

Klimaatkamertest van de Gill R3 sonische anemometer/thermometer en de Licor 7500 H₂O/CO₂ sensor

A. Schuitmaker

KNMI technical report = technisch rapport; TR-305

De Bilt, 2009

PO Box 201
3730 AE De Bilt
Wilhelminalaan 10
De Bilt
The Netherlands
<http://www.knmi.nl>
Telephone +31(0)30-220 69 11
Telefax +31(0)30-221 04 07

Author: Schuitmaker, A.



**Klimaatkamertest van de Gill R3 sonische
anemometer/thermometer en de Licor 7500 H₂O/CO₂
sensor
- KNMI stageverslag -**

A. Schuitmaker

Stage verslag
De Bilt, februari 2009

Onder begeleiding van:
Dr. F.C. Bosveld (KNMI)

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut
Sector Klimaat en Seismologie
Afdeling regionaal Klimaat



Samenvatting

In dit verslag staan de resultaten van de stage die uitgevoerd is bij het KNMI onder begeleiding van F.C. Bosveld (KNMI) en S.R. de Roode (TU Delft). Gedurende de stage is gekeken naar de calibratie van de Gill R3 en R3A sonische anemometer en de LI-7500, instrumenten die gebruikt worden op de meetmast Cabauw.

Resultaten van calibratiemetingen laten zien dat de Gill R3 en R3A sonische anemometer een grote gemeten temperatuur afwijking laten zien rond $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. De temperatuur gevoeligheid is onderzocht in het gebied 10°C tot 40°C . De lineaire regressie laat zien dat de sonische anemometer voor alle relatieve vochtigheden een offset heeft. De gevoeligheid ligt voor alle gevallen dicht bij één en binnen de standaard fout marge. Verder zijn er in de klimaatkamer een aantal metingen verricht die lijken op de hysteresis zoals waargenomen in de in-situ metingen.

Voor de calibratie van de LI-7500 is er gekeken naar in-situ observaties van 6 mei 2008 en observaties uit de klimaatkamer. De resultaten van operationele data en klimaatkamer laten een gevoeligheid zien van respectievelijk 1.05 en 0.96.



Inhoudsopgave

Inhoudsopgave	5
1 Introductie	7
1.1 Onderzoeksdoelen	7
1.2 Wetenschappelijk doel	8
1.3 Vergelijking van turbulentie instrumenten met referentie instrumenten in Ca- bauw	10
2 Theorie Sonische Anemometer en LI-7500	13
2.1 Gill R3 Sonische Anemometer	13
2.2 LI-7500	14
2.2.1 Introductie	14
2.2.2 Theorie	14
3 Meetmethode en instellingen	17
3.1 Meetmethode	17
3.1.1 Klimaatkamer data verwerking	18
3.1.2 Sonische anemometer data verwerking	18
3.1.3 LI-7500 data verwerking	19
3.2 Instellingen	19
3.2.1 Sonische anemometer	19
3.2.2 LI-7500	19
4 Resultaten	21
4.1 Observatie analyse	21
4.1.1 Analyse in-situ observaties	21
4.1.2 Analyse vochtmeting	22
4.2 Analyse klimaatkamer metingen temperatuur	26
4.2.1 Sonische temperatuur gedrag	26
4.2.2 Hysterese	26
4.2.3 Bepaling gevoeligheid sonische anemometer	30
4.3 Vocht	33
5 Discussie en Conclusies	35
5.1 Temperatuur	35
5.2 Vocht	36
Bibliografie	39

Hoofdstuk 1

Introductie

De stage is een onderdeel van de studie Technische Natuurkunde van de TU Delft. Na een afstudeeronderzoek met als titel *Measurement of turbulent energy spectra in the stable atmospheric boundary layer using Laser Doppler Anemometry* (zie Schuitmaker[7]) is een stage bij het KNMI een logisch stap. Tijdens mijn afstudeerwerk werden referentiemetingen verricht met de sonische anemometer. Kennis van de werking van sonische anemometer was derhalve al aanwezig.

In deze stage gaat het om de fabrieksmetingen van temperatuur en vocht van sonische anemometer/thermometers en een openpad H₂O/CO₂ sensor te controleren door analyse van in-situ en klimaatkamer metingen.

1.1 Onderzoeksdoelen

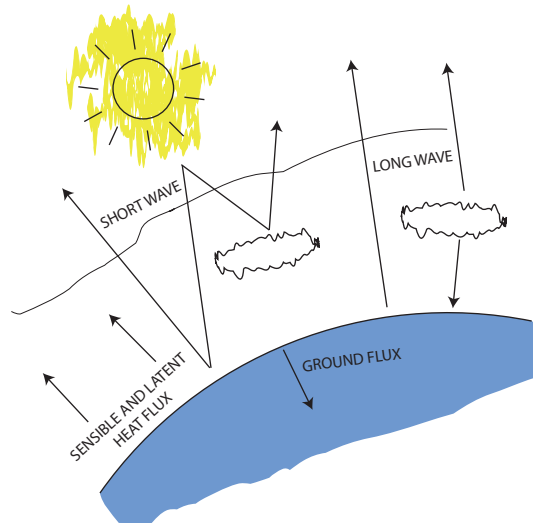
In de 200 m hoge meteorologische meetmast in Cabauw wordt door het KNMI op een aantal niveaus turbulentie metingen uitgevoerd. Van belang voor betrouwbare metingen zijn goede ijkingen en een methode om on-line problemen in de metingen te kunnen detecteren. Dit laatste gebeurt door gebruik te maken van redundantie in het meetprogramma.

Vergelijking van de temperatuursignalen van de Gill R3 sonische anemometer/thermometers met standaard KNMI temperatuur observaties in Cabauw suggereren dat de ijkfactoren afwijken van de te verwachten waarden en dat er bovendien ook een hysteresis in de dagelijkse gang aanwezig is.

Ook vergelijking van de vochtsignalen van de LI-7500 open path sensoren met de vochtmetingen in Cabauw suggereert dat de ijkfactoren afwijken van de te verwachten waarden.

Om dit nader te onderzoeken zijn ijkingen en testen in de KNMI klimaatkamer uitgevoerd worden. Onderzoeksvragen zijn:

- Zijn de in-situ vergelijkingen in Cabauw voor temperatuur en vocht te reproduceren onder de gecontroleerde omstandigheden in de klimaatkamer van het KNMI?
- Komt de gevoeligheid voor vocht van de LI-7500 overeen met de referentiemetingen?
- Kan de in de openlucht gevonden hysteresis in de temperatuurmetingen verklaard worden?
- Komt de gemeten vocht invloed op de sonische temperatuur overeen met de theoretische waarde?



Figuur 1.1: De warmte energie balans bestaat uit verschillende termen met energie transport.

- Hoe groot is de temperatuur invloed op de bias in de windsnelheidssignalen?

1.2 Wetenschappelijk doel

De Gill R3 sonische anemometer en de LI-7500 staan voor wetenschappelijke doeleinde op de meetmast van Cabauw. Met deze instrumenten worden metingen van latente- en sensibele warmteflux gedaan. De sensibele warmteflux gaat over het transport van pakketjes lucht met verschillende temperatuur. In het geval dat een warm pakketje lucht naar boven wordt getransporteerd is er sprake van een positieve warmteflux. Denk hier bijvoorbeeld aan een thermiekbels die loskomt van de grond en warme lucht naar grotere hoogtes brengt. Een visualisatie van sensibele warmteflux is te zien in figuur 1.3. De latente warmte flux gaat over het transport van vocht. Warmte die het kost om water in een dampfase te brengen kan op een andere plek weer vrijkomen. Denk hierbij weer aan diezelfde thermiekbels. Het verdampen van vocht onttrekt warmte aan de bodem en door de thermiekbels wordt dit vocht naar grotere hoogtes getransporteerd. Daar komt de warmte weer vrij als het vocht condenseert. De plek waar dit gebeurt wordt gemarkeerd door het ontstaan van een Cumulus wolk. De beide fluxen zijn dus energiestromen en zijn onderdeel van de oppervlakte energie balans (zie figuur 1.1).

Voor latente warmte flux is er dus naast de sonische anemometer ook een vochtmeting nodig. Op de Cabauw meetmast wordt deze meting uitgevoerd door een LI-7500. De beide instrumenten zijn te zien op de foto's in figuur 1.2. Voor de sensibele warmte flux wordt temperatuur gemeten door de sonische anemometer. Het mag duidelijk zijn dat een goede calibratie van beide instrumenten belangrijk is voor een correcte meting van de sensibele- en latente warmteflux.

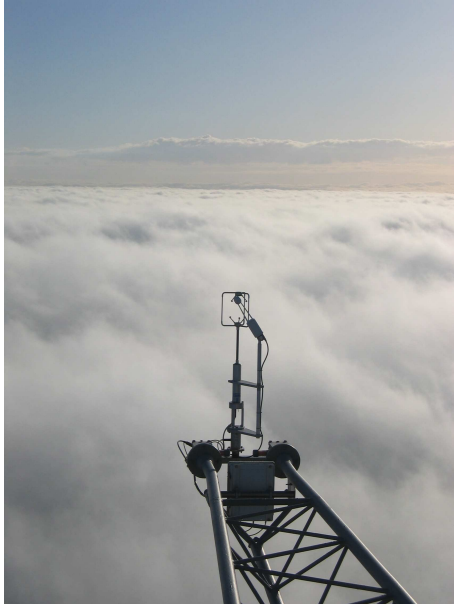
De sensibele warmte flux volgt uit:

$$H = \rho c_p (\overline{w'\theta'}) \quad (1.1)$$

waarin ρ de dichtheid is van lucht, c_p de specifieke warmte capaciteit van lucht bij constante druk, w' de verticale wind component fluctuatie en θ' de potentiële temperatuur fluctuatie.

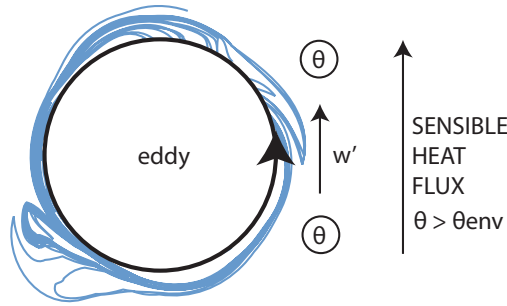


(a) Sonische anemometer weghalen van de Cabauw meetmast voor metingen in de KNMI klimaatkamer.



(b) Sonische anemometer op de mast. (c) De meetmast van Cabauw vanaf de grond.

Figuur 1.2: Foto's van de sonische anemometer op de Cabauw mast.



Figuur 1.3: Opwaartse sensibele warmte transport door transport van warme lucht omhoog en koude lucht naar beneden.

Hier geeft $(\overline{w'\theta'})$ een tijdmiddeling aan van $w'\theta'$. De potentiële temperatuur volgt uit:

$$\theta = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{b_\theta} \quad (1.2)$$

waarin T de absolute temperatuur is, p de luchtdruk, p_0 een referentie druk (100kPa) and b_θ een constante met waarde 0.286.

De latente warmte flux volgt uit:

$$L_v E = \rho L_v (\overline{w'q'}) \quad (1.3)$$

waarin L_v de specifieke verdampingswarmte, de hoeveelheid energie per massa eenheid die nodig is om van een gecondenseerde toestand naar een gas toestand te komen. E is de flux van de waterdamp.

Met een combinatie van een sonische anemometer en een LI-7500 kan de sensibele - en latente warmte flux dus gemeten worden door temperatuur, vocht en wind component fluctuaties te meten. De fluctuaties volgen uit

$$\theta' = \theta - \bar{\theta}, \quad (1.4)$$

$$q' = q - \bar{q}, \quad (1.5)$$

$$w' = w - \bar{w}. \quad (1.6)$$

Een slechte calibratie van de sonische anemometer en LI-7500 die leidt tot een onder- of overschatting van w' , q' of θ' zal daardoor een fout geven in de gemeten sensibele - en latente warmte flux. Het is daarom van groot belang dat de calibratie van de gebruikte sonische anemometer en LI-7500 goed is.

1.3 Vergelijking van turbulentie instrumenten met referentie instrumenten in Cabauw

In de meetmast van Cabauw, waar de sonische anemometer normaliter is gestationeerd, worden de metingen van de vocht gecorrigeerde sonische temperatuur, T_{sonic}^c vergeleken met de referentietemperatuur metingen. De referentietemperatuur metingen worden uitgevoerd met een Pt500 in een standaard KNMI hutje. Het meetprincipe van en correcties op de sonische temperatuur wordt in hoofdstuk 2 behandeld. In dit geval staat de sonische anemometer op een hoogte van 60 meter en zijn er referentiemetingen op 40 (T_{40}) en 80

(T_{80}) meter. Het gemiddelde van deze twee temperaturen wordt daarom vergeleken met de sonische anemometer. De referentietemperatuur volgt dan uit:

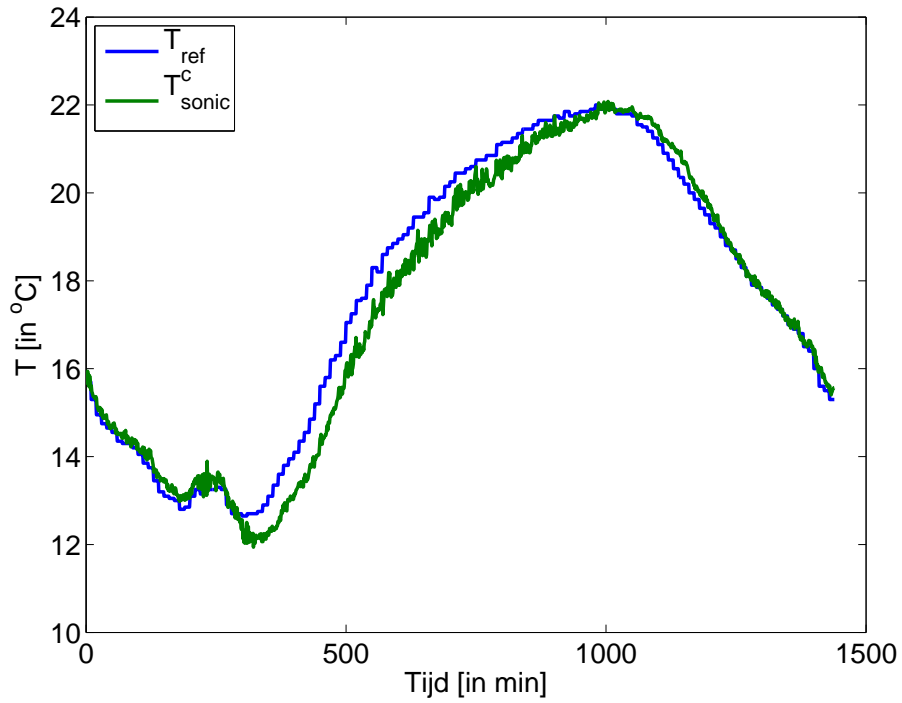
$$T_{ref} = \left(\frac{T_{40m} + T_{80m}}{2} \right). \quad (1.7)$$

In figuur 1.4 is een dergelijke vergelijking tussen T_{ref} en T_{sonic} te zien voor de dagelijkse gang van 6 mei 2008.

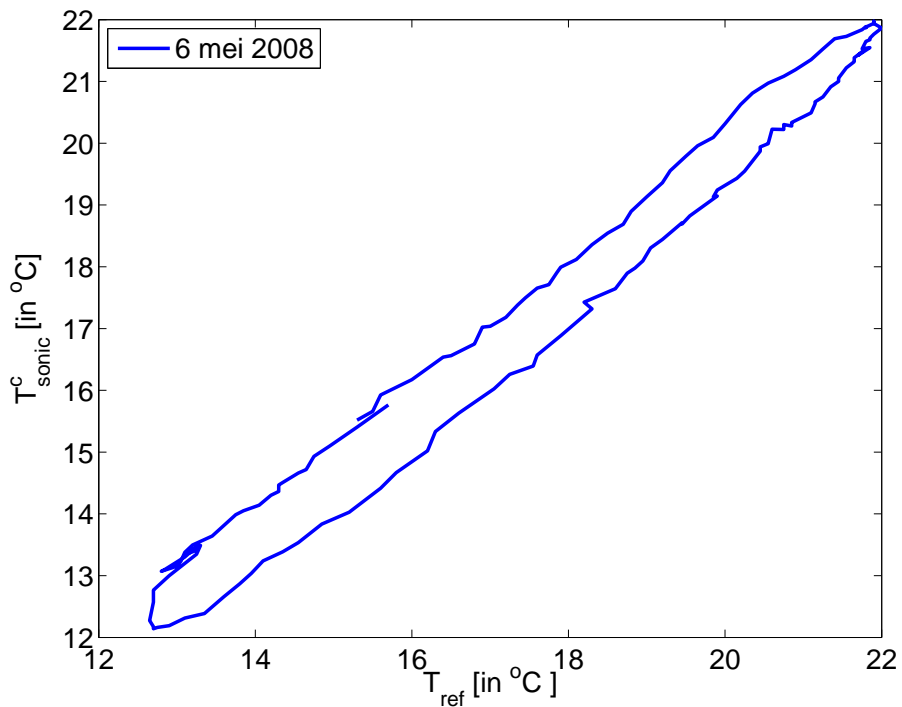
Het mag verwacht worden dat metingen van temperatuur voor de sonische anemometer overeenkomen. In figuur 1.4a lijkt echter de sonische anemometer achter te lopen op de referentietemperatuur. Dit wordt duidelijker weer gegeven in figuur 1.4b. In de rest van dit rapport zal naar deze vertraging worden gerefereerd met de term *hysterese*. Intuïtief zou er aan de volgende zaken gedacht kunnen worden:

- Uitzetting van de Gill R3 sonische anemometer kop waardoor een vergroting van het meetpad ontstaat. Een relatief kleine verandering in meetpad kan al een significante fout in de temperatuur meting. Stel het totale meetpad is normaal 15 cm. Een vervorming waardoor het meetpad 0.1 mm langer wordt geeft al een verandering in waargenomen temperatuur van $0.36 \text{ }^\circ\text{C}$. Het opwarmen en afkoelen van deze kop zou wellicht kunnen leiden tot hysterese in de metingen.
- Vertraging in het Pt500 signaal. Bij een vertraging van de Pt500 op de gemeten sonische anemometer temperatuur zou gedacht kunnen worden aan invloeden van straling, windsnelheid en windrichting op het microklimaat van het Pt500 huisje.
- De gemeten sonische temperatuur is afhankelijk van windrichting, windsnelheid of dauwpunt.

In dit onderzoek zal gekeken worden wat de oorzaak van de hysterese is en zal er verder gekeken worden naar de calibratie van de LI-7500.



(a) Vergelijking van T_{ref} en T_{sonic}^c over de dagelijkse gang.



(b) T_{sonic}^c uitgezet tegen T_{ref} . De dagelijkse gang loopt over de curve in tegengestelde klokrichting.

Figuur 1.4: Vergelijking van gemeten waarden van de Pt500 temperatuur en vocht gecorrigeerde sonische temperatuur voor de dagelijkse gang.

Hoofdstuk 2

Theorie Sonische Anemometer en LI-7500

Er wordt in dit verslag onderzoek gedaan naar het ijkgedrag van de Gill R3 sonische anemometer and LI-7500 open path sensor. In deze sectie wordt de werking van beide sensoren beschreven.

2.1 Gill R3 Sonische Anemometer

De sonische anemometer is in principe een windsnelheid- en thermometer. Een groot voordeel van het gebruik van een sonische anemometer boven een cup anemometer en een windvaan is dat de sonische anemometer geen bewegende delen heeft. Bovendien kan de sonische anemometer met hoge frequentie metingen doen en reageert de sonische anemometer bijna direct op veranderingen van temperatuur en windrichting. Voor de metingen op de mast is het belangrijk dat de sonische anemometer met hoge frequentie een puntmeting doet van de windvector en temperatuur. Meest gangbaar voor onderzoeksdoeleinde is een sonische anemometer waarmee de drie windsnelheidscomponenten gemeten kunnen worden. De sonische anemometer meet de tijd die een geluidspuls gebruikt om een bepaalde afstand af te leggen. Als in beide richtingen de reistijd van de geluidspuls gemeten wordt kan daaruit ook de geluidssnelheid bepaald worden. Als de geluidssnelheid bekend is, kan daarmee de luchttemperatuur gemeten worden. De vluchttijden van de geluidspulsen zijn afhankelijk van de afstand tussen de zender en ontvanger en van de geluidssnelheid. Dit hoofdstuk is gebaseerd op de handleiding van de in dit onderzoek onderzochte Gill R3 sonische anemometer[2] en Schotanus[6].

Bij uitleg van de werking van de sonische anemometer zullen we ons beperken tot de snelheid en temperatuur meting langs één component. De tijd die een puls nodig heeft om door de lucht naar de ontvanger te reizen is afhankelijk van de geluidssnelheid en sterkte van de wind langs het meetpad en - haaks op het meetpad volgens:

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{d}{\sqrt{c^2 - v^2} + u}, \\ t_2 &= \frac{d}{\sqrt{c^2 - v^2} - u}. \end{aligned} \tag{2.1}$$

Hierin is c de geluidssnelheid, d de lengte van het meetpad, u de gemiddelde windsnelheid over het meetpad en v de gemiddelde snelheid haaks op het meetpad. De snelheid haaks

op het meetpad is nodig, omdat deze invloed heeft op de looptijd van de puls. De Gill R3 sonische anemometer voert hiervoor intern een correctie uit. Uit 2.1 volgt nu eenvoudig voor de windsnelheid over het meetpad dat:

$$u = \frac{1}{2} \left(\frac{d}{t_1} - \frac{d}{t_2} \right), \quad (2.2)$$

en voor de geluidssnelheid geldt dat:

$$c = \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{d}{t_1} + \frac{d}{t_2} \right)^2 + v^2}. \quad (2.3)$$

De sonische temperatuur, T_{sonic}^c gecorrigeerd voor vocht wordt nu gevonden uit:

$$T_{sonic}^c = \frac{(T_{sonic})}{1 + 0.51q} = \frac{\left(\frac{c^2}{403}\right)}{1 + 0.51q} \quad (2.4)$$

waarin q de specifieke vochtigheid is en T_{sonic} de sonische temperatuur.

Uit de metingen van de looptijden van de geluidspulsen kan dus de gemiddelde windcomponent langs de meetas en de gemiddelde temperatuur gemeten worden.

2.2 LI-7500

In deze sectie wordt de LI-7500 CO₂/H₂O Analyzer beknopt beschreven. De tekst is voornamelijk gebaseerd op de handleiding van de LI-7500[1].

2.2.1 Introductie

De LI-7500 is een open pad infrarood CO₂/H₂O Analyzer ontworpen voor gebruik in eddy covariantie flux meetsystemen. Belangrijke eigenschappen die genoemd worden in de handleiding zijn:

- De mogelijkheid tot gelijktijdige meten van CO₂ en H₂O in de open atmosfeer.
- De LI-7500 kan op een hoge sampling frequentie werken. De maximale sampling frequentie is 20 Hz.
- De LI-7500 weerstaat regen en sneeuw zonder schade en calibratie verschuiving.
- De LI-7500 biedt verschillende manieren om een dataverbinding aan te gaan. Gevoemd worden DACs, SDM and RS-232.

Een LI-7500 wordt vaak in combinatie met een sonische anemometer gebruikt zoals te zien is in figuur 1.2.

2.2.2 Theorie

De schalingswet van Jamieson (zie [3]) laat het effect van luchtdruk op infrarood absorptie zien. Als de hoeveelheid van een bepaald absorberend gas ρ_i [mol m⁻³] en de absorptie in een bepaalde spectrum band α_i gerelateerd zijn via de functie $h_i(\cdot)$ geldt:

$$\frac{\alpha_i}{P_{ei}} = h_i \left(\frac{\rho_i \lambda}{P_{ei}} \right). \quad (2.5)$$



Figuur 2.1: Een plaatje van de LI-7500.

Hierin geeft het onderschrift i een specifiek gas aan, refereert λ naar de padlengte en is P_{ei} de equivalente druk voor het absorberend gas i . De molaire dichtheid vinden we nu door vergelijking 2.5 te herschrijven tot:

$$\rho_i = \frac{P_{ei}}{\lambda} h_i^{-1} \left(\frac{\alpha_i}{P_{ei}} \right). \quad (2.6)$$

Met de introductie van een nieuwe functie $f_i()$ die bestaat uit $h_i()$ en λ volgt:

$$\rho_i = P_{ei} f_i \left(\frac{\alpha_i}{P_{ei}} \right). \quad (2.7)$$

De calibratie functie $f_i()$ wordt gevonden door metingen van een bekende ρ_i en het fitten van ρ_i/P_{ei} tegen α_i/P_{ei} .

Stel een infraroodbron voor met vermogen Φ met een detector op een afstand daarvan. Als reflectie niet in beschouwing wordt genomen kan de absorptie α_i door gas i beschreven worden door:

$$\alpha_i = 1 - \tau_i = 1 - \frac{\Phi_i}{\Phi_o}. \quad (2.8)$$

Hierin is τ_i de transmissie door gas i , Φ_i het doorgelaten vermogen in de absorptie band onder een bepaalde concentratie van gas i en Φ_o het doorgelaten vermogen met een nul concentratie van gas i . De LI-7500 benaderd de absorptie met:

$$\alpha_i = \left(1 - \frac{A_i}{A_{io}} \right) \quad (2.9)$$

waarin A_i het ontvangen vermogen is van de bron in een absorberend golflengte van gas i en A_{io} het ontvangen vermogen is in een referentie golflente die niet geabsorbeerd wordt door het gas i . Door het combineren van vergelijkingen 2.7 en 2.9 wordt gevonden:

$$\rho_i = P_{ei} f_i \left(\left[1 - \frac{A_i}{A_{io}} z_i \right] \frac{S_i}{P_{ei}} \right) \quad (2.10)$$

Nieuwe termen hier zijn de calibratietermen z_i en S_i .

De verschillende parameters A_c , A_{co} , A_w and A_{wo} worden gelijktijdig gemeten door een detector. Hier refereren de termen met een onderschrift w naar metingen van water (vocht) en de termen met onderschrift c naar metingen van CO_2 . Door de gelijktijdige metingen is sprake van kruisgevoeligheid tussen gassen door imperfecties in de frequentie respons van de detector. De vergelijking 2.9 wordt daarom gecorrigeerd hiervoor:

$$\alpha_i = \left(1 - \left[\frac{A_i}{A_{io}} + X_{ji} \left(1 - \frac{A_j}{A_{jo}} \right) \right] \right) \quad (2.11)$$

hierin is X_{ji} de kruisgevoeligheid van gas j op gas i en A_j en A_{jo} het geabsorbeerd en niet geabsorbeerde vermogen van gas j .

In de atmosfeer geldt dat de absorptie van straling door vocht niet significant afhankelijk is van een ander gas. Daardoor geldt dat de effectieve druk voor vocht P_{ew} simpelweg gelijk is aan de totale druk:

$$P_{ew} = P \quad (2.12)$$

De absorptie van het water in de lucht volgt nu uit voorgaande vergelijkingen als:

$$\alpha_w = \left(1 - \left[\frac{A_w}{A_{wo}} + X_{cw} \left[1 - \frac{A_c}{A_{co}} \right] \right] z_w \right). \quad (2.13)$$

De molaire dichtheid ρ_w volgt dan uit:

$$n_w = P f_w \left(\frac{\alpha_w S_w}{P} \right) \quad (2.14)$$

waarin de coëfficiënten van de derdegraads polynoom functie $f_w()$ gegeven worden in de calibratie tabel.

Hoofdstuk 3

Meetmethode en instellingen

In dit hoofdstuk wordt de gebruikte methode beschreven die gebruikt is bij het meten. Ook zal er praktische informatie gegeven worden over de instellingen van de software en hardware.

3.1 Meetmethode

In de klimaatkamer van het KNMI is het mogelijk om de relatieve vochtigheid en temperatuur te regelen. Het voordeel van testen in de klimaatkamer is dat er bij een groot aantal verschillende controleerbare temperaturen en vochtigheden gemeten kan worden.

De metingen worden uitgevoerd in een temperatuur bereik van -20°C tot 40°C met stappen van 10°C . Vanaf 0°C wordt de sonische- en de referentietemperatuur gemeten onder verschillende relatieve vochtigheden. Er worden metingen verricht bij de relatieve vochtigheden van 30%, 70% en 97%. De reden dat pas vanaf 0°C onder drie verschillende relatieve vochtigheden wordt gemeten is omdat het erg tijdrovend is om een stabiel klimaat te krijgen bij lage temperaturen. Bovendien is de vocht invloed op de sonische temperatuur erg klein bij lage temperaturen.

De waargenomen hysteresis uit figuur 1.4 kan niet eenduidig worden verklaard uit analyse van de observaties. Mogelijke oorzaken die genoemd zijn in de introductie kunnen in een klimaatkamer getest worden. Vragen die we proberen te beantwoorden met een klimaatkamer test:

- Hoe gedraagt de sonische anemometer zich t.o.v. de Pt500 zich in een over een groot temperatuurbereik? Hierbij kijken we dus naar de lineaire regressie van de meetdata.
- Hoe reageren de sonische anemometer zich t.o.v. de Pt500 op een plotselinge temperatuur overgang? Loopt de sonische anemometer achter op de Pt500 of is het juist andersom?
- Hoe gedraagt de LI-7500 zich t.o.v. de referentie vochtigheid over een groot vochtbereik? Hierbij kijken we dus naar de lineaire regressie van de meetdata.

De metingen van de verschillende instrumenten worden vastgelegd in een databestand, waardoor een vergelijking van de verschillende grootheden gemaakt kan worden. In de komende secties zullen de werkformules gegeven worden die gebruikt zijn bij de verwerking. De KNMI nummers van de gebruikte instrumenten staan in tabel 3.1.

Gill R3	01-00-555-007
Gill R3A	01-00-555-002
LI-7500	01-07-061-003

Tabel 3.1: In deze tabel staan de KNMI nummers van de gebruikte instrumenten.

N_A	$6.022141510^{23} \text{ mol}^{-1}$	Avogadro constante
R	$8.31447215 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$	Universele gas constante
M_{H_2O}	$18.01534 \text{ g mol}^{-1}$	Molaire massa van water
M_{dry}	$28.9644 \text{ g mol}^{-1}$	Molaire massa van droge lucht

Tabel 3.2: Constanten

3.1.1 Klimaatkamer data verwerking

In de klimaatkamer hangen referentie sensoren voor zowel vocht als temperatuur. De temperatuur wordt gegeven in Celsius en vocht in relatieve vocht procenten. De molaire verhouding van vocht wordt berekend door:

$$x_{H_2O} = \left[\frac{RH}{100} \right] \frac{E_s(T)}{P} \quad (3.1)$$

waarin RH de relatieve vochtigheid is, $E_s(T)$ de druk van de verzadigingsdamp bij de luchttemperatuur (T) en P de luchtdruk is.

De druk van de verzadigingsdamp is de druk die waterdamp op de wanden van een gesloten container uitoefent wanneer het geheel in evenwicht is. Bij toename van de temperatuur in de container zal de druk van de verzadigingsdamp toenemen. Voor de druk van de verzadigingsdamp is gebruik gemaakt van (zie [5]):

$$E_s(T) = a_0 + T(a_1 + T(a_2 + T(a_3 + T(a_4 + T(a_5 + Ta_6)))))) \quad (3.2)$$

waarin T de kamertemperatuur in graden Celsius is. De specifieke vochtigheid [kg/kg] wordt dan gevonden uit:

$$q = \frac{x_{H_2O} M_{H_2O}}{x_{H_2O} M_{H_2O} + (1 - x_{H_2O}) M_{dry}} \quad (3.3)$$

De waarde van de verschillende constanten uit deze formule staan in tabel 3.2.

De massa concentratie [kg/m³] van water volgt dan uit:

$$\begin{aligned} \rho &= x_{H_2O} n_{air} M_{H_2O} \\ &= \left(\left[\frac{RH}{100} \right] \frac{E_s(T)}{P} \right) \left(\frac{P}{R(T + 273.15)} \right) M_{H_2O} \\ &= \left[\frac{RH}{100} \right] \frac{E_s(T)}{R(T + 273.15)} M_{H_2O} \end{aligned} \quad (3.4)$$

waarin n_{air} de molaire dichtheid van lucht is.

3.1.2 Sonische anemometer data verwerking

De sonische anemometer is ingesteld volgens de tabel 3.3. Hierdoor wordt door de sonische anemometer de geluidssnelheid uitgevoerd. Met vergelijking 2.4 kan hieruit de sonische temperatuur met vocht correctie berekend worden.

3.1.3 LI-7500 data verwerking

De LI-7500 geeft de molaire dichtheid uit vergelijking 2.14. Wanneer de molaire dichtheid [mol/m^3] wordt vermenigvuldigd met de molaire massa [kg/mol] volgt de massaconcentratie ρ [kg/m^3] gemeten door de LI-7500:

$$\rho = n_w M_{H_2O}. \quad (3.5)$$

Deze massaconcentratie gemeten door de LI-7500 zullen we in de resultaten vergelijken met de referentie massaconcentratie.

3.2 Instellingen

In deze sectie worden de gebruikte instellingen beschreven. Een uitgebreidere beschrijving van de mogelijkheden van de Gill R3 sonische anemometer kan gevonden worden in de handleiding [2].

3.2.1 Sonische anemometer

De sonische anemometer kan geconfigureerd worden met de RCOM software die te verkrijgen is van de Gill website, <http://www.gill.co.uk>. Naast het configureren van de sonische anemometer is het ook mogelijk metingen te doen en die weg te schrijven in een log file. De metingen die uitgevoerd zijn voor dit rapport zijn verkregen via de "polling"methode, derhalve was de log functie van de RCOM software niet nodig. De RCOM software is daardoor alleen maar gebruikt om de sonische anemometer te configureren.

De sonische anemometer kun je configureren nadat er succesvol een verbinding is gemaakt tussen de computer en de sonische anemometer. Onder optie 6 *Configure Anemometer* kan de configuratie van de sonische anemometer aangepast worden. Bedenk bij het aanpassen van de opties dat deze instelling in de sonische anemometer worden gezet en niet in de software. De gebruikte instelling zijn weergegeven in tabel 3.3.

Zoals al aangegeven is wordt gemeten in de zogenaamde polling modus van de sonische anemometer. Dit houdt in dat bij zenden van een bepaald commando over RS-232, in dit geval een vraagteken "?", de sonische anemometer op dat moment een meting verricht en de resultaten terugstuurt. Dit heeft het voordeel dat bij gebruik van meerdere instrumenten metingen tegelijk uitgevoerd kunnen worden. Ook wordt daarmee de aansturing en verwerking met computer software vergemakkelijkt. Alle commando's staan beschreven in de gebruikershandleiding van de Gill R3 sonische anemometer.

3.2.2 LI-7500

De configuratie en het uitgezonden formaat van de metingen van de LI-7500 kan in hoge mate aangepast worden. De configuratie is mogelijk met commando's over het RS-232 kanaal (mogelijk in HyperTerminal onder Windows®) of via de LI-7500 software. De software van de LI-7500 die draait op Windows® is verkrijgbaar via de site van LiCor: <http://www.licor.com>.

Net zoals de sonische anemometer wordt de LI-7500 in de polling modus uit gelezen. Bij het zenden van het "Enq"(enquiry) commando over RS-232 geeft de LI-7500 een meting door. Als de LI-7500 verbinding in Hyperterminal onder Windows® wordt getest kan het enquiry commando gestuurd worden door Ctrl-E te drukken.

<i>Data Reported</i>	
Report Mode	Axis
Speed of Sound mode	Speed
Absolute Temp Mode	On K
<i>String Format</i>	
String Format	ASCII PAD
ASCII Terminator	CRLF
Echo	On
Message Mode	Poll
<i>Reporting Speed</i>	
Average	10
Baud Rate	9600
Instantaneous	Off
<i>Analogue</i>	
Channels enabled	EEEEED
Full Scale Deflect	20
Direction Wrap Mode	360
<i>Additional Features</i>	
Confidence Tone	Disabled
Axis Alignment	Axis

Tabel 3.3: In deze tabel staat de configuratie van de Gill R3 sonische anemometer die gebruikt is bij de metingen.

De metingen uit dit rapport zijn echter niet in polling modus uitgelezen om praktische redenen. De LI-7500 is daarom in een modus geconfigureerd waarin meerdere metingen per 10 seconden worden uitgevoerd. Op het moment dat de sonische anemometer om een meting wordt gevraagd, wordt de ook de meest recente LI-7500 meting opgeslagen.

Hoofdstuk 4

Resultaten

In dit hoofdstuk staan de resultaten van een analyse van veldmetingen en van de metingen die uitgevoerd zijn in de klimaatkamer van het KNMI in de periode 15 december 2008 tot 12 januari 2009. Het eerst deel van dit hoofdstuk gaat over de analyse van de in-situ observaties van de meetmast Cabauw, deel twee gaat over de temperatuurmetingen in de klimaatkamer. Het derde deel gaat over vochtmetingen van de LI-7500 en de klimaatkamer.

4.1 Observatie analyse

4.1.1 Analyse in-situ observaties

In hoofdstuk één zijn een aantal mogelijke redenen genoemd voor de waargenomen hysteresis in de in-situ observaties. Door analyse van de in-situ observaties zou het onderzoek in de juiste richting gestuurd kunnen worden en zouden mogelijke redenen al in een vroeg stadium uitgesloten kunnen worden.

In hoofdstuk één wordt de suggestie gewekt dat een mogelijke vervorming van de Gill R3 sonische anemometer kop een verandering zou kunnen geven in de lengte van het meetpad. Daar de sonische anemometer intern nog rekent met vast ingesteld lengte zou er een fout kunnen optreden in de door de Gill R3 sonische anemometer weergegeven temperatuur.

Zo is het aan het begin van de dag koud. Hierdoor is het frame gekrompen, waardoor de padlengte kleiner is geworden. Een kleinere padlengte geeft kortere reistijden van de geluidspulsen. Dit leidt tot een grotere geluidssnelheid en daardoor ook een hogere temperatuur dan de werkelijkheid.

Doordat de zon net opgekomen is zal de omgevingstemperatuur stijgen. In het geval van een traagheid in de thermische respons van het frame zal de gemeten sonische anemometer temperatuur T_{sonic} dus consequent hoger zijn tijdens een temperatuur stijging en consequent lager bij een temperatuur daling. Dit is precies het tegenovergestelde van wat waargenomen wordt in de figuur 1.4.

In deze korte analyse zijn we ervan uitgegaan dat een temperatuur stijging van het frame een uitzettende werking heeft op het meetpad. Doordat dit in het onderzoek niet gemeten is, is het niet met zekerheid te stellen dat de kop en daarom ook het meetpad uitzet bij een temperatuurstijging. Een vervorming door niet uniforme respons zou zelfs kunnen leiden tot een verkleining bij een verhoging van de temperatuur van het frame.

De duur van de vertraging kan worden geanalyseerd door te veronderstellen dat het

temperatuur signaal van de sonische anemometer vertraagd is met Δt volgens:

$$T_{sonic}^c(t + \Delta t) = T_r(t). \quad (4.1)$$

Vervolgens wordt de correlatie coëfficiënt berekend met de standaard correlatiefunctie van het numeriek rekenpakket MATLAB tussen het vertraagde sonische anemometer temperatuur signaal en het referentietemperatuur signaal. Het resultaat van deze analyse is weergegeven in figuur 4.1. De dagen die gebruikt zijn zijn heldere dagen, dus zonder wolken. Hierdoor wordt het temperatuur verloop niet verstoord door een beperking van de kortgolvlige straling.

Uit de figuur moet geconcludeerd worden dat de metingen van de Gill R3 sonische anemometer goed correleren met de referentiemeting van 25 à 30 minuten eerder. Hierdoor zou men geneigd kunnen zijn te stellen dat de hysteresis ook weleens veroorzaakt zou kunnen zijn door een vertraging in de verwerking. Als echter naar kleine temperatuur fluctuaties wordt gekeken in observatiedata uit onder andere figuur 1.4 treden die gelijktijdig op in de sonische temperatuur en de referentietemperatuur. Deze discrepantie zal worden besproken in het hoofdstuk *Discussie*.

In hoofdstuk één wordt ook een suggestie gedaan over een mogelijke afhankelijkheid van windrichting, windsnelheid en dauwpunt. De reden achter deze suggestie is dat de precieze plaats op de mast en de behuizing van zowel de Pt500 en Gill R3 sonische anemometer invloed zou kunnen hebben op de metingen. Om deze afhankelijkheden te onderzoeken wordt het verschil in waargenomen sonische temperatuur uitgezet tegen deze verschillende parameters. Dit is te zien in figuren 4.2 en 4.3. Het doel van deze plaatjes is dus om visueel een eventuele correlatie te kunnen vaststellen tussen de uitgezette grootheden. Bij de beschouwing van de verschillende plaatjes moet rekening worden gehouden met een al reeds aanwezige correlatie door de dagelijkse gang.

In figuur 4.2(a) staat het temperatuurverschil uit tegen de windrichting. Bij een afhankelijkheid zou gedacht kunnen worden aan een slechte ventilatie van het Pt500 huisje vanwege obstructie van de mast, asymmetrie van het huisje of obstructie van de luchtstroom door een ander voorwerp. In figuur 4.2(b) staat het temperatuurverschil uit tegen de windsnelheid. Mocht er sprake zijn van een microklimaat, dan zou kleine verschillen in T_r en T_S verwacht kunnen worden bij harde wind en grote verschillen bij zachte wind. In figuur 4.3 staat het temperatuurverschil uit tegen de referentietemperatuur minus het dauwpunt. Dit is een maat voor de vochtigheid van de lucht en wordt ook wel dauwpuntsdepressie genoemd. Hoe kleiner dit verschil, hoe dichter bij een relatieve vochtigheid van 100%.

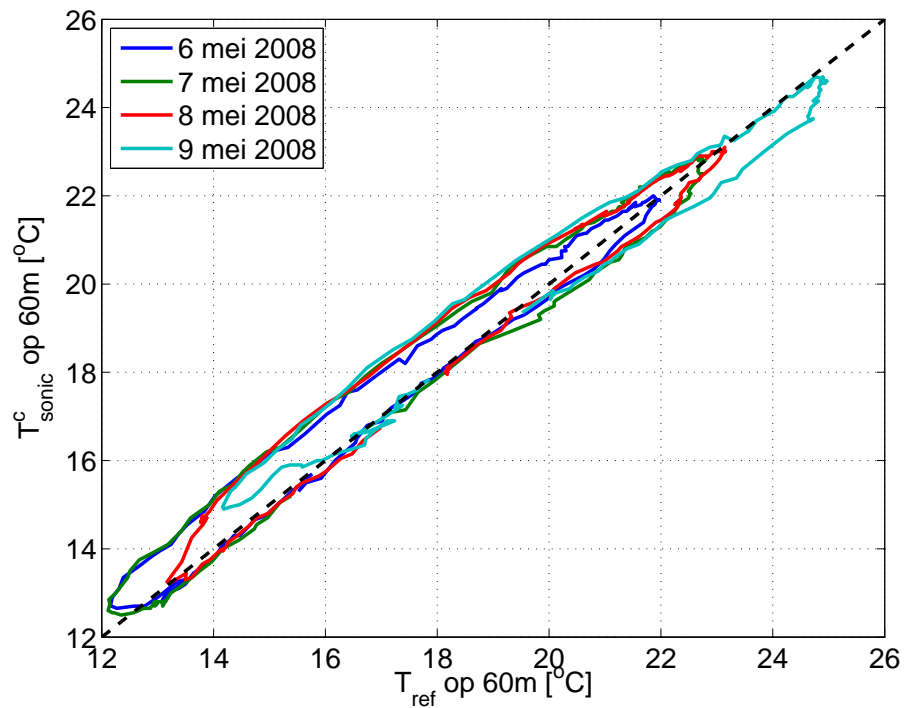
In geen van de figuren is een duidelijke correlatie zoals in figuur 4.1 aanwezig. De correlatie die te zien is lijkt voort te komen uit de correlatie die we zien door naar delay-tijd te kijken. Het is daarom zeer onwaarschijnlijk dat de hysteresis afhankelijk is van één van bovenstaande parameters.

4.1.2 Analyse vochtmeting

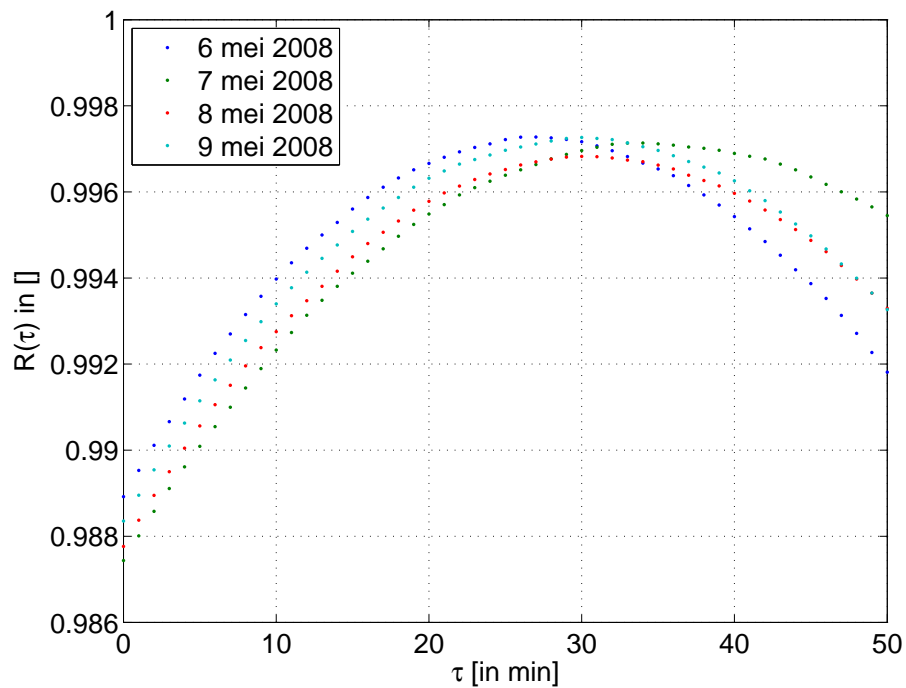
Voor vocht is voor 1 dag (6 mei 2008) een vergelijking gemaakt tussen de in-situ observaties van de LI-7500 en de referentiemeting. Dit wordt getoond in figuur 4.4. Door de kleinste kwadraten methode is de best passende lineaire curve bepaald:

$$q_{LiCor} = A_q q_{ref} + B_q \quad (4.2)$$

Uit de methode volgt $A_q = 1.05$ (met $SE_A = 0.01$) en $B_q = -0.01$ (met $\sigma_B = 0.04$). De LI-7500 is voor de in-situ observaties dus iets gevoeliger voor vocht dan de referentiemeting.

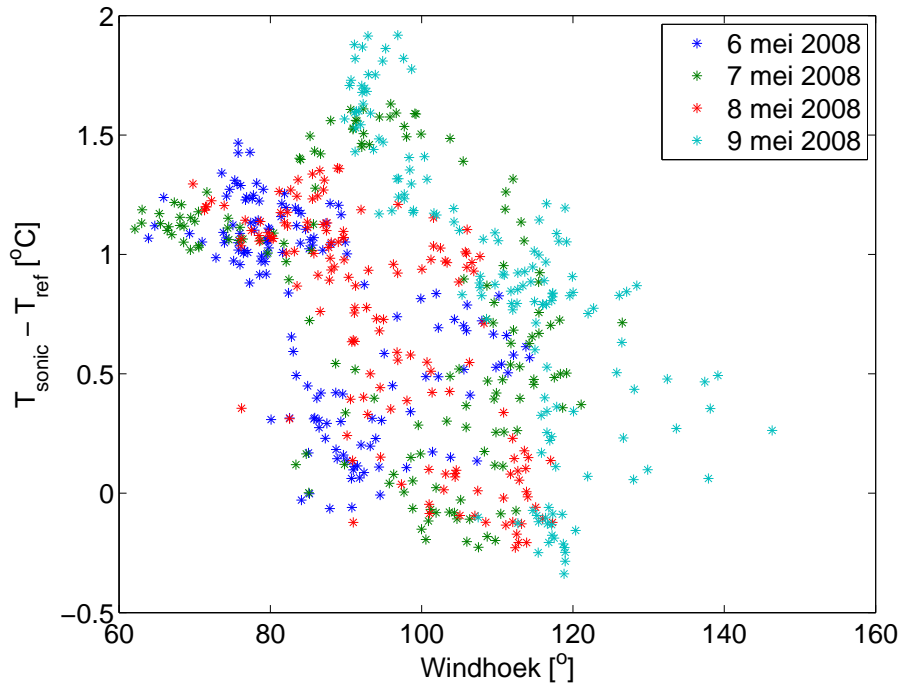


(a) De sonische temperatuur uitgezet tegen de referentietemperatuur over de dagelijkse gang voor verschillende dagen.

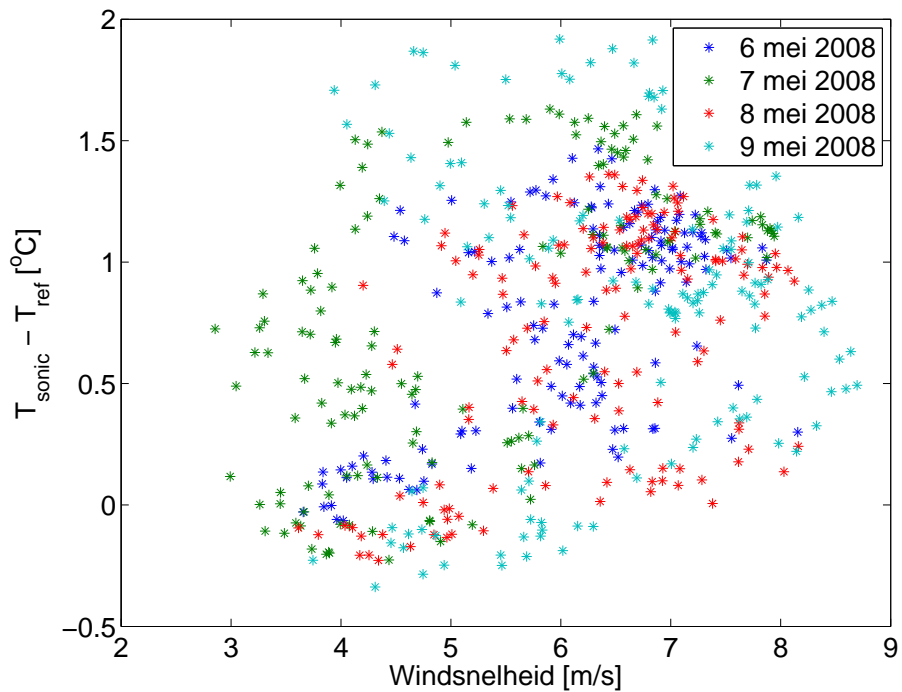


(b) De correlatie coëfficiënt als functie van τ .

Figuur 4.1: Analyse van observaties van de sonische en referentietemperatuur.

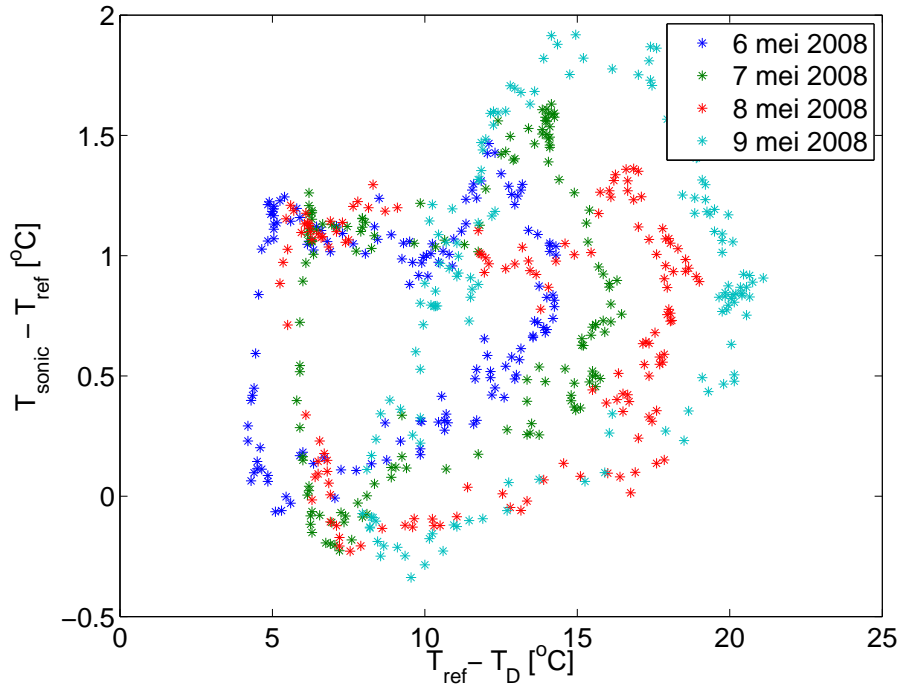


(a) Het verschil tussen de vocht gecorrigeerde sonische temperatuur en de referentietemperatuur als functie van de windrichting.

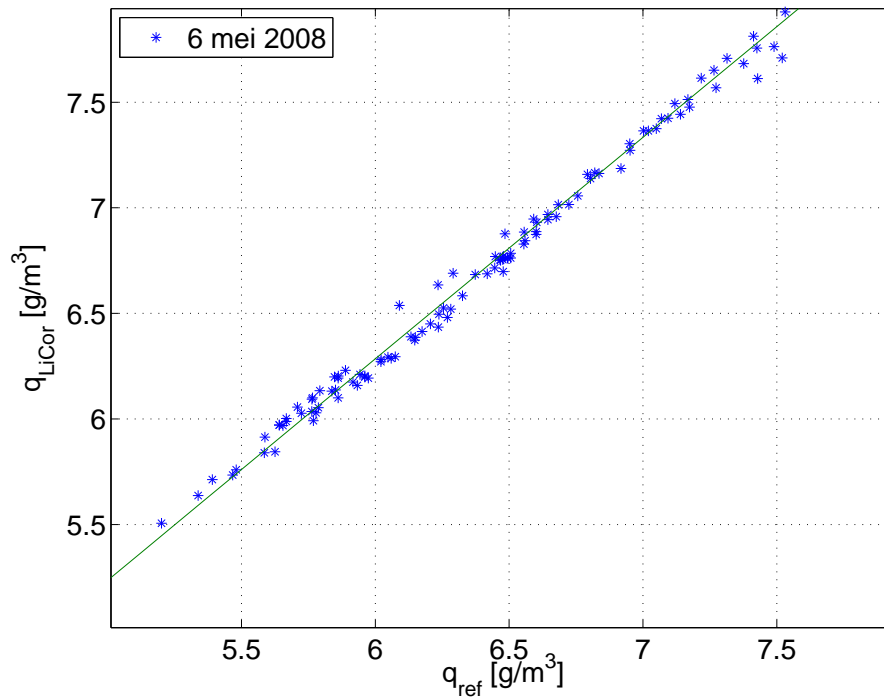


(b) Het verschil tussen de vocht gecorrigeerde sonische temperatuur en de referentietemperatuur als functie van de windsnelheid.

Figuur 4.2: Visuele correlatie tussen het vocht gecorrigeerde sonische temperatuur en de referentietemperatuur en windparameters.



Figuur 4.3: Het verschil tussen de vocht gecorrigeerde sonische temperatuur en referentietemperatuur als functie van de referentietemperatuur minus het dauwpunt.



Figuur 4.4: De gemeten vocht concentratie van de LI-7500 als functie van de in-situ referentiemeting.

4.2 Analyse klimaatkamer metingen temperatuur

Voor een vergelijking van de sonische temperatuur met de referentietemperatuur zijn drie verschillende meetreeksen te onderscheiden. Temperatuur en vocht zijn om de vijf seconden gemeten. In de resultaten wordt er echter alleen gekeken naar de datapunten bij stabiele condities. Figuur 4.5 geeft een impressie van een gemeten tijdreeks waarin de stabiele meetpunten duidelijk zichtbaar zijn.

- De eerste meetreeks bestaat uit een vergelijking bij verschillende temperaturen en relatieve vochtigheden. De eerste meetsessie levert interessante informatie op over het gedrag van de symmetrische Gill R3 sonische anemometer rond een temperatuur van $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, daarom is rond deze temperatuur uitgebreider gemeten in een tweede meetsessie.
- De tweede meetreeks bestaat uit een meting per graad vanaf -10 tot $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Deze meetreeks is uitgevoerd met dezelfde symmetrische Gill R3 sonische anemometer.
- In een derde meetsessie is gekeken of het waargenomen gedrag van meetreeks één en meetreeks twee reproduceerbaar is met een tweede sonische anemometer. Ditmaal is een asymmetrische Gill R3 sonische anemometer gebruikt die alleen uiterlijk van de symmetrische versie verschilt. Waar de asymmetrische versie elk 120° een verticaal verbindingstuk heeft, heeft de asymmetrische deze op 120° , 180° en 240° .

In sectie 4.2.1 worden de metingen van de ongecorrigeerde (voor vocht) sonische temperatuur vergeleken met de referentietemperatuur. In sectie 4.2.2 wordt gekeken naar hysteresis. Met behulp van meetreeks één en twee wordt een lineaire regressie bepaald van de sonische anemometer temperatuur en de referentietemperatuur. Resultaten hiervan worden gegeven in sectie 4.2.3

4.2.1 Sonische temperatuur gedrag

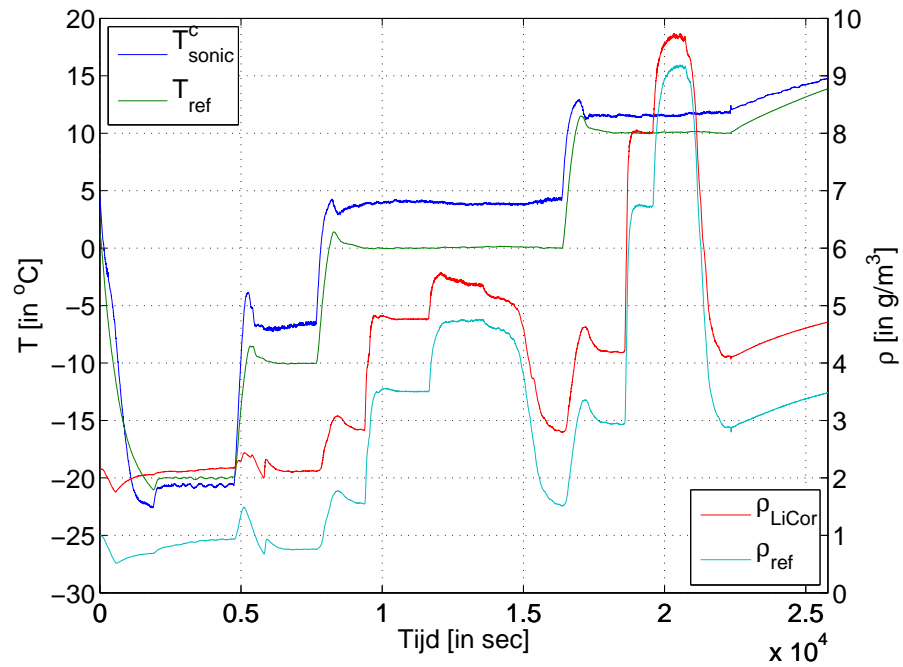
In figuur 4.6 en tabellen 4.1, 4.2 en 4.3 staan de resultaten van de testen die uitgevoerd zijn in de klimaatkamer. In de figuur staat het verschil tussen de sonische en de referentietemperatuur uitgezet tegen de referentietemperatuur. De lijnen in de beide figuren geven de vochtcorrectie aan die toegepast zou moeten worden op de sonische temperatuur. In het ideale geval liggen de meetpunten op de bijbehorende lijnen.

De bovenste figuur bestaat uit meetdata van de Gill R3 sonische anemometer. De figuur laat een groot verschil tussen de sonische temperatuur en de referentietemperatuur rond $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ zien. In het algemeen is er ook een grote offset te zien. De waargenomen vocht gecorrigeerde sonische temperatuur is altijd hoger dan de referentietemperatuur. Het waargenomen temperatuur gedrag rond $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ is uitvoeriger bekeken met diezelfde sonische anemometer en een andere sonische anemometer, de Gill R3A sonische anemometer.

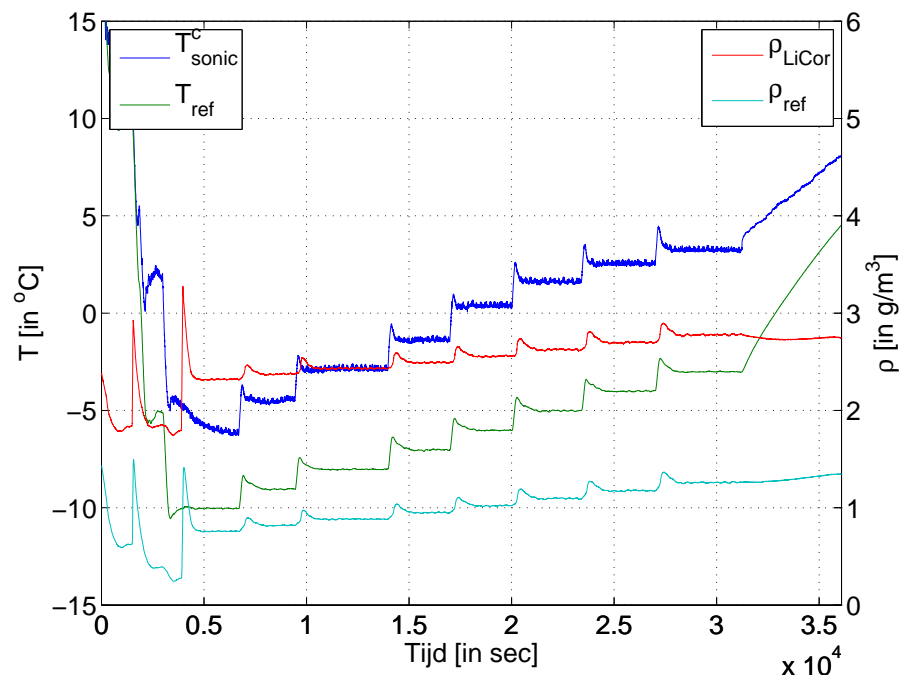
Het meest in het oog springende is een forse afwijking van de sonische temperatuur rond $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dit gedrag treedt in verschillende mate op in beide Gill R3 sonische anemometers.

4.2.2 Hysteresis

Gedurende laboratoriumexperimenten is een snelle temperatuurverandering in de klimaatkamer aangebracht waardoor de typische vertraging van deze temperatuurverandering gemeten kan worden. De resultaten van deze meting zijn gepresenteerd in figuren 4.7 en 4.8. Bij de beoordeling van de resultaten moeten er de volgende opmerkingen gemaakt worden

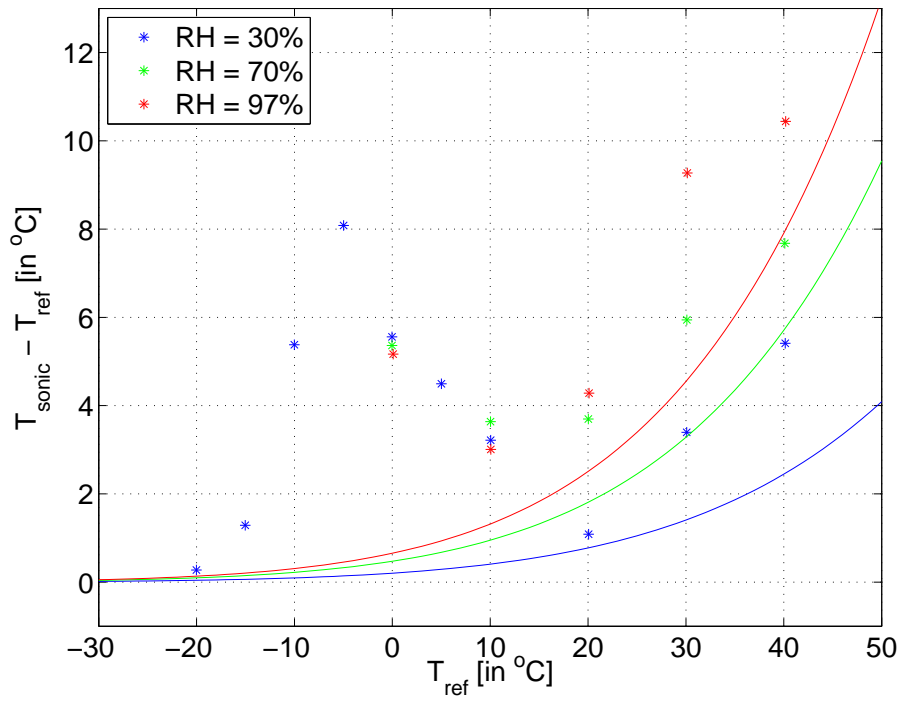


(a) Tijdsérie één met gemeten temperatuur en vocht.

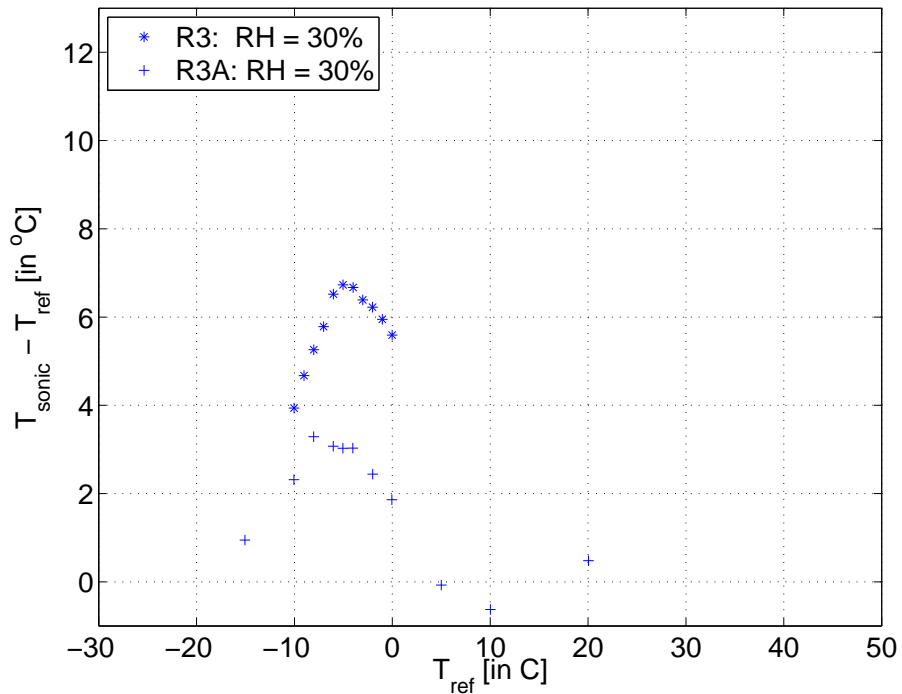


(b) Tijdsérie twee met gemeten temperatuur en vocht.

Figuur 4.5: In deze figuren staan de tijdseries van temperatuur- en vochtmetingen van de klimaatkamer.



(a) De resultaten van meetreeks één.



(b) De resultaten van meetreeks twee en drie.

Figuur 4.6: Resultaten van de basis klimaatkamer testen. Het verschil tussen de sonische temperatuur en de referentietemperatuur is uitgezet tegen de referentietemperatuur.

T_{ref} in [$^{\circ}C$]	T_{sonic} in [$^{\circ}C$]	RH in [%]
-20.01	-19.74	81.46
-15.02	-13.73	83.76
-10.00	-4.62	31.79
-4.97	3.11	31.69
-0.03	5.53	31.43
-0.03	5.34	71.53
0.08	5.25	97.24
5.01	9.51	31.14
10.06	13.27	30.76
10.03	13.67	70.55
10.07	13.08	97.12
20.06	21.15	30.88
20.03	23.72	70.61
20.11	24.39	97.48
30.09	33.48	30.80
30.10	36.04	70.85
30.14	39.42	95.23
40.14	45.56	30.56
40.11	47.79	71.84
40.19	50.63	98.27

Tabel 4.1: Resultaten meetreeks één.

T_{ref} in [$^{\circ}C$]	T_{sonic} in [$^{\circ}C$]	RH in [%]
-10.03	-6.10	32.34
-9.02	-4.35	32.36
-8.03	-2.77	32.35
-7.02	-1.24	32.38
-6.01	0.50	32.39
-5.03	1.70	32.22
-4.01	2.66	32.14
-3.01	3.38	32.13
-2.02	4.20	31.90
-1.02	4.93	31.96
-0.02	5.57	31.94

Tabel 4.2: Resultaten meetreeks twee.

T_{ref} in [$^{\circ}C$]	T_{sonic} in [$^{\circ}C$]	RH in [%]
-15.05	-14.10	84.81
-10.05	-7.73	32.26
-8.03	-4.74	32.25
-6.03	-2.96	32.09
-5.05	-2.02	32.05
-4.03	-1.00	32.03
-2.00	0.43	31.95
-0.05	1.81	31.96
5.00	4.93	31.61
10.03	9.40	31.34
20.05	20.53	30.90

Tabel 4.3: Resultaten meetreeks drie.

- De temperatuurveranderingen zijn geen nabootsing van een situatie zoals die zou kunnen optreden in de atmosfeer.
- De vertraging in de temperatuur meting van de Pt500 ten opzichte van de sonische temperatuur wordt geschat aan de hand van een correlatie methode.

Op een vergelijkbare wijze als in sectie 4.1 is de delay-tijd bepaald (zie figuur 4.8). De top van de correlatie functie ligt bij $\tau = 92$ sec. In literatuur (zie [4]) wordt een een vertraging gevonden van ongeveer 80 seconden voor een Pt500 element voor een temperatuursprong van ruim $45^{\circ}C$. De Pt500 loopt dus in deze proef 92 seconden achter op de metingen van de sonische anemometer.

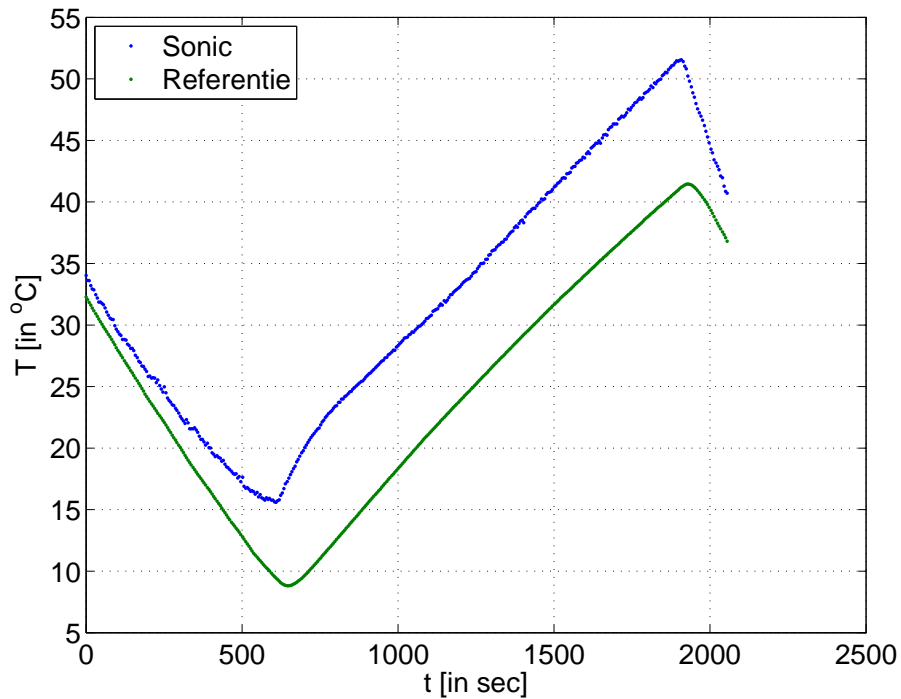
De dagelijkse gang is niet gereproduceerd in de klimaatkamer. Het is daardoor onmogelijk om diezelfde resultaten als in figuur 4.1 te krijgen. Er zijn echter in de klimaatkamer een aantal metingen gedaan die lijken op hysteresis. Zo is in figuur 4.5(a) omstreeks 0.7×10^4 seconden na een opwaartse temperatuursprong de gemeten vochtdichtheid en klimaatkamer temperatuur stabiel terwijl de temperatuur van de sonische anemometer nog steeds klimt. Hetzelfde geldt voor figuur 4.5(b) waarin omstreeks 0.5×10^4 na een neerwaartse temperatuur sprong de sonische temperatuur daalt terwijl vochtdichtheid en klimaatkamer temperatuur constant zijn. Opmerkelijk hierbij is dat de sonische anemometer verloopt in de richting van de temperatuursprong vlak daarvoor.

4.2.3 Bepaling gevoeligheid sonische anemometer

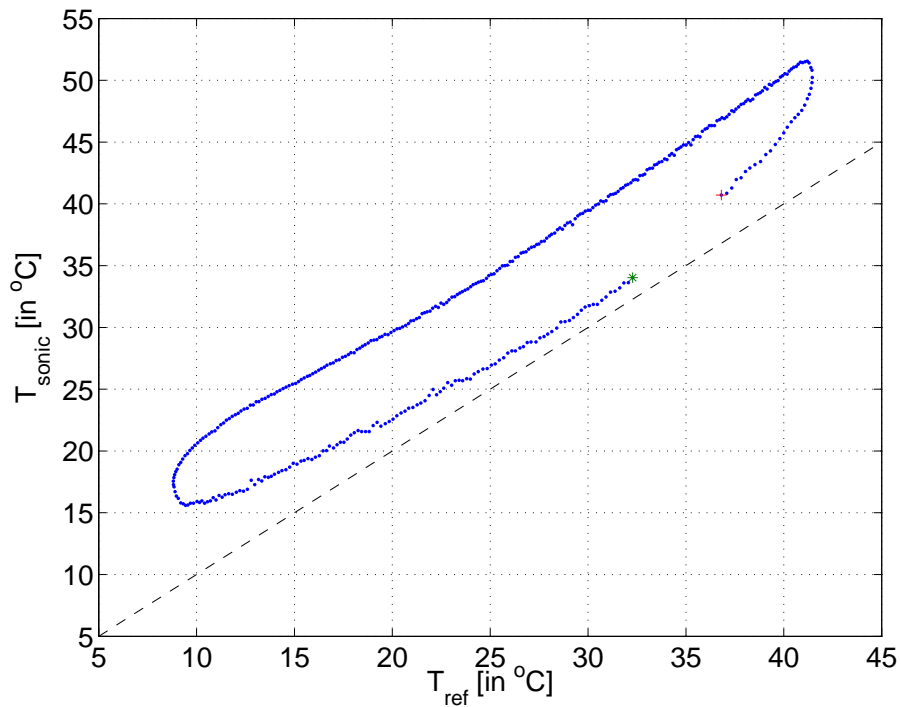
In deze sectie wordt gekeken naar het verband tussen de referentietemperatuur van de klimaatkamer en de vocht gecorrigeerde sonische temperatuur. Hierbij wordt niet alle data gebruikt van meetreeks één, maar alleen dat deel van $10^{\circ}C$ en hoger. Zoals al behandeld in sectie 4.2.1 is het temperatuur gedrag onder de $10^{\circ}C$ niet lineair. In figuur 4.9 worden de resultaten van meetreeks één nogmaals weergegeven, maar nu voor 10 tot en met $40^{\circ}C$. Met de kleinste kwadraten methode is de lineaire fit gevonden voor de functie:

$$T_{sonic}^c = A_T T_{ref} + B_T \quad (4.3)$$

waarin T_{sonic}^c de vocht gecorrigeerde sonic temperatuur is, T_{ref} de referentietemperatuur en A en B lineair fit constanten. Deze fit constanten zijn in tabel 4.4 gegeven. Uit deze tabel blijkt dat de waarde van de helling, A, van alle drie de relatieve vochtigheden vrij dicht

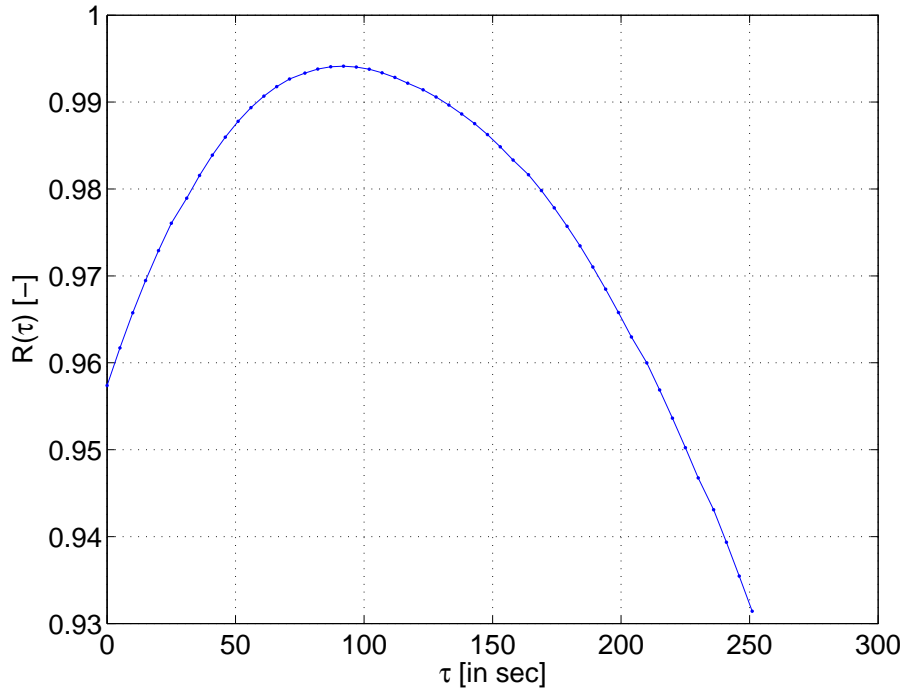


(a) De sonische temperatuur (blauw) en de referentietemperatuur (groen) tegen de tijd uitgezet.

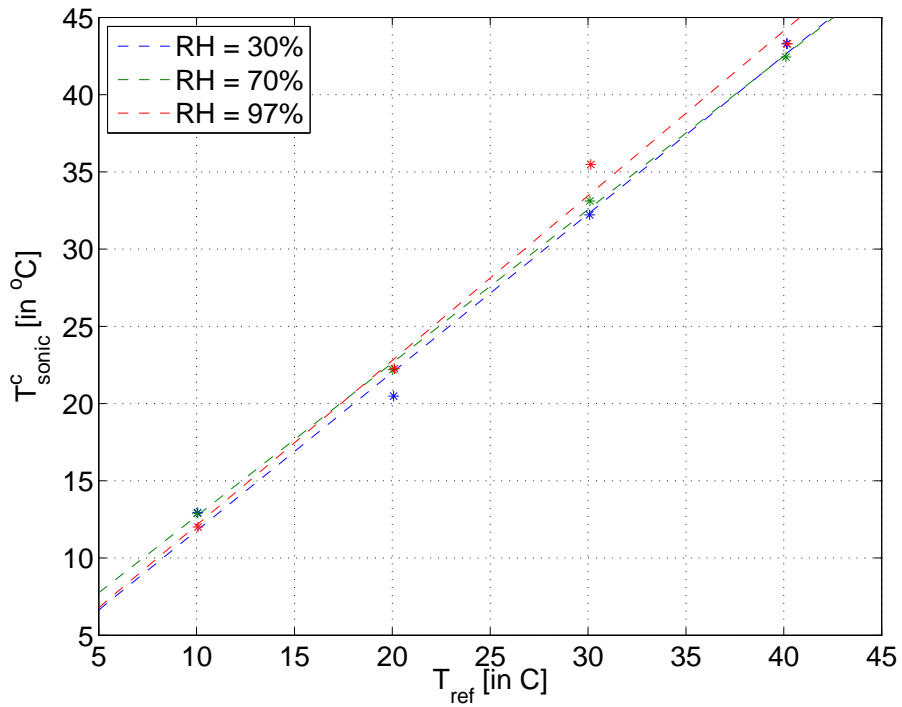


(b) De sonische temperatuur uitgezet tegen de referentietemperatuur. Het groene meetpunt geeft het startpunt aan en het rode punt het eindpunt aan.

Figuur 4.7: De gemeten sonische temperatuur en referentietemperatuur uitgezet tegen de tijd en tegen elkaar. Uit deze plaatjes is duidelijk te zien dat de referentietemperatuur achterloopt op de sonische temperatuur.



Figuur 4.8: De piek van de autocorrelatie functie wordt gevonden op $\tau = 92$ seconden.



Figuur 4.9: In deze figuur staat de sonische vocht gecorrigeerde temperatuur uitgezet tegen de referentietemperatuur.

bij één ligt. In het ideale geval ligt de waarde van B rond nul. Dit zou betekenen dat de sonische anemometer geen offset heeft. Aan de waarden in de tabel blijkt dat er wel een offset is. Deze is niet belangrijk bij flux metingen, omdat daar alleen variaties belangrijk zijn.

	RH = 30%	RH = 70%	RH = 97%
A_T	1.03	0.99	1.07
SE_A	0.06	0.02	0.07
B_T	1.51	2.78	1.46
SE_B	1.78	0.60	1.95

Tabel 4.4: Lineair fit resultaten met de standaard fouten.

4.3 Vocht

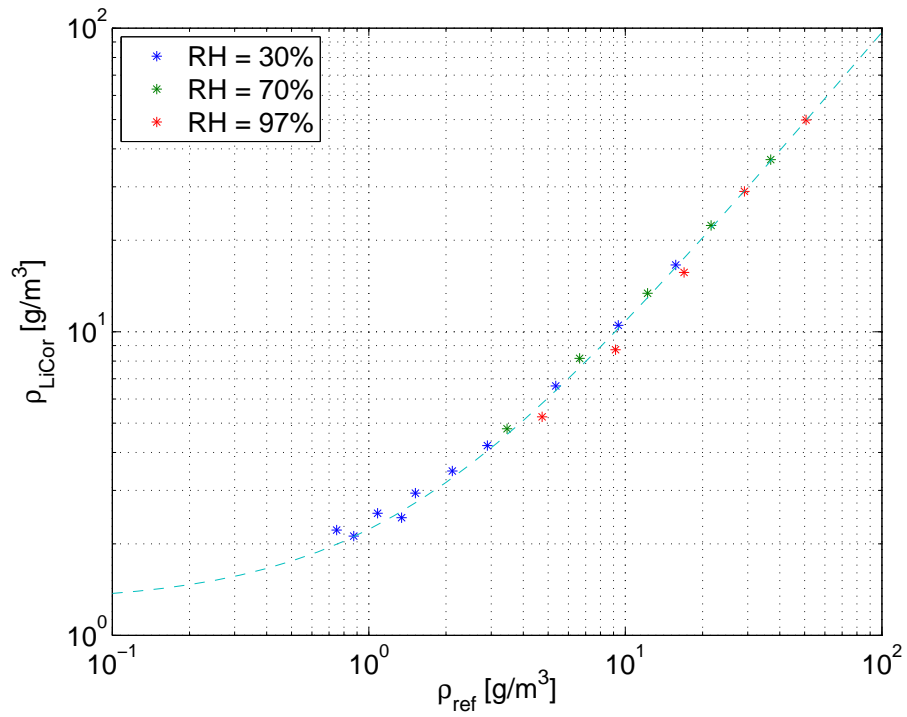
In figuur 4.10 staan de gemeten vocht concentraties uitgezet tegen elkaar. Door de kleinste kwadraten methode is de best passende lineaire curve bepaald waarvan de gevonden waarden van A_q en B_q vermeld staan in tabel 4.5. Uit de figuren en fit kunnen we de volgende dingen concluderen:

- De LI-7500 lijkt een constante offset te hebben. Voor lage concentraties geeft de LI-7500 1.5 g/m^3 meer dan de referentie.
- De data van RH 30% en 70 % lijken de trend redelijk te volgen. Bij data met RH 97% wijken 3 van 5 punten af van de trend.

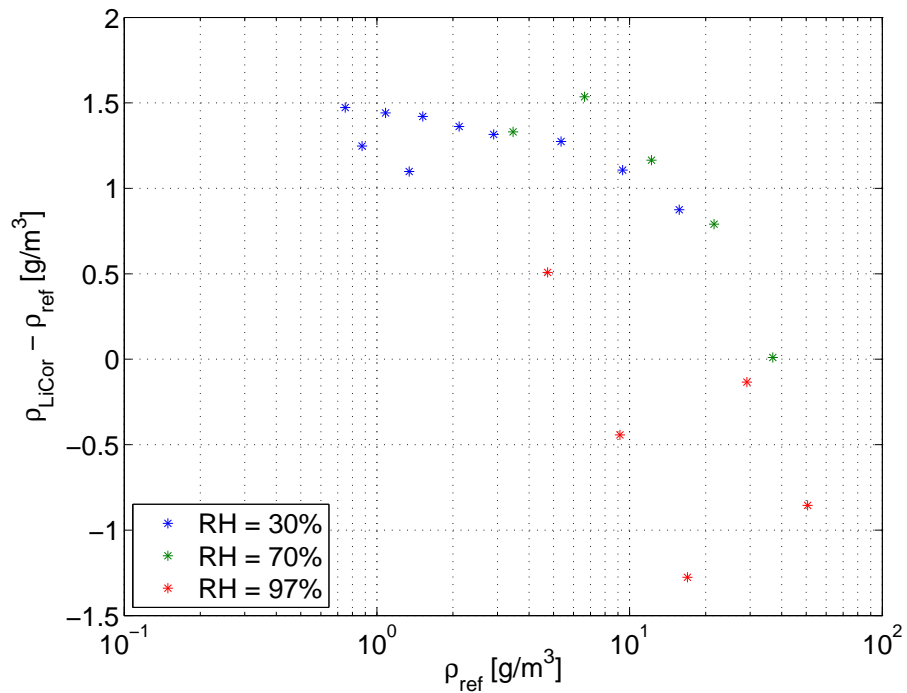
De offset en kleinere gevoeligheid van de LI-7500 wordt goed geïllustreerd door figuur 4.10b.

A_q	0.96
SE_A	0.01
B_q	1.28
SE_B	0.18

Tabel 4.5: Lineaire regressie resultaten van de vochtmetingen.



(a) De gemeten vochtconcentratie van de LI-7500 uitgezet tegen de gemeten vochtconcentratie van de referentie.



(b) Het verschil in gemeten vochtconcentratie uitgezet tegen de gemeten vochtconcentratie van de referentie.

Figuur 4.10: De resultaten van de vochtmetingen in de klimaatkamer.

Hoofdstuk 5

Discussie en Conclusies

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de metingen besproken. Het hoofdstuk is opgedeeld in twee stukken, één deel voor de temperatuurmetingen en één deel voor de vochtmetingen.

5.1 Temperatuur

In deze sectie worden de resultaten besproken van de temperatuur calibratie van de Gill R3 en R3A sonische anemometers. De verschillende resultaten worden stap voor stap besproken. Daarbij vormen de onderzoeksvragen, zoals gesteld in hoofdstuk één, de leidraad.

De eerste onderzoeksvraag houdt verband met de hysteresis zoals waargenomen in de in-situ observaties op de meetmast van Cabauw. Een precieze nabootsing van de hysteresis in de klimaatkamer is niet gerealiseerd. Gezien de beperkte tijd in deze stage is er voor gekozen meer aandacht te besteden aan het afwijkend gedrag rond $-5^{\circ}C$.

Een ander probleem dat zich voordeed is dat na het instellen van een nieuwe relatieve vochtigheid en temperatuur de klimaatkamer typisch zo'n 10 à 15 minuten nodig heeft voordat stabiele condities zijn bereikt. Dit is duidelijk zichtbaar uit figuur 4.5. Daarbij regelt de klimaatkamer eerst de temperatuur voor de nieuwe instelling en vervolgens de relatieve vochtigheid. Daarbij is de temperatuurmeting van de Pt500 niet afhankelijke van de hoeveelheid vocht, maar de temperatuurmeting van de sonische anemometer wel.

In de analyse van de tijdreeksen en uitkomsten van de correlaties blijkt dat tijdens de veldmetingen de sonische temperatuur met een vertraging van zo'n 25 à 30 minuten goed gecorreleerd is met de referentietemperatuur. Uit meting in de klimaatkamer blijken snelle temperatuur veranderingen echter vertraagd te zijn met 92 seconden. Hier loopt juist de referentietemperatuur achter op de sonische anemometer. Uit analyse van de tijdreeksen van T_{sonic}^c en T_{ref} tijdens veldmetingen kan opgemaakt worden dat snelle temperatuur fluctuaties wel tegelijkertijd worden waargenomen in de sonische anemometer en referentie meting. De waargenomen hysteresis in de in-situ metingen is dus het gevolg van een proces dat 25 à 30 minuten nodig heeft om stabiel te worden.

Er zijn in de klimaatkamer een aantal metingen gedaan die lijken op hysteresis zoals waargenomen in de in-situ metingen. Deze hysteresis in de klimaatkamer treedt op na een grote temperatuursprong waarin de vochtdichtheid en referentietemperatuur een snel evenwicht bereiken. In een eventueel vervolg onderzoek kan de hysteresis het best onderzocht worden door dit soort snelle sprongen te monitoren. De nieuwe klimaatkamer, die net na de metingen uit dit rapport is geïnstalleerd, is daarvoor een geschikt instrument. Deze kli-

maatkamer heeft minder tijd nodig om een stabiele conditie in de klimaatkamer te creëren dan de oude klimaatkamer.

Het gedrag van de sonische anemometer rond een temperatuur van $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ is verassend te noemen. Een tweede sonische anemometer vertoont een kwalitatief vergelijkbaar gedrag. Het probleem lijkt een typisch Gill probleem, want het is eerder vastgesteld in een zelfde soort test met een Gill WindMaster Pro door Wiel Wauben en Rob van Krimpen van het KNMI.

Door de beperkte uitvoer van de Gill R3 sonische anemometer is dit probleem erg lastig te onderzoeken. De ruwe meetdata is niet beschikbaar en correcties worden intern uitgevoerd. In dit rapport wordt bijvoorbeeld de gemeten geluidssnelheid door de Gill R3 sonische anemometer gegeven. De gebruiker kan dan offline de sonische temperatuur off-line berekenen. De Gill geeft zo bijvoorbeeld de gemiddelde geluidssnelheid over alle meetpaden terwijl het interessant zou zijn deze voor elk afzonderlijk meetpad te hebben. Eventuele vervormingen zouden dan makkelijker opgemerkt kunnen worden.

Bij de lineaire regressie van de temperatuurmetingen zijn de temperaturen meegenomen van 10°C , 20°C , 30°C en 40°C . De lineaire regressie laat zien dat de sonische anemometer voor alle relatieve vochtigheden een offset heeft. De gevoeligheid wijkt niet significant af van één. Wel zijn de fout marges vrij groot door het beperkte aantal meetpunten.

5.2 Vocht

In dit rapport is gekeken naar de vochtmetingen uit de Cabauw mast en zijn er vochtmetingen uitgevoerd in de klimaatkamer. Met een lineaire regressie is er gekeken naar de gevoeligheid van de LI-7500 voor vocht. Uit de analyse van de data van de Cabauw mast volgt een helling van 1.05 voor de lineair regressie. Met diezelfde lineaire regressie volgt voor de klimaatkamer observaties een gevoeligheid van 0.96. Deze twee waarden zijn significant verschillend. Uit de klimaatkamer observaties volgt ook een constante offset van 1.5 g/m^3 .

Deze resultaten komen dus niet goed overeen. Hieruit moet dus geconcludeerd worden dat de gevoeligheid zoals gevonden wordt in operationele data niet gebruikt kan worden voor een calibratiecontrole. Hierbij moet opgemerkt worden dat voor regressie alleen gebruik gemaakt is van vochtmetingen van 6 mei.

Dankwoord

Mijn stage op het KNMI heb ik ervaren als een leuke en leerzame tijd. Met veel geluk pakte ik een meteorologische interessante periode mee. Er was ineens een lange vorstperiode in Nederland (zie figuur 5.1). Daardoor kon het NK marathon weer geschaatst worden. Bijna iedere KNMI'er haalde de schaatsen uit het vet. Schaatsen en ijs was het gesprek van de dag. Van een echte winter kan ik ook altijd wel genieten en daarom hield ik gedurende deze periode de modelprognoses voor ijsdikte goed in de gaten.

Versteld sta ik van gigantische hoeveelheid data die verzameld wordt door het KNMI. De meetmast in Cabauw en de meetvelden in Nederland zijn volgehangen met instrumenten om temperatuur, wind, straling, vocht en vele andere meteorologische parameters te meten. Ook komt in de De Bilt zo'n beetje alle denkbare meetdata binnen van alle vliegvelden in Nederland. Denk ook aan neerslag waarnemingen die door vrijwilligers wordt verzameld en naar het KNMI gestuurd wordt. Met satellieten kan er worden gemeten op plekken die niet makkelijk bereikbaar zijn. Deze satelliet data wordt weer vergeleken met metingen die worden verricht op de vele internationaal varende vrachtschepen. Als laatste wil ik hier het oplaten van een weerballon noemen. Twee keer per dag wordt in De Bilt een weerballon opgelaten. Deze ballon verzamelt informatie over vocht, temperatuur en windsnelheid. De ballon in De Bilt wordt tegelijkertijd opgelaten met alle andere weerballonnen in de wereld.

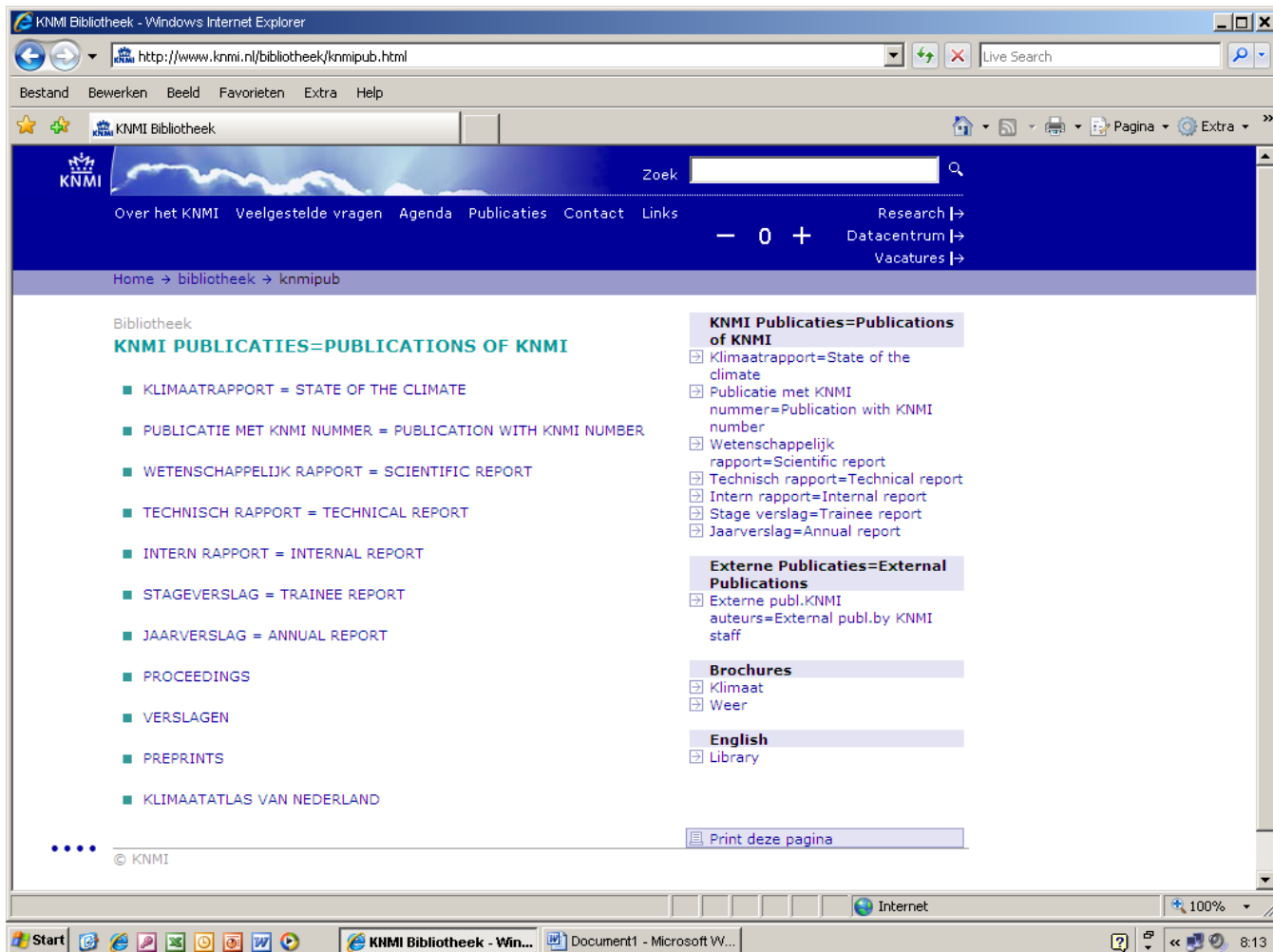
Hierbij wil ik graag het KNMI bedanken voor het mogelijk maken van deze stage. Fred Bosveld wil ik bedanken voor het begeleiden van het project. Rob van Krimpen wil ik danken voor de hulp bij de metingen in de klimaatkamer. Sjaak Warmer was al mijn held tijdens het afstudeerwerk met metingen op Cabauw. Ik kan nu ook niets anders zeggen dan dat het weer fantastisch was om samen de sonische anemometer en LI-7500 van de mast te halen. Bedankt voor de hulp Sjaak! Marcel Brinkenbergh wil ik bedanken voor de hulp bij het transport van de instrumenten en voor de gezelligheid in De Bilt. Als laatste wil ik Mark Savenije bedanken voor het maken van een crontab/cronjob voor de satelliet beelden en de gezellige kletspraat.



Figuur 5.1: De ingang van het KNMI onder winterse omstandigheden. Ijs op de sloten, rijp in de bomen en een mooie strak blauwe lucht.

Bibliografie

- [1] *LI-7500 Open Path CO₂/H₂O Analyzer - Instruction Manuel.*
- [2] *Omnidirectional (R3) & Asymmetric (R3A) Research Ultrasonic Anemometer.*
- [3] J.A. Jamieson, R.H. McFee, G.N. Plass, R.H. Grube, and R.G. Richards. *Infrared Physics and Engineering.* McGraw Hill, New York, 1963.
- [4] E. Lanzinger and H. Langmack. Measuring air temperature by using an ultrasonic anemometer.
- [5] P.R. Lowe and J.M. Ficke. The computation of saturation vapor pressure. Technical report, Environmental Prediction Research Facility, Naval Postgraduate School, 1974.
- [6] P. Schotanus. Temperature measurement with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes. *Boundary-Layer Meteorology*, 26:81–93, 1983.
- [7] A. Schuitmaker. Measurements of turbulent energy spectra in the stable atmospheric boundary layer using laser doppler anemometer. Master's thesis, TU Delft, 2008.



All titles of KNMI-publications (and a full text PDF for the most recent ones) can be found on

<http://www.knmi.nl/bibliotheek/knmipub.html>

If you have any questions, please contact us: bibliotheek@knmi.nl

