

1960

KONINKLIJK NEDERLANDS
METEOROLOGISCH INSTITUUT

Verslagen V-73
(R III-256-1960)

METHODEN TER BEPALING VAN TEMPERATUUR EN
VOCHTIGHEID IN DE ONDERSTE LUCHTLAAG

door

Dr. J.P.M. Woudenberg

551.508.26 :

551.500.7

0. Inleiding

Bij metingen, die ten doel hebben het verloop van de "ware" luchttemperatuur en luchtvochtigheid te kennen, doen zich in de praktijk enige moeilijkheden voor. Deze zijn allereerst een gevolg van het feit, dat niet van "de" temperatuur en "de" vochtigheid kan worden gesproken, zeker niet in de alleronderste luchtlaag. Tengevolge van turbulente bewegingen in de atmosfeer zullen achtereenvolgens luchtpakketjes met andere fysische eigenschappen langs de meetinstrumenten strijken. Al naar de traagheid zullen de schommelingen in temperatuur, die daarvan het gevolg zijn, door verschillende meetinstrumenten verschillend gevolgd worden.

Enige vlak naast elkaar opgestelde thermometers, doch van verschillend type zullen hierdoor bijna nimmer dezelfde waarde van de temperatuur aanwijzen.

Voorts worden de metingen bemoeilijkt door het feit dat het gebruikte instrument straling absorbeert of emitteert met als gevolg een temperatuurverhoging of verlaging van de thermometer of psychrometer t.o.v. de omringende lucht. Door het aanbrengen van een scherm kan in principe de stralingsinvloed worden geëlimineerd. Wanneer evenwel een scherm de straling niet voor 100% terugkaatst, zal een gedeelte daarvan in warmte worden omgezet en het scherm warmer worden dan de omgevende lucht. Van hieruit zal zowel naar buiten als naar binnen straling uitgaan, welke ook de thermometer kan bereiken. Aangezien de reflectie van het schermmateriaal in de praktijk vrijwel nooit meer dan 50% is, zal overdag steeds enige straling de thermometer bereiken. Op wat grotere hoogte zal bij voldoende ventilatie de temperatuurverhoging ten gevolge van de opvallende straling vrijwel geheel teniet worden gedaan, doch in de alleronderste luchtlaag is de ventilatie in het algemeen gering, zodat de compensatie niet volledig is en de thermometer een hogere dan de luchttemperatuur aanwijst.

Hierbij dient te worden aangetekend, dat als gevolg van de grote temperatuurgradiënten, die in de alleronderste luchtlaag van enige decimeters hoogte bestaan, kunstmatige ventilatie niet is aan te bevelen, omdat hierdoor de situatie min of meer zou worden gestoord.

Er zijn reeds tal van pogingen ondernomen om de stralingsinvloed bij temperatuur- en vochtigheidsmetingen te ondervangen. Omdat het klimatologisch onderzoek in de onderste luchtlagen, waar in het algemeen de ventilatie geringer is, thans in het middelpunt van de belangstelling staat, wordt aan dit punt zeer veel aandacht geschonken.

Als wij er in geslaagd zijn de stralingsfout geheel uit te sluiten, dan nog kan de meting ongunstig worden beïnvloed en wel door geleiding van warmte door het materiaal, waarin het meetinstrument staat opgesteld en waarvan de temperatuur een andere is dan die van de lucht. Bij elektrische thermometers kan dit ook veroorzaakt worden door warmtegeleiding langs de toevoerdraden. Hierop zal later worden teruggekomen.

In het hierna volgende zal een overzicht worden gegeven van de verschillende thermometers en hygrometers, alsmede van de mogelijkheden ter voorkoming van meetfouten, zonder dat aanspraak wordt gemaakt op volledigheid.

1. Vloeistof-thermometers.

In een publikatie over de betrouwbaarheid van temperatuurwaarnemingen met behulp van kwikthermometers, gaan Kramer, Post en Woudenberg (1954) uitvoerig in op de mogelijkheid de invloed van de straling uit te schakelen. Het ligt voor de hand daarvoor een hut of afschermkap te gebruiken. Het blijkt echter, dat behalve het materiaal, waaruit de hut of beschermingskap is samengesteld, ook de vorm een belangrijke rol speelt. Hoe beter de mogelijkheid tot ventilatie, hoe minder de gemeten temperatuur van de "ware" temperatuur afwijkt. Voor metingen vlak bij de grond zijn het beste gebleken een statief, in gebruik voor minimumtemperatuurmetingen op 10 cm hoogte, dat bestaat uit een drietal boven elkaar bevestigde horizontale plaatjes, waarvan de bovenste zover boven de andere uitsteekt, dat deze laatste ook bij de laagste zonnestand niet door de zon beschenen kunnen worden.

Een cilindrisch model, dat aan de bovenste helft dubbel is uitgevoerd, en dat naar het noorden geheel open is, blijkt eveneens geschikt te zijn voor het doen van temperatuurwaarnemingen.

Ook anderen hebben eerder onderzoekingen op dit gebied verricht en kwamen daarbij tot overeenkomstige conclusies.

Over de grote hut als klassiek middel om thermometers tegen straling te beschermen, staat reeds het een en ander beschreven in de genoemde publikatie van Kramer e.a. (1954). Omdat deze hut voor mikroklimatologische metingen niet geschikt is, zal hierop niet verder worden ingegaan.

Door Geiger en Büdel (1929) werd het door Büdig (1917) geconstrueerde en naar deze genoemde "Büdigschirm" verder aanbevolen en ook gebruikt bij eigen metingen.

Het Büdigschirm bestaat uit een metalen plaatje, dat boven het vloeistofreservoir met behulp van een klem aan de horizontaal liggende thermometer is bevestigd. Büdel (1933) heeft naderhand met behulp van thermo-elementen, die hij als de best bruikbare thermometers beschouwde, de werking van het Büdigschirm en van andere schermen op de aanwijzing van vloeistofthermometers nagegaan. Hij kwam daarbij tot de volgende bevindingen. De binnenzijde van het Büdigschirm bleek bij volle bestraling door de zon zonder natuurlijke of kunstmatige ventilatie ca 9 °C warmer te zijn dan de lucht; desondanks wees de thermometer vrijwel de "ware" luchttemperatuur aan. Bij gebruikmaking van een halfcylindrisch model kwam hij tot overeenkomstige bevindingen. Een direkt aan de straling blootgestelde kwikthermometer wees zonder ventilatie 3,7 °C hoger aan dan het thermokoppel, een toluol-minimum-thermometer 1,5 °C hoger.

Men kan zich evenwel hierbij afvragen of de metingen wel correct zijn uitgevoerd, of geen andere fouten b.v. als gevolg van warmtegeleiding zijn ontstaan.

Büdel heeft tevens nagegaan, welke waarde aan de uitkomsten van de slinger-psychrometer moeten worden toegekend. Het bleek, dat de ventilatie bij het slingeren onvoldoende was om alle stralingsinvloeden te elimineren, waardoor hij het slingeren in de schaduw aanbeval.

Alhoewel lange tijd Assmann-thermometers als "het" instrument werden beschouwd waarmee de "ware" luchttemperatuur en vochtigheid kunnen worden gemeten, zijn de inzichten daarover thans wel gewijzigd. Uit vergelijkende metingen te De Bilt is gebleken (zie Kramer, Post en Woudenberg, 1954) dat: 1e het uiterlijk van de metaalomhulling de temperatuur van de thermometer beïnvloedt, en 2e het instrument ongeschikt is voor metingen lager dan 50 cm boven de grond of het gewas. Een eerste bezwaar, vooral bij mikroklimatologische metingen, is, dat men het instrument moet benaderen voor het aflezen, waardoor men de omstandigheden ter plaatse stoort. Bovendien wordt door de kunstmatige ventilatie de situatie te veel gestoord, zoals ook hiervoor reeds werd opgemerkt. Heckert (1953a) wees er op, dat kortperiodische schommelingen te snel door de thermometers worden gevolgd, waardoor de Assmann-psychrometer niet geschikt is bij metingen waarbij geen momentane waarden vereist zijn. Hierdoor zijn volgens deze auteur de grote verschillen te verklaren, die in het algemeen tussen de aanwijzingen van de Assmann-psychrometer enerzijds en de kwikthermometer en de thermograaf in de meteorologische kooi anderzijds worden geconstateerd. In een ander artikel gaat Heckert (1953b) nog eens uitvoerig in op de ongeschiktheid van de Assmann-psychrometer in zijn huidige vorm voor het verrichten van temperatuur- en vochtigheidsmetingen. Deze ongeschiktheid wijt de auteur aan de geringe en bovendien ongelijke traagheid van de beide thermometers. Door de traagheid te vergroten, voor natte en droge bol in ongelijke mate, verkreeg hij betere resultaten.

Forster (1940) wees op de invloed, die een statief kan hebben op de aanwijzingen van een daarin gelegde thermometer, als gevolg van warmteoverdracht. Indien de lucht op 10 cm hoogte 10 °C warmer is dan het grondoppervlak, dan wijst een thermometer in een metalen statief bij geringe windsnelheid 3,7 °C hoger aan dan een aan draden opgehangen thermometer. Vooral bij gebruik van metalen houders moet voor goede isolatie worden zorggedragen.

Kwikthermometers (in glas) hebben echter voor mikroklimatologische metingen een groot bezwaar, namelijk, men moet deze thermometers bena-

deren, teneinde de temperatuur te kunnen aflezen. Dit brengt mede, dat men het mikroklimaat ter plaatse stoort en door vertrapping van gewassen blijvend kan verstoren.

Beter in dit opzicht zijn daarom vloeistof-thermometers, waarmede men de temperatuur op afstand kan aflezen, t.w. de kwikthermometer in stalen buis, al dan niet verbonden aan een registrerend instrument. Wegens hun nogal grote omvang zijn zij echter niet geschikt voor mikroklimatologisch onderzoek, afgezien nog van het feit dat een betrekkelijk grote afschermkap nodig is, om de stralingsinvloeden te elimineren. In dit opzicht is dit type thermometers in het nadeel ten opzichte van de kwikthermometer.

2. Deformatie-thermometers.

Dit zijn thermometers van metaal van het Bourdon-type en de bimetaal-thermometers.

Aan deze instrumenten kleven zeer vele bezwaren, vooral als het metingen ten behoeve van het mikroklimatologisch onderzoek betreft. Behalve de bezwaren, die deze instrumenten met de kwikthermometers gemeen hebben, komt daar nog bij de geringere nauwkeurigheid. Bovendien zijn de gebruikelijke typen registrerende instrumenten zonder meteorologische hut niet bruikbaar, omdat bij iedere poging de stralingsinvloed te verminderen de ventilatie zodanig verkleind wordt, dat grote afwijkingen van de geregistreerde t.o.v. de ware luchttemperatuur kunnen voorkomen.

Tanner (1957) heeft getracht een andere oplossing te zoeken bij gebruikmaking van bimetaalthermometers. Hij gebruikte smalle thermometers van het Weston-type, aan het uiteinde voorzien van een pen, die op geregelde tijden door middel van een slagmechanisme een punt op een ronddraaiende schijf optekent. Even voordat dit gebeurt, wordt een kleine ventilator in beweging gebracht, die een constante luchtstroom van ca 2,5 m/sec langs droge en natte bol veroorzaakt. De nauwkeurigheid van dit instrument is 0,5 °C. Bij registrerende hygrometers voorzien van een haarbundel blijken de afwijkingen van de ware luchtvochtigheid als gevolg van opvallende straling beneden 5% te liggen, dus van de orde van grootte van de meetnauwkeurigheid, zodat deze instrumenten wel bruikbaar zijn met een eenvoudige bescherming (zie Woudenberg 1960).

3. Elektrische thermometers.

3.1 Thermokoppels.

Omstreeks 1870 werd het thermo-element als instrument voor het meten van temperatuur ontwikkeld. Tot systematische metingen kwam men evenwel eerst tijdens de Eerste Wereldoorlog. Het was vooral Keränen (1920)

in Finland die uitvoerige metingen van de temperatuur met behulp van thermokoppels deed. De grote gevoeligheid, waardoor het thermokoppel alle veranderingen op de voet volgt, was evenwel oorzaak dat dit instrument aanvankelijk zo weinig toepassing vond. Daarom gebruikte ook Keränen hem voornamelijk voor de meting van de temperatuur in de grond en in een sneeuwlaag. Bruckmann (1917) vervaardigde zijn thermokoppels voor de meting van de grondtemperatuur van draad van 0,5 mm dikte en sloot deze aan op een draaispoelgalvanometer van Siemens en Halske. Ook werd het thermokoppel gebruikt in gevallen waarin de turbulentiegraad van de lucht niet zo groot is, waarbij tevens de temperatuurschommelingen minder groot zijn.

Gehlhoff (1922) maakte er gebruik van bij metingen van de temperatuur van de lucht gedurende de nacht, dus in de periode dat de lucht als regel stabiel gelaagd is.

Geiger en Amann (1931) bezigden thermokoppels voor temperatuurmetingen in een eikenbestand, waarin ook overdag de turbulentiegraad gering is en zeker veel kleiner dan in het vrije veld, hetgeen door de metingen werd bevestigd.

Barkov (1915) maakte juist gebruik van de grote gevoeligheid van het thermokoppel bij zijn onderzoek naar de turbulentiegraad van de atmosfeer.

Het grote voordeel van het thermokoppel is echter vooral hierin gelegen, dat deze als "vreemde massa" de thermische toestand van het object, waarvan wij de temperatuur willen bepalen, weinig stoort. Speciaal geëigend is het thermokoppel om temperatuurmetingen in zeer kleine ruimten of van zeer kleine voorwerpen, zoals bladknoppen, dunne bladeren, stengels, enz. uit te voeren. Verder kan als voordeel genoemd worden het feit, dat met het thermokoppel gemakkelijk temperatuurverschillen kunnen worden gemeten (zie o.a. ook Middleton en Spilhaus, 1953).

Ongetwijfeld worden ook temperatuurmetingen met behulp van thermokoppels beïnvloed door straling. De grootte van het verschil tussen de door een thermokoppel geregistreerde temperatuur bij opvallende straling en de "ware" luchttemperatuur wordt door verschillende onderzoekers verschillend beoordeeld.

Rossi constateerde bij zijn temperatuurmetingen een stralingsfout van maximaal 0,3 °C en bij vochtigheidsmetingen van maximaal 3%. Hij vergeleek met een Assmann-psychrometer, waarvan de geregistreerde temperaturen en vochtigheidswaarden voor juist werden aangenomen.

Bij onze huidige kennis van de fouten, die bij gebruik van een Assmann-psychrometer kunnen optreden (zie o.a. Kramer, Post en Woudenberg, 1954,

Heckert, 1953) staat het echter te bezien of bovenvermelde afwijkingen wel juist zijn, afgezien nog van dadelijk te noemen andere factoren, die de metingen kunnen beïnvloeden.

Andere onderzoekers geven evenwel een andere stralingsfout op, tot een waarde van 1 °C toe. Raschke (1954 b) constateerde bij volkomen windstilte en sterke bestraling ($1-5 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$) bij gebruik van een dunne thermokoppel ($\phi 0,02 \text{ mm}$) een afwijking van ca 1 °C. Onder normale gemiddelde omstandigheden moet volgens Raschke evenwel met een fout van 0,3 °C gerekend worden. Bij dikkere koppels ($\phi 0,1 \text{ mm}$) kan de afwijking tengevolge van opvallende straling zelfs 3,3 °C bedragen, terwijl in heldere rustige nachten de afwijking gewoonlijk veel geringer is en ca 0,4 °C groot kan zijn.

Mäde (1952) geeft echter aan, dat bij gebruik van een thermokoppel met een doorsnede van 0,02 mm de afwijking slechts 0,2 °C bedraagt.

Volgens Mäde waren de afwijkingen bij gebruik van koppels met een doorsnede van 0,05 en 0,08 mm bij windstilte en volle straling ($1,2 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$) resp. 0,5 en 0,8 °C. De constructiewijze van het thermokoppel heeft evenwel een grote invloed op de waarde van de temperatuurmetingen. Daar is in de eerste plaats de dikte van de gebruikte draadsoorten, die de warmtecapaciteit, en daarmee de stralingsfout bepaalt. Een belangrijker punt vormt echter de lengte, waarover de 2 metaalsoorten aan elkaar gelast zijn. Deze lengte heeft nl. geen invloed op de opgewekte E.M.K. doch wel op de stralingsfout, aangezien de massa bij verlenging van de lasplaats wordt vergroot.

Er is reden om aan te nemen, dat door enkele onderzoekers hieraan te weinig aandacht is geschonken.

Vergelijking is nl. niet steeds mogelijk omdat veelal de constructie van de koppels niet is vermeld. Raschke (1954 b) geeft aan, dat de stralingsfout tot de helft kan worden gereduceerd door het thermokoppel te vernikkelen. Hiertegenover staat evenwel, dat ook de opgewekte E.M.K. kleiner wordt, waardoor het element minder gevoelig wordt.

Eerst na de Tweede Wereldoorlog werd aan het thermo-element als meetinstrument veel aandacht besteed, getuige het verschijnen van diverse publikaties over dit onderwerp en het grote aantal toepassingen, dat het thermokoppel thans heeft verkregen. Er werd vooral veel aandacht geschonken aan de invloed van de straling.

Ter vermindering van de stralingsinvloed maakte Rossi (1933) gebruik van een Büdig-scherm.

Mugen beschrijft een verbeterde uitvoering van een thermo-element-psychrometer, een instrument, waaraan ook Rossi in 1933 gewerkt heeft, maar dat

toen niet heeft voldaan. Dit instrument heeft Mogen registrerend gemaakt, overigens met een apparaat, waarover geen technische bijzonderheden worden gegeven. Blijkens een bijgevoegd voorbeeld van een registratie zijn met deze thermo-element-psychrometer bevredigende metingen te verrichten. Door Wald (1932) was reeds aangetoond, dat vochtigheidsmetingen met behulp van thermokoppels zonder stralingsfout ook mogelijk zijn zonder ventilatie, door gebruik te maken van een poreus aardewerk buisje van slechts 1 mm doorsnede, waarin het thermo-element voor de natte bol gebracht is. Er wordt uitgegaan van het feit, dat bij afnemende doorsnede van het thermo-element het psychometrisch verschil toeneemt, althans bij volledige windstilte. Bij de beschreven aardewerk-buis zou het psychometrisch verschil zijn bovenste grens hebben bereikt, zodat ventilatie in dit verschil geen wijziging vermag te brengen.

Door Koch (1936) zijn met gunstig gevolg laboratoriumproeven genomen, doch in de praktijk werd het instrument niet toegepast. Albrecht (1952) heeft een bruikbaar instrument gebouwd, waarbij zowel de droge als de natte thermometer in de vorm van thermokoppels in een aardewerk-buisje zijn gebracht. Boven het natte buisje bevindt zich een glaasje, gevuld met water. Volgens Albrecht is de traagheid gering en was het mogelijk ook snelle variaties in de vochtigheid van de lucht te volgen, hetgeen het instrument geschikt maakt voor onderzoek naar de turbulentie van de lucht. Overigens bleek dit instrument gevoelig voor straling, in tegenstelling tot de mening van Wald, reden waarom een plaatje werd aangebracht, dat rechtstreekse bestraling door de zon verhindert. Dit plaatje dient met de gang van de zon veresteld te worden, waardoor het instrument in zijn huidige uitvoering niet geschikt is voor registratie. Thornthwaite e.a. (1950) constateerden bij metingen op verschillende hoogten boven het aardoppervlak, dat de uit deze metingen verkregen toestandscurven geen vloeiende lijn vertoonden. Zij schrijven dit toe aan systematische en toevallige fouten. De systematische bestaan uit stralingsfouten, die gecompliceerd werden door het feit, dat vlak bij de grond de ventilatie veel geringer is dan op grotere hoogte, een probleem, dat zich eveneens bij metingen door ons heeft voorgedaan. Aanbrengen van een stralingsscherm gaf verbetering, doch geheel opgelost was het probleem hiermede niet. Thornthwaite bepaalde een gemiddelde uit 20 achtereenvolgende aflezingen. Hij achtte het nodig ter controle eveneens metingen met kwikthermometers uit te voeren.

Pasquil (1949) loste het probleem op, door de thermokoppels aan te brengen in stukjes koper en deze op gelijke wijze af te schermen als de thermometers bij een Assmann-psychrometer. Bij kunstmatige ventilatie

met een gemiddelde snelheid van 2,5 m/sec verkreeg hij resultaten, waarbij de onnauwkeurigheid 0,2 °C bedroeg. Met behulp van deze apparatuur verkreeg hij vloeiende toestandscurven van temperatuur en vochtigheid in de onderste luchtlaag. Een bezwaar is evenwel, dat een dergelijke opstelling nogal wat ruimte vraagt, hetgeen het voordeel van het kleine thermokoppel geheel teniet doet.

Diem (1953) gebruikte elektrisch gelaste ijzer-constantaan-elementen van 0,5 mm doorsnede, waarvan de contactplaatsen gelakt werden. Teneinde stralingsinvloeden uit te sluiten werd bij de metingen een Büdigscherm gebruikt.

Unger (1958) bezigde voor de metingen van de luchtvochtigheid het psychrometrisch verschil van een droog en een nat element, die beide voorzien zijn van een wollen omhulsel of een aardewerkbuisje, teneinde de stralingsfout voor beide dezelfde te doen zijn. Met een afzonderlijk element zonder omhulsel wordt de luchttemperatuur gemeten.

Raschke (1954 a) gebruikte voor de registratie een Cambridge-recorder, die betrekkelijk traag is en waarmede goede resultaten werden bereikt. Bij geringe windsnelheden is het psychrometrisch verschil afhankelijk van de snelheid. Teneinde dit te ondervangen is door De Wit (1953) een vibrerende psychrometer ontworpen, waardoor voorkomen wordt dat zich rondom de natte bol een met waterdamp verzadigd luchthuidje vormt. Tevens wordt hierdoor de stralingsinvloed geheel uitgeschakeld.

Het is echter gebleken dat een dergelijke vibrator moeilijkheden oplevert bij ononderbroken metingen. Na betrekkelijk korte tijd raakt het materiaal vermoeid en ontstaat breuk in de toevoerdraden. Höhne (1960) voert nog als bezwaar aan, dat de interruptor warmte ontwikkelt, die een kleine temperatuurstijging tengevolge heeft, vooral in een kleine ruimte. Deze auteur heeft daarom een andere oscillerende psychrometer ontworpen, waarbij gebruik wordt gemaakt van een uitgespannen draad met het laspunt in het midden. Vlak bij het ene uiteinde is een kleine magneet bevestigd, die zich in een wisselend magneetveld bevindt. De spoel waarmede dit wisselveld wordt opgewekt gebruikt zeer weinig energie, zodat de ontstane warmte kleiner is dan de stralingsfout, die er ondanks de vibratie nog overblijft.

Een andere mogelijkheid is lucht langs de contactpunten te blazen met een interruptor of een kleine ventilator, waardoor alleen bij de thermolas een luchtstroom wordt opgewekt en het temperatuur- en vochtigheidsprofiel zo weinig mogelijk wordt verstoord. Praktische ervaring met deze methode is voorzover mij bekend, niet opgedaan.

Door Middleton en Spilhaus (1953) wordt aanbevolen ter vermindering van

stralingsfouten een scherm te gebruiken, bestaande uit twee ovale plaatjes boven en eenzelfde beneden het element. Een dergelijke afscherming werd door ons eveneens ontworpen voor de afscherming van weerstandsthermometers (zie 3.2.2) waarbij echter de bovenste plaat zodanige afmetingen heeft, dat de zonnestrallen nimmer de onder gelegen platen kunnen bereiken.

Een dergelijk scherm is eveneens ontworpen door Thornthwaite (1950 en 1952).

Ook op andere wijze is getracht de stralingsfout te elimineren.

Höhne tracht dit te doen door 3 thermokoppels a, b, en c in serie en tegen elkaar in te schakelen, waarbij de stralingsfout van b tweemaal zo groot is als van a en c, hetgeen door zwarting van het contactpunt is te bereiken. Proeven op het Lab. voor Natuur- en Weerkunde te Wageningen (1955) hebben echter aangetoond dat hiermede geen goede resultaten te bereiken zijn, als gevolg van de ongelijke massa van de koppels.

Raschke (1954 b) tracht eveneens met een compensatiemethode de stralingsfout te elimineren. Van drie in serie geschakelde thermokoppels wordt van één de absorptie- en de warmte-overdrachtscoëfficiënt zodanig gewijzigd dat de extra E.M.K. in de andere elementen worden gecompenseerd.

Voorts kunnen bij metingen met behulp van thermokoppels nog fouten van andere aard optreden.

Een daarvan is de schommeling in de temperatuur van de "koude" las. Teneinde een constante temperatuur te bereiken wordt als regel een thermosfles gevuld met water en ijs gebezigd. Vaak blijkt evenwel na zekere tijd een temperatuurgradiënt in de fles te ontstaan, zodat ook de temperatuur van de koude las van 0 °C kan gaan afwijken. Dit maakt een regelmatig controleren van de temperatuur van de koude las noodzakelijk.

Door enige onderzoekers is hiervoor een andere oplossing gezocht door het ontwerpen van een compensatieschakeling. Höhne e.a. (1956) ontwierpen een temperatuurgevoelige brugschakeling in combinatie met een thermostaat. Hiermede wisten zij de schommelingen zodanig te compenseren, dat een meetnauwkeurigheid van 0,1 °C werd bereikt.

Unger (1958) ontwierp een thermobatterij met gecompenseerde koude las. Het meetelement bestaat uit een raam van kunststof met 20 tot 40 wikkelingen van constantaan-draad. Aan één zijde van het raam is het draad voor de helft verkoperd. De compensatie van de koude las werd uitgevoerd op de door Höhne aangegeven wijze. Het voordeel van deze elementen is, dat geen versterking van de thermospanning nodig is.

Tenslotte dient nog vermeld te worden de fout die ontstaat als de temperatuur van de toevoerdraden aanzienlijk afwijkt van die van de luchttemperatuur op de meetplaats. Bij gebruikmaking van thermokoppels bestaande uit 0,1 mm dik koper en 0,3 mm dik constantaandraad vond Forster bij een verschil in draad en luchttemperatuur van 5,4 °C een afwijking van 0,5 °C. Er dienen derhalve voorzorgen te worden genomen dat draad- en luchttemperatuur niet teveel van elkaar verschillen.

Alles bij elkaar genomen biedt het thermokoppel bij temperatuur- en vochtigheidsmetingen voordelen boven andere typen thermometers bij mikrometeorologisch onderzoek. Indien het evenwel alleen te doen is om gemiddelden over langere perioden zijn zij minder geschikt, vanwege de grote spreiding van de meetpunten.

3.2 Elektrische weerstandthermometers.

Bij de elektrische weerstandthermometers dienen twee typen onderscheiden te worden, nl. de metalen thermometer en de thermometer van keramisch materiaal met negatieve temperatuur-coëfficiënt.

3.2.1 Metalen weerstandthermometers.

De weerstandthermometer, bestaande uit een platinadraad, al dan niet gewikkeld, is reeds lang bekend. De toepassing werd echter in de aanvang beperkt door het noodzakelijke gebruik van een gevoelige galvanometer, die moeilijk transportabel was, zodat dit type thermometer zich alleen voor metingen in het laboratorium leende. Vervolgens leggen ook hier, evenals bij de andere typen thermometers, stralingsfouten beperkingen op aan de mogelijkheden van temperatuurmetingen. Voor metingen van grondtemperaturen zijn deze instrumenten echter zeer geschikt. Aan de eerstgenoemde moeilijkheid werd tegemoet gekomen door het bouwen van robuuste galvanometers, al dan niet in combinatie met schrijvers. Albrecht (1927) is degene geweest, die aan de weerstandthermometer voor metingen van de luchttemperatuur nadere gestalte gegeven heeft. Teneinde de stralingsfout zo klein mogelijk te maken, vervaardigde hij thermometers van lange dunne uitgespannen draden. Volgens Albrecht is de stralingsfout van een dunne uitgespannen platina draad van 0,015 mm ϕ bij een bestraling van 1,5 cal/cm² min. ca 0,1 °C. Dit kon alleen in het laboratorium aangetoond worden.

Geiss (1949) voerde vergelijkende metingen uit met thermometers, bestaande uit uitgespannen draden over ramen van ca 4 x 9 cm, waarbij één apparaat volledig aan de zon bij windstilte werd blootgesteld, terwijl een ander tegen straling werd beschermd. Hij vond een grootste afwijking

van 0,5 °C, dus meer dan Albrecht had geconstateerd. Wellicht kunnen zich bij deze experimenten reële verschillen hebben voorgedaan, aangezien de instrumenten op enige afstand van elkaar waren opgesteld. Haude (1934) gebruikt daarom bij zijn metingen van de turbulentie en Austausch boven een woestijngrond korte platinadraden van 8 cm lengte. Mäde (1938) ontwierp een beschermingskaartje voor dit soort thermometers, waardoor de metingen nauwelijks werden beïnvloed.

Tegenover de voordelen staan evenwel ook nadelen. De voornaamste is wel de kwetsbaarheid van de draad, ook bij sterke wind en zware regen. Bij gebruik van dikkere weerstandsdraden wordt de fout tengevolge van opvallende staling groter. Anderzijds was het echter in de eerste ontwikkelingstijd niet mogelijk dikkere draden te gebruiken, omdat de gebruikelijke galvanometers daarvoor te ongevoelig waren.

Volgens Mäde (1952) zijn weerstandsdraden met kleine doorsnede moeilijk voor een constante waarde van de weerstand bij zekere temperatuur te vervaardigen, omdat door soldeer enz. reeds grote fouten kunnen ontstaan. Ik acht dit geen groot bezwaar, omdat iedere thermometer geijkt kan worden. Het kan echter een bezwaar worden bij de uitwerking van de gegevens, als het meetinstrument niet dadelijk de weerstand omgerekend in °C weergeeft. Volgens Mäde levert de industrie geen draad van constante dikte, zodat ook in dit opzicht bezwaren bij de vervaardiging worden ondervonden. Ook kan volgens Mäde de verwarming van de draad bij gebruik in een gewas zonder ventilatie afwijkingen veroorzaken. Werden reeds in de twintiger jaren metingen met dit type thermometers vlak boven de grond uitgevoerd (zie o.a. Albrecht 1927), in de jaren 1930-1935 hadden deze thermometers het pleit gewonnen.

A. Mäde (1936) heeft dit type thermometer in ruime mate toegepast o.a. bij metingen in een Topinamboer-bestand. Verschillende Duitse onderzoekers gebruiken ook heden nog de dunne weerstandthermometer bij hun metingen. Mäde (1936) wijst echter op het bezwaar van de grote strooïing der meetpunten wanneer het gewas nog open is. Zodra het bestand gesloten is, wordt de strooïing veel kleiner.

Het is duidelijk dat de temperatuurverhoging door opvallende straling afhankelijk is van de vorm van het element, alsmede van het materiaal waaruit dat element bestaat. Ångström (1932) vestigde er evenwel de aandacht op, dat bij zeer grote doorsneden de afwijking van de "ware" temperatuur onafhankelijk is van de doorsnede van het element.

Albrecht (1934) wijst op de mogelijkheid voor straling ongevoelige, trage thermometers te vervaardigen, door gebruik te maken van 2 verschillende thermometers, waarvan de verhouding van warmte-opname en afgifte in het

gehele spectraalgebied gelijk is. Is deze verhouding bekend en gelijk p , dan kan de temperatuur bepaald worden uit

$$T_L = pT_2 - T_1$$

Als T_2 en T_1 de afgelezen temperaturen zijn.

Dit kan behalve op elektrische thermometers ook op andere typen thermometers worden toegepast.

Teneinde de weerstandthermometer trager te maken wond Heraeus de platinadraad als spiraal van 3 mm doorsnede en 6 cm lengte, bij een draaddikte van 0,05 mm en 100 Ω weerstand. Het geheel werd in een kwartsbuis van 4 mm ϕ gesmolten. Bij windstilte en een straling van 15 cal/cm² min. bedroeg de temperatuurverhoging 4,8 °C (zie Albrecht, 1934). Deze verhoging is in dezelfde orde van grootte als bij de kwikthermometer. Dergelijke weerstandthermometers zijn ook door ons bij metingen gebruikt. Bij gebruik van weerstandthermometers van dit type zal dus voor een goede afscherming tegen straling moeten worden zorggedragen. Deze "ingebouwde" weerstandthermometers leveren echter moeilijkheden van andere aard op. Het is nl. gebleken, dat indien, zonder speciale voorzieningen in een zeer vochtige ruimte, b.v. kweekbak opgesteld, hen geen lang leven beschoren is. Ook Middleton en Spilhaus (1953) zijn van oordeel, dat de "weatherproofing" van dit type elektrische weerstandthermometers grote moeilijkheden oplevert.

Door Höhne (1952) is eveneens een schakeling ontworpen, waarbij de fout tengevolge van opvallende straling zoveel mogelijk wordt geëlimineerd.

Geiger (1935, 1950) gebruikt bij zijn metingen t.b.v. onderzoek tussen het gewas weerstandthermometers van platinadraad, gewikkeld op een glasstaaf en het geheel in een nikkel huls gebracht. Deze elementen zijn wel gevoelig voor opvallende straling, doch Geiger acht dit geen bezwaar, aangezien toch ook de planten straling ontvangen en zich er naar richten. Het maakt een groot verschil uit of de genoemde elementen met hun as noord-zuid dan wel oost-west worden geplaatst. Hij beveelt daarom aan de elementen steeds oost-west te plaatsen. Niettemin blijkt bij de aldus opgestelde thermometers de stralingsinvloed bij matige wind vlak bij de grond zeven maal zo groot te zijn als op 2 m hoogte!

Tenslotte kan nog vermeld worden een door Eisner (1952) ontworpen weerstandthermometer van platinadraad. Een 0,006 inch dikke platina-draad omwoeld door 0,002 inch dikke laag zijde werd om een dunne koperen buis gewikkeld, welke laatste na de nodige bewerkingen van

het draad door middel van elektrolyse in een bad van kopersulfaat werd verwijderd. De aldus vervaardigde thermometer heeft een zeer geringe thermische capaciteit. Het bezwaar is evenwel, dat ook deze thermometer niet zonder stalingskap kan worden gebruikt.

3.2.2 NTC-weerstandsthermometers.

Hales (1948) publiceerde in 1948 metingen met behulp van thermistors (NTC-weerstanden), ontwikkeld door de Bell Telephone Laboratories, en vervaardigd van keramisch materiaal.

Het voordeel van deze weerstandsthermometer is vooral gelegen in het feit, dat zij in het normale temperatuurtraject van -20 tot $+50$ °C een zeer grote temperatuurcoëfficiënt hebben, zodat hiermede gevoelige temperatuurmetingen kunnen worden uitgevoerd. Bovendien bezitten zij een geringe traagheid, terwijl de dimensies tot zeer kleine proporties kunnen worden teruggebracht, alhoewel dan een zeer hoge weerstand wordt verkregen. De hoge weerstand van de thermometer maakt, dat de weerstand van de toevoerleidingen geen gewicht in de schaal legt. Als bezwaar kan evenwel genoemd worden, dat het praktisch niet mogelijk is enige thermometers van dezelfde weerstand te vervaardigen, een bezwaar, dat evenwel ook bij de metalen weerstandsthermometers aanwezig is. Ook bij dit type thermometers kan een belangrijke stralingsfout optreden, zodat ook hier afscherming tegen opvallende straling geboden is.

Intussen heeft de NTC-weerstandsthermometer op ruime schaal toepassing gevonden. Penman (1949) heeft reeds tal van metingen met dit instrument verricht. Ook in ons land heeft de NTC-weerstand als thermometer zijn intrede gedaan.

De ervaringen door ons met deze thermometer opgedaan zijn niet steeds gunstig geweest. Met name kan bij het inbouwen van de weerstand in een huls een plotselinge weerstandsverandering ontstaan, die waarschijnlijk te wijten is aan een verandering van de overgangsweerstand tussen NTC-weerstand en de toevoerdraden. Soms werden ook geleidelijke weerstandsveranderingen geconstateerd, zodat wij de ervaring van Hales, die waarnam, dat zich gedurende de lange perioden van meting geen veranderingen voordeden, niet kunnen onderschrijven.

4. Sonische thermometers.

Volledigheidshalve dient nog de "sonische" thermometer te worden genoemd zoals die door Barrett en Suomi (1949) wordt beschreven. Met behulp van een piezo - elektrisch kristal wordt een geluidstrilling van hoge frequentie door het medium gezonden, waarvan men de temperatuur

wil meten. De frequentie van het opgevangen signaal is afhankelijk van de temperatuur, zodat in principe temperatuurmetingen hiermede mogelijk zijn. Het grote voordeel van dit type temperatuurmetingen is, dat de straling geen invloed daarop kan uitoefenen. Een tweede voordeel is, dat de traagheid klein is. Dit instrument is overigens in de eerste plaats ontworpen voor temperatuurmetingen in de hogere luchtlagen t.b.v. synoptische studies.

5. Conclusie.

Resumerend kan worden gezegd, dat het niet mogelijk is, instrumenten aan te bevelen, die voor temperatuur- en vochtigheidsmetingen algemeen bruikbaar zijn. Voornamelijk de stralingsinvloeden en de geringe ventilatie leggen beperkingen op. Voor micro-klimatologische doeleinden komt alleen het thermokoppel als meetinstrument in aanmerking.

De Bilt, maart 1957.

herzien maart 1960.

Dr. J.P.M. Woudenberg.

Literatur

- Albrecht, F. 1927 Thermometer zur Bestimmung der wahren Lufttemperatur.
Meteor.Z. 44, 420.
- Albrecht, F. 1934 Über die Einwirkung der Strahlung auf frei aufgestellte elektrische Thermometer.
Tat.Ber.Preuss.Meteor.Inst i.J.1933, 76.
- Albrecht, F. 1950 Die Methoden zur Bestimmung der Verdunstung der natürlichen Erdoberfläche.
Arch.f.Meteor.Geoph.Biokl. B2, 1-28.
- Ångström, A. 1932 Commission de Météorologie agricole.
Proc.Verb.d.Science d.Munich, App.XVII.
- Barkov, E. 1915 Über die thermische Struktur des Windes.
Meteor.Z. 32, 97.
- Barett, E.W. and Suomi, V.E. 1949 Preliminary Report on Temperature Measurement by Sonic Means.
J.Meteor. 6, 273-276.
- Brückmann, W. 1917 Über Versuche der Registrierung der Oberflächentemperatur des Bodens mit elektrischen Thermometern.
Ber.Tät.Preuss.Meteor.Inst. im Jahre 1917, 111.
- Büdel, A. 1933 Der Strahlungsschutz am Thermometer.
Das Wetter, 50, 225.
- Büdig. 1917 Beschirmung von Bodenthermometer gegen nächtliche Ausstrahlung.
Veröfftl.Preuss.Meteor.Inst.nr.294.
- Diem, M. 1953 Feuchtemessung mit Hilfe thermoelektrischer Psychrometer.
Arch.Meteor.Geophys.Bioklim., B5, 59.
- Eggert, R. 1946 The construction and installation of thermocouples for biological research.
J.Agric.Res.(Wash) 72, 341-355.
- Eisner, H.S. 1952 A simple resistance thermometer.
J.Scient.Instr.(London) 29, 166.
- Forster, H. 1940 Über Fehler, die bei Lufttemperaturmessungen infolge Wärmeleitung auftreten.
Meteor.Z. 57, 334.
- Gehlhoff. 1922 Thermoelektrische Messungen des nächtlichen Temperaturverlauf in den unteren Luftschichten.
Meteor.Z. 39, 137-141.

- Geiger, R. 1935 Ein Messgerät zur Dauerbeobachtung der Temperaturschichtung am Boden. Das Wetter, 52, 205-213.
- Geiger, R. 1950 Das Klima der bodennahen Luftschicht. Erde druck. Vieweg u. S.
- Geiger, R. und Amann. 1931 Forstmeteorologische Messungen in ein Eichenbestand. Forstwiss.Centr. bl.53, 809-819.
- Geiger R. und Büdel, A. 1929 Über ein tragbares Messgerät für Temperaturbestimmungen in den bodennahen Luftschicht. Das Wetter, 46, 265-270.
- Geiss, W. 1949 Versuche über den Strahlungseinfluss auf kleine Platindrahtwiderstandsthermometer mit Cellonglasrahmen. Z.f.Meteor. 3, 356-358.
- Hales, W.B. 1948 Thermistors as instruments of thermometry and anemometry. Bull.Am.Meteor.Soc. 29, 494-499.
- Haude, W. 1934 Temperatur und Austausch der bodennahen Luft über eine Wüste. Beitr.Physik.d.freien Atm.21, 129-142.
- Heckert, L. 1953a Die Bedeutung kurzfristiger Temperaturschwankungen für die üblichen Temperatur- und Feuchtemessungen mit dem Aspirationspsychrometer nach Assmann. Z.f.Meteor. 7, 19-23.
- Heckert, L. 1953b Zur Frage der Brauchbarkeit der Assmann-Thermometer für die üblichen Temperatur- und Feuchtemessungen auf Grund empirischer Trägheitsbestimmungen. Z.f.Meteor. 7, 259-268.
- Höhne, W. 1952 Kompensation des Strahlungsfehlers beim Thermoelement und Widerstandsthermometer. Ber.D.Wetterd.US-zone, 42, 82-85.
- Höhne, W., Mäde, A. und Schmidt, M. 1956 Kompensation des Einflusses der Vergleichstemperatur bei thermoelektrischen Messungen. Z.f.Meteor. 10, 131-136.
- Höhne, W. 1960 Ein oszillierendes Thermoelement und seine Anwendung bei Temperatur- und Feuchtemessungen. Angew.Meteor. 3, 312-315.

- Johnson, N.K. 1949 A study of the vertical gradient of temperature in the atmosphere near the ground. Geophys.Mem. nr.46.
- Keränen, J. 1920 Über die Temperatur des Bodens und der Schneedecke in Sodankilä. Helsinki.
- Koch, W. 1936 Messungen der Luftfeuchtigkeit mit Thermoelementen ohne künstliche Belüftung. Gesundheitsing. 59, 504-505.
- Kramer, C., Post, J.J. en Woudenberg, J.P.M. 1954 Nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van temperatuur- en vochtigheidsbepalingen in buitenlucht met behulp van kwikthermometer. Meded.en Verh. K.N.M.I. nr.60.
- Mède, A. 1936 Widerstandselektrische Temperaturmessungen in einem Topinamburbestand. Wiss.Abh.Ra f.Wetterd. II, nr.6.
- Mède, A. 1938 Ein Schutzkorb für das Platin-Widerstandsthermometer des Reichswerrerdienstes. Meteor.Z. 55, 415-417.
- Mède, A. 1951 Temperaturbeobachtungen an vereinfachten Klimastationen. Angew.Meteor.1, 53-55.
- Mède, A. 1952 Zur Methodik mikroklimate Temperaturmessungen. Angew.Meteor. 1, 215-219.
- Middleton, W.E.K. and Spilhaus, A.F. 1953 Meteorological Instruments. Un.of Toronto-press. 3rd edition.
- Pasquill, F. 1949 A portable indicating apparatus for the study of temperature and humidity profiles near the ground. Quat.J.R.M.S. 75, 239-248.
- Penman, H.L. 1949 A portable thermistor bridge for micro-meteorology among growing crops. Sci.Instrum., 26, 77-80.
- Raschke, K. 1954a A sturdy thermoelectric psychrometer for microclimatic measurements. Proc.Ind.Acad.Sci. 39, 98-107.
- Raschke, K. 1954b Die Kompensation des Strahlungsfehlers thermoelektrischer Messfühler. Arch.Meteor.Geoph.Bioklim. B5, 447-455.

- Rossi, V. 1933 "Über mikroklimatische Temperatur- und Feuchtigkeitsbeobachtungen mit Thermo- elementspsychrometern. Soc.Sci.Fennica, Phys.Math. 6, 1-22.
- Tanner, J.T. 1957 A wet-bulb and a dry-bulb recording thermometer. Ecology, 38, 530-531.
- Thorntwaite, C.W. 1950 Microclimatology of the surfacelayer of the atmosphere. Publ.in Climat. 3, no.2, 4, nrs.3 and 4.
- Unger, K. 1953 Thermoelementspsychrometer für mikro- klimatische Messungen. Angew.Meteor. 1, 280-283.
- Unger, K. 1958 Eine Thermobatterie mit kompensierter Vergleichstemperatur für mikrometeoro- logische Temperaturmessungen. Arch.f.Meteor.Geoph.Bioklim. B8, 378-381.
- Wald, H. 1932 Psychrometer ohne künstliche Belüftung. Z.f.d.Ges.Kälte Ind. 39, Heft 6.
- Wit, C.T. de 1953 An oscillating psychrometer for micro- meteorological purposes. Appl.Sci.Res. A4, 120.
- Wit, C.T. de 1955 Persoonlijke mededeling.
- Wood, R.C. 1959 The infrared hygrometer as a potential meteorological aid. Bull.Am.Meteor.Soc., 40, 280-284.
- Woudenberg, J.P.M. 1960 Afscherming van thermografen en hygro- grafen tegen straling. Verslagen K.N.M.I., nr. V.63