

De variabele constante

Onderzoek naar de psychrometrische constante bij lage windsnelheden

L.W.M. Roest

12 december 2013

begeleiders: T. Euser, W.M.J. Luxemburg

Samenvatting

De psychrometrische constante wordt gebruikt om met behulp van een psychrometer de relatieve luchtvochtigheid vast te stellen. Onderzoek geeft aan dat deze psychrometrische constante niet constant is en dat voor lage windsnelheden de algemeen geaccepteerde formules niet zonder meer toepasbaar zijn. In dit onderzoek wordt vastgesteld wat het verband is tussen de waarde van de psychrometrische constante en de snelheid van langstromende lucht aan de psychrometer. Hierdoor kunnen de bekende formuleringen om de relatieve luchtvochtigheid vast te stellen ook bij lage windsnelheden worden toegepast.

1 Inleiding

De ‘psychrometrische constante’ wordt vaak als constant beschouwd, dit blijkt echter niet zo te zijn. Er zijn namelijk diverse publicaties waarin wordt ontkracht dat de ‘psychrometrische constante’ daadwerkelijk constant is, waaronder: Harrison en Wood, Loescher et al. en Visscher [6, 7, 11]. Harrison en Wood hebben onderzoek gedaan naar de invloed van afschermkappen van weerstations op luchtvochtigheidsmetingen. Deze afschermkappen houden namelijk een deel van de wind tegen, waardoor de effectieve snelheid van de langsstromende lucht afneemt. Zij hebben hierbij een significant hogere waarde voor de psychrometrische constante gevonden bij lage windsnelheden.

Veel publicaties over verdamping en psychrometers maken melding van een ondergrens voor de windsnelheid¹ waarbij formules om dampspanning en luchtvochtigheid te berekenen nog geldig zijn. Deze ondergrens varieert tussen 3 en 5 m/s [7]. Voor hogere windsnelheden wordt verondersteld dat de ‘psychrometrische constante’ wel constant is, terwijl voor windsnelheden lager dan 3 m/s geen waarden worden gegeven. Het ontbreken van waarden voor de psychrometrische constante bij lage windsnelheden lijkt problematisch voor veldmetingen. Het komt namelijk regelmatig voor dat de windsnelheid niet boven de 3 à 5 m/s uitkomt. Een windsnelheid van 5 m/s komt namelijk overeen met windkracht 3 *Bft*.

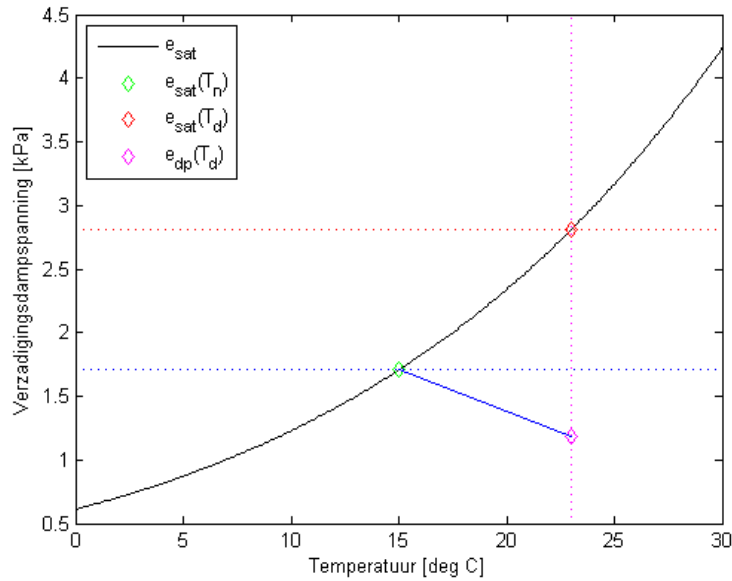
Een serie proeven onder geconditioneerde omstandigheden is nodig om duidelijkheid te krijgen over de waarden van de psychrometrische constante voor windsnelheden lager dan 5 m/s . Het is hierbij belangrijk dat voor langere tijd een constante windsnelheid kan worden gehandhaafd en dat de temperatuur en de relatieve luchtvochtigheid niet te hard variëren gedurende de dag. Deze voorwaarden kunnen alleen worden bereikt in een laboratoriumomgeving. Dit alles brengt mij tot de volgende onderzoeksvraag: “*Wat is het verband tussen de waarde van de psychrometrische constante en de snelheid van de langsstromende lucht aan de psychrometer?*”

2 Methode

2.1 Theorie

De psychrometer is een meetinstrument waar indirect relatieve luchtvochtigheid mee wordt gemeten en bestaat uit twee thermometers of temperatuursensoren, waarvan er een vochtig wordt gehouden. Langs de temperatuursensoren moet een voldoende sterke luchtstroom staan, waardoor water van de ‘natte sensor’ verdampt. Door het verdampen zal warmte worden onttrokken aan deze sensor. Na enige tijd ontstaat er een evenwicht tussen het onttrekken van warmte aan de sensor door verdamping en toevoer van warmte door de langsstromende lucht. Deze ‘evenwichtstemperatuur’ is de zogenaamde natteboltemperatuur. Aan de hand van verschillende formules kan vervolgens de relatieve luchtvochtigheid worden berekend. (Zie paragraaf 2.1.1 verderop in dit artikel.)

¹Met windsnelheid wordt bedoeld: de snelheid van de luchtstroom langs de temperatuursensoren.



Figuur 1: Verzadigingsdampspanning

De (actuele) dampspanning is de de partiële gasdruk die wordt veroorzaakt door waterdamp in de lucht en is daarmee een deel van de totale atmosferische druk. De dampspanning bij 100% relatieve luchtvochtigheid wordt de verzadigingsdampspanning genoemd, omdat de lucht dan volledig verzadigd is met waterdamp. Deze dampspanningen kunnen niet direct worden gemeten en worden daarom berekend aan de hand van de natte- en droge-boltemperatuur. De relatieve luchtvochtigheid wordt berekend uit de verhouding tussen de actuele dampspanning en de verzadigingsdampspanning, zie formule (3).

Om de actuele dampspanning in de lucht te berekenen wordt formule (2) gebruikt. Een van de parameters in deze formules is de zogenaamde ‘psychrometrische constante’ γ , welke niet constant blijkt te zijn. Wanneer het temperatuurverschil tussen de sensoren klein is, wordt een te hoge luchtvochtigheid gevonden. De oorzaak van het kleine temperatuurverschil kan bijvoorbeeld liggen in een lage windsnelheid, waardoor er minder verdamping optreedt en de ‘evenwichtstemperatuur’ van de natte sensor hoger blijft dan verwacht mocht worden. Het doel is dan ook om op een andere manier de waarde van de psychrometrische constante vast te stellen, zodat ook bij lage windsnelheden de juiste relatieve luchtvochtigheid berekend kan worden.

2.1.1 Dampspanning

Voor het berekenen van de (verzadigings-)dampspanning is een zeer nauwkeurige formule opgesteld volgens de “International Temperature Scale of 1990” (ITS’90) [8], uitgeven door Hardy [5], zie bijlage C. Deze formule is vrij ingewikkeld van aard door de vele

coëfficiënten. Daarnaast wordt een benaderingsformule gehanteerd in veel publicaties.

Allen et al., Harrison en Loescher et al. [3, 6, 7], geven dezelfde benaderingsformule, echter met andere coëfficiënten, zie formules (1), (2) en (3). Deze formules zijn allen afgeleid van Buck [4], waarbij de coëfficiënten zijn aangepast aan nieuwe gegevens of een ander temperatuurbereik. De afwijking van deze benaderingsformule ten opzichte van formule (10) is kleiner dan 0,05% op het temperatuurbereik tussen 0 en 50 °C. De formules van Allen et al. [3], zoals gepubliceerd in FAO rapport 56 zullen worden gebruikt voor verdere uitwerking van de resultaten. Voor de coëfficiënten, zie tabel 1.

$$e_{sat} = f \left(a \cdot e^{\frac{b \cdot T}{T+c}} \right) \quad [kPa] \quad (1)$$

$$e_{act} = e_{sat}(T_n) - \gamma \cdot p_a \cdot (T_d - T_n) \quad [kPa] \quad (2)$$

$$h = \frac{e_{act}}{e_{sat}(T_d)} \quad (3)$$

Tabel 1: Overzicht van coëfficiënten in de dampspanningsformule

	Buck	Allen	Harrison	Loescher
f	1,004	1	1	$1,0007 + p_a \cdot 3,46 \cdot 10^{-5}$
a	0,61121	0,6108	0,6112	0,61121
b	17,368	17,27	17,67	17,502
c	238,88	237,3	243,5	240,97
γ	niet gegeven	0,00066	0,0008	0,00054 tot 0,00070

In deze formules is e_{sat} de verzadigingsdampspanning in kPa bij een Temperatuur T in graden Celsius. p_a is de actuele atmosferische luchtdruk in kPa . e_{act} is de actuele dampspanning in kPa , γ is de psychrometrische constante in K^{-1} en T_d en T_n zijn respectievelijk de droge- en natte-boltemperatuur in graden Celsius.

2.1.2 Psychrometrische constante

Er zijn twee verschillende definities voor de psychrometrische constante in omloop. Formule (4) geeft de definitie van Allen et al. [3]. In deze formule is de atmosferische luchtdruk onderdeel van de psychrometrische constante. Een andere definitie, op basis van thermodynamica, wordt gegeven door onder andere Visscher [11], Loescher et al. [7] en Harrison [6]. Hierbij maakt de atmosferische druk geen deel uit van de psychrometrische constante, zie formule (5). Mijn inziens is het beter om de luchtdruk buiten de de psychrometrische constante te houden, omdat de luchtdruk niet constant is. Dit kan omdat de psychrometrische constante ofwel impliciet wordt vermenigvuldigd met de luchtdruk (formule (4)), ofwel expliciet in de formule voor de actuele dampspanning (zie formule (2)). In het eerste geval heeft γ de eenheid kPa/K , in het tweede geval heeft γ de eenheid kPa . Om tot dezelfde eenheid, namelijk kPa/K , te komen moet nog expliciet vermenigvuldigd worden met p_a . Formule (5) zal dan ook worden gebruikt als definitie van de psychrometrische constante.

$$\gamma = \frac{C_p \cdot p_a}{\epsilon \cdot \lambda} = 0,665 \cdot 10^{-3} \cdot p_a = 0,067 \quad [kPa K^{-1}] \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{C_p}{\epsilon \cdot \lambda} \quad [K^{-1}] \quad (5)$$

In deze formules is C_p de specifieke warmte van ‘lucht’ in $\frac{J}{kg \cdot K}$, ϵ is de verhouding tussen de moleculaire massa’s van water en droge lucht, λ is de latente verdampingswarmte in $\frac{J}{kg}$ en p_a is de atmosferische luchtdruk in kPa . Uit formules (1), (2) en (3) kan een formule worden afgeleid voor de psychrometrische constante γ , waarmee γ kan worden terug gerekend als alle andere gegevens bekend zijn, zie formule (6). De benodigde gegevens zijn:

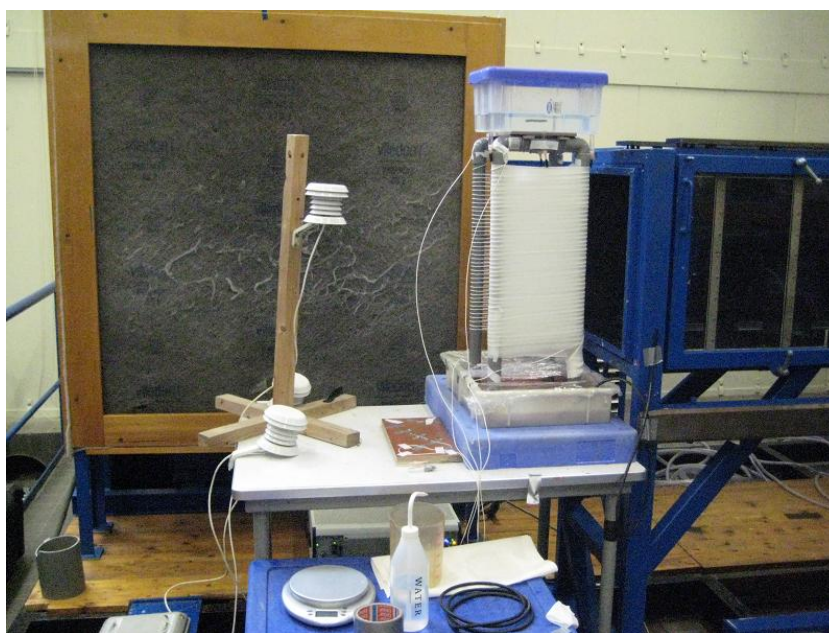
- $e_s(T_n)$, de verzadigingsdampspanning bij T_n in kPa
- $e_s(T_d)$, de verzadigingsdampspanning bij T_d in kPa
- p_a , de atmosferische luchtdruk in kPa
- T_d , de droge-boltemperatuur (actuele luchttemperatuur) in $^{\circ}C$
- T_n , de natte-boltemperatuur in $^{\circ}C$
- h , de relatieve luchtvochtigheid (onafhankelijk gemeten)

$$\gamma = \frac{e_s(T_n)}{p_a(T_d - T_n)} - \frac{h \cdot e_s(T_d)}{p_a(T_d - T_n)} = \frac{e_s(T_n)}{p_a \cdot \Delta T} - \frac{h \cdot e_s(T_d)}{p_a \cdot \Delta T} \quad [K^{-1}] \quad (6)$$

2.2 Experimentele opstelling

Om vast te stellen hoe de psychrometrische constante afhangt van de windsnelheid, zijn er experimenten gedaan. Hiervoor is een opstelling gemaakt in een windtunnel. Waardoor een vaste windsnelheid kan worden gegarandeerd tijdens de proeven. De snelheid van de wind moet ook naar behoeven instelbaar zijn. Daarnaast moeten de droge en natte-boltemperatuur continu gemeten worden om inzichtelijk te maken hoe deze in de tijd verlopen. Tevens is het noodzakelijk dat de relatieve luchtvochtigheid continu gemeten wordt om de waarde voor de psychrometrische constante vast te kunnen stellen.

Om een instelbare, niet variërende windsnelheid te garanderen is gekozen om een windtunnel te gebruiken. Het ging hierbij om de M-tunnel van de Faculteit Lucht- en Ruimtevaarttechniek [2]. Op basis van deze tunnel is vervolgens een opstelling ontworpen die de droge- en natte-boltemperatuur bijhoudt. Voor de temperatuurmetingen is gekozen voor de DTS-techniek, waarmee de temperatuur van een glasvezelkabel gemeten wordt met behulp van een laser, zie Selker et al. [9]. Het gebruikte DTS-apparaat betreft een Silixa Ultima [10]. Tevens zijn er drie HOBO-sensoren opgesteld die de relatieve luchtvochtigheid meten. Verder is ter referentie en voor de eerste resultaten ook een handslingerpsychrometer gebruikt. In de uitwerking van de resultaten zijn de metingen van de handslingerpsychrometer niet meegenomen.



Figuur 2: De meetopstelling in gebruik

Om de ‘psychrometer’ te bouwen is een opstelling gemaakt van pvc-buis en betonplex waar een glasvezelkabel omheen is gewikkeld in twee aparte spiralen, een droge en een natte kant. De natte spiraal is vervolgens ingewikkeld in gaasverband om deze voldoende vochtig te kunnen houden. Bovenop de opstelling is een bak gemaakt waaruit water wordt verdeeld. Zie Figuur 2.

2.3 Metingen

2.3.1 Eisen aan de metingen

De metingen moeten een voldoende hoge resolutie hebben, zowel in de plaats als in de tijd. Zo moet duidelijk zijn wat er gebeurt tijdens het verdampingsproces en het afkoelen van de natte thermometer. Maar ook moet duidelijk zijn hoe de afkoeling in verband staat met de toevoer van water van bovenaf. Er is voor de temperatuurregistratie gekozen voor een resolutie van 30 seconden en voor de relatieve luchtvochtigheid één minuut. De handslingerpsychrometer is tenminste éénmaal per meting gebruikt en afgelezen.

2.3.2 Uitvoering

Alle metingen zijn uitgevoerd volgens eenzelfde stramien. Eerst werd de windtunnel op snelheid gebracht, waarna de watertoevoer werd geopend. Vervolgens werd gewacht tot de natte-boltemperatuur stationair bleef, waarna de watertoevoer werd afgesloten. Ook nu werd weer gewacht tot de natte-boltemperatuur weer constant werd. De tijdsduur van een meting kwam hiermee op ongeveer tien minuten voor windsnelheden groter dan

twee meter per seconde, oplopend tot ruim twintig minuten voor lagere windsnelheden. De temperatuur van het toegevoerde water lag enkele graden boven de omgevingstemperatuur.

Het tussentijds afsluiten van de watertoevoer was nodig, omdat de aangevoerde hoeveelheid water te groot was om terug te koelen naar de natte-boltemperatuur. Er bleef een sterke gradiënt bestaan in de temperatuur over de hoogte van de opstelling. Door het afsluiten van de watertoevoer kon het aanwezige water worden afgekoeld, zonder dat nieuw, warm water werd aangevoerd. Hierdoor bleek de temperatuurgradiënt aan de onderkant van de opstelling te verdwijnen, waardoor daar een constante ‘natte-boltemperatuur’ ontstond.

Er zijn metingen gedaan op drie achtereenvolgende dagen, waardoor er per dag verschillen zijn in de omgevingstemperatuur, luchtdruk en relatieve luchtvochtigheid. Meten op verschillende dagen was nodig om een grotere hoeveelheid data te verzamelen en om te zien wat de invloed van de relatieve luchtvochtigheid is op de psychrometrische constante.

3 Resultaten en Discussie

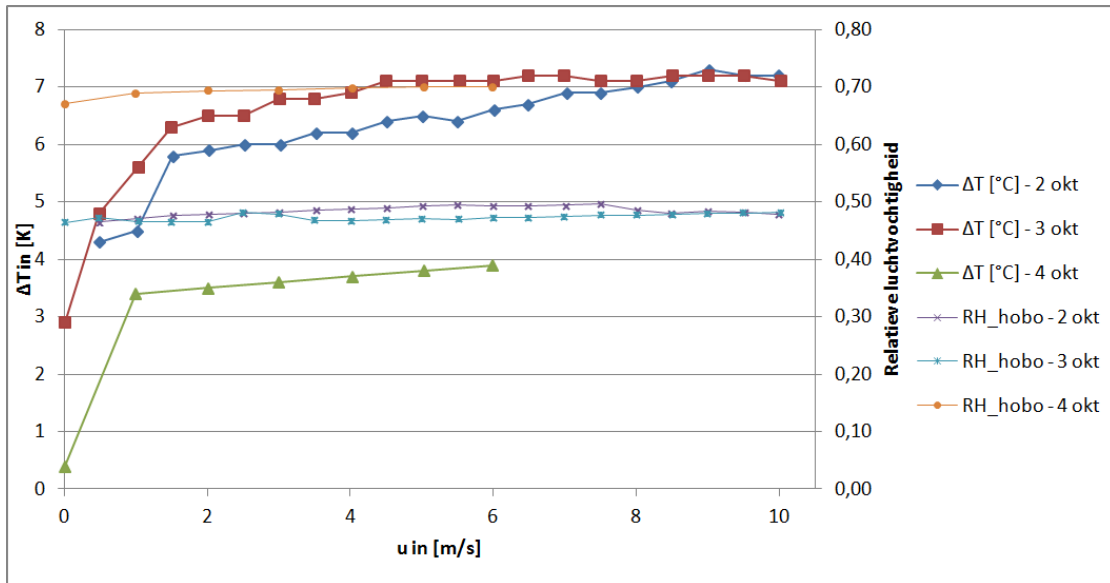
3.1 Metingen

Er is gemeten op drie verschillende dagen, namelijk van 2 tot en met 4 oktober 2013. Op 2 oktober lag de luchtdruk tussen de 101,59 en 101,63 kPa en de luchtvochtigheid tussen de 46 en 48%. 3 oktober was vergelijkbaar, met een luchtdruk van 101,55 kPa aflopend naar 101,32 kPa over de dag, de luchtvochtigheid was gelijk aan de dag ervoor. De derde dag, 4 oktober, laat een heel ander beeld zien. De luchtdruk is gedaald tot 101,28 kPa en de relatieve luchtvochtigheid is sterk gestegen tot waarden tussen de 67 en 70%. Doordat op de laatste meetdag de relatieve luchtvochtigheid een stuk hoger lag dan de dagen ervoor is uit de resultaten af te leiden wat de invloed van de luchtvochtigheid is.

3.2 Psychrometrische constante

De resultaten sluiten goed aan bij wat er verwacht mocht worden, namelijk dat het verschil tussen de droge- en natte-boltemperatuur kleiner is bij lagere windsnelheden² (zie Figuur 3). Dit betekent dat er bij lage windsnelheden de verdampingsflux kleiner is. Hierdoor wordt minder warmte onttrokken aan de natte temperatuursensor dan bij hogere windsnelheden het geval zou zijn. Vervolgens zijn voor alle metingen de dampspanningen uitgerekend aan de hand van formules (1), (2) en (3), waarna met de relatieve luchtvochtigheid uit de data van de HOBO-sensoren de psychrometrische constante γ bepaald kon worden (zie formule (6) en figuur 4). Wat direct opvalt in de figuur, is dat naarmate de windsnelheid afneemt, γ in waarde toeneemt. Voor waarden van 2 m/s en lager, is de toename zelfs zeer sterk. De hoogst berekende waarde voor γ is $1,7 \cdot 10^{-2} K^{-1}$, terwijl volgens de literatuur gangbare waarden rond $6,6 \cdot 10^{-4} K^{-1}$

²Met windsnelheid wordt bedoeld: de snelheid van de luchtstroom langs de sensoren.



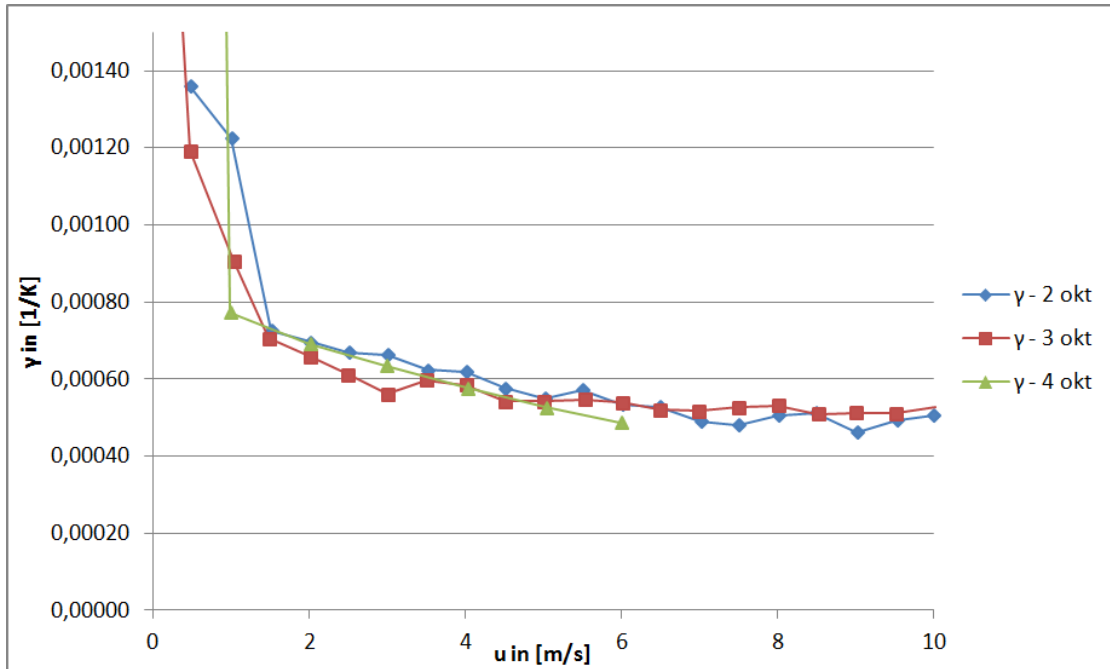
Figuur 3: Temperatuurverschil ΔT t.o.v. windsnelheid u

liggen [11]. Een dalende trend van γ is ook waarneembaar bij windsnelheden hoger dan 2 m/s .

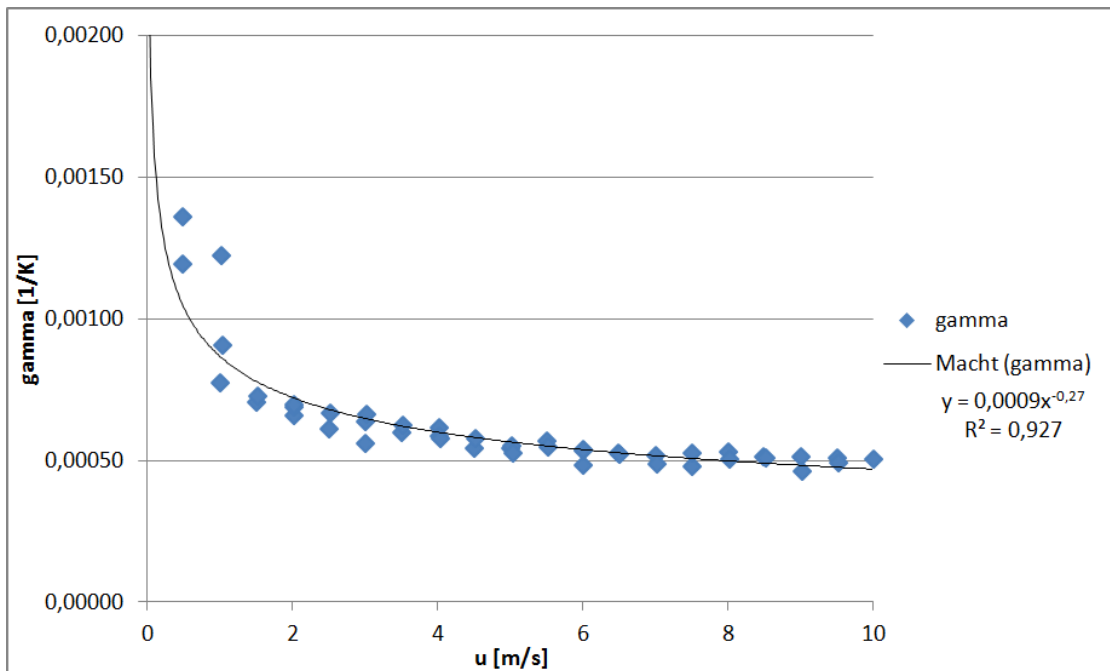
3.3 Relatieve luchtvochtigheid

De waarden voor de relatieve luchtvochtigheid zijn enerzijds verkregen door de directe metingen van drie Hobo-sensoren. Deze sensoren hebben een afwijking ten opzichte van elkaar, maar laten wel allemaal dezelfde trends zien gedurende de dag. Volgens de datasheet [1] van de gebruikte sensoren bedraagt de afwijking voor het meten van relatieve luchtvochtigheid $\pm 3\%$. Voor de waarde van de relatieve luchtvochtigheid is het gemiddelde genomen van de waarden van de sensoren, gemiddeld over de laatste drie minuten van een meting. Daarnaast stond een handslingerpsychrometer ter beschikking. Deze bevat twee kwikthermometers die tot op $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ nauwkeurig zijn af te lezen. De relatieve luchtvochtigheid wordt verkregen door de dampspanningsformule³ toe te passen, met de aanname dat voor de psychrometrische constante geldt: $\gamma = 6,6 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$. Het betreft hier echter puntmetingen die één of tweemaal per meting zijn uitgevoerd. De data verkregen uit de Hobo sensoren laat dan ook een veel eenduidiger beeld zien dan de handslingerpsychrometer en worden niet beïnvloed door afleesfouten. Ook is het de vraag of de waarde van psychrometrische constante van de handslingerpsychrometer wel $6,6 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ is. De data verkregen uit de HOBO-sensoren is daarom betrouwbaarder.

³Voor gebruikte formules: zie paragraaf 2.1.1



Figuur 4: 'Psychrometrische constante' γ t.o.v. windsnelheid u



Figuur 5: Curve-fit van γ t.o.v. windsnelheid u

3.4 Windtunnel

De gebruikte windtunnel is geschikt om windsnelheden te genereren tot 35 m/s. Er is tijdens de metingen alleen gebruik gemaakt van het bereik tussen 0 en 10 m/s. De M-tunnel heeft een regelsysteem dat vermogen aan de rotor levert, hierdoor is de relatieve fout in de gegenereerde windsnelheid hoger voor lage windsnelheden. Verder was er ook een luchtcirculatie aanwezig in de hal waar de metingen werden verricht, waardoor de metingen waarbij de tunnel uit stond (0 m/s) niet bij exact stilstaande lucht zijn uitgevoerd. Deze luchtcirculatie was echter niet meetbaar en is verwaarloosbaar wanneer de windtunnel wel aan staat.

3.5 Gevoeligheid

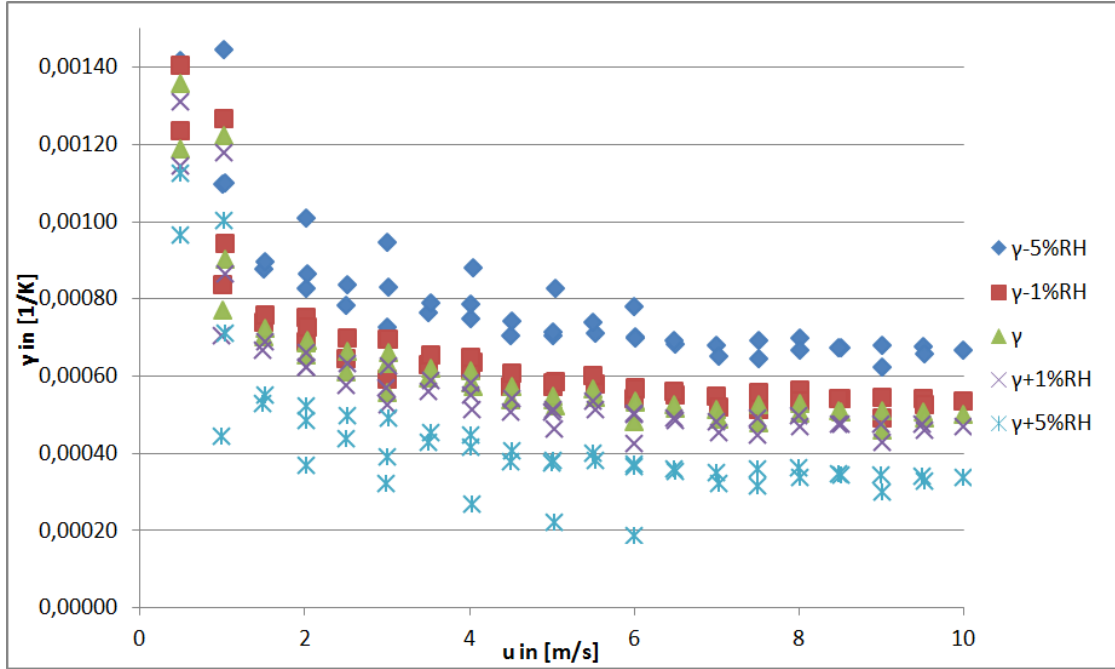
Ook naar de gevoeligheid van de metingen is gekeken, namelijk naar de gevoeligheid voor een meetfout in de relatieve luchtvochtigheid en een meetfout in de natte-boltemperatuur. De gevoeligheid zal worden beschouwd door een verandering aan de gemeten waarde op te leggen en met de veranderde waarde de psychrometrische constante opnieuw uit te rekenen.

De gevonden waarden van de psychrometrische constante γ blijken lineair afhankelijk te zijn van de gemeten waarden van de relatieve luchtvochtigheid, zie formule (7). Een toename van de relatieve luchtvochtigheid met 5% geeft een afname van ongeveer $3 \cdot 10^{-4} : K^{-1}$. Dit is bijna een halvering van de berekende waarde van γ . De gevoeligheid voor de gemeten waarde van de relatieve luchtvochtigheid is dus erg groot. Zeker omdat de gebruikte HOBO-sensoren een nauwkeurigheid hadden van $\pm 3\%$ volgens de datasheet. Door het inzetten van drie onafhankelijke sensoren is de verwachtingswaarde van de meetfout terug gebracht tot $\pm \frac{3\%}{3} = \pm 1\%$. Zie figuur 6.

De luchtvochtigheidssensoren stonden opgesteld achter de psychrometer. Hierdoor hebben ze wellicht een te hoge luchtvochtigheid gemeten, omdat waterdamp vanaf de psychrometer werd meegevoerd langs deze luchtvochtigheidssensoren. Dit lijkt in overeenstemming met de gemeten waarden voor de psychrometrische constante γ , die aan de lage kant lijken te zijn. Een hoger gemeten waarde voor de luchtvochtigheid geeft een bias voor de waarden van de psychrometrische constante, welke lager worden dan verwacht. Zie formule (7).

$$\gamma \mp \Delta\gamma = \frac{e_s(T_n)}{p_a(T_d - T_n)} - \frac{(h \pm \Delta h) \cdot e_s(T_d)}{p_a(T_d - T_n)} \quad [K^{-1}] \quad (7)$$

De gevoeligheid voor de gevonden waarde van de natte-boltemperatuur is ook bekeken, het verband is echter niet eenvoudig vast te stellen. Een toename van de natte-boltemperatuur met geeft een toename van de waarde van de psychrometrische constante. Hierbij moet nog worden opgemerkt dat de natte-boltemperatuur nooit boven de droge-boltemperatuur uit kan komen, er vindt namelijk altijd enige verdamping plaats. Wanneer de droge- en natte-boltemperatuur aan elkaar gelijk zijn is de formule om de psychrometrische constante te berekenen niet meer geldig, er zou dan door nul gedeeld

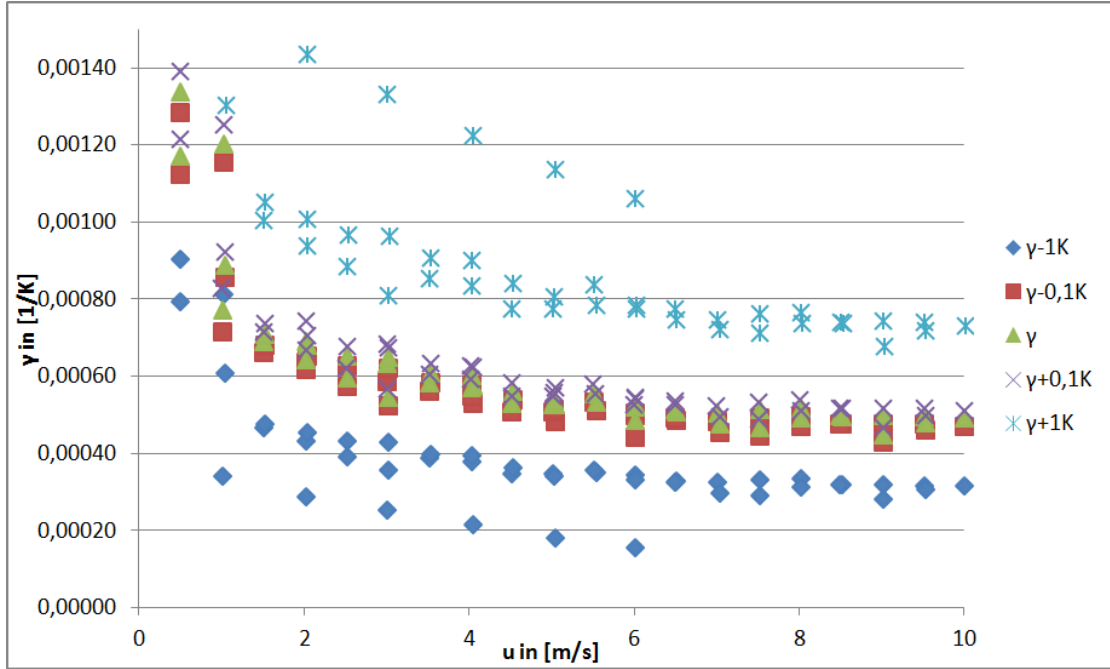


Figuur 6: Gevoeligheid van de psychrometrische constante voor een meetfout in de relatieve luchtvochtigheid

moeten worden, zie formule (8). Formule (9) laat het verband zien tussen de psychrometrische constante en de natte-boltemperatuur, zie tevens figuur 7. De nauwkeurigheid van de Ultima om temperaturen te meten is ongeveer 0,1 K, dus de verwachte afwijking blijft beperkt.

Een overzicht van de gevoeligheid van de psychrometrische constante voor een meetfout in zowel de natte-boltemperatuur als de relatieve luchtvochtigheid is gegeven in figuur 8, bij verschillende waarden van de windsnelheid en relatieve luchtvochtigheid. De afwijking in temperatuur is $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$, de afwijking in relatieve luchtvochtigheid is $\pm 5\%$. De streeplijnen geven de maximale afwijking aan volgens de fabrikant van de sensoren, 2 maal 0,1 K voor de temperatuur en $\pm 3\%$ voor de HOBO-sensoren [1]. De schaalverdeling voor de psychrometrische constante γ is vastgesteld als bandbreedte van $3,0 \cdot 10^{-4}$ rondom de originele waarde voor γ . Hieruit blijkt dat de gevoeligheid veel groter is bij een lage waarde van ΔT . Een klein temperatuursverschil wordt enerzijds veroorzaakt door een hoge luchtvochtigheid en anderzijds door een lage windsnelheid. De gevoeligheid is dus het hoogst bij een combinatie van een lage windsnelheid en een hoge luchtvochtigheid, zie figuur 8a.

$$\gamma = \frac{e_s(T_n)}{p_a(T_d - T_n)} - \frac{h \cdot e_s(T_d)}{p_a(T_d - T_n)} = \frac{a \cdot e^{\frac{b \cdot T_n}{T_n + c}}}{p_a(T_d - T_n)} - \frac{h \cdot a \cdot e^{\frac{b \cdot T_d}{T_d + c}}}{p_a(T_d - T_n)} \quad [K^{-1}] \quad (8)$$



Figuur 7: Gevoeligheid van de psychrometrische constante voor een meetfout in de natte-boltemperatuur

$$\gamma \pm \Delta\gamma = \frac{a \cdot e^{\frac{b \cdot (T_n \pm \Delta T_n)}{(T_n \pm \Delta T_n) + c}}}{p_a(T_d - (T_n \pm \Delta T_n))} - \frac{h \cdot a \cdot e^{\frac{b \cdot T_d}{T_d + c}}}{p_a(T_d - (T_n \pm \Delta T_n))} \quad [K^{-1}] \quad (9)$$

met:

$$a = 0,6108$$

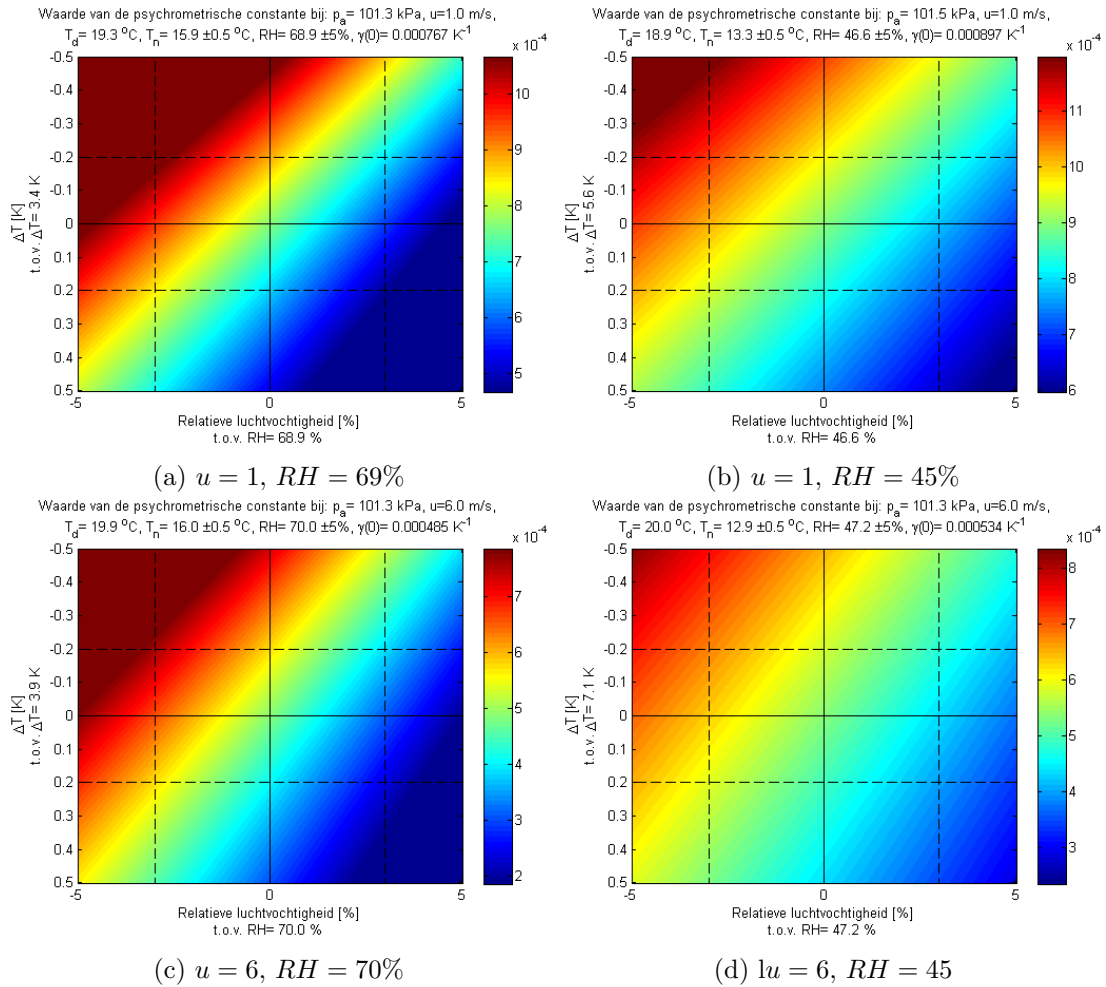
$$b = 17,27$$

$$c = 237,3$$

Verder moet nog worden opgemerkt dat hoewel de relatieve luchtvochtigheid en de natte-boltemperatuur apart gemeten zijn, deze wel van elkaar afhankelijk zijn, zie formule (3). Een hogere relatieve luchtvochtigheid heeft bij eenzelfde droge-boltemperatuur namelijk een hogere natte-boltemperatuur tot gevolg.

4 Conclusie

Om terug te komen op de onderzoeksvraag: “Wat is het verband tussen de waarde van de psychrometrische constante en de snelheid van de langstromende lucht aan de psychrometer?” Curve-fitting geeft het verband tussen de psychrometrische constante en de windsnelheid: $\gamma = 9 \cdot 10^{-4} u^{-0,27}$, met $R^2 = 0,93$ zie figuur 5. Hierbij moet wel de kanttekening worden gemaakt dat door de sterke gevoeligheid voor –met name– een



Figuur 8: Gevoeligheid van de psychrometrische constante voor een absolute meetfout in de natte-boltemperatuur (y-as) en de relatieve luchtvochtigheid (x-as)

meetfout in de relatieve luchtvochtigheid het lastig maakt om tot een exact verband te komen tussen de psychrometrische constante en de windsnelheid.

Bij lage windsnelheden ligt de natte-boltemperatuur hoger, dan bij hoge windsnelheden het geval is. De verdamping die plaatsvindt aan de natte bol is beduidend lager (zie figuur 3). Om tot een correcte waarde te komen van de relatieve luchtvochtigheid, is een correctie nodig. Deze correctie kan worden toegepast op de ‘psychrometrische constante’. De waarde van de psychrometrische constante is onafhankelijk van de relatieve luchtvochtigheid, omdat bij verschillende waarden voor de relatieve luchtvochtigheid een zelfde waarde voor de psychrometrische constante wordt gevonden. Bij lage windsnelheden is de waarde van de psychrometrische constante is vele malen hoger dan de uit de literatuur bekende waarden.

Zoals ook door Visscher [11] wordt uitgelegd, heeft iedere psychrometer binnen zekere

marges zijn eigen waarde voor de psychrometrische constante. Dat de gevonden waarden voor de psychrometrische constante voor hoge windsnelheden zo dicht bij de waarden uit de literatuur liggen, geeft aan dat vrijwel iedere meetopstelling met een droge en natte temperatuursensor als psychrometer kan fungeren. Dus ook een opstelling op basis van een glasvezelkabel en DTS-techniek. Dit biedt kansen om het verloop van relatieve luchtvochtigheid met hoge resolutie te meten in een gebied, afstand, of hoogte.

5 Aanbevelingen

Gezien de grote gevoeligheid van de psychrometrische constante voor de gemeten waarde van relatieve luchtvochtigheid ligt het voor de hand om bij vervolgonderzoek een nauwkeuriger methode te gebruiken om de relatieve luchtvochtigheid vast te stellen. Ook moet kritisch worden gekeken naar het snelheidsbereik van de windtunnel, omdat juist bij zeer lage windsnelheden de interessante metingen gedaan worden, waarover in dit onderzoek de meeste onzekerheid bestaat.

Referenties

- [1] *Datasheet Hobo U23, Relative Humidity Sensor.* http://www.onsetcomp.com/files/data-sheet/Onset_HOBO_U23_Pro_v2_Data_Loggers.pdf.
- [2] TU Delft: M-tunnel. <http://www.lr.tudelft.nl/organisatie/afdelingen/aerodynamics-wind-energy-flight-performance-and-propulsion/wind-tunnel-laboratories/low-speed-tunnels/m-tunnel/>.
- [3] R. Allen, L. Pereira, D. Raes, and M. Smith. *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper No. 56.* Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1998.
- [4] A. Buck. New equations for computing vapor pressure and enhancement factor. *Journal of Applied Meteorology*, 20:1527–1532, 1981.
- [5] B. Hardy. Its-90 formulations for vapor pressure, frostpoint temperature, dewpoint temperature, and enhancement factors in the range -100 to $+100$ c. *The Proceedings of the Third International Symposium on Humidity & Moisture*, (April 1998), 1998.
- [6] R. Harrison and C. Wood. Ventilations effects on humidity measurements in thermometerscreens. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 3, 2011.
- [7] H. Loescher, C. Hanson, and T. Ocheltree. The psychrometric constant is not constant: A novel approach to enhance the accuracy and precision of latent energy fluxes through automated water vapor calibrations. *Journal of Hydrometeorology*, 10:1271–1284, 2009.
- [8] H. Preston-Thomas. The international temperature scale of 1990 (its-90). *Metrologia*, 27(107), 1990.
- [9] J. Selker, L. Thévenaz, H. Huwald, A. Mallet, W. Luxemburg, N. Van de Giesen, M. Stejskal, J. Zeman, M. Westhoff, and M. Parlange. Distributed fiber-optic temperature sensing for hydrologic systems. *Water Resources Research*, 42(12), 2006.
- [10] Silixa Ltd. *Manual Silixa Ultima*, 2012.
- [11] G. Visscher. Standard psychrometers: A matter of (p)references. *Measurement Science and Technology*, 6(10):1451–1461, 1995.

A Meetgegevens

De meetgegevens zijn bijgevoegd in excel-bestand ‘meetgegevens.xlsx’.

B Symboolverklaring

Tabel 2: Verklaring van de gebruikte symbolen

Symbol	Grootheid	Eenheid	Omschrijving
a	–	–	Coëfficiënt in de dampspanningsformule
b	–	–	Coëfficiënt in de dampspanningsformule
c	–	–	Coëfficiënt in de dampspanningsformule
C_p	–	$\frac{J}{kg K}$	Specifieke warmte (van lucht)
e_{act}	Druk	kPa	Actuele dampspanning
e_{sat}	Druk	kPa	Verzadigingsdampspanning
f	–	–	Coëfficiënt in de dampspanningsformule
h	Verhouding	–	Relatieve luchtvochtigheid
p_a	Druk	kPa	Actuele atmosferische luchtdruk
T_d	Temperatuur	°C	Droge-boltemperatuur
T_n	Temperatuur	°C	Natte-boltemperatuur
u	Snelheid	m/s	Snelheid van de langsstromende lucht
γ	Per temperatuur	K^{-1}	Psychrometrische constante
Δ	Vershil	–	Vershil tussen twee waarden
ϵ	Verhouding	–	molaire massaverhouding van water en droge ‘lucht’
λ	Specifieke warmte	J/kg	Verdampingswarmte van water

C Dampspanningsformules

De dampspanningsformule volgens Hardy [5], geldig op het temperatuurbereik van 0 tot 100 °C.

$$\begin{aligned}
 e_{sat} &= f \cdot e^{g_7 \cdot \ln(T) + g_6 \cdot T^4 + g_5 \cdot T^3 + g_4 \cdot T^2 + g_3 \cdot T + g_2 + g_1 \cdot T^{-1} + g_0 \cdot T^{-2}} \quad [Pa] \quad (10) \\
 \alpha &= cw_0 + T_c \cdot (cw_1 + T_c \cdot (cw_2 + T_c \cdot cw_3)) \\
 \beta &= e^{dw_0 + T_c \cdot (dw_1 + T_c \cdot (dw_2 + T_c \cdot dw_3))} \\
 f &= e^{\left(\alpha \cdot \left(1 - \frac{e_{sat}}{p_a}\right) + \beta \cdot \left(\frac{p_a}{e_{sat}} - 1\right)\right)}
 \end{aligned}$$

met:

$$\begin{aligned}
 g_0 &= -2836,5744 & cw_0 &= 3,53624 \cdot 10^{-4} \\
 g_1 &= -6028,076559 & cw_1 &= 2,9328363 \cdot 10^{-5} \\
 g_2 &= 19,54263612 & cw_3 &= 8,5813609 \cdot 10^{-9} \\
 g_3 &= -0,02737830188 & dw_0 &= -10,7588 \\
 g_4 &= 1,6261698 \cdot 10^{-5} & dw_1 &= 0,063268134 \\
 g_5 &= 7,0229056 \cdot 10^{-10} & dw_2 &= -2,5368934 \cdot 10^{-4} \\
 g_6 &= -1,8680009 \cdot 10^{-13} & dw_3 &= 6,3405286 \cdot 10^{-7} \\
 g_7 &= 2,7150305 & p_a &= \text{atmosferische luchtdruk in Pa} \\
 T &= \text{temperatuur in Kelvin} & T_c &= \text{temperatuur in graden Celsius} \\
 e_{sat} &= \text{Verzadigingsdampspanning in Pa}
 \end{aligned}$$

Op basis van deze formule en zijn voorganger uit 1976, zijn benaderingsformules gemaakt met een afwijking van minder dan 0,05%. Het temperatuurbereik van deze formules beperkt zich echter van 0 tot 50 °C. Vrijwel iedere publicatie maakt gebruik van zijn eigen set coëfficiënten, maar ze verwijzen vrijwel allemaal terug naar Buck [4]. Voor coëfficiënten zie tabel 3

$$e_{sat} = f \left(a \cdot e^{\frac{b \cdot T}{T+c}} \right) \quad [kPa] \quad (11)$$

$$e_{act} = e_{sat}(T_n) - \gamma \cdot p_a \cdot (T_d - T_n) \quad [kPa] \quad (12)$$

$$h = \frac{e_{act}}{e_{sat}} \quad (13)$$

Tabel 3: Overzicht van coëfficiënten in de dampspanningsformule

	Buck	Allen	Harrison	Loescher
f	1,004	1	1	$1,0007 + p_a \cdot 3,46 \cdot 10^{-5}$
a	0,61121	0,6108	0,6112	0,61121
b	17,368	17,27	17,67	17,502
c	238,88	237,3	243,5	240,97
γ	niet gegeven	0,00066	0,0008	0,00054 tot 0,00070

Hierin is e de dampspanning in kPa, T de temperatuur in graden Celsius en γ de psychrometrische constante in K^{-1} .

Uit voorgenoemde formules kan een formule voor γ worden afgeleid:

$$\gamma = \frac{e_s(T_n)}{p_a(T_d - T_n)} - \frac{h \cdot e_s(T_d)}{p_a(T_d - T_n)} \quad (14)$$

Wanneer deze volledig wordt uitgeschreven voor h , p_a , T_d , $e_n T_n$, komt dat neer op

formule (15). Voor coëfficiënten zie tabel 3

$$\gamma(h, p_a, T_d, T_n) = \frac{a \cdot e^{\frac{b \cdot T_n}{T_n + c}}}{p_a(T_d - T_n)} - \frac{h \cdot a \cdot e^{\frac{b \cdot T_d}{T_d + c}}}{p_a(T_d - T_n)} \quad [K^{-1}] \quad (15)$$