratiesoftware, zodat alleen de onzekerheid in de kalibratie overblijft plus de spreiding op de correctiewaarden. De spreiding is 1 mK, de onzekerheid is volgens opgave van VSL niet groter dan 6 mK.

Agilent DMM 34970A

Voor de meting van de weerstand van de sensoren wordt gebruik gemaakt van een standaard digitale multimeter (DMM) van Agilent. Een switchunit met een relais-gestuurde multiplexer is onderdeel van de DMM. De multimeter wordt bestuurd en uitgelezen over een GPIB-bus²¹. De foutanalyse van de DMM is opgenomen in de bijlagen (BIJLAGE 4- Nauwkeurigheid van de Agilent DMM 34970A). De nauwkeurigheid is volgens opgave van de fabrikant 67 mΩ, maar bij de jaarlijkse ijkingen blijkt de onnauwkeurigheid niet groter dan 1 mΩ, met een onzekerheid van 10 mΩ. De totale onzekerheid in de temperatuur is vastgesteld op ongeveer 8 mK.

Afkeuringscriteria

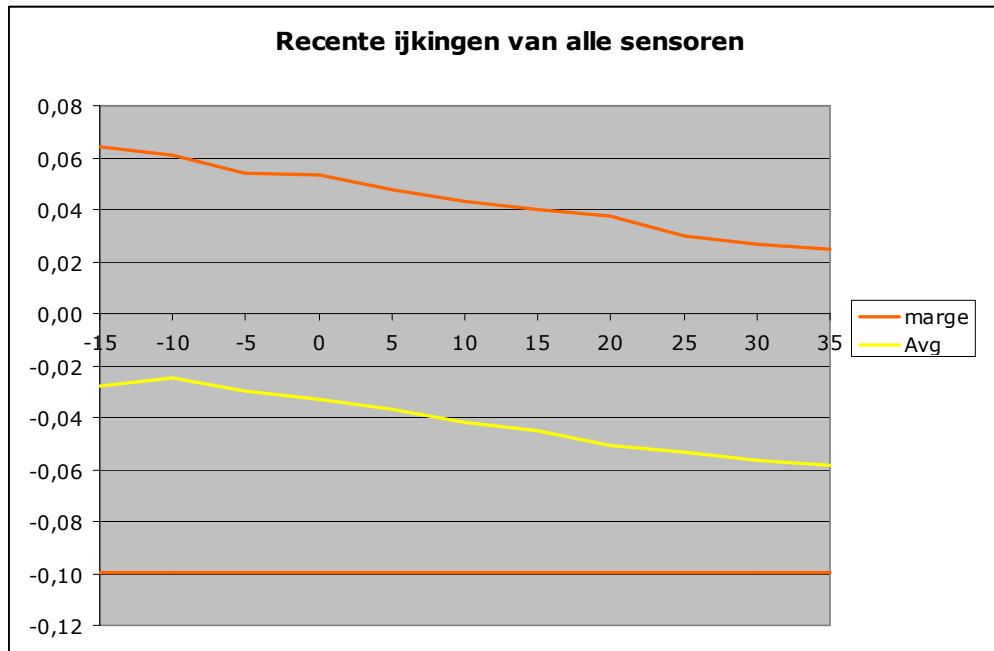
Het afkeuringskriterium voor de sensoren ligt volgens de procedures WI.K&M.09_1.1^[7] en HL_ALG_4.0 op een afwijking van 0.1 °C. Dit kriterium wordt toegepast op alle meetpunten. In de praktijk werden de fouten afgerond op 0.05 °C. Een afwijking van 0.12 °C werd afgerond op 0.10 °C, en dus goedgekeurd. Een afwijking van 0.13 °C werd afgerond op 0.15 °C en afgekeurd (zie BIJLAGE 5 - IJKresultaten). Sinds 2011 worden de criteria echter strikt gehanteerd. Alle ijkingen waarbij meetpunten worden gevonden met een afwijking >0.10°C worden afgekeurd.

*De afkeuringscriteria houden geen rekening met de onzekerheden in de kalibratie. Daarom heeft ook het afkeuringskriterium een onzekerheid, die in de orde is van 10 mK.
Ook houdt het afkeuringskriterium geen rekening met de meetfouten in het veld, die geïntroduceerd worden door de SIAM. De totale meetfout kan daarom groter zijn dan de gespecificeerde nauwkeurigheid van 0.1 °C.*

²¹ De GPIB-bus wordt ook wel aangeduid met de term HPIB (door Agilent/Hewlett-Packard) of IEEE-bus.

Onzekerheid

Onderstaande figuur laat zien hoe de meest recente ijkingen verlopen zijn. Daaruit blijkt een temperatuurafhankelijke systematische fout.



Figuur 6 De laatste ijkingen van alle operationele sensoren. Er is een systematische afwijking te zien die temperatuurafhankelijk is. De bijkomende 95% onzekerheid is $0,08^\circ$, maar die wordt voor hoge temperaturen afgekapt door het afkeuringskriterium.

De 95% onzekerheid is dus niet $\pm 0,1^\circ$, wat je zou verwachten, maar is temperatuurafhankelijk. In onderstaande tabel is de onzekerheid van de sensorkalibratie samengevat in drie temperatuurklassen.

Temperatuur °C	Afwijking	Onzekerheid	Maximale fout
-15..0	-0.02	-0.08..+0.08	-0.10..+0.06
0..25	-0.04	-0.06..+0.08	-0.10..+0.05
25..35	-0.05	-0.04..+0.08	-0.10..+0.03

Verbetertrajecten

Op grond van de bevindingen tijdens dit onderzoek zijn door het IJklaboratorium een aantal verbeteringen in gang gezet.

1. De inbedding van de afwijking van de referentiesensoren in de ijksoftware wordt geborgd in KMS-procedures.
2. Sensoren worden nu afgekeurd op grond van niet afgeronde ijkresultaten, bij elke ijktemperatuur afzonderlijk.
3. Sensoren met een afwijking $> 0,7^\circ$ worden gereviseerd met elementen uit oude GMS-sensoren.
4. Sensoren zullen worden geijkt over het hele gespecificeerde temperatuurbereik van $-30..+40^\circ\text{C}$, nu het nieuwe ijkvat dit mogelijk maakt.
5. De levensloop van sensoren wordt beter vastgelegd in het sensor beheersysteem (TopDesk).

5. SIAM

De weerstand van de sensor wordt bemonsterd met een SIAM. De SIAM bevat een 4-voudige multiplexer, zodat de sensoren kunnen worden gemeten met dezelfde electronica als twee referentieweerstanden .

Nauwkeurigheid

De nauwkeurigheid is geoptimaliseerd door een aantal maatregelen^[10]:

1. Om de opwarming ten gevolge van de meetstroom te minimaliseren (zie BIJLAGE 6- Zelfopwarming) is de excitatiestroom beperkt tot 1500 μA .
2. De meettijd is zo kort mogelijk, eveneens ter beperking van de opwarming. Er wordt van elk kanaal één monster genomen met een integratietijd van 360 ms. De herhalingstijd is 12 seconden.
3. De referentieweerstanden zijn nominaal 500 en 600 Ω . Ze zijn van het type Vishay S102KT. Dit type heeft een hoge absolute nauwkeurigheid en een zeer lage temperatuurdift. Over het klimatologisch bereik is de maximale drift minder dan 10 ppm, wat overeenkomt met 2.5 mK.

De spanning over zowel de weerstand als over de referentieweerstand wordt gemeten met een 24 bits AD-omzetter. De weerstandswaarde van de sensor wordt als volgt berekend.

$$R_t = R_{500} + (R_{600} - R_{500}) * \frac{U_t - U_{500}}{U_{600} - U_{500}}$$

Hierin is

- R_t de te bepalen weerstand van de sensor;
- R_{500} de nominale waarde van de 500.00 Ω referentieweerstand;
- R_{600} de nominale waarde van de 600.00 Ω referentieweerstand;
- U_t de door de AD-omzetter gemeten spanning over de sensorweerstand;
- U_{500} de door de AD-omzetter gemeten spanning over de 500 Ω weerstand;
- U_{600} de door de AD-omzetter gemeten spanning over de 600 Ω weerstand.

De weerstandswaarde wordt omgerekend naar temperatuur met de inverse Callendar-Van Dusen vergelijking:

$$t = \frac{-A + \sqrt{A^2 - 4 * B * (1 - R_t/R_0)}}{2 * B}$$

Hierin is

- R_t de hierboven berekende weerstand van de sensor;
- t de te bepalen temperatuur van de sensor in $^{\circ}\text{C}$;
- R_0 de nominale weerstand in Ω van de sensor bij 0.000 $^{\circ}\text{C}$;
- A de 1^e graads coëfficiënt van de Callendar-Van Dusen vergelijking;
- B de 2^e graads coëfficiënt van de Callendar-Van Dusen vergelijking.

Een analyse van de meetonzekerheden staat in de bijlagen (BIJLAGE 2 - Onzekerheid van de SIAM). Uit de analyse blijkt een onzekerheid van 0.029 $^{\circ}\text{C}$.

Resolutie

Alle metingen en berekeningen in de SIAM vinden plaats met een resolutie van minimaal 0.01 °C. In de output worden de resultaten echter afgerond conform WMO requirements op 0.1 °C²². De afrondfout is inherent aan de WMO-eisen, en wordt niet beschouwd als meetfout.

Veroudering van de referentieweerstanden

In het onderzoek naar de nauwkeurigheid van bodemtemperaturen in Cabauw^[9] is de long-term drift van de referentieweerstanden vastgesteld op 0.02 °C. De veroudering is verdisconteerd in de hierboven gegeven overall onzekerheid van 0.029 °C.

Afkeuringscriteria

In de SIAM vindt een aantal tests plaats op de meetwaarden, die de betrouwbaarheid van de waarneming verhogen. Testen kunnen leiden tot een waarschuwing (anomalie) of een afkeuring (fatale fout). Het resultaat wordt aangegeven door een statuscode. Bij een normale meting is dat het cijfer 0. Een anomalie wordt aangegeven met een kleine statusletter, maar de meetwaarden worden normaal in de output opgenomen. Fatale fouten worden aangeduid met een hoofdletter, waarbij de meetwaarden worden vervangen door slashes.

In de operationele temperatuur-SIAM DU1 vinden tests plaats volgens onderstaande tabel.

Tabel 4
 Statuscodes SIAM

Fatale fouten			
A	Siam reset	Na een reset zijn nog geen meetresultaten beschikbaar	
C	Transiënt	Er is een te grote sprong in de metingen waargenomen.	> 0.7° of < -1.0°
D	Bereikfout	De waarneming ligt buiten het meetbereik van de SIAM	-90..+90°C
N	Mastfout	De meetwaarde is verworpen omdat de mast waarin gemeten wordt (booreilanden) is neergeklapt.	
X	Siam fout	Interne SIAM fout	
Z	Afwezig	De sensor is door onderhoudstechnici uitgezet.	

Anomaliën			
c	Transiënt	Er is een verdacht grote sprong in de metingen waargenomen	> 0.3° of < -0.5°
d	Bereikfout	De temperatuur ligt buiten het gespecificeerde meetbereik, maar kon nog wel door de SIAM worden gemeten.	-40..+55°C
g	Kalibratie gainfout	De waarde van de referentieweerstand van 600 Ω wijkt verdacht veel af.	Ongekalibreerde waarde ±30%
h	Kalibratie offsetfout	De waarde van de referentieweerstand van 500 Ω wijkt verdacht veel af.	Ongekalibreerde waarde ±30%
x	Siam temperatuur te hoog	De interne temperatuur van de SIAM is te hoog	>+55°C

²² Voor binaire codes (o.a. BUFR) is de resolutie inmiddels verhoogd tot 0.01 °C, vermoedelijk wordt dit ook in de CIMO-guide als eis opgenomen.

6. Opstelling

Meetfouten die een gevolg zijn van de opstelling zijn moeilijk kwantificeerbaar, omdat een objectieve referentie ontbreekt. Ze vallen buiten de scope van dit onderzoek, maar omdat de fouten veel groter kunnen zijn dan de overige meetfouten, worden ze hier volledigheidshalve alleen globaal belicht.

Luchttemperatuur 150 cm

Tot eind jaren '80 werd de luchttemperatuur gemeten in een houten of kunststof Stevensonhut. In die jaren werd de hut vervangen door een schotelhut, die was afgeleid van een Vaisalahut, die weer was afgeleid van een Canadees ontwerp. De schotelhut van het model 04-02-030²³ is daarna niet meer ingrijpend gewijzigd.

De Pt-500 temperatuursensor is ondergebracht in zo'n ongeventileerde schotelhut. Dit is het standaardhutje waarmee zowel op synoptische als klimatologische stations wordt gemeten (BIJLAGE 1 - Opstelling). Op de meeste stations vinden vocht- en temperatuurmeting plaats in twee afzonderlijke hutjes, maar op enkele locaties, zoals Cabauw, Noordzeeplatforms, mistposten etc is dit niet mogelijk.

Er bestaat geen door de WMO aanbevolen standaardhut, omdat in verschillende klimaatregio's verschillende eisen worden gesteld aan het ontwerp van de hut. In de tropen is vooral het voorkomen van opwarming van belang, terwijl in polaire regio's de reflectie van sneeuwbedekking op de bodem een grote rol speelt.²⁴

Noot: In 2011 is een begin gemaakt met het vervangen van Vaisala vochtsensoren door EE33 sensoren. Omdat dit een gestookte sensor is, kan die niet in dezelfde hut worden ondergebracht als de temperatuursensor. Waar geen ruimte is voor twee hutjes is daarom een nieuw type hut ontworpen met twee gescheiden compartimenten. Er is echter nog geen wetenschappelijk onderzoek gedaan naar de fouten die deze hut introduceert. De hut is ten tijde van het schrijven van dit rapport nog niet vrijgegeven voor operationeel gebruik.

In de CIMO-guide Ch.1 para 1 wordt onderscheid gemaakt tussen drie foutenbronnen.

1. Niet-representativiteit van de locatie (o.a. beschutting en bodemsoort)²⁵;
2. Temperatuurverschil van de lucht *in* en *buiten* de hut (b.v. t.g.v. opwarming door zonnestraling);
3. Temperatuurverschil tussen de *sensor* en de lucht in het *hutje* (b.v. door slechte tijdconstante, door eigen opwarming en door mogelijke natte-bol effecten).

De fouten onder 1. zijn in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten.

De overige fouten zijn niet goed kwantificeerbaar, omdat vergelijking met een referentie niet mogelijk is. Wel kunnen vergelijkingen worden gemaakt met verschillende typen hutjes. Een dergelijk onderzoek is gedaan door Van der Meulen in de jaren 1989-1995. De voorlopige resultaten zijn gepubliceerd in 1998^[12], en meer volledig door Brandsma en Van der Meulen in 2007^[11].

Het blijkt dat het hutje te lijden heeft van verschillende versturende effecten.

1. Directe instraling van de zon;
2. Indirecte (gereflecteerde) instraling;
3. Directe en indirecte in- en uitstraling door het hutje zelf;

²³ De nummers verwijzen naar het documentatiesysteem voor technische tekeningen van WIS.

²⁴ In 2007 is de WMO gestart met een onderzoek naar het gedrag van hutjes in verschillende klimaatregio's. Voorlopig is alleen onderzoek gedaan in Algerije. Verder onderzoek in andere klimaatregio's heeft nog niet plaatsgevonden, zodat voor de Nederlandse situatie nog geen relevante gegevens voorhanden zijn.

²⁵ Door de afdeling WIS wordt de representativiteit van een station routinematig geïnspecteerd.

4. Onvoldoende ventilatie (windstilte), waardoor een microklimaat in het hutje ontstaat, en lange responsetijden.
5. Verstoring van het windveld rond het hutje;
6. Afkoeling door neerslag, mist, sneeuw en ijsafzetting;
7. Opwaartse warmtestuwing t.g.v. instraling op de paal.

Daarbij speelt vervuiling van het hutje een niet te verwaarlozen rol. Vervuiling verhoogt de absorptie van zonnestraling en vocht.

Brandsma en Van der Meulen vonden kleine nominale verschillen ($<0.2\text{ °C}$)²⁶ tussen verschillende typen ongeventileerde schotelhutjes.

In klimatologische data (maandgemiddelden) zijn de verschillen doorgaans kleiner dan 0.1 °C . In de dagextremen komen 's winters wel verschillen voor tot 0.5 °C en 's zomers tot 1.0 °C , want in sommige omstandigheden kunnen grote momentane verschillen optreden. De volgende omstandigheden zijn geïdentificeerd.

1. **Instraling door de zon** op het hutje bij lage windsnelheid. De opwarming van het hutje onder deze omstandigheden kan een overschatting veroorzaken van soms meer dan 1.0 °C . Deze situatie treedt vooral 's zomers op ten tijde van het dagmaximum.
2. **Mist** veroorzaakt condensatie op de sensoren en de lamellen van de hut. De effecten hiervan zijn echter klein.
3. **Sneeuw** op de bodem veroorzaakt sterke reflectie van zonnestraling aan de (niet afgeschermd) onderzijde van de hut. Dit kan –afhankelijk van het ontwerp van de hut- tot verschillen leiden. Er zijn effecten gemeten groter dan 0.5 °C . In uitzonderlijke omstandigheden kan het hutje aan de windzijde dichtsneeuwen, waardoor een extreem microklimaat in de hut ontstaat, omdat er weinig ventilatie optreedt. Het is niet bekend hoe groot de afwijking in die omstandigheden kan worden.



Figuur 7 Een dichtgesneeuwd hutje op 4 februari 2012, Lelystad. 's Nachts werden minima bereikt van -22 °C .

4. **Regen** kan bij hoge windsnelheid (of bij geventileerde hutten) aanleiding geven tot natte depositie op de sensor, waardoor een natte-bol effect ontstaat. De effecten zijn groot, maar in de ongeventileerde KNMI-hut zeldzaam.

²⁶ In het onderzoek is gerekend met 10'-gemiddelden om small-scale effecten (o.a. tgy turbulentie) te vermijden.

De hierboven genoemde omstandigheden duren in het algemeen niet lang. Invloeden van regen worden geschat op een duur van maximaal twee uur. Sneeuw en zonnestraling hebben vooral invloed tijdens maxima, en kunnen ook enkele uren duren.

Naar schatting is de invloed van de overige effecten op het 1'-gemiddelde 0.5..1.0 °C. De invloed op de maxima is even groot. Ook 10'- en uur-gemiddelden kunnen tijdens het dagmaximum een dergelijke afwijking vertonen. De invloed op daggemiddelden is veel kleiner, naar schatting niet meer dan 0.1 °C.

Luchttemperatuur 10 cm

De 10 cm temperaturen (ook wel ten onrechte grastemperaturen genoemd) worden gemeten in een hutje (model 04-02-050) dat van het standaardmodel is afgeleid. Het hutje heeft slechts één lamel en twee topschotels. Het is vanaf 1993 in gebruik. Daarvoor werd gebruik gemaakt van een platte kunststof hut.

In de jaren 1990-1993 is door Van der Meulen onderzoek gedaan naar de onderlinge verschillen tussen beide typen hutjes. De resultaten zijn in een interne notitie ten behoeve van het overleg met de toenmalige Klimatologische Dienst vastgelegd.^[14]

In dit overleg is op 15 februari 1993 besloten het schotelhutje als standaard te gaan invoeren. Van der Meulen vond verschillen, vooral overdag t.g.v. instraling, tot ongeveer 1 °C. Over de absolute nauwkeurigheid doet de notitie geen uitspraken.

Bodemtemperaturen

Bodemtemperaturen worden op een aantal stations gemeten op dieptes van 5, 10, 20, 50 en 100 cm. De temperaturen worden gemeten met soortgelijke platinaopnemers als voor de luchttemperatuur, maar in een veel langer capillair.

Rijkooft heeft in 1961 onderzoek gedaan naar de representativiteit van de metingen^[18], en kwam daarbij tot de conclusie dat die niet beter is dan enkele tienden graden.

Verschillen ontstaan door verschillen in de bodemgesteldheid (samenstelling, bodemvochtigheid, vegetatie) en door afwijkingen van de meetdiepte. Door de grote gradiënt in de bovenste bodemlagen is de meetdiepte kritisch. In 1962 werd echter nog gemeten met kwikthermometers. In 1981 werden ze vervangen door Pt-sensoren.

Tot 2005 werden de sensoren ingegraven door ze in een installatiegat te leggen en te bedekken met losse aarde. Deze methode leidt tot aanzienlijke fouten doordat de grond lange tijd nodig heeft om in te klinken, waarbij de uiteindelijke diepte varieert. Bovendien kan het inklinken gepaard gaan met grote mechanische krachten waardoor defecten kunnen optreden. Bij het uitgraven van oude opstellingen werden vooral in de bovenste aardlagen afwijkingen van de vereiste diepte gevonden tot enkele cm.

In 2005 ontwikkelden Mazee en Jilderda een verbeterde methode^[16] waardoor de representativiteit aanzienlijk is toegenomen. Wetenschappelijk onderzoek naar de absolute nauwkeurigheid ontbreekt, maar de afwijkingen worden geschat op enkele tienden °C.

Mistposten

Rond luchthaven Schiphol zijn een aantal waarneemposten aanwezig, waar meteorologische parameters worden gemeten ten behoeve van de zeer korte termijn verwachtingen (30 minuten) op de landingsbanen. De posten worden veelal aangeduid met de term *mistposten*, maar omdat de waarnemingen voor veel meer dan mist worden gebruikt zouden ze beter *trendposten* kunnen worden genoemd.

Op deze velden worden temperaturen gemeten op 50 cm en 8.5 m hoogte²⁷. De requirements voor deze metingen zijn niet gespecificeerd, maar aangenomen wordt dat ook hiervoor een onzekerheid van 0.1 °C geldt.^[17]

²⁷ Volgens specificatie zou de tophoogte 10 m moeten zijn, maar om praktische redenen wordt iets lager gemeten. De achterliggende algoritmen houden met de lagere hoogte echter geen rekening.

Andere opstellingen

Op sommige locaties wordt niet gemeten op de standaardhoogtes van 10 cm en 150 cm. Op de stations van de Koninklijke Luchtmacht (Klu) wordt gemeten op 0.5 en 9.0 meter, o.a. omdat voor de Klu metingen op cockpit- en motorhoogte van belang zijn. In Cabauw wordt op een groot aantal verschillende hoogtes gemeten tot 200 m. Op de Noordzeelocaties wordt temperatuur gemeten op arbitraire hoogtes tot 70 m, die bepaald worden door de afmetingen van de platforms.

7. Meetonzekerheden

De onzekerheden zijn in kaart gebracht volgens de richtlijnen van de *European co-operation for Accreditation*. Deze organisatie beschrijft de wijze waarop onzekerheden in metingen moeten worden bepaald^[2].

Alle metingen zijn gedaan met gekalibreerde meetmiddelen met herleidbare referenties. In de bijlagen zijn die nader toegelicht.

De verschillende onzekerheden in de metingen kunnen als volgt worden samengevat.

1. Referentiethermometer

De referentiethermometers die worden gebruikt bij de kalibraties, worden jaarlijks bij VSL²⁸ gekalibreerd, met een onzekerheid van 6 mK.

Voor de afwijking wordt in de software van de opstelling gecorrigeerd. De 90% onzekerheid van 6 mK blijft over als meetfout, plus de spreiding op de correctiewaarden van 1 mK. De totale fout komt daarmee op 7 mK.

2. Inhomogeniteit

De inhomogeniteit van het ijkvat is bepaald met metingen (zie BIJLAGE 3 - Fluke 7341 ijkvat). De metingen zijn uitgevoerd in ethanol, met een door het ijklaboratorium aangebrachte modificatie (RVS-binnenmantel) om de menging te verbeteren. De inhomogeniteit is daarbij vastgesteld op minder dan 1 mK.

3. Agilent 34970A

In bijlage 4 zijn de onzekerheden van de Agilent DMM bepaald. De totale onzekerheid kan worden geschat op 0.016 Ω . Dit komt overeen met een onzekerheid in de temperatuur van 8 mK.

4. Veroudering van de sensoren

De veroudering van de sensoren is gering, minder dan 1 mK per jaar. Omdat de sensoren elke drie jaar worden gekalibreerd speelt de veroudering geen rol van betekenis. Wanneer de bij kalibratie gevonden afwijking teveel is opgelopen wordt de sensor afgevoerd.

5. Niet-lineariteit van de sensoren

Het verband tussen weerstand en temperatuur wordt verondersteld te verlopen volgens het kwadratische Calendar-Van Dusen algoritme, waarvan de coëfficiënten zijn vastgelegd in EN-IEC-60751. Ook de niet-lineariteit is onderdeel van de kalibratieprocedure, en speelt dus geen afzonderlijke rol in de meetonzekerheid.

6. Thermische drift van de referentie weerstanden

De gebruikte referentieweerstand zijn van het type Vishay S102KT. Vishay specificeert voor de S102KT een toename van de weerstand van 10 ppm bij -15°C en 5 ppm bij

²⁸ VSL is onderdeel van de Holland Metrology Groep, voorheen de NMI-groep. VSL is een voortzetting van het Van Swinden Laboratorium, onderdeel van het Nederlands Meet Instituut.

+50°C. Hoewel de fout bekend is, en er dus voor gecorrigeerd zou kunnen worden blijkt die zo klein, dat correctie niet nodig is. Drift van 10 ppm komt neer op een weerstandstoename van ca 5 mΩ. Omdat beide referentieweerstanden dezelfde kant op driften, geeft dat alleen een offset en geen verandering van de hellinghoek van de ijkcurve. De offset geeft een fout in de temperatuurmeting van maximaal 2.5 mK.

7. Zelfopwarming

Tijdens de meting vloeit stroom door de sensor, en dissipeert daar vermogen in de vorm van warmte.

De opwarming die dat ten gevolg heeft is afhankelijk van de warmtecapaciteit van de sensor, de meettijd en de warmteafgifte aan de omgeving. Voor de bepaling van de zelfopwarming zijn uitvoerige metingen gedaan (zie BIJLAGE 6 - Zelfopwarming). Daaruit blijkt dat de zelfopwarming in ieder geval minder bedraagt dan 1 mK, en zeer waarschijnlijk niet groter is dan 0.5 mK.

8. Steeleffecten

Tijdens de metingen kan er warmte-uitwisseling plaatsvinden tussen het gevoelige deel van de sensor (het capillair) en de kabelaansluiting. Tijdens de meting in de atmosfeer bevindt de sensor zich op nagenoeg dezelfde temperatuur als de aansluitkabel. Daardoor vindt er nauwelijks warmtetransport plaats. Tijdens ijking echter kan er een groot temperatuurverschil optreden tussen het capillair in het bad en de kabel die zich daarboven in de vrije ruimte bevindt. Bij laboratoriummetingen (zie BIJLAGE 7- Steeleffect) is dat effect gekwantificeerd, en vastgesteld op minder dan 1 mK.

9. Instabiliteit van de excitatiestroom

De SIAM meet de sensorweerstand relatief ten opzichte van de referentieweerstanden. Alle afwijkingen in de SIAM worden daardoor gecompenseerd, met uitzondering van de "very short term drift" en de ruis, met name op de aangelegde meetstroom (excitatiestroom). Het effect daarvan is bij laboratoriumexperimenten^[9] vastgesteld op 1.2 mK (standaarddeviatie σ voor het 1'- gemiddelde). De 95% onzekerheid is $2 \cdot \sigma = 2.4$ mK.

8. Foutanalyse

In voorgaande hoofdstukken zijn de onzekerheden voor alle foutenbronnen bepaald. De bijdragen daarvan worden berekend volgens het EA- model^[2] en de GUM^[3]. Onderstaande onzekerheden gelden voor een 95% waarschijnlijkheid ($k=2$).

Kalibratie

	foutenbron	referentie	onzekerheid (mK)
1	Agilent 34970A weerstandsmeting	kalibratie VSL	8.0
2	Agilent drift en ruis	bijlage 5	2.5
3	Referentiethermometer	ijkbewijs NMI	7.0
4	Inhomogeniteit ijkvat	bijlage 4	<1 ²⁹
	Totale onzekerheid		10.9

Sensor

	foutenbron	referentie	onzekerheid (mK)
5	Veroudering	schatting TR-313 ^[9]	<1
6	Nonlineariteit	hoofdstuk 7	<1
7	Zelfopwarming	bijlage 6	<1
8	Steeleffecten	bijlage 7	<1
	Totale onzekerheid		0.0

De non-lineariteit is onderdeel van de kalibratieprocedure, en maakt daarom deel uit van de systematische fout in de tolerantie van de sensor. De tolerantie kent geen normaalverdeling, omdat sensoren buiten specificatie worden afgekeurd. De verdeling is uniform, en de onzekerheid kan niet kwadratisch worden gesommeerd. De tolerantie wordt bepaald bij de ijkprocedure. Het afkeuringskriterium is 0.1 °C.

SIAM

	foutenbron	referentie	onzekerheid (mK)
09	Tolerantie ref. weerstanden	Vishay spec	20.0
10	Thermische drift ref weerstanden	Vishay spec ³⁰	2.5
11	Instabiliteit excitatiestroom SIAM	bijlage 2	2.4
12	Veroudering referentieweerstanden	TR-313 ^[9]	20.0
	Totale onzekerheid		28.5

Volgens het EA-model moeten alle bekende foutenbronnen worden gekwantificeerd. In dit onderzoek onderscheiden we de volgende foutenbronnen:

- o De kalibratieopstelling in het ijklab u_k ;
- o Het verloop van de sensor u_t ;
- o De onzekerheid van de SIAM u_s .

Object	parameter	foutenbronnen	onzekerheid (mK)
Ijkopstelling	u_k	1, 2, 3, (4) ³¹	10.9
Sensor	u_t	(5, 6, 7, 8)	0.0
Siam	u_s	9, 10, 11,12	28.5

Behalve de onzekerheden is er een systematische fout t.g.v. de tolerantie van de sensor van maximaal 0.10 °C (zie hierboven onder 'sensor').

²⁹ Foutenbronnen kleiner dan 1 mK worden verder buiten beschouwing gelaten.

³⁰ Vishay specificeert een toename van de weerstand van 10 ppm bij -15°C en 5 ppm bij +50°C.

³¹ Tussen haakjes zijn de foutenbronnen vermeld die te klein zijn om een rol te spelen.

9. Samenvatting van de meetonzekerheden

In deze paragraaf gaan we nader in op de totale onzekerheid, en de criteria waaraan de verschillende processtappen zouden moeten voldoen om de gewenste overall-specificatie te halen. Daarbij hanteren we de volgende uitgangspunten.

- De gewenste overall specificatie is 0.1 °C (conform WMO-eisen).
- De omgevingscondities spelen een grote rol, en zijn nauwelijks kwantificeerbaar. We gaan er daarom vanuit dat de condities (hutje, opstelling) optimaal zijn, zodat de gespecificeerde nauwkeurigheid geldt voor de temperatuur in het hutje (level I data).
- De temperatuur in het hutje wordt gelijk verondersteld aan de temperatuur van de sensor.
- De temperatuur van de sensor wordt weergegeven door de SIAM. Dit getal wordt beschouwd als de gemeten temperatuur waarvoor de specificatie geldt.

In voorgaande hoofdstukken is de invloed van de onzekerheden in kaart gebracht.

1. De onzekerheid van de **SIAM** bestaat uit een meetonzekerheid van **29 mK**, inclusief veroudering.
2. De onzekerheid in de **ijkprocedure** wordt bepaald door de fouten die gemaakt worden bij de vaststelling van de temperatuur van het ijkvat en de fouten die gemaakt worden bij de meting van de sensorweerstand. De onzekerheid in de **badtemperatuur** is 0.007 °C voor de referentiethermometers en <0.001 °C voor de homogeniteit van het bad. We nemen aan dat de onzekerheid niet groter is dan 0.007 °C. De onzekerheid van de **weerstandsmeting** is 0.008 °C. De totale onzekerheid is **11 mK**.
3. De onzekerheid van de **sensor** bestaat uit de maximale toegestane fout bij kalibratie en de veroudering. De veroudering is verwaarloosbaar klein. Ook andere effecten (opwarming, steeffect etc) zijn verwaarloosbaar. De toelaatbare afwijking is echter maximaal **100 mK**. Daarboven wordt de sensor afgekeurd.

De totale onzekerheid is die van de meetnauwkeurigheid en de sensorfout bij elkaar opgeteld. De onzekerheid van de meetnauwkeurigheid is

$$u_m = \sqrt{(29^2 + 11^2)} = 31 \text{ mK}$$

Het totaal van de meetonzekerheden is zeer gering. Dat is te danken aan de grote nauwkeurigheid van de ijkingen en de kwaliteit van de SIAM.

De sensorfout mag niet kwadratisch worden gesommeerd, omdat die geen normaalverdeling volgt, maar een uniforme verdeling ($k=1$).

$$u = 100 + 31 = 131 \text{ mK}$$

afgerond is dit een totale onzekerheid van 0.13 °C.

De onzekerheid ten gevolge van de stralingsafscherming is niet kwantificeerbaar en valt buiten de scope van dit onderzoek. Onderzoek van Van der Meulen heeft aangetoond dat in bepaalde omstandigheden (natte depositie, sneeuw, lage windsnelheid bij grote instraling etc) afwijkingen tot ongeveer een graad kunnen optreden.

De hierboven gegeven onzekerheden zijn van toepassing op alle temperatuurmetingen met standaard KNMI-sensoren: Luchttemperatuur 150 cm, luchttemperatuur 10 cm, en bodemtemperaturen.

Een afkeuringscriterium van 0.07 i.p.v. 0.10 °C zou voldoende zijn om de gewenste onzekerheid te kunnen garanderen.

Referenties

Normen en standaarden

1. *Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors*, CENELEC IEC 60751:2008 ed 2.0, (2008)
2. *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration. Publication Reference EA-4/02*, European co-operation for Accreditation, (1999).
3. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, Joint Committee for Guides in Metrology - BIPM Paris (2008)³²
4. *Uitdrukken van de meetonzekerheid van kalibraties*, Raad voor Accreditatie – RvA-TK-2.8 (2004)³³
5. *Guide To Meteorological Instruments And Methods Of Observation - WMO-No. 8*, 7th edition Part I (2008)³⁴
6. *Handboek Waarnemingen*, KNMI (2001)
7. *Temperatuursensoren ijken*, Revisie nr. 2, KNMI - KMS Werkinstructie (IW-KM09-WIS), (2011)

Publicaties en rapporten

8. Bijma, J.R. – *Een lineaire meetbrug voor Platina temperatuur opnemers*, KNMI-INSA intern rapport. (1982)
9. Bijma, J.R. – *Bodemtemperatuurmeting Cabauw*, KNMI, Technisch Rapport TR-313 (2010)
10. Bijma, J.R. – *DU1-SIAM Temperatuur en Vocht*, versie 1.4, ID-30-052 (2010)
11. Brandsma, T. en Van der Meulen, J.P. – *Thermometer screen intercomparison*, International Journal of Climatology (2007).
12. Van der Meulen, J.P. – *A Thermometer Screen Intercomparison*, Instruments and Observing Methods Reports No. 70 (WMO/TD 877) (1998)
13. Van der Meulen, J.P. – *Some considerations for the intercomparison of radiation screens*, Instruments and Observing Methods Reports No. 74, WMO/TD 1028 (2000)
14. Van der Meulen, J.P. – *10 cm temperaturen*, KNMI interne notitie, (1993)
15. Van der Meulen, J.P. – *Pt500 elementen, definitieve keuze alternatief*, KNMI interne nota Okt-1/JvdM, (1987)
16. Mazee, A.N. en Jilderda, R. – *Verbetering Bodemtemperatuurmetingen*, KNMI, Technisch Rapport TR-280, (2005)
17. Mureau, R. e.a. – *Advies Mistposten Schiphol; project verwachtingen voor lage mist en stratus*, Intern Rapport IR2006-02 (2006)
18. Rijkooft, P. – *Vergelijkende metingen van de bodemtemperatuur in De Bilt*, Verslag V-102, (1961).
19. Saecker, D. – *An end to the uncertainty*, Chemical Plants and Processes 1/2010, (2010)

³² De guide wordt internationaal de GUM genoemd.

³³ Deze publicatie is voor het KNMI de norm. Als Nederlands instituut is het KNMI daaraan gehouden. In feite is de norm echter een vertaling van de guide (GUM) ref 3. De internationale *richtlijn* is dus in Nederland een *norm*.

³⁴ De richtlijn staat bekend als de CIMO-guide.

Bijlage 1 – Opstelling

BIJLAGE 1 - Opstelling



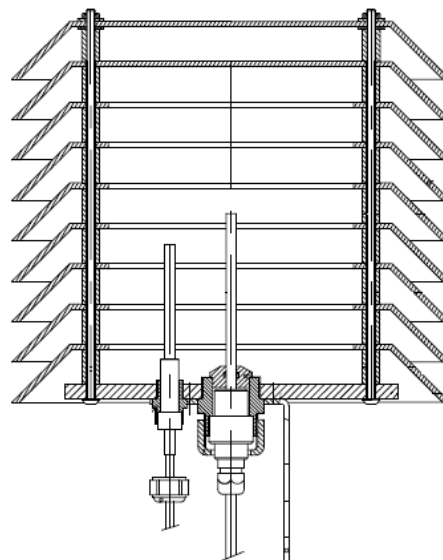
Figuur 8
De standaard opstelling op operationele stations. Links de vochtsensor, rechts de temperatuursensor. Op mistposten en op Noordzee platforms zijn alternatieve constructies in gebruik.



Figuur 9
Opengewerkte schotelhut type 04-02-030 met Pt-500 sensor.



Figuur 10
Schotelhut voor 10 cm temperaturen type 04-02-050.



Figuur 11
Bij opstellingen met EE33 vochtsensoren zit er naast de Pt500 nog een E+E Pt1000 sensor voor de berekening van het dauwpunt.

Bijlage 2 – Onzekerheid van de SIAM

BIJLAGE 2 - Onzekerheid van de SIAM

Ten behoeve van het onderzoek Bodemtemperaturen Cabauw is onderzoek gedaan aan de onzekerheden van de SIAM. De resultaten zijn beschreven in TR-313^[9]. Daaruit blijken de volgende onzekerheidsfactoren.

Standaardonzekerheid

De standaardonzekerheid wordt uitsluitend bepaald door de tolerantie van de referentieweerstanden (Vishay S102K). De resulterende tolerantie is naar schatting **ca 0.020 °C**.

Overige foutenbronnen m.b.t. de referentieweerstanden

De thermal EMF t.g.v. temperatuurverschil tussen de aansluitdraden is verwaarloosbaar.

Short-term drift

De short-term SIAM-stabiliteit wordt vrijwel alleen bepaald door de stabiliteit van de excitatiestroom. De standaarddeviatie van het 1'-gemiddelde is **0.002 °C**.

Medium-term drift

De middellange termijn stabiliteit wordt bepaald door de temperatuurstabiliteit van de referentieweerstanden. De maximale fout is, omgerekend naar temperatuur, minder dan **0.005 °C**.

Long-term drift

De lange termijn stabiliteit wordt uitsluitend bepaald door de veroudering van de referentieweerstanden. Gerekend kan worden met een onzekerheid van **0.020 °C**.

Afrondfouten

De SIAM presenteert de temperatuur in eenheden van 0.1 °C. De onzekerheid die daar het gevolg van is bedraagt 0.05°C. De afrondfout wordt echter buiten beschouwing gelaten, omdat zij geen gevolg is van fouten in het meetsysteem, maar van de WMO-specificatie.

Overall onzekerheid van de SIAM

De totale onzekerheid is opgebouwd uit de volgende componenten.

Component	Bijdrage in °C
Standaard onzekerheid	0.020
Short term drift en ruis	0.002
Thermische stabiliteit	0.005
Veroudering	0.020
Afrondfout	n.v.t.

De totale onzekerheid U kan worden geschat op

$$U = \sqrt{(0.020^2 + 0.002^2 + 0.005^2 + 0.020^2)}$$
$$U = \mathbf{0.029 \text{ °C}}$$

Bijlage 3 – Fluke 7341 ijkvat

BIJLAGE 3 - Fluke 7341 ijkvat

In 2009 is het ijkvat van het KNMI ijklaboratorium vervangen door een Fluke 7341 temperatuurbad. Het vat is gewijzigd om de menging te verbeteren. Het ijkvat wordt gebruikt in combinatie met een tweetal digitale thermometers van Automatic Systems Laboratories (ASL) met een Tempcontrol referentiesensor. De afwijking van de thermometers is door het VSL vastgesteld op minder dan 10 mK. Voor de afwijking wordt in de software gecompenseerd³⁵. De onzekerheid daarop bedraagt 6 mK. IJkingen vinden plaats in ethanol.

Tijdens testen voor het project "Bodemtemperatuur Cabauw" is de homogeniteit van het vat met ethanol vastgesteld. De resultaten daarvan zijn beschreven in TR-313^[9]. De homogeniteit is beter dan ± 2 mK bij constante insteekdiepte.

Bij kleine afstanden tussen de sensoren is de homogeniteit beter dan 1 mK.



Figuur 12

Het temperatuurijkvat in het ijklaboratorium. Rechts de beide referentiethermometers met aangesloten referentiesensor. Eén van de sensoren is ingestoken in het geroerde ethanolbad.

³⁵ De inbedding van de systematische afwijking van de referentie in de software is eind 2011 geborgd in procedures.

BIJLAGE 4 - Nauwkeurigheid van de Agilent DMM 34970A

De nauwkeurigheid van de Agilent DMM, waarmee de Pt500 weerstanden tijdens kalibratie worden gemeten, is onderzocht in TR313^[9]. De conclusies daarvan zijn onderstaand samengevat.

Specificaties

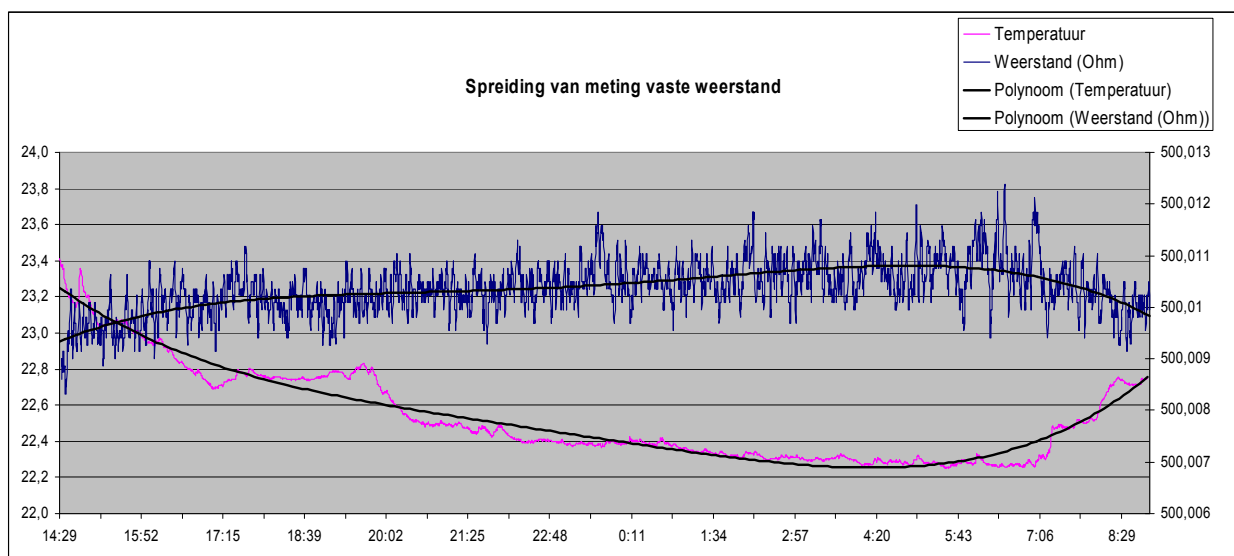
De nauwkeurigheid op het 1000 Ω bereik is 67 m Ω .

Het instrument wordt jaarlijks geijkt door Agilent. Bij de laatste ijking is de nauwkeurigheid vastgesteld op 1 m Ω . De onzekerheid op dat getal is vermoedelijk 10 ppm. Dat komt overeen met 10 m Ω .

Sinds 2011 wordt de switch-unit meegekalibreerd. De onzekerheid is ca 12 ppm, of 12 m Ω . De jaarlijkse drift is door Agilent niet nader gespecificeerd, maar zijn wel onderdeel zijn van de gespecificeerde nauwkeurigheid. Long term drift hoeft dus niet apart verrekend te worden. Bij de ijking van de DMM is in 2007 een afwijking gevonden van 0.0 m Ω , in 2008 0.67 m Ω en in 2009 1.0 m Ω . De *long term drift* kunnen we dus schatten op minder dan 1 m Ω per jaar.

Stabiliteit

De *short term drift* is bepaald door een stabiele referentieweerstand gedurende 24 uur te bemeten in de complete ijkopstelling. Daarbij werd ook de omgevingstemperatuur geregistreerd.

**Figuur 13**

Ruis en temperatuurgevoeligheid van de Agilent DMM

De polynomen laten duidelijk een temperatuurafhankelijkheid zien, in de orde van $-2 \text{ m}\Omega/\text{°C}$. De te verwachten temperatuurafhankelijkheid van de weerstand zelf is juist rond de 25 °C zeer klein, minder dan $0.5 \text{ m}\Omega/\text{°C}$. Het overgrote deel van de temperatuursinvloed is dus toe te schrijven aan de DMM.

IJkingen kunnen om deze reden niet worden gedaan bij erg afwijkende temperaturen. De omgevingstemperatuur in het IJklaboratorium is $21..26 \text{ °C}$ ³⁶. Het verloop is binnen dit

³⁶ De ijkingstelling in het KNMI IJklaboratorium bevindt zich in een geconditioneerde ruimte.

Nauwkeurigheid van operationele temperatuurmetingen

Bijlage 4: Nauwkeurigheid van de Agilent DMM 34970A

temperatuurgebied 5 mΩ (2.5 mK). Behalve temperatuursinvloed zien we ook ruis op de meting. De standaarddeviatie is 1.02 mΩ (0.5 mK).

Samenvattend

Samenvattend kunnen we de onzekerheden als volgt vaststellen

Component	Bijdrage in Ω
DMM	0.010
Switch	0.012
Thermische stabiliteit	0.005
Ruis	0.001

De totale onzekerheid kan worden geschat op

$$U = \sqrt{(0.010^2 + 0.012^2 + 0.005^2 + 0.001^2)} = 0.016 \Omega$$

→ 0.008 °C (8 mK)

BIJLAGE 5 - IJkresultaten

Vanaf 1988 is de kalibratie geautomatiseerd, en worden de ijkresultaten opgeslagen. Een deel daarvan kon worden achterhaald om historische analyses te doen.

Alle 859 thermometerijkingen (voor zover beschikbaar)³⁷ werden geanalyseerd. Daarbij zijn ook ijkingen die (soms ver) buiten de specificaties liggen. Die sensoren zijn uiteraard afgekeurd, maar zijn vaak na reparatie weer opnieuw in het bestand opgenomen.

De ijkingen zijn gesorteerd zowel op datum als op nummer, zodat problemen zowel aan de betreffende ijking als aan de sensor gerefereerd kunnen worden.

Sensoren die niet meer in het Topdesk bestand voorkomen zijn beschouwd als afgekeurd.

1. Wanneer van alle sensoren de laatste ijking wordt genomen (de ijking die relevant is voor afkeuring van een element), kunnen we ze indelen in vier categorieën.

Terecht goedgekeurd	115
Onterecht goedgekeurd	25
Terecht afgekeurd	23
Op andere wijze uit het bestand	33

Bij de 25 sensoren die onterecht goedgekeurd zijn gaat het in veruit de meeste gevallen om ijkingen tussen 2008-2011. De afwijkingen zijn vrij klein (minder dan 0.15°), maar toch meer dan 0.10° (de maximale afwijking die de werkinstructie en het Handboek waarnemingen toestaan). Inmiddels zijn de procedures aangescherpt, en leiden dergelijke afwijkingen tot afkeuring.

Er zijn 33 sensoren weliswaar uit het bestand, maar niet op grond van de ijkresultaten. Er waren kennelijk andere redenen om de sensor af te keuren, zoals beschadigingen of haperingen tijdens het gebruik, of de sensor is op een andere manier uit het bestand geraakt.

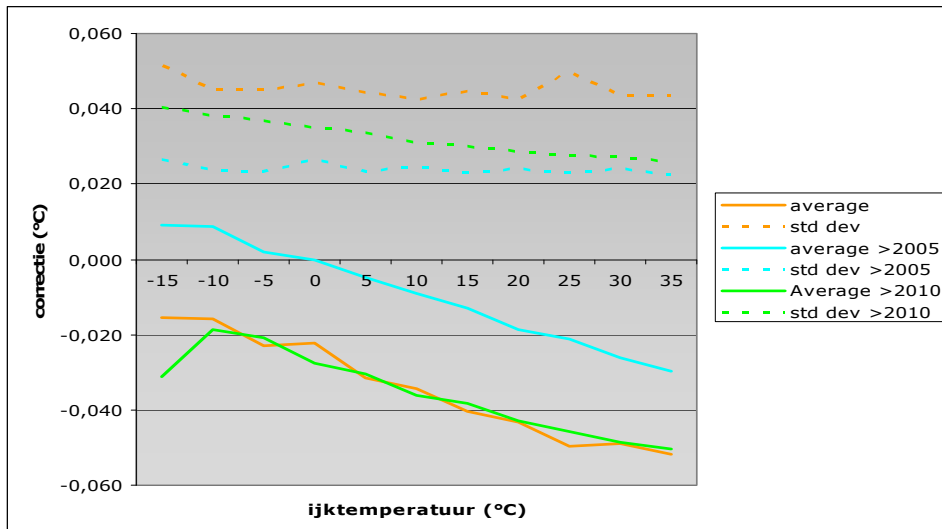
2. Figuur 14 laat zien wat de gemiddelde afwijking is bij de verschillende ijktemperaturen³⁸. Daarbij is ook de standaarddeviatie aangegeven. Opvallend is dat de sensoren die zijn ingezet ná 2004 (kennelijk nieuwe sensoren) opvallend veel beter zijn. Het is niet onmogelijk dat er rond 2005 nog een nieuwe batch Pt-elementen is aangeschaft met een specificatie 0/10 DIN. Dat zou verklaren waarom sensoren die ná 2004 zijn aangeschaft veel kleinere afwijkingen hebben. Of die bestelling er inderdaad is geweest viel niet te achterhalen. In de figuur is ook de ijking opgenomen van de sensoren met oude GMS-elementen, die naar verluidt zijn gespecificeerd op 1/10 DIN, maar dat is waarschijnlijk niet juist. De ijking is niet beter dan die van de oude sensoren. Wel is de spreiding iets minder.

³⁷ Een deel van de ijkingen is niet meer beschikbaar, omdat de betreffende datafiles corrupt zijn. De ijkingen tussen 10/1991 en 04/1994 en die tussen 06/2000 en 03/2005 zijn daarom niet in het overzicht opgenomen.

³⁸ De waarden in de grafieken en tabellen zijn niet de afwijkingen, maar de *correcties*. De werkelijke afwijkingen zijn echter gemiddeld positief, dat wil zeggen dat een te hoge weerstandswaarde wordt gemeten.

Nauwkeurigheid van operationele temperatuurmetingen

Bijlage 5 IJkresultaten

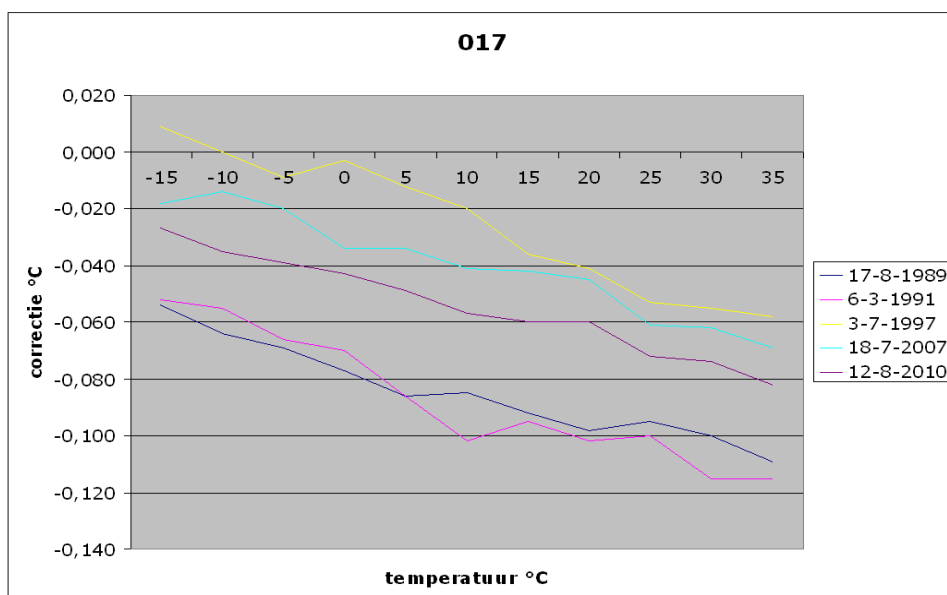


Figuur 14

Gemiddelde ijking van oude en nieuwe sensoren. Rood/Oranje zijn de oude sensoren, blauw zijn de sensoren vervaardigd na 2004, groen zijn de sensoren die zijn gemaakt met oude GMS-elementen.

Uit de figuur is ook op te maken dat er een duidelijke systematische afwijking bestaat, vooral bij hogere temperaturen. Vóór 2005 is er een afwijking zowel in nulpunt als in range. Na 2005 is er alleen een afwijking in de range. Vermoedelijk zijn de afwijkingen een gevolg van het fabricageproces. Over de hele lijne (oude en nieuwe elementen) is de fout 0.02 bij -15, tot 0.05 bij +35, met een standaarddeviatie van 0.06.

3. De afwijkingen bij oudere ijkings (voor 2000) zijn niet anders dan na 2000, zodat we mogen aannemen dat ijkmethodes al die jaren correct zijn geweest.
4. Het is de eerste keer dat de ijkings in een historisch perspectief zijn geplaatst. We zien daarbij soms interessante fenomenen, zoals grote sprongen in de ijking. Dat duidt op een probleem met de sensor, maar zolang de ijkings binnen specificatie liggen wordt hij toch goedgekeurd. Figuur 15 is daarvan een voorbeeld voor sensor nummer 017. De ijking is in de loop der jaren herhaaldelijk heen en weer gesprongen.



Figuur 15

Verskillende kalibratieruns van één sensor 1989..2010.

Nauwkeurigheid van operationele temperatuurmetingen

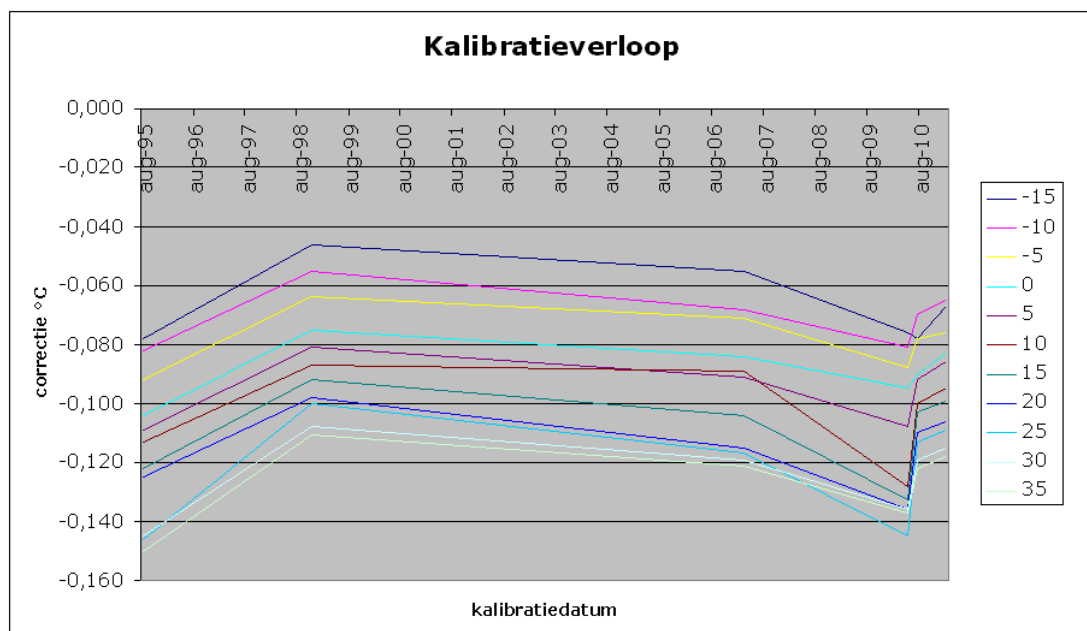
Bijlage 5 IJKresultaten

Onderstaand voorbeeld laat ook een geval zien van een meetreeks waarvan je op grond van het verloop kunt zeggen dat de sensor beter afgekeurd had kunnen worden. In 2009 is de sensor nog goedgekeurd op grond van het afkeuringskriterium van 0,125°C dat toen nog bestond, maar het verschil in ijking met de voorgaande kalibraties is zo groot, dat de sensor duidelijk onbetrouwbaar is.

Tabel 5 Voorbeeld van een sensor (068) die op grond van het historisch verloop beter kon worden afgekeurd.

KNMI-nr	datum	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35
01.02.203.068	4-12-1990	-0,016	-0,024	-0,035	-0,027	-0,048	-0,056	-0,067	-0,074	-0,064	-0,072	-0,074
01.02.203.068	8-7-1998	-0,032	-0,033	-0,041	-0,043	-0,054	-0,057	-0,062	-0,065	-0,060	-0,063	-0,071
01.02.203.068	30-8-2006	-0,029	-0,046	-0,045	-0,052	-0,052	-0,054	-0,062	-0,072	-0,074	-0,077	-0,091
01.02.203.068	12-2-2009	-0,056	-0,059	-0,067	-0,079	-0,077	-0,084	-0,091	-0,098	-0,101	-0,106	-0,107

5. Figuur 14 hierboven geeft het beste beeld van de afwijkingen van de operationele sensoren op dit moment. De gemiddelde fout is 0.02 bij -15 tot 0.05 bij +35, met een standaarddeviatie van 0.045. Dat is vrij veel, in aanmerking nemend dat de overall spec 0.10° is.
6. Wanneer we de ijkingen van één sensor uitzetten tegen de tijd valt iets anders op: een systematische offset, die afhankelijk is van de datum. Figuur 16 laat dit zien voor sensor 131. De ijkpunten liggen steeds even ver van elkaar, maar de offset varieert. Dat betekent dat bij een bepaald ijkmoment de weerstand van de sensor een vast aantal ohms hoger of lager wordt gemeten. Dit is vrijwel zeker te wijten aan de DMM waarmee de weerstand wordt gemeten. Het kan afhankelijk zijn van de multiplexerinput waarop het element is aangesloten, maar het kan ook zijn dat de ijking van de DMM is verlopen met de temperatuur in het lab of in de tijd.



Figuur 16 Systematische offsetsprongen bij verschillende kalibraties.

7. Figuur 16 laat ook zien dat de veroudering niet is vast te stellen. De variaties in de ijking zijn zodanig dat een trend niet waarneembaar is.

BIJLAGE 6 - Zelfopwarming

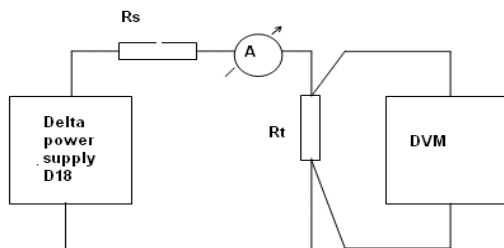
In het lab werd de opwarmingscoëfficiënt bepaald van de standaard KNMI Pt-500 sensoren. Met behulp van deze meetresultaten is af te leiden welke fouten worden gemaakt bij het meten met de SIAM en bij de ijking.³⁹

De zelfopwarmingscoëfficiënt ξ is gedefinieerd als het aantal graden Kelvin waarmee de temperatuur van de sensor stijgt wanneer in het element een vermogen van één milliwatt wordt gedissipeerd. De factor is afhankelijk van de fysieke uitvoering van de sensor, maar ook van de warmteoverdracht aan de omgeving.

Meetopstelling

De factor ξ is het meest ongunstig wanneer de warmteoverdracht naar de omgeving minimaal is. Dat is het geval in stilstaande lucht. Daarom is gemeten in een hoek van het lab, 20 cm van de wand en de tafelopbouw. Er werden geen temperatuurfluctuaties waargenomen, zodat mag worden aangenomen dat de omgeving stabiel is.

De weerstand van de sensor is bepaald door de spanning te meten over het Pt-element bij een nauwkeurig gemeten excitatiestroom, volgens onderstaand schema.



Figuur 17
Meetopstelling

Een stabiele voeding genereert een stroom I , die wordt bepaald door de regelbare weerstand R_s (stappenbank). De stroom wordt gemeten met een Prema 6001 DMM. De stroom wordt door het meetelement R_t gestuurd, de opgewekte spanning V wordt (vierdraads) gemeten met een Keithley 2000 DVM.

Er wordt eerst gemeten met een geringe stroom van ca 0.2 mA, en daarna bij 5.6 mA. De hogere stroom genereert een hoger vermogen. De bijbehorende temperatuurverhoging kan worden bepaald door de weerstand van het Pt-element te bepalen.

Meetresultaten

Tabel 6 Meetresultaten van de bepaling van de zelfopwarmingscoëfficiënt

t (s)	I (mA)	U (V)	P (mW)	R (Ω)	T ($^{\circ}\text{C}$)	Delta T ($^{\circ}\text{C}$)
0	5,648	3,08900	17,44667	546,91926	24,10	0,00
20	5,648	3,08999	17,45226	547,09455	24,19	0,09
40	5,648	3,09050	17,45514	547,18484	24,23	0,14
60	5,648	3,09106	17,45831	547,28399	24,29	0,19
80	5,648	3,09164	17,46158	547,38669	24,34	0,24

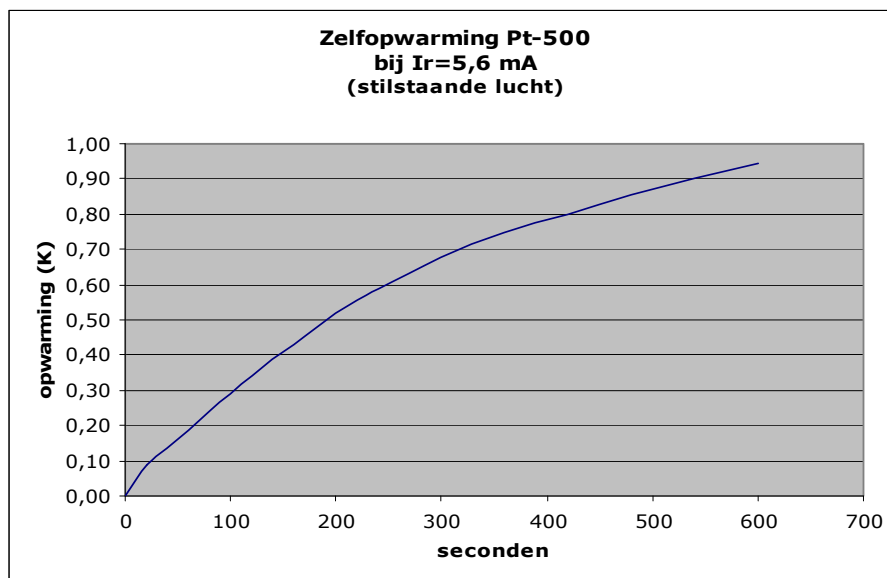
³⁹ De gevolgde methode is gelijk aan die waarmee de opwarming van de experimentele bodemtemperatuursensoren voor Cabauw werd bepaald (zie TR 313, *Bodemtemperatuurmeting Cabauw*, Bijma 2010)

Nauwkeurigheid van operationele temperatuurmetingen

Bijlage 6 Zelfopwarming

100	5.648	3.09220	17.46475	547.48584	24.39	0.29
120	5.648	3.09275	17.46785	547.58322	24.44	0.34
140	5.648	3.09325	17.47068	547.67174	24.49	0.39
160	5.648	3.09373	17.47339	547.75673	24.53	0.43
180	5.648	3.09420	17.47604	547.83994	24.57	0.47
200	5.648	3.09466	17.47864	547.92139	24.61	0.52
220	5.648	3.09507	17.48096	547.99398	24.65	0.55
240	5.648	3.09546	17.48316	548.06303	24.69	0.59
300	5.648	3.09641	17.48852	548.23123	24.77	0.68
360	5.648	3.09717	17.49282	548.36579	24.84	0.75
420	5.648	3.09777	17.49620	548.47203	24.90	0.80
480	5.648	3.09837	17.49959	548.57826	24.95	0.86
540	5.648	3.09889	17.50253	548.67033	25.00	0.90
600	5.648	3.09933	17.50502	548.74823	25.04	0.94

Om de 20 seconden (na 5 minuten om de minuut) werd een sample genomen. Omdat stroom en spanning bekend zijn kunnen P en R worden berekend. Uit R kan weer een temperatuur worden bepaald met de inverse Calendar Van Dusen formule. De gemeten kromme verloopt volgens onderstaande figuur.



Figuur 18

Opwarmingsverloop

Uit de resultaten kunnen de volgende gegevens worden afgeleid:

Tijdconstante	τ	320 sec
Opwarmingscoëfficiënt	ξ	0.064 °/mW
Initiële opwarmsnelheid	S	0.00019 °/mW.s

De initiële opwarmsnelheid is de factor die wordt gebruikt bij kortdurende pulsmetingen. De puls is zo kort, dat de opwarming als lineair kan worden beschouwd.

Opwarming door de SIAM

De SIAM meet elke periode t_m van 12 seconden gedurende een tijd $t_s = 300$ ms de weerstand met een excitatiestroom van 1.5 mA. De opwarming is het grootst bij maximale weerstand (580 Ω). De opwarming vindt plaats in periodes van 0.3 seconden, waarna het element weer afkoelt in bijna 12 seconden.

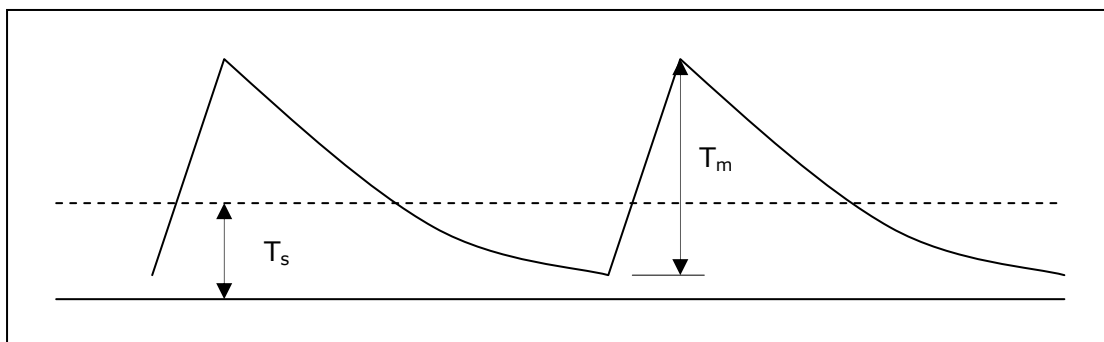
Grootheid	Waarde
I_t	1.5 mA
t_m	12 s
t_s	0.36 s

In de afkoelingsperiode vindt geen volledige afkoeling plaats, maar het element warmt langzaam op tot een *gemiddelde* waarde T_s bepaald door het *gemiddeld* vermogen P_s . Op die gemiddelde temperatuur ontstaat een zaagtand T_m t.g.v. de snelle opwarming tijdens de meting, gevolgd door een langzame afkoeling.

De opwarmingscoëfficiënt ξ en de opwarmingsnelheid S van de sensor in stilstaande lucht zijn bepaald bij de laboratoriumproeven die hierboven zijn beschreven.

Grootheid	Waarde
ξ	0.064 °/mW
S	0.00019 °/mW.s

In figuur 1 is het verloop van de temperatuur geschetst.



Figuur 19 Verloop van de temperatuur van de sensor bij periodieke meting

Gedurende de opwarming vindt de meting plaats. Het is niet te zeggen welke waarde dan precies gemeten wordt. Maar we houden rekening met het worst case scenario dat die waarde bepaald wordt juist op het maximum, in de top van de zaagtand. De waarden T_s en T_m laten zich eenvoudig aan de hand van de opwarmingseigenschappen bepalen.

De gemiddelde temperatuurstijging T_s is gelijk aan:

$$T_s = \xi * P_s \quad (1)$$

Het gemiddeld vermogen P_s wordt als volgt berekend:

$$P_s = P_m * t_s / t_m \quad (2)$$

Daarin is P_m het vermogen tijdens de meting.

Als we rekening houden met de worst case waarde voor R_t (bij +50 °C) = 580 Ω dan is

$$P_m = 0.0015^2 * 580 = 1.3 \text{ mW} \quad (3)$$

$$P_s = 1.3 * 0.36 / 12 = 0.039 \text{ mW} \quad (4)$$

Nauwkeurigheid van operationele temperatuurmetingen

Bijlage 6 Zelfopwarming

Met (1) levert dat een temperatuurstijging op van gemiddeld

$$T_s = 0.064 * 0.039 = 0.0025 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5)$$

De amplitude van de zaagtand is

$$T_m = t_m * P_m * S \quad (6)$$

$$T_m = 0.36 * 1.3 * 0.00019 = 0.000089 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7)$$

Het blijkt dat de opwarming van de sensor in de korte meettijd zo klein is, dat die kan worden verwaarloosd. De opwarming komt geheel voor rekening van de *gemiddelde* dissipatie, en is 0.0025 °C. Voor de operationele metingen is dat verwaarloosbaar.

Opwarming tijdens de ijking

Tijdens de ijking van de sensoren in het ijkvat van het ijklaboratorium zijn de condities anders dan bij het meten met de SIAM.

De sensoren worden bij het ijkproces voortdurend bemonsterd met de Agilent 34970A DMM. De exacte sampletijden zijn niet bekend, maar liggen in de orde van 100 ms per seconde per kanaal. De excitatiestroom is tijdens de meting 1 mA. Bij deze stroom is de dissipatie P_m in 580 Ω gelijk aan 0.58 mW.

Grootheid	Waarde
I_t	1.0 mA
t_m	1 s
t_s	0.1 s

In stilstaande lucht zou de opwarming gelijk zijn aan

$$T_s = \xi * P_m * t_s / t_m = 0.0037 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8)$$

In het geroerde ijkbad is de opwarming zeer veel kleiner, en dus ruimschoots verwaarloosbaar.

Opwarming tijdens experimenten

Bij experimenten (o.a. in de klimaatkamer) wordt veelal gemeten met een DMM zonder multiplexer. De sensor wordt dan voortdurend opgewarmd door de excitatiestroom. De stroom is bij de toepasbare DMM's in het algemeen 1 mA.

Bij deze stroom is de dissipatie P_m in 580 Ω gelijk aan 0.58 mW.

In *stilstaande lucht* is de opwarming gelijk aan

$$T_s = \xi * P_m = 0.037 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9)$$

Conclusies

De zelfopwarming tijdens de *operationele metingen* is bij benadering 0.002 °C. Bij de *ijking* is de opwarming zeer veel kleiner dan 0.004 °C. Voor operationele doeleinden zijn deze invloeden verwaarloosbaar.

Bij *experimenten* met sensoren in stilstaande lucht is de opwarming 0.037 °C als gemeten wordt met een gangbare DMM (o.a. Keithley, Agilent). Dat is niet altijd verwaarloosbaar.

BIJLAGE 7 - Steeleffect

Het steeleffect van een thermometer is het effect dat er door temperatuurverschillen tussen de body van de thermometer en het temperatuurgevoelige deel, warmte wordt uitgewisseld, waardoor een afwijking in de meting plaatsvindt.

In de hut is er geen sprake van een steeleffect, omdat de body en de sensor ongeveer dezelfde temperatuur aannemen. Bij ijking echter is er sprake van grote temperatuurverschillen tussen het verdikte deel (de "potseal") en de sensor. De sensor bevindt zich in de vloeistof, de potseal steekt daar bovenuit en neemt de kamertemperatuur aan.

Bij het ontwerp van de sensor is rekening gehouden met dat effect. De verbindingdraden tussen de Pt-500-elementen en de aansluitkabel zijn gemaakt van zeer dun materiaal met goede elektrische, maar slechte thermische geleiding.

Het steeleffect is bij laboratoriumproeven gemeten.

Daarvoor zijn twee Pt-500 thermometers ingestoken in een aluminiumblok. Thermische pasta zorgt voor een goed thermisch contact, zodat de thermometers dezelfde temperatuur hebben.

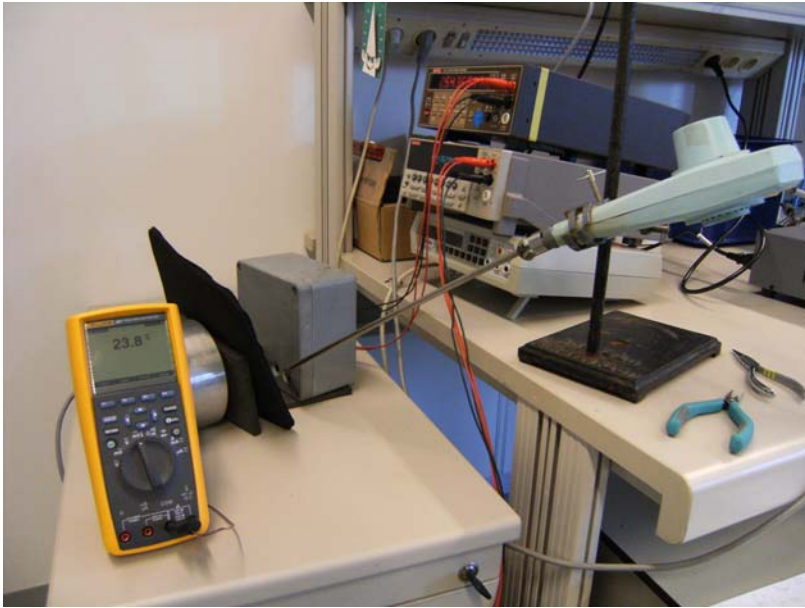


Figuur 20

De beide sensoren worden isotherm gehouden d.m.v. een aluminium blok. Door een RVS buis wordt hete lucht ingeblazen in het kabelcompartiment. Met isolatiemateriaal wordt het blok gescheiden van de hete lucht.

Van één van de thermometers is de aansluitkabel ondergebracht in een afgesloten kunststof kastje. Via een RVS buisje wordt hete lucht ingeblazen in het kastje, waardoor de kabel wordt opgewarmd. De weerstand van de beide sensoren wordt gemeten met een tweetal digitale multimeters (Keithley 2000 en Keithley 199). De temperatuur in het kastje wordt gemeten met een temperatuurprobe en een Fluke 287 handheld DMM.

Bijlage 7 - Steeeffect

**Figuur 21**

Meetopstelling voor de bepaling van het steeffect

Gedurende de opwarming van de kabel werden de meetwaarden opgenomen volgens onderstaande tabel (T_k = kabeltemperatuur, R_{dut} = weerstand van de sensor met verwarmde kabel, R_{ref} = weerstand van de sensor met onverwarmde kabel).

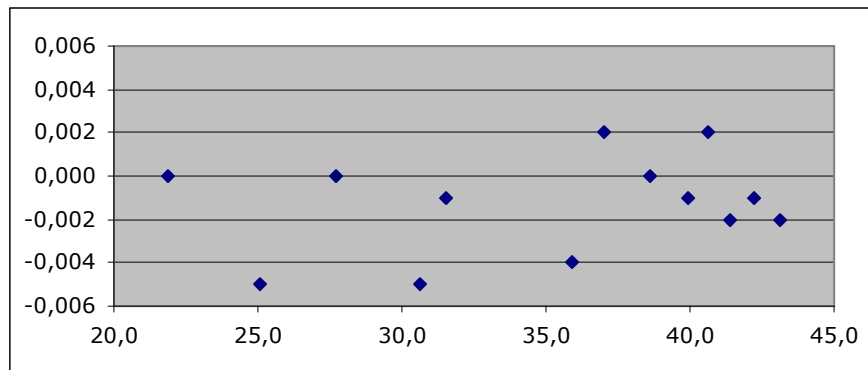
T_k	R_{dut}	R_{ref}
21,9	543,677	543,530
25,1	543,832	543,680
27,7	543,847	543,700
30,6	543,872	543,720
31,5	543,938	543,790
35,9	543,921	543,770
37,0	543,895	543,750
38,6	543,907	543,760
39,9	543,958	543,810
40,6	543,985	543,840
41,4	544,009	543,860
42,2	544,048	543,900
43,1	544,189	544,040

Er is een systematisch verschil tussen de twee weerstanden van ongeveer 0.15Ω . Dit is een gevolg van een systematische afwijking van de Keithley 199.⁴⁰

De hiervoor gecorrigeerde verschillen tussen beide sensoren zijn uitgezet in onderstaande grafiek.

⁴⁰ De Keithley 199 is geen referentieinstrument, en wordt niet gekalibreerd. Bij bemonstering van beide sensoren met *alleen* de Keithley 2000 was het verschil 0.006Ω .

Bijlage 7 - Steeleffect

**Figuur 22**

Gecorrigeerd verschil (Ω) over het gemeten temperatuurbereik tussen de sensoren met en zonder verwarmde kabel. De metingen zijn gedaan bij opwarming van 20..45 °C. Er is geen trend waarneembaar.

Uit de figuur is duidelijk dat de kabelverwarming geen invloed heeft op de meting. Kennelijk is de warmteoverdracht van de kabel naar het element zeer gering. De geringe verschillen (max 0.005 Ω zijn toe te schrijven aan afrondfouten⁴¹.

Verificatie

Het laboratoriumresultaat werd geverifieerd in het ijklab. Daarvoor werd een standaard ijking gedaan met vier sensoren. Daarbij zitten de capillairs van de sensoren en van de referentiesensor in de vloeistof, maar de potseals zitten in de vrije lucht.

Achtereenvolgens werden de volgende experimenten gedaan:

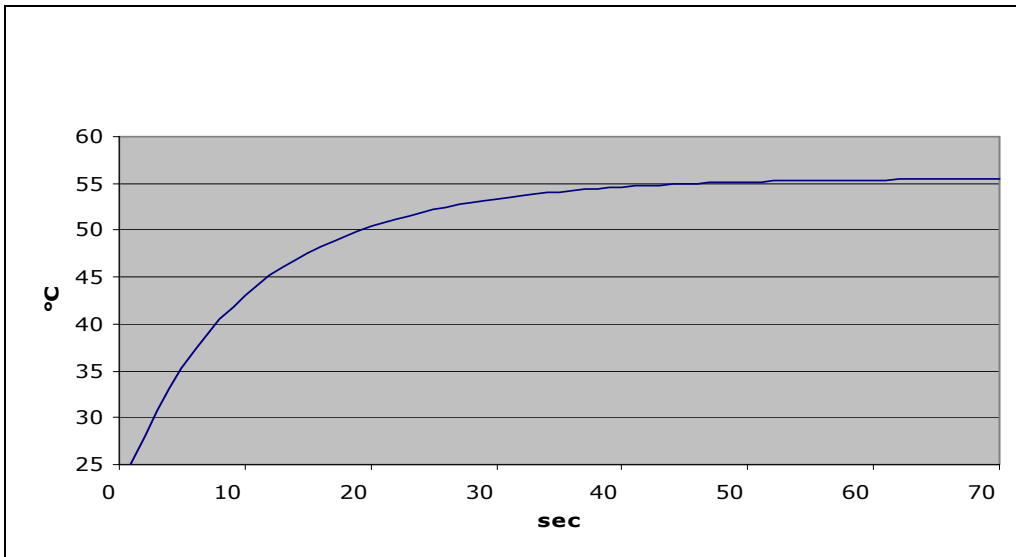
- De referentiethermometer werd met potseal en al ondergedompeld;
- De sensoren werden ondergedompeld met de potseal;
- De sensoren werden met nog eens 15 cm kabel ondergedompeld.

Telkens werden vijf samples genomen, waarvan het gemiddelde is bepaald. In alle gevallen waren de verschillen niet zichtbaar. De variatie bedroeg minder dan 3 mK. Dit bevestigt de eerdere laboratoriummetingen.

⁴¹ De Keithley 199 heeft een resolutie van 0.01 Ω .

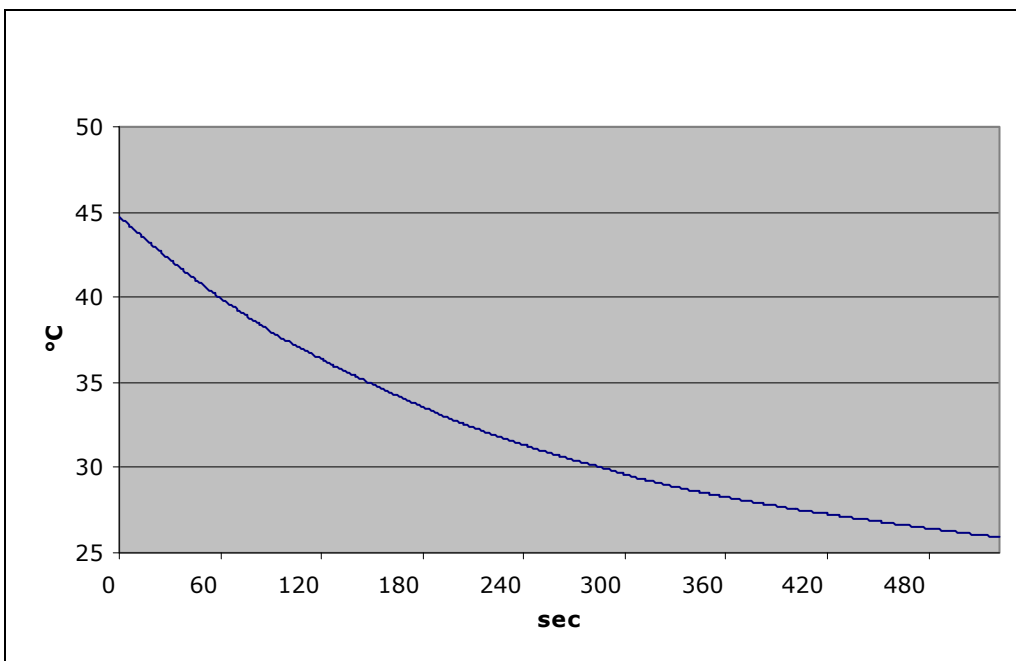
BIJLAGE 8 - Responsie

De responsie van de KNMI Pt-500 sensor is bij laboratoriummetingen bepaald. De sensor werd daarvoor in een aluminium blok opgewarmd tot ca 50 °C. Vervolgens werd de sensor uit het blok genomen en in de vrije stilstaande lucht gehangen (ca 22 °C).



Figuur 23

De opwarming in het aluminium blok. Omdat de warmteoverdracht maximaal is, is dit de hoogst haalbare snelheid.



Figuur 24

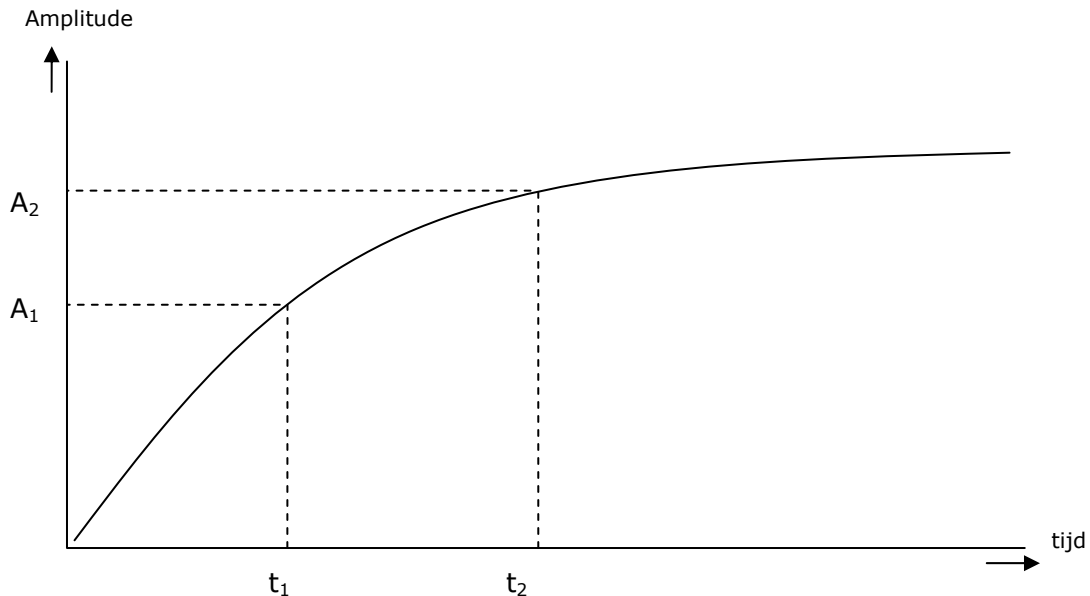
Afkoeling in stilstaande lucht.

Nauwkeurigheid van operationele temperatuurmetingen

Bijlage 8 - Responsie

Uit de gemeten krommes werd de tijdconstante⁴² (τ) bepaald met de *equidistante waarden methode*, omdat bij deze methode de eindwaarde niet bekend hoeft te zijn.

De kromme wordt genormaliseerd tot een positief gaande kromme vanuit 0 tot een positieve eindwaarde.



De kromme in de figuur geeft een genormaliseerde E-macht weer met de functie

$$A_t = A * (1 - e^{-t/\tau})$$

We nemen twee meetwaarden op tijdstippen t_1 en t_2 , waarbij t_1 en t_2 equidistant zijn, dus

$$t_2 = 2 * t_1$$

Stel $S = A_2/A_1$, dan volgt uit

$$A_1 = A * (1 - e^{-t_1/\tau})$$

$$A_2 = A * (1 - e^{-t_2/\tau})$$

dus

$$\begin{aligned} S &= (1 - e^{-2t_1/\tau}) / (1 - e^{-t_1/\tau}) \\ &= (1 - e^{-t_1/\tau}) * (1 + e^{-t_1/\tau}) / (1 - e^{-2t_1/\tau}) \\ &= 1 + e^{-t_1/\tau} \end{aligned}$$

$$-t_1/\tau = \ln(S - 1)$$

$\tau = \frac{-t_1}{\ln(S - 1)}$

De tijdconstante kan zo worden berekend uit de meting van A_t op twee equidistante tijdstippen t_1 en $2*t_1$.

⁴² De tijdconstante is de tijd waarin de temperatuur een waarde bereikt van $1 - e^{-1}$ (63,2%) van de eindwaarde.

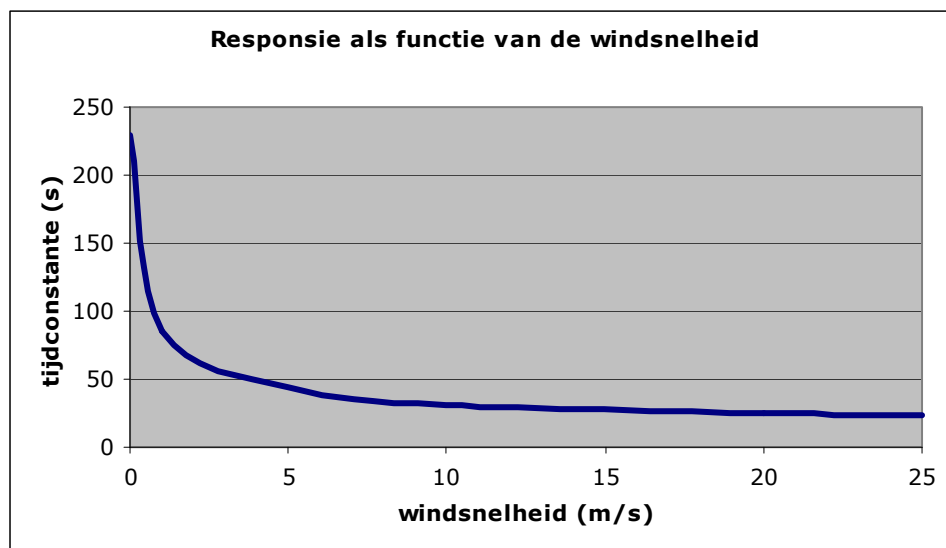
Nauwkeurigheid van operationele temperatuurmetingen

Bijlage 8 - Responsie

De meting is gedaan met verschillende sensoren, zowel oude als nieuwe. Globaal waren de resultaten gelijk. De volgende tijdconstanten werden bepaald:

Conditie	Tijdconstante (s)
Maximale warmteoverdracht	10
Ongeventileerd	240

Om een meer kwantitatieve indicatie te hebben van de responsie als functie van de windsnelheid is de meting herhaald in de windtunnel bij windsnelheden tot boven 10 m/s. Onderstaande grafiek laat de resultaten zien.



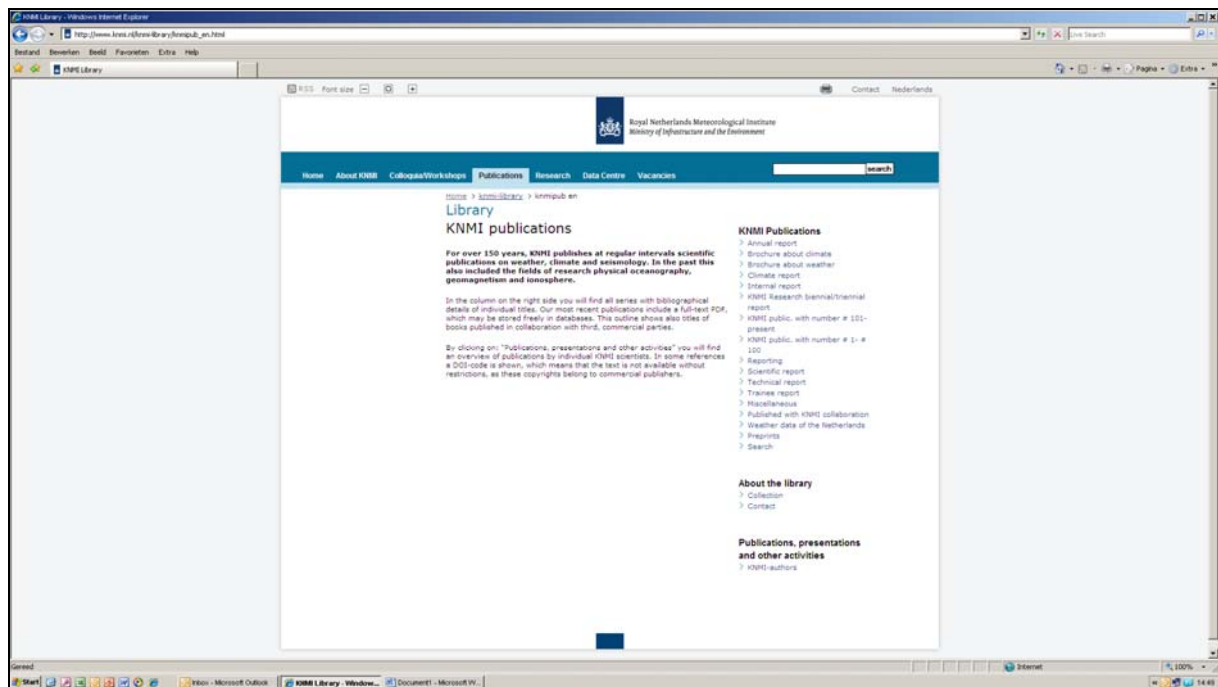
Figuur 25

Responsie als functie van de windsnelheid, zoals die bij windtunnelmetingen is bepaald.

- 0 -

A complete list of all KNMI -publications (1854 – present) can be found on our website

www.knmi.nl/knmi-library/knmipub_en.html



The most recent reports are available as a PDF on this site.

