

# **Bepaling van de karakteristieken van de KNMI cup-anemometer**

*Martijn de Roos*

## KNMI stageverslag

De Bilt, 2007

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

Auteur: Roosz, M. de

Begeleiders KNMI: Wauben, W.  
Manders, H.





Stageverslag

# **Bepaling van de karakteristieken van de KNMI cup anemometer**

Martijn de Roos

Stageopdracht uitgevoerd bij het  
Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut

5 september 2007

---

Stageverslag

# Bepaling van de karakteristieken van de KNMI cup anemometer

Saxion Hogescholen  
Academie Life Science, Engineering & Design  
Opleiding Technische Natuurkunde  
Postbus 70.000  
7500 KB Enschede  
053-4871111

KNMI  
Afdeling R&D Informatie- en Waarneeminfrastructuur  
Wilhelminalaan10  
3732 GK De Bilt  
030-2206911

Bedrijfsbegeleider : Drs. J.H.A. Manders, Dr. W.M.F. Wauben  
Begeleider namens Saxion : Ir. W.J.M. Tiemessen  
Student : Martijn de Roos

Oorspronkelijke verslag Martijn de Roos van 29 juni 2007.  
Na interne KNMI review geheel herzien door Wiel Wauben van 5 september 2007.

---

## Samenvatting

De dynamische karakteristieken van een cup anemometer zijn de aanloopsnelheid en de responslengte. De aanloopsnelheid is de minimale windsnelheid die nodig is om de anemometer te laten draaien. De responslengte is de lengte van de luchtkolom die de anemometer moet passeren om bij een plotselinge verandering van de windsnelheid 63% van het verschil te overbruggen. De karakteristieken van de KNMI cup anemometer zijn zo'n 30 jaar geleden bepaald voor de toenmalige versie van de anemometer. In de loop van de tijd hebben er een aantal wijzigingen aan de anemometer plaats gevonden. Daarom wil men deze karakteristieken opnieuw bepalen.

Om de aanloopsnelheid en de responslengte te bepalen zijn proeven gedaan in de windtunnel van het KNMI. De aanloopsnelheid is bepaald door de windsnelheid in de windtunnel met kleine stapjes op te voeren totdat de anemometer begon te draaien. De aanloopsnelheid is bepaald op  $0,15 \pm 0,07$  m/s.

De metingen om de responslengte te bepalen zijn gebeurd met verschillende windtunnel- en anemometersnelheden. Om de anemometer een andere snelheid te laten draaien dan de windtunnelsnelheid, is gebruik gemaakt van perslucht. Hiermee werd tegen de cups geblazen en werd de snelheid van de anemometer verhoogd of juist verlaagd, afhankelijk van op welke kant van de cups geblazen werd. Voor metingen vanuit stilstand is er gebruik gemaakt van een touwtje dat in de meetsectie van de windtunnel werd gespannen en zo het cupstel van de anemometer blokkeerde. De eindsituatie is altijd de onverstoorde windtunnel met een vaste stand van de windsnelheid die gedurende de gehele responslengte test gelijk is.

Uit de pulsen van de anemometer is de periodetijd gemeten en dit is doorgestuurd naar de meetcomputer. De data-analyse gebeurde met Excel. Er zijn 2 manieren om de responslengte te bepalen. Namelijk de zogenaamde FIT methode die een lineaire lijn door de natuurlijke logaritme van de frequentie trekt en daaruit de responstijd bepaald, en een andere manier die op basis van de ISO procedure werkte. Bij de ISO methode wordt de responstijd bepaald uit het verschil tussen de tijdstippen waarop 30 en 74% de stapverandering van de anemometersnelheid wordt bereikt. Door deze responstijd te vermenigvuldigen met de windsnelheid kan de responslengte bepaald worden.

Uit de data-analyse is gebleken dat de responslengte gelijk is aan  $3,2 \pm 0,4$  m en gelijk is voor beide anemometers. De responslengte ligt binnen de eerder bepaalde waarde van  $2,9 \pm 0,4$  m. De responslengte voor acceleratie en deceleratie zijn nagenoeg gelijk.

De responslengte voor relatief kleine snelheidsveranderingen op hogere snelheid zijn lastig te bepalen. De responslengtes die hier bepaald zijn, zijn kleiner dan de andere responslengtes, maar hebben een grotere standaarddeviatie.

De beste methode om de responslengte te bepalen is m.b.v. de bovengenoemde FIT methode, die alle relevante meetpunten gebruikt en bovendien eenvoudig handmatig is aan te passen om gebieden met verstoringen in de metingen in de analyse niet te gebruiken. De ISO methode maakt enkel gebruik van 2 meetpunten en is daardoor gevoeliger voor fouten in de metingen.

---

# Inhoudsopgave

<b>1. Inleiding</b>	<b>1</b>
<b>2. Theoretische achtergrond</b>	<b>2</b>
2.1 <i>KNMI windmeetnet</i>	2
2.2 <i>KNMI cup anemometer</i>	2
2.3 <i>Aanloopsnelheid</i>	3
2.4 <i>Responslengte</i>	3
<b>3. Experimentele opstelling</b>	<b>6</b>
3.1 <i>Meetopstelling</i>	6
3.2 <i>Data-acquisitie</i>	7
3.3 <i>Meetprocedure</i>	8
<b>4. Meetresultaten en verwerking</b>	<b>11</b>
4.1 <i>Meetcondities</i>	11
4.2 <i>Meetresultaten en verwerking</i>	11
<b>5. Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>22</b>
5.1 <i>Conclusies</i>	22
5.2 <i>Aanbevelingen</i>	22
<b>6. Literatuur</b>	<b>24</b>

---

## **1. Inleiding**

Mijn stage in het kader van de opleiding Technische Natuurkunde is uitgevoerd bij het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) in De Bilt, in de afdeling Research & Development van de sector Informatie- en Waarneeminfrastructuur.

Mijn opdracht bestaat uit het bepalen van de dynamische karakteristieken van de KNMI cup anemometer. Deze anemometer is in de jaren '70 door het KNMI ontwikkeld. Toentertijd zijn de karakteristieken bepaald (Monna, 1978). In de loop van de tijd hebben er een aantal wijzigingen aan de anemometer plaats gevonden. Daarom wil men deze karakteristieken opnieuw bepalen. Mijn opdracht is om de aanloopsnelheid en de responslengtes voor de huidige operationele KNMI cup anemometer te bepalen. Tevens zal worden onderzocht of de responslengte voor acceleratie en deceleratie gelijk zijn en of deze afhankelijk zijn van de heersende windsnelheid.

In dit verslag zal eerst de theorie over de anemometer behandeld worden en de probleemstelling van het project worden beschreven. Daarna zal de meetopstelling en de meetprocedures besproken worden. Vervolgens zullen de meetresultaten en de verwerking ervan worden gepresenteerd. Tot slot worden conclusies en aanbevelingen gegeven.

## 2. Theoretische achtergrond

### 2.1 KNMI windmeetnet

Het KNMI beschikt samen met de Koninklijke Luchtmacht, Koninklijke Marine en Rijkswaterstaat over 70 windmeetstations verspreid over Nederland (SWANET, 2005). De dichtheid van de stations langs de kust en rondom het IJsselmeer is groter dan in het oosten van het land, waar een het windveld homogener is. Het aantal meetstations is voldoende om overal in Nederland de gemiddelde windsnelheid binnen 5% nauwkeurigheid te schatten. Op de stations wordt de windsnelheid en –richting gemeten met door het KNMI ontwikkelde sensoren. Dit gebeurt meestal op een hoogte van 10 meter boven het aardoppervlak. Om een representatieve wind te kunnen meten is de eis dat het station in het vrije veld staat en dat obstakels zich op een afstand van minimaal 15 keer de obstakelhoogte van de windmeter bevinden. Mocht dit niet haalbaar zijn, dan wordt de wind op een grotere hoogte gemeten (bijv. 20 meter in De Bilt) en/of er moet gebruik gemaakt worden van een zogenaamde beschuttingsfactor. Met de beschuttingsfactor kan de windsnelheid bepaald worden die er zou zijn als er geen obstakels in de buurt zouden staan. De beschuttingsfactor wordt bepaald per richtingssector van 30°. Dit gebeurt door te kijken hoe groot de windvlagen zijn bij een bepaalde gemiddelde windsnelheid (Handboek Waarnemingen, 2001).

Verder is het wenselijk dat de ruwheid van het terrein in alle richtingen binnen 150 meter van de windmeter ongeveer hetzelfde is. De ruwheidslengte dient in alle richtingen minder dan 1 meter te bedragen (Wieringa en Rijkoort, 1983). Bij meetstations dicht aan de kust is een homogene ruwheid van het landschap niet altijd mogelijk. De grootte van de windvector boven zee nabij de kust is slechts met een onzekerheid van enkele tientallen procenten af te leiden uit kuststationmetingen. Daarom is het belangrijk om windgegevens te hebben van locaties 10-20km uit de kust. Vroeger werd dit verkregen door het plaatsen van windmeters op lichtschepen. Tegenwoordig zijn er enkele windmeetstations op productieplatformen op zee (SWANET, 2005).

### 2.2 KNMI cup anemometer

Om de windsnelheid te meten gebruikt het KNMI cup anemometers (zie figuur 2-1). De cup anemometer die momenteel in gebruik is op het KNMI is in de jaren '70 bij het KNMI ontwikkeld. In het binnenwerk van de anemometer zit op de as een cilinder met spleten die tussen een led en een fotodiode beweegt. Per omwenteling worden er 32 pulsen gegenereerd. Het signaal afkomstig van de fotodiode wordt versterkt en omgezet in een blokvormig signaal. De tijdsduur tussen de pulsen of de frequentie is een maat voor de windsnelheid. De conversie naar windsnelheid vindt in het KNMI meetnet in de SIAM (Sensor Intelligente Adaptatie Module) plaats. Deze SIAM (Bijma, 2006) is een microcomputer die het signaal van de sensor omzet in een meteorologische grootheid en elke 12 seconden doorgeeft aan het meetnet.

In de loop van de tijd zijn er een aantal aanpassingen gedaan aan de cup anemometer. Zo is er een grotere opening gemaakt tussen de rotor en het vaste deel van de anemometer. Dit is gedaan om in de winter bevroering van water tussen beide delen bij windstil weer te voorkomen. Verder is het materiaal van de cups veranderd, omdat er bij hoge windsnelheden vervorming van de cups kon optreden, wat uiteindelijk tot scheuren kon leiden. Ook is de elektronica in de loop der tijd veranderd. Vroeger werden de pulsen opgewekt m.b.v. een magneetcontact, tegenwoordig met de fotodiode, zoals hiervoor is beschreven.





Figuur 2-1 De KNMI cup anemometer

De theorie van de cup anemometer is beschreven in Bijlage 1. Hier worden enkel de relevante informatie voor het bepalen van de karakteristieken van de cup anemometer gegeven.

### 2.3 Aanloopsnelheid

Om de cup anemometer vanuit stilstand in beweging te krijgen is een bepaalde koppel nodig. Dit koppel is nodig om de aanloopweerstand in het lager van de anemometer te overwinnen. De windsnelheid waarbij de anemometer begint te draaien wordt de aanloopsnelheid genoemd. Deze snelheid ligt in de regel onder 0,3 m/s. Tijdens de ijking van anemometers controleert het KNMI of de aanloopsnelheid minder dan 0,5 m/s is. Als de anemometers, normaal na een verblijf van 14 maanden in het veld, worden uitgewisseld voor periodiek onderhoud of wegens storingen wordt gecontroleerd of de aanloopsnelheid beneden de 1,0 m/s is. Zoniet, dan wordt hiervan melding van gemaakt aan de gebruiker, zodat deze hiermee rekening kan houden.

#### Bepaling aanloopsnelheid

De aanloopsnelheid wordt bepaald door te starten in de tunnel bij windsnelheid nul met de cup anemometer in stilstand. Vervolgens wordt de windsnelheid geleidelijk in kleine stapjes verhoogd totdat de cup anemometer begint te draaien. De aanloopsnelheid is de windsnelheid op het moment dat de cup anemometer begint te draaien.

### 2.4 Responslengte

Bij een windsnelheidsverandering heeft de anemometer tijd nodig om de nieuwe windsnelheid te bereiken. De tijd die nodig is om 63% van de snelheidsverandering te bereiken, wordt de responstijd  $\tau$  genoemd. Hieruit kan de responslengte  $D$  uitgerekend worden door de responstijd met de windsnelheid te vermenigvuldigen. De responslengte is de lengte van de horizontale kolom lucht die de anemometer gepasseerd moet zijn om 63% van de snelheidsverandering te bereiken. Bij de meeste cup anemometers ligt de responslengte tussen de 2 m en 5 m. Dit is conform de eis van de Wereld Meteorologische Organisatie (WMO, 1996). In 1978 is de responslengte van de KNMI cup anemometer bepaald op  $2,9 \pm 0,4$  m (Monna, 1978). Dit was voor de oudere versie van de KNMI cup anemometer.

De afhankelijkheid van de responslengte van een cup anemometers van windsnelheid, stapgrootte en acceleratie/deceleratie is in de literatuur nauwelijks bekend. Curvers en Schuurman (1990) geven responslengtes van een vijftal cup anemometers voor acceleratie/deceleratie. Voor 3 anemometers is de responslengte voor deceleratie significant kleiner dan voor acceleratie; voor een anemometer geeft deceleratie en acceleratie geen significant verschil; terwijl bij een andere anemometer de responslengte voor deceleratie juist significant groter is dan voor acceleratie.

#### Bepaling responslengte volgens ISO

Voor het bepalen van de responslengte is een ISO standaard opgesteld (ISO, 2007). Deze ISO 17713 schrijft voor dat de responslengte bepaald moet worden vanuit stilstand naar 5m/s en 10m/s. Met onderstaande formule kan de snelheid van de anemometer op een zeker tijdstip  $t$  berekend worden. De acceleratie verloopt exponentieel en is afhankelijk van de responstijd  $\tau$ .

$$V_t = V_f \left(1 - e^{-(t/\tau)}\right)$$

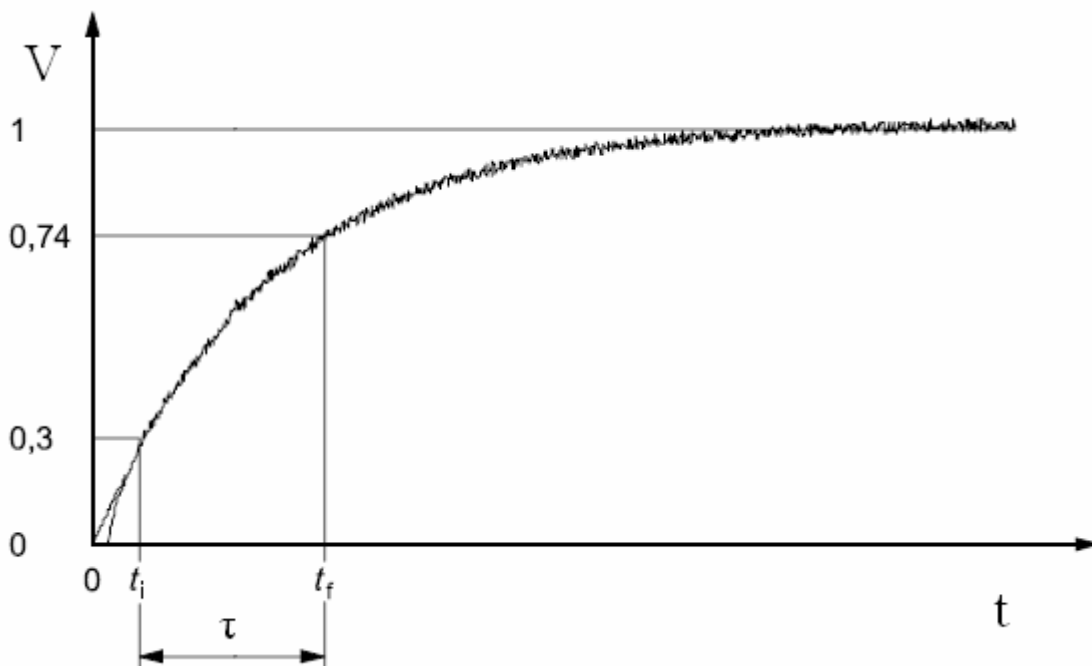
$V_f$  is de uiteindelijke snelheid die bereikt wordt. De ISO standaard bepaald de responstijd niet uit de tijdsduur die nodig is om 63% van de verandering te bereiken, maar uit het tijdsverschil waarop 30% en 74% van de windsnelheid wordt behaald. Hierbij wordt vermeden dat weerstandseffecten, die een belangrijke rol spelen bij lage snelheden, de bepaling van  $\tau$  beïnvloeden. In figuur 2-2 is de ISO methode schematisch weergegeven. Hierin is  $t_i$  het tijdstip waarbij 30% van de windsnelheidsverandering wordt bereikt en bij  $t_f$  wordt 74% bereikt. De responstijd  $\tau$  wordt bepaald door

$$\tau = t_f - t_i.$$

De responslengte  $D$  kan nu berekend worden met

$$D = V_f \tau.$$

ISO schrijft voor om voor zowel 5 en 10 m/s de responslengte te bepalen uit tenminste 10 afzonderlijke metingen. De responslengtes bij beide snelheden mogen niet meer dan 10% afwijken van het gemiddelde van de responslengte van beide snelheden.



Figuur 2-2 Verloop van de acceleratie en de bepaling van de responstijd  $\tau$  volgens de ISO methode

ISO meldt dat de op manier berekende responstijd een afwijking heeft van minder dan 1% van de werkelijke waarde. Aangezien

$$t_f - t_i = -\ln(0.26)\tau + \ln(0.70)\tau = 0.990\tau$$

geeft de ISO methode altijd een onderschatting van de responstijd en dus een overschatting van de responslengte van 1%. In de data-analyse is hiervoor gecorrigeerd.

### Bepaling responslengte volgens FIT

Voor het bepalen van de responstijd volgens de FIT methode wordt de snelheid voor een stapverandering herschreven als

$$\ln(V_t - V_e) = \ln(V_s - V_e) - (t / \tau).$$

De natuurlijke logaritme van  $(V_t - V_e)$  verandert lineair in de tijd, waarbij de helling gelijk is aan  $-1/\tau$ . Deze helling, en dus de responstijd, zijn dus te verkrijgen door een lineaire fit aan  $\ln(V_t - V_e)$ . De fit dient te worden toegepast op metingen die niet te dicht bij de begin- en eindsnelheid liggen zodat de verandering goed wordt beschreven met het exponentiële verloop. Hiervoor kunnen bijvoorbeeld de meetpunten tussen  $t_i$  en  $t_f$  worden gebruikt. De FIT methode is geïllustreerd in sectie 4.2.2.

Een voordeel van de fit is dat meerdere meetpunten worden gebruikt en niet enkel 2 meetpunten zoals in de ISO methode, waardoor deze laatste gevoeliger is voor meetfouten. De fit geeft tevens informatie over de kwaliteit

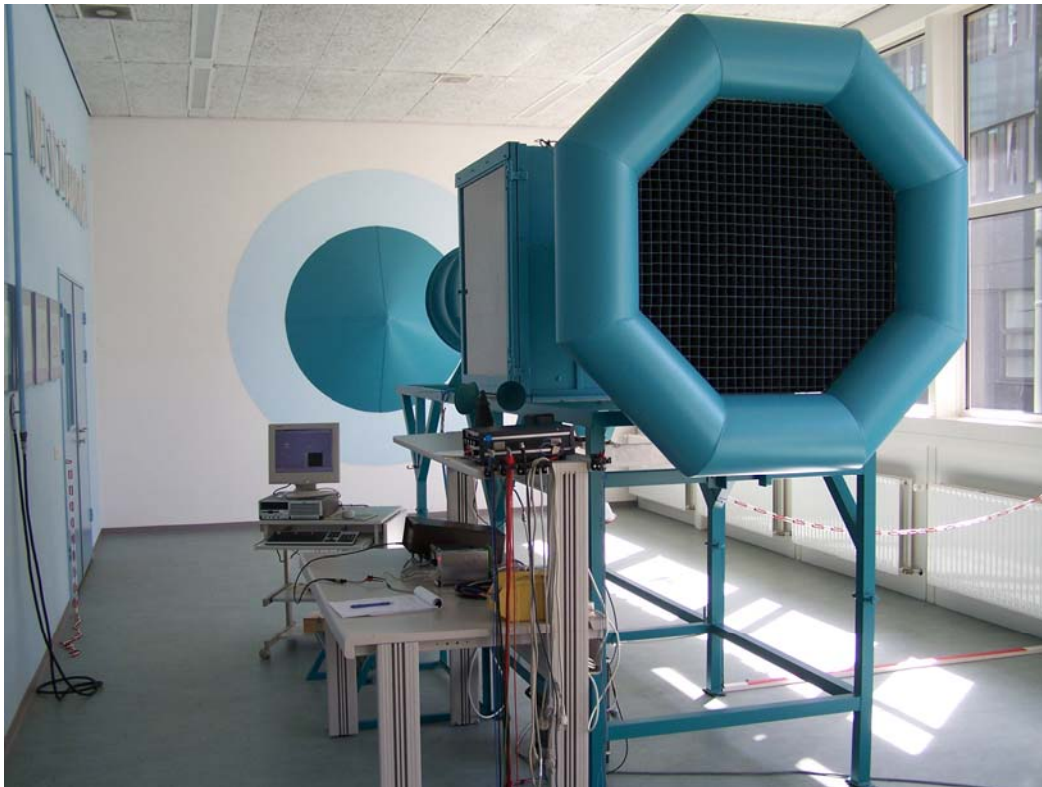
van de fit en de fout van in de helling. Daarnaast kan het fitgebied eenvoudig worden aangepast mocht het gekozen interval tekenen vertonen van verstoringen.

### 3. Experimentele opstelling

#### 3.1 Meetopstelling

De aanloopsnelheid en responslengte worden gemeten in de windtunnel van het KNMI (zie Figuur 3-1). Bij het KNMI wordt de windtunnel hoofdzakelijk gebruikt voor het ijken van cup anemometers van het meetnet. In de meetsectie van de windtunnel bevindt zich een mast met daarop een montageplug. Hierop kan de anemometer gemonteerd worden. De tunnel is van het zogenaamde Eiffel type, met een gesloten meetsectie. De belangrijkste maten en eigenschappen zijn (Monna, 1983):

- Oppervlak achzijdige meetsectie:  $0,134\text{m}^2$
- Lengte meetsectie:  $0,4\text{m}$
- Kleinste bruikbare windsnelheid:  $0,2\text{ m/s}$
- Grootste bruikbare windsnelheid:  $30\text{ m/s}$
- Snelheidsregeling d.m.v. een regeltransformator
- Grootste afwijking van de gemiddelde snelheid in het bruikbare deel van het meetvolume: ca. 3%
- Turbulentiegraad in het bruikbare deel van het meetvolume:  $<1\%$



Figuur 3-1 De KNMI windtunnel.

In de loop der tijd hebben een aantal wijzigingen aan de windtunnel plaatsgevonden. Zo is er op de instroomopening een torus gemonteerd, de uitstroomopening is verlengd en tegenover de uitstroomopening op de wand van de windtunnelruimte is een kegelvormige stromingsgeleider gemonteerd. Dit alles om een betere laminaire luchtstroming te krijgen. Verder is de windtunnel op een stevig frame gemonteerd en zijn de aandrijfmotor en riemen vervangen.

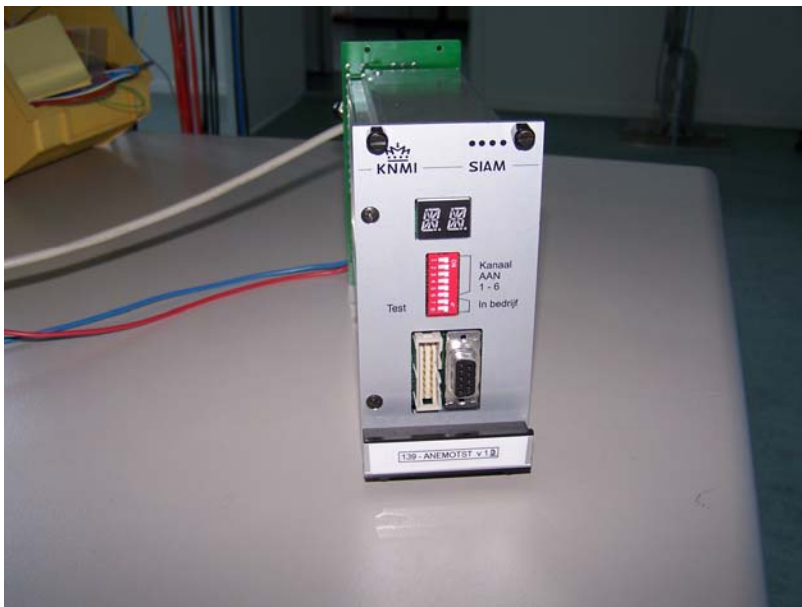
Om tijdens de metingen de anemometer een andere snelheid dan de windtunnelsnelheid te laten draaien, is een perslucht opstelling gemaakt. Deze bestaat uit een aluminium leiding die via een gat in de bovenkant van de meetsectie in de windtunnel wordt gelaten. De uitstroomopening van de leiding kan zowel op de bolle als holle kant van de cups worden gericht. Door met perslucht tegen de cups te blazen kan de snelheid van de rotor verhoogd dan wel verlaagd worden (zie figuur 3-2). De perslucht toevoer is regelbaar met een kraan.



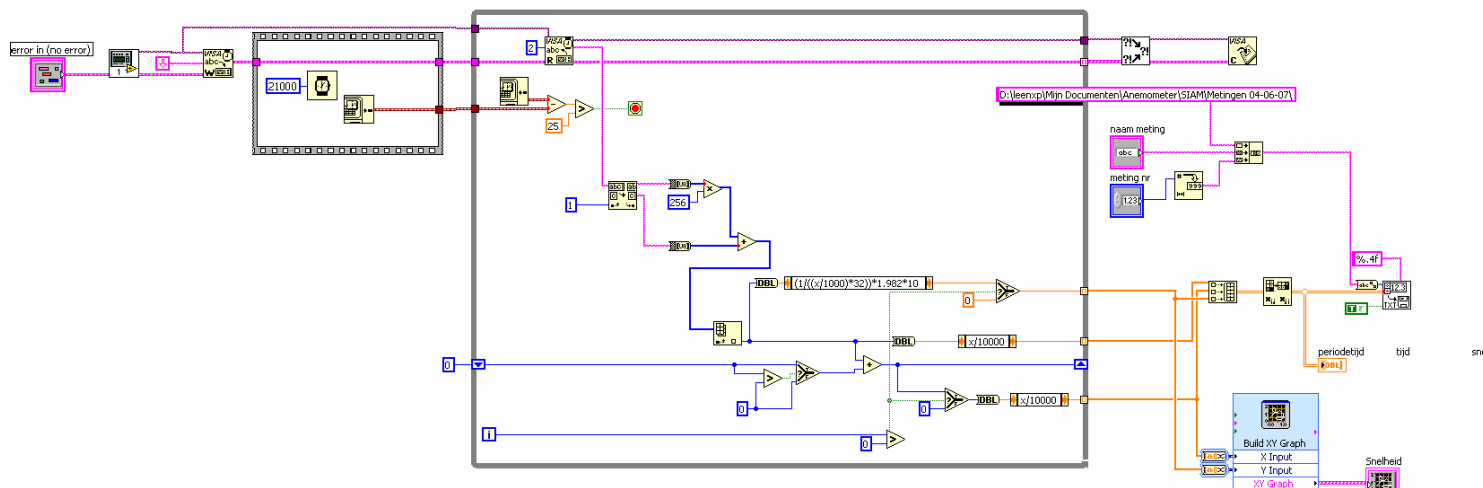
*Figuur 3-2 Cup anemometer in de KNMI windtunnel en de persluchtstelling.*

### **3.2 Data-acquisitie**

Het blokvormige signaal dat uit de anemometer komt moet worden omgezet in een periode waaruit vervolgens de windsnelheid kan worden afgeleid. Dit gebeurt m.b.v. een SIAM (zie figuur 3-3). De SIAM in deze meetopstelling is een speciale versie die gedurende 20 seconden meet. De meting wordt gestart als er over de datalijn een Linefeed wordt ontvangen. De SIAM start vervolgens aan het begin van iedere ontvangen puls een teller met een resolutie van  $100 \mu\text{s}$ . De teller stopt bij het verschijnen van de volgende puls. De gemeten periodetijd wordt opgeslagen in het interne geheugen. De SIAM is geprogrammeerd op een meetduur van 20 seconden. Na deze 20 seconden wordt de data uitgestuurd en via de seriële poort van de meetcomputer binnen gehaald.



*Figuur 3-3 De SIAM voor het meten van de periode.*



Figuur 3-4 Blokdigram van de LabVIEW applicatie.

De aansturing van de meting gebeurt door een LabVIEW applicatie op de meetcomputer. In figuur 3-4 is het blokdigram van deze applicatie te zien. Bij het starten van de applicatie wordt eerst de COM poort geconfigureerd. M.b.v. een 'VISA Write' wordt er een Linefeed naar de SIAM gestuurd waarna deze begint met meten. De 'Flat sequence structure' zorgt ervoor dat er vervolgens 21 seconden gewacht wordt. Als deze 21 seconden voorbij zijn wordt een While loop gestart. Hierin zorgt een 'VISA Read' dat de binaire data uit de SIAM wordt ingelezen. De data bestaat uit 2 bytes. Deze worden gesplitst met de 'Search/split string', waarna de MSB (Most Significant Byte) wordt vermenigvuldigd met 256. De waarde van de LSB (Least Significant Byte) wordt hier bij opgeteld zodat de periodetijd ontstaat in 100  $\mu$ s. Met een 'Index array' wordt van de data een array-type gemaakt. Met een 'Expression node' wordt er uit de periodetijd de snelheid berekend. De totale tijd wordt verkregen door alle periodetijden bij elkaar op te tellen. Dit gebeurt m.b.v. een 'shift register'. De waarden komen uit de 'While loop' en worden met een 'Build array' en 'Transpose 2D array' in een array van de juiste dimensie geplaatst. Deze array wordt met een 'Write to spreadsheet file' in een Excel bestand opgeslagen. Met een 'Build XY graph' wordt er op het front panel een grafiek gegenereerd die de snelheid als functie van de tijd weergeeft.

Op het frontpanel van de LabVIEW applicatie is de naam van de meting en het metingnummer in te voeren. Als naam van de meting is de conventie xxx\_vs-ve\_nr gebruikt waarbij xxx gelijk is aan acc of dec voor acceleratie en deceleratie, respectievelijk met vs en ve de start- en eindsnelheid. Een druk op de startknop stuurt een Linefeed naar de SIAM gestuurd waardoor deze begint te meten. Wanneer alle data van de SIAM op de meetcomputer is ontvangen, zal de LabVIEW applicatie de waarden presenteren in een tabel en grafiek. In de tabel staan naast de periodetijd, ook de hieruit berekende snelheid van de anemometer en de tijd. De grafiek toont de snelheid als functie van de tijd. Naast de presentatie op het frontpanel worden alle gegevens ook in een Excel bestand gezet. De bestandsnaam bevat de naam van de meting en het metingnummer. In Excel zal vervolgens de data-analyse gebeuren.

### 3.3 Meetprocedure

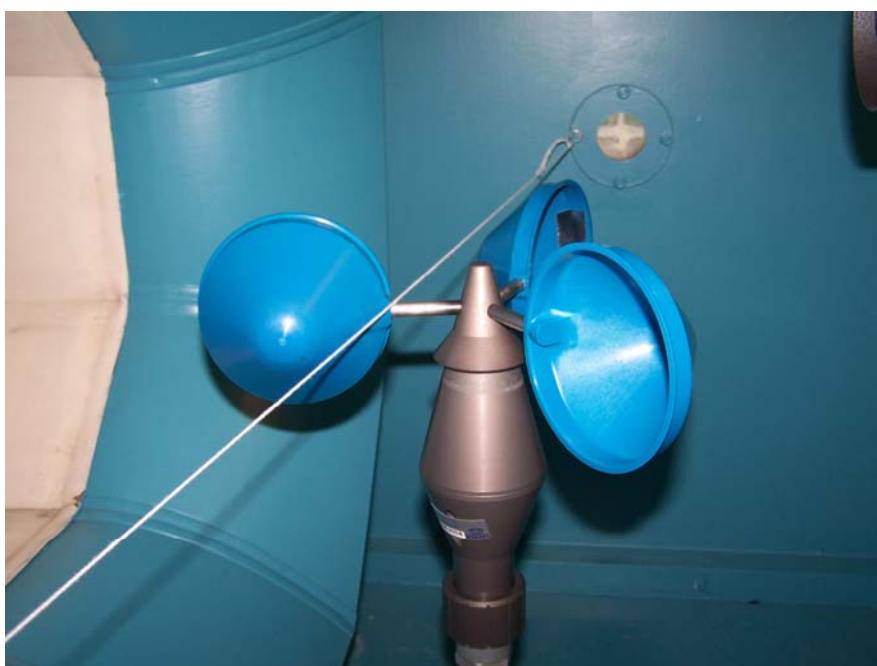
Voor het bepalen van de aanloopsnelheid wordt de rotor van de anemometer zo gepositioneerd dat een cup met de holle zijde loodrecht op de luchtstroom staat. De ventilator van de windtunnel wordt nu langzaam aangezet en met kleine stapjes wordt de snelheid opgevoerd totdat de rotor van de anemometer begint te draaien. Helaas kon de snelheid van de tunnel op dat moment nog niet geregistreerd worden. De aanloopsnelheid is daarom de snelheid die de cup anemometer op dat moment aangeeft en dus niet de heersende windsnelheid. Conform de aanbeveling van ISO is de aanloopsnelheid meerdere keren bepaald. De gemiddelde waarde wordt gerapporteerd als de aanloopsnelheid terwijl de fout gegeven wordt door de standaard deviatie van de individuele metingen.

Voor het bepalen van de responselengte worden er verschillende metingen verricht bij verschillende snelheden. Dit gebeurt zowel bij versnellen als bij vertragen. In onderstaande tabel is een overzicht van de uitgevoerde metingen gegeven.

Tabel 3-1 Overzicht van responslengte metingen

<b>Acceleratie</b>	<b>Deceleratie</b>
0-5 m/s	5-0 m/s
0-10 m/s	10-0 m/s
0-15 m/s	10-5 m/s
5-10 m/s	15-5 m/s
5-15 m/s	20-5 m/s
10-15 m/s	15-10 m/s
13-20 m/s	20-10 m/s

Bij het uitvoeren van de proeven wordt eerst de windtunnel op de gewenste snelheid gebracht. Dit is de eindsnelheid van de responslengte proef. Bij de acceleratieproeven vanuit stilstand moet er gezorgd worden dat het cupstel van de anemometer stil blijft staan in de luchtstroom. Dit gebeurt d.m.v. een touwtje dat gespannen wordt over de breedte van de meetsectie van de windtunnel en zo voorkomt dat het cupstel gaat draaien (zie figuur 3-5). Als de meting wordt gestart wordt het touwtje omhoog getrokken waardoor het cupstel niet langer wordt tegen gehouden en begint te draaien.



Figuur 3-5 De opstelling voor acceleratie vanuit stilstand.

Bij acceleratieproeven vanaf een bepaalde snelheid naar een hogere snelheid, wordt gebruik gemaakt van de perslucht opstelling. De windtunnel wordt op de gewenste snelheid gebracht waarna door perslucht de anemometer wordt afgeremd naar een bepaalde constante snelheid. Hierna wordt de meting gestart en na een aantal seconden wordt de perslucht gestopt, waardoor de anemometer begint te versnellen.

Bij het vertragen van de anemometer wordt ook gebruik gemaakt van de perslucht. Nu wordt de perslucht op de holle kant van de cups gericht zodat de anemometer een hogere snelheid krijgt dan de windtunnelsnelheid. Door de perslucht te stoppen zal de anemometer vertragen naar de tunnel windsnelheid.

De aanloopsnelheid en de responslengte metingen zijn elk met twee gereviseerde en geijkte anemometers uit de voorraad van het KNMI uitgevoerd. De KNMI serienummers zijn:

<b><i>Aanloopsnelheid</i></b>
Anemometer 1: 01.00.029-140
Anemometer 2: 01.00.029-141
<b><i>Responslengte</i></b>
Anemometer 1: 01.00.029-129
Anemometer 2: 01.00.029-074

Aangezien de metingen van de aanloopsnelheid en responslengte op verschillende dagen zijn uitgevoerd waren niet dezelfde sensoren voor deze test beschikbaar.



## 4. Meetresultaten en verwerking

### 4.1 Meetcondities

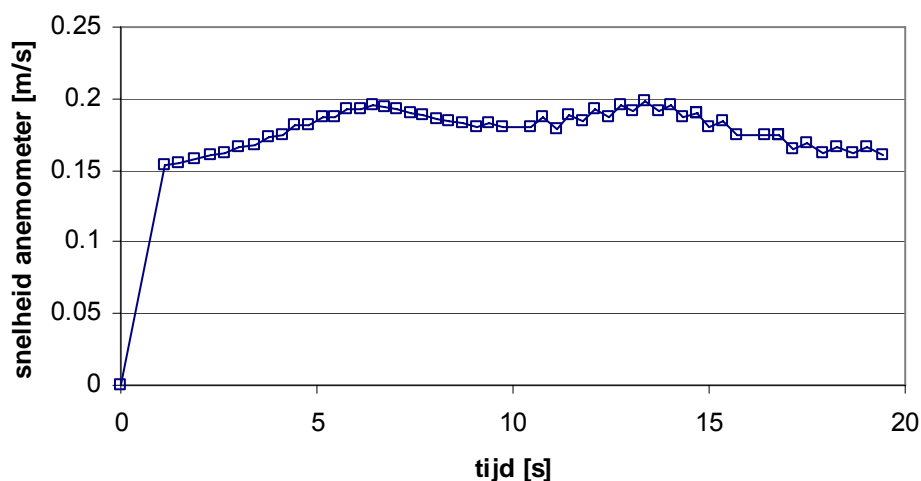
Bij iedere meting zijn temperatuur, luchtvochtigheid en luchtdruk gemeten en genoteerd. Hieruit is de luchtdichtheid te bepalen die van invloed kan zijn op de resultaten. De meetcondities voor iedere meetserie zijn opgenomen in de bijlage 3. De condities zijn gelijk gedurende de meetserie.

### 4.2 Meetresultaten en verwerking

Bijlage 4 geeft de meetresultaten van de individuele metingen. In dit hoofdstuk worden de verwerking van de meetgegevens en de algemene meetresultaten besproken.

#### 4.2.1 Bepaling aanloopsnelheid

Een voorbeeld van een meting is gegeven in figuur 4-1. Het eerste punt in deze figuur correspondeert met de eerste puls waarbij nog geen snelheid bepaald kan worden. De volgende puls geeft de eerste snelheid. Vervolgens zijn bij gelijke instelling van de snelheid van de windtunnel nog minimaal 10 snelheden gemeten. In de figuur is te zien dat de snelheid van de anemometer varieert, hetzij door fluctuatie in de windtunnel of doordat de anemometer langzaam op gang komt uit stilstand en soms zelfs lijkt te herstellen van een overshoot bij het opeens in beweging komen of door wrijving tussentijds nagenoeg weer stop. Dit laatste is kan gebeuren doordat het lager niet geheel homogeen is, maar ook doordat de positie van de cup anemometers t.o.v. de wind snelheid verandert en dus ook het ondervonden koppel. De aanloopsnelheid is bepaald uit de eerste, tweede of het gemiddelde van de eerste 10 snelheid metingen van de anemometer. De aanloopsnelheden voor beide anemometers zijn op deze manier 9 keer bepaald. De individuele resultaten zijn gegeven in bijlage 4.



Figuur 4-1 Aanloopsnelheid test nr. 7 van cup anemometer 1.

De aanloopsnelheid per individuele meting verschilt behoorlijk. Vooral voor anemometer 1 is de variatie erg groot. Dit wordt iets beter als het gemiddelde van de eerste 10 snelheidsmetingen van de cup anemometer wordt gebruikt voor de aanloopsnelheid. De bepaalde aanloopsnelheden zijn

$$0,15 \pm 0,14 \text{ m/s}$$

voor anemometer 1 en

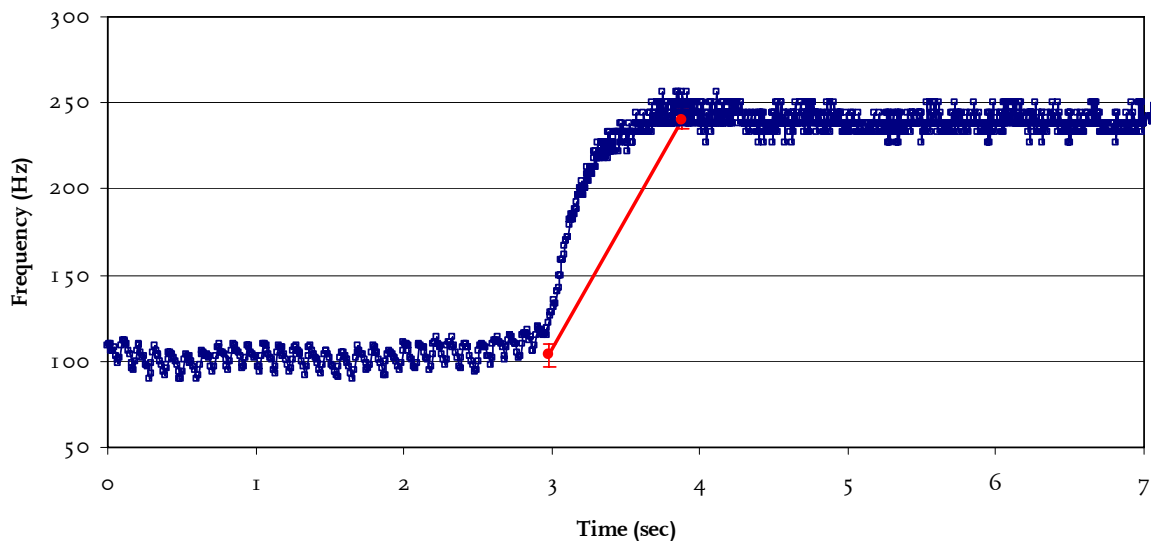
$$0,14 \pm 0,07 \text{ m/s}$$

voor anemometer 2. Merk op dat hier de snelheid gerapporteerd door de cup anemometer is gebruikt en niet de snelheid van de windtunnel. Deze laatste is waarschijnlijk hoger doordat de anemometer nog hinder ondervindt van wrijving. De afhankelijkheid van de aanloopsnelheid van de startpositie van het cupstel t.o.v. de luchtstroom is niet onderzocht.

## 4.2.2 Bepaling responslengte

De bepaling van de responslengte gebeurt in Excel. Dit is grotendeels geautomatiseerd, maar vereist toch enkele handmatige acties, controle en znodig handmatige aanpassingen. De details van de data-analyse die uitgevoerd is, staat beschreven in bijlage 2.

Als eerste wordt het gebied van de verandering bepaald en de gemiddelde frequentie voor en na de verandering. Dit is geïllustreerd in figuur 4-2. De figuur toont tevens aan dat de frequentie van de cupanemometer voor en na de verandering nogal sterk varieert. Het gebruik van perslucht leidt in dit geval zelf tot een cyclische fluctuatie van de frequentie voor de verandering. In dit geval is zijn de start en eind tijdstippen van de verandering op 2,98 en 3,88 sec en de gemiddelde frequentie (en standaard deviatie) zijn 103 Hz (6%) en 240 Hz (2%), voor en na de verandering, respectievelijk.



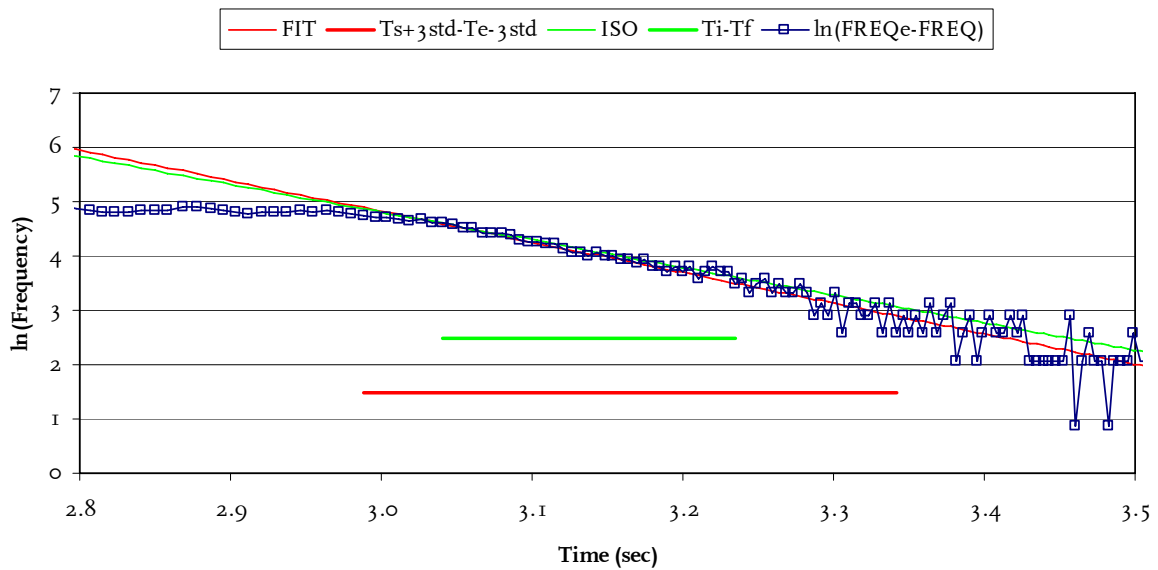
*Figuur 4-2 Illustratie van de data-analyse aan de hand van run 2 van de acceleratie van 5 naar 15 m/s voor anemometer 2. Getoond zijn de gemeten frequentie versus de tijd (blauw) en het veranderingsgebied (rode lijn) met gemiddelde frequentie en standaard deviatie voor en na de verandering (rode punten).*

Vervolgens wordt bepaald waar 30% en 74% van de verandering is bereikt (3,04 en 3,24 sec) en wat het fitgebied is (2,99-3,34 sec). Dan wordt de responstijd volgens ISO en FIT bepaald. ISO geeft een responstijd van 0,196 sec met een onzekerheid van 11% en FIT geeft 0,177 sec met een standaard fout van 5%. Het verwachte exponentiële verloop tijdens de verandering kan nu worden bepaald en is in figuur 4-3 en 4-4 aangegeven. De kwaliteit van de ISO en FIT is voor beide bepaald over het fitbereik en geeft voor de correlatie coëfficiënt, standaard fout en residu, respectievelijk, 0,948 0,169 en 1,838 voor ISO en 0,948 0,138 en 1,181 voor FIT. Aangezien de FIT gebaseerd is op alle meetpunten in het fitbereik is de standaard fout en residu kleiner dan voor ISO die enkel 2 meetpunten gebruikt. De responslengtes zijn in dit geval  $2,92 \pm 0,33$  m volgens ISO en  $2,64 \pm 0,15$  m volgens FIT.

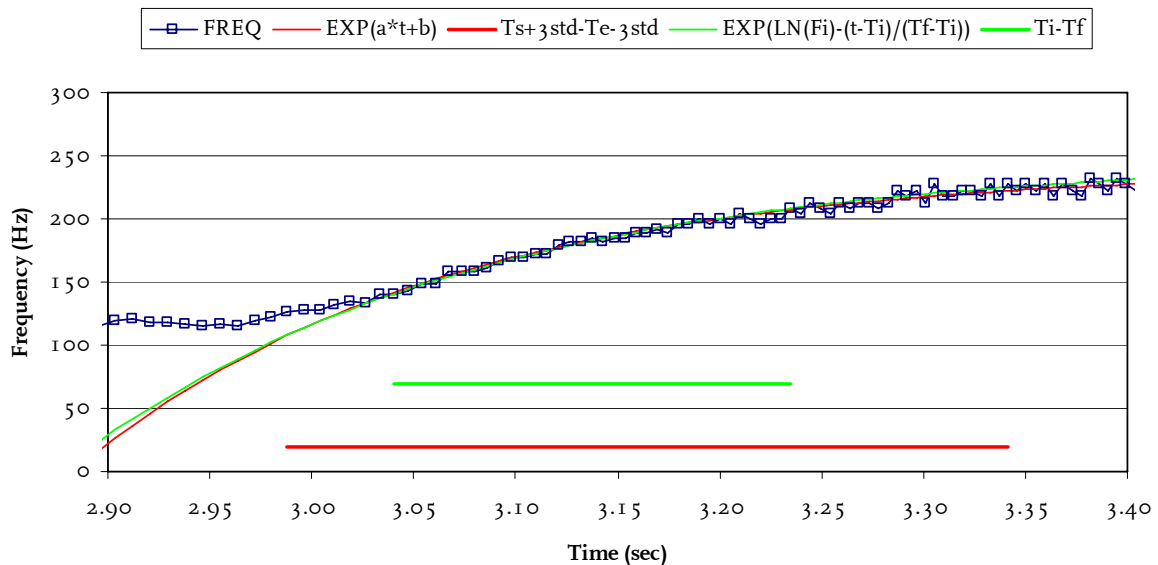
Figuur 4-4 toont dat aan het begin van het fitbereik de metingen enigszins afwijken van het exponentiele verloop. De resultaten van FIT veranderen nagenoeg niet als het fitbereik wordt aangepast zodat FIT deze metingen niet gebruikt. De grote sprongen in de metingen op het eind van het fitgebied (zie figuur 4-3) komen door de fluctuaties en de resolutie van de metingen in de buurt van de eindsnelheid. Ook hiervoor is FIT vrij ongevoelig omdat de beste lineaire fit aan deze punten wordt bepaald. De ISO methode is gevoeliger voor meetfouten omdat deze methode maar 2 meetpunten gebruikt. Als een van deze punten afwijkt van het gemiddelde verloop van de metingen (zie bijvoorbeeld figuur 4-5) heeft dit direct een negatieve invloed op de bepaling van de responslengte volgens de ISO methode.

Om de FIT en ISO methode beter vergelijkbaar te maken wordt in het vervolg het fitbereik beperkt tot 30% en 74% van de verandering, dus gelijk aan dat van de ISO methode. In bovenstaand voorbeeld geeft dit voor de FIT methode een responstijd van 0,193 sec met een onzekerheid van 6%. De correlatie coëfficiënt, standaard fout en

residu zijn, respectievelijk, 0,967 0,066 en 0,148 voor ISO en 0,967 0,057 en 0,109 voor FIT. Doordat het fitbereik is beperkt wordt het gedrag van de meting beter beschreven door het exponentieel verloop. De responslengtes zijn in dit geval  $2,92 \pm 0,33$  m volgens ISO en  $2,87 \pm 0,17$  m volgens FIT.



Figuur 4-3 Als figuur 4-2, maar nu de logaritme van de gemeten frequentie versus de tijd (blauw), het bereik van ISO en FIT (groene en rode horizontale lijn, respectievelijk) en het verloop volgens ISO en FIT.



Figuur 4-4 Als figuur 4-3, maar nu uitgezet als frequentie versus de tijd.

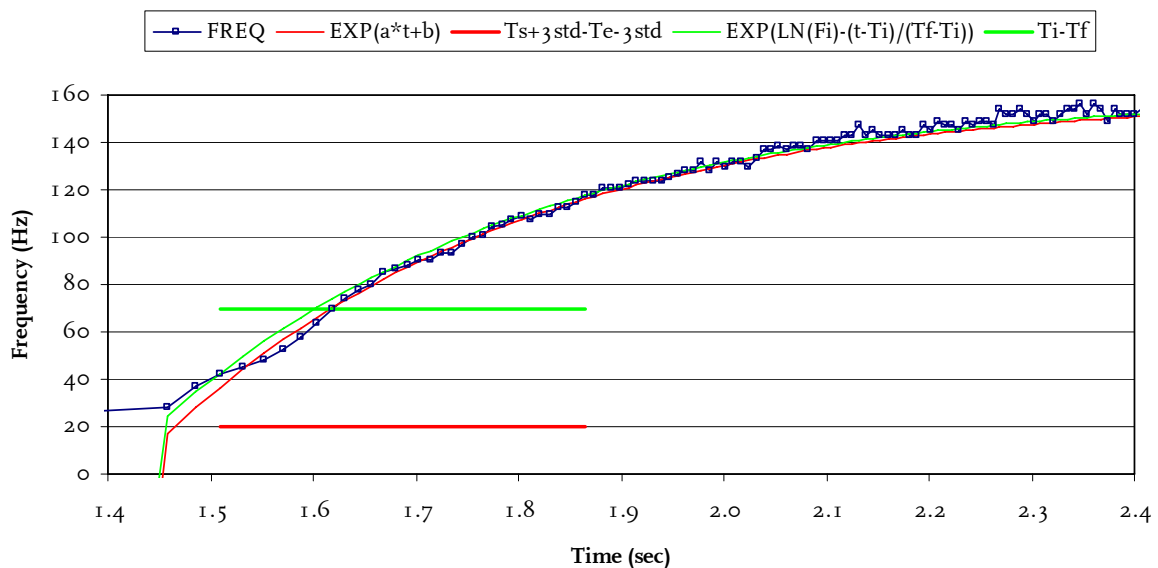
#### 4.2.2.1 Nauwkeurigheid

Er moet rekening worden gehouden met een aantal onnauwkeurigheden bij de metingen. Zo is de windtunnelsnelheid niet geheel constant. De variatie van de snelheid van de windtunnel is ongeveer 5%. In de tweede plaats speelt de resolutie van de SIAM een rol. Deze meet de periodetijd van het signaal met een resolutie van 100  $\mu$ s. Bij een windsnelheid van 20 m/s is de periodetijd zo'n 3 ms. Bij deze snelheid geeft dit een onnauwkeurigheid van ongeveer 3%. Bij een snelheid van 5 m/s is de periodetijd 12 ms en de onnauwkeurigheid is minder dan 1%. De fout bij de bepaling van de tijdsconstante bij de analyse is 2%. Ervan uitgaande dat deze fouten onafhankelijk zijn geeft dit een totale onzekerheid voor de responslengte van 6%.

## 4.2.2.2 Acceleratie

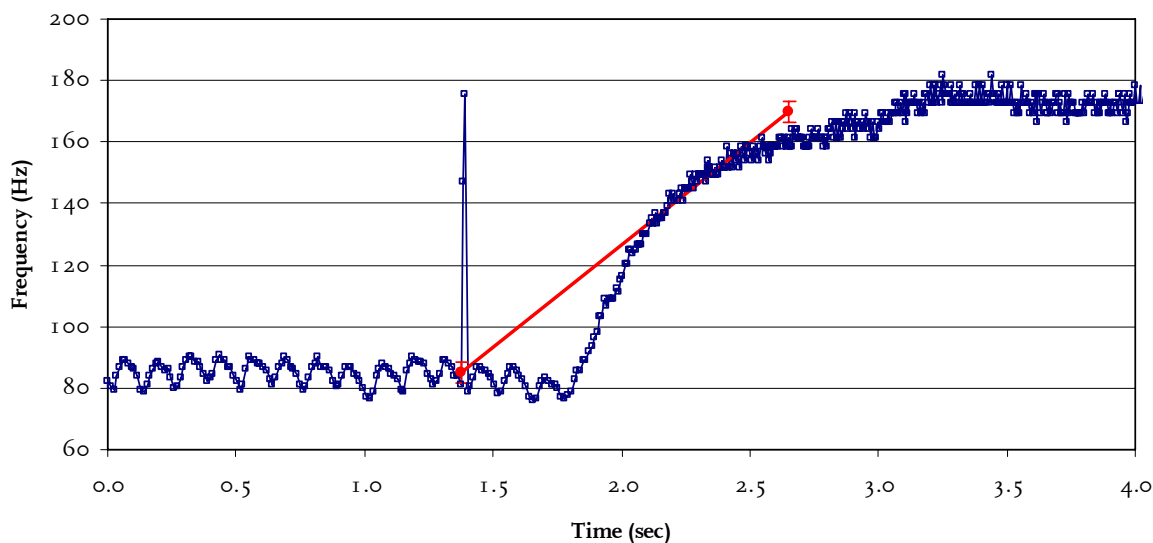
### Acceleratie vanuit stilstand

Bij acceleratie vanuit stilstand valt op dat de curve niet een gelijkmatig verloop heeft. Bij een windtunnelsnelheid van 5 m/s zien we steeds een dipje bij een anemometer snelheid van ongeveer 1,5 m/s (zie figuur 4-5). In dit ‘dipje’ neemt de snelheid van de anemometer maar langzaam toe. Na ongeveer 150 ms neemt de snelheid weer sneller toe en volgt weer de exponentiele curve. Bij acceleratie vanuit stilstand naar 10 m/s zien we hetzelfde verschijnsel. Nu doet zich het verschijnsel voor bij een anemometersnelheid tussen 2,5 en 3 m/s. De tijdsduur van de dip is nu ongeveer 70 ms. Bij acceleratie naar 15 m/s zien we de dip verschijnen bij snelheden tussen 3 en 3,5 m/s met een duur van ongeveer 50 ms. De reden van dit verschijnsel is niet duidelijk. Mogelijk dat turbulente stromingen een rol spelen. In figuur 4-5 is een voorbeeld te zien van de twee verschillende manieren om de responslengte te bepalen. De groene lijn is de curve die bepaald wordt door de ISO methode. In dit geval ligt het 30% punt voor ‘het dipje’. Dit heeft tot gevolg dat de berekende responslengte een stuk groter is dan wanneer deze met ‘het dipje’ zou zijn bepaald. De rode lijn is de FIT en is handmatig aan te passen, maar de bijdrage van de meetpunten voor de ‘dip’ aan de fit klein is omdat FIT meerdere meetpunten gebruikt.



*Figuur 4-5 Illustratie van de data-analyse aan de hand van run 8 van de acceleratie van 0 naar 10 m/s voor anemometer 2. Door een dipje in de acceleratie geeft de ISO methode een grotere responstijd dan de FIT methode.*

Bij sommige metingen was er sprake van valse pulsen (zie bijvoorbeeld figuur 4-6). Deze werden veroorzaakt door de fotodiode in de anemometer. Wanneer de fotodiode belicht werd ontstond er tijdens de overgang naar ‘doorlaat’ een oscillatie op de flank van het signaal. Dit had tot gevolg dat, wanneer deze stoerpuls sterk genoeg was, er een extra puls door de SIAM gedetecteerd werd. Dit betekent dat de gemeten tijd tussen de pulsen korter werd en zo een hogere windsnelheid gedetecteerd werd. Dit fenomeen deed zich voor bij windsnelheden tussen 4,5 m/s en 9 m/s. Deze stoerpulsen waren duidelijk herkenbaar doordat er grote pieken in de snelheid te zien waren. Deze stoerpulsen zijn in de Excel analyse handmatig verwijderd. In feite worden de 2 pulsen met een te hoge frequentie samengevoegd. Tijdens het doormeten van anemometer 2 is zijn de valse pulsen niet meer opgetreden doordat de SIAM applicatie hiervoor is aangepast. Figuur 4-6 toont tevens een situatie waarin de begin situatie met perslucht tot een cyclische verstoring van de anemometer snelheid leidt terwijl de eindsituatie ook een verstoring vertoont. Terwijl de cyclische verstoring aan het begin bijna altijd voorkomt bij acceleratie van 5 naar 10 m/s is de verstoring voor het bereiken van de eindsnelheid een uitzondering.



*Figuur 4-6 Illustratie van een stoorpuls tijdens run 2 van de acceleratie van 5 naar 10 m/s voor anemometer 1. In dit geval leidt de stoorpuls tot een foutieve bepaling van het gebied van de verandering, maar de bepaling van de responslengte wordt er nauwelijks door beïnvloed. De verstoring aan het eind van de verandering moet worden vermeden.*

*Tabel 4-1 De responslengtes voor acceleratie vanuit stilstand voor beide anemometers.*

	Anemometer 1		Anemometer 2		Anemometer 1		Anemometer 2	
	$\langle D_{FIT} \rangle$	$\pm \langle \sigma_D \rangle$	$\langle D_{FIT} \rangle$	$\pm \langle \sigma_D \rangle$	$\langle D_{ISO} \rangle$	$\pm \langle \sigma_D \rangle$	$\langle D_{ISO} \rangle$	$\pm \langle \sigma_D \rangle$
0 → 5	3.26	± 0.15	3.38	± 0.12	3.43	± 0.18	3.57	± 0.12
0 → 10	3.50	± 0.10	3.48	± 0.14	3.49	± 0.22	3.46	± 0.11
0 → 15	3.42	± 0.10	3.47	± 0.15	3.47	± 0.23	3.45	± 0.20

In tabel 4-1 zijn de mediaan van de responslengtes van de metingen te zien voor de twee anemometers bij acceleratie vanuit stilstand. De individuele resultaten zijn gegeven in bijlage 4. Behalve de mediaan is ook de standaard deviatie bepaald uit de responslengtes van de afzonderlijke runs.

Tabel 4-1 geeft aan dat de responslengte bij hogere windtunnelsnelheid toeneemt, vooral tussen 5 en 10 m/s. De ISO methode resultaten geven dit niet, maar hier wordt de bepaling bij 5 m/s sterk beïnvloed door de ‘dip’. Bij 5 m/s geven beide methodes een hogere responslengte voor anemometer 2 in vergelijking met anemometer 1. Bij 10 en 15 m/s geven beide sensoren bijna dezelfde responslengte en zijn de resultaten voor FIT en ISO nagenoeg gelijk.

### **Acceleratie vanaf 5 m/s**

De resultaten voor acceleratie vanaf 5 m/s staan in tabel 4-2. Bij acceleratie vanaf 5 m/s zien we in de curves geen dipjes. De hierbij bepaalde responslengtes zijn, net als vanuit stilstand, hoger naarmate het snelheidsverschil groter is. Opvallend is dat de responslengtes uit de ISO methode hier in de meeste gevallen kleiner is dan uit FIT, behalve bij acceleratie van 5 naar 10 m/s voor anemometer 2. De responslengtes zijn kleiner bij acceleratie vanaf 5 m/s dan vanuit stilstand. Dit geldt met name bij acceleratie van 5 naar 10 m/s in vergelijking met 0 naar 10 m/s. Dit komt omdat bij een kleiner verschil in windsnelheid het verschil minder snel zal worden overbrugd. Voor anemometer 1 is de responslengte van 5 naar 10 m/s zelfs kleiner dan voor 0 naar 5 m/s en hetzelfde is het geval voor 5 naar 15 m/s in vergelijking met 0 naar 10 m/s, terwijl deze voor anemometer 2 bijna gelijk zijn.

Tabel 4-2 De responslengtes voor acceleratie vanaf 5 m/s voor beide anemometers.

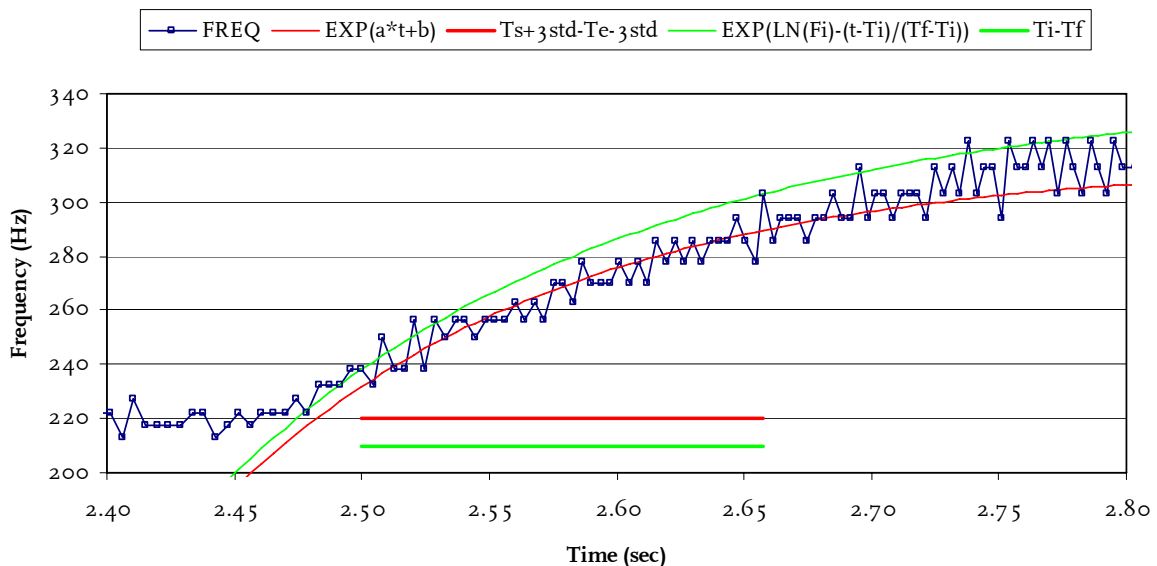
	Anemometer 1	Anemometer 2	Anemometer 1	Anemometer 2
	$\langle D_{FIT} \rangle \pm \langle \sigma_D \rangle$	$\langle D_{FIT} \rangle \pm \langle \sigma_D \rangle$	$\langle D_{ISO} \rangle \pm \langle \sigma_D \rangle$	$\langle D_{ISO} \rangle \pm \langle \sigma_D \rangle$
5 → 10	3.09 ± 0.31	3.30 ± 0.31	2.94 ± 0.43	3.28 ± 0.33
5 → 15	3.39 ± 0.22	3.49 ± 0.25	3.20 ± 0.24	3.55 ± 0.25

### Acceleratie vanaf hogere snelheden

Hierbij zijn metingen gedaan vanaf 10 m/s naar 15 m/s en vanaf 13 m/s naar 20 m/s (14 naar 20 m/s voor anemometer 1). De meting vanaf 10 m/s naar 15 m/s is alleen met de tweede anemometer gebeurd, wegens een defect aan de eerste anemometer. We zien dat bij deze metingen de responslengtes kleiner zijn dan bij de andere metingen. Dit is vooral zichtbaar bij de metingen vanaf 14 m/s naar 20 m/s. De responslengte van anemometer 2 past in de afnemende trend bij als het verschil afneemt (vergelijk 10 naar 15 met 5 naar 15) en/of de eindsnelheid toeneemt (vergelijk 10 naar 15 met 5 naar 10 en 0 naar 5). De oorzaak van de lage responslengte voor een acceleratie van 13 naar 20 m/s is onduidelijk. Door de perslucht kunnen turbulente stromingen ontstaan die het acceleratiegedrag van de anemometer beïnvloeden en pas na enige tijd na stoppen van de perslucht zijn uitgedempt. Echter dit zou leiden tot een hogere responslengte. Aangezien de SIAM periodetijden kan meten met een resolutie van 100 μs zal de nauwkeurigheid bij hogere snelheid afnemen. Dit is duidelijk te zien in figuur 4-7. Dit verklaart ook de grotere spreiding in de meetresultaten in vergelijking met de andere metingen. De standaarddeviatie ligt hier tussen 0,3 en 0,8 m en is daarmee hoger dan bij de meeste andere metingen.

Tabel 4-3 De responslengtes voor acceleratie vanaf 10 en 13 m/s voor beide anemometers.

	Anemometer 1	Anemometer 2	Anemometer 1	Anemometer 2
	$\langle D_{FIT} \rangle \pm \langle \sigma_D \rangle$	$\langle D_{FIT} \rangle \pm \langle \sigma_D \rangle$	$\langle D_{ISO} \rangle \pm \langle \sigma_D \rangle$	$\langle D_{ISO} \rangle \pm \langle \sigma_D \rangle$
10 → 15	- ± -	3.10 ± 0.66	- ± -	3.12 ± 0.70
13 → 20	2.25 ± 0.32	2.39 ± 0.58	2.20 ± 0.83	2.47 ± 0.80

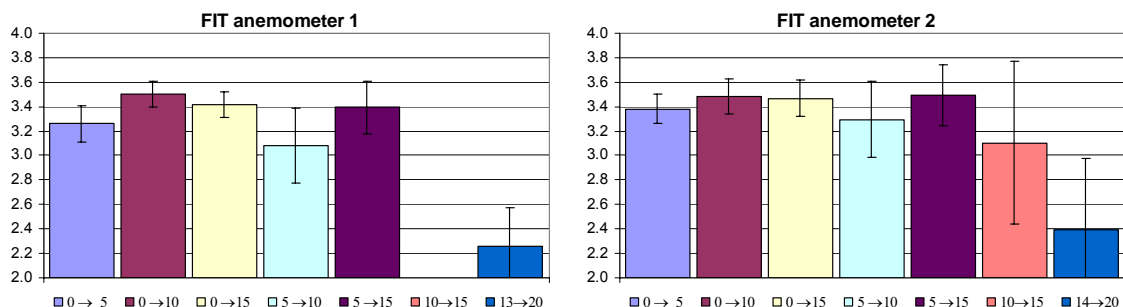


Figuur 4-7 Acceleratie van 13 naar 20 m/s voor anemometer 2 (run 3). Het is moeilijk om een goede lijn door de curve te krijgen. Door de resolutie van de SIAM wordt de onnauwkeurigheid in de snelheid groter bij hogere windsnelheid.

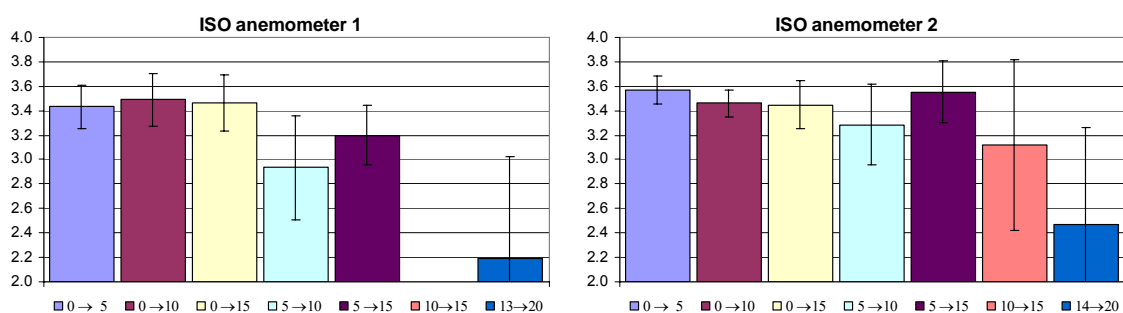
### Vergelijking acceleratie responslengtes

In onderstaande figuren 4-8 en 4-9 en tabel 4-4 zijn de gemiddelde responslengtes voor de twee anemometers verkregen met de FIT en ISO methode weergegeven.

Bij FIT is er een zelfde verloop zichtbaar bij beide anemometers. De grootste verschillen tussen de twee anemometers zijn te zien bij acceleratie van 5 m/s naar 10 m/s en van 13 m/s naar 20 m/s. Vervolgens komen de verschillen bij acceleratie van 0 m/s naar 5 m/s en van 5 m/s naar 15 m/s. In alle gevallen zijn de verschillen tussen de 2 anemometers binnen de foutenmarge en heeft de tweede anemometer een hogere waarde. Hetzelfde gedrag is te zien in de resultaten van de ISO methode, maar daar zijn de verschillen en de foutenmarge groter.



Figuur 4-8 De responslengtes bepaald door de FIT methode bij acceleratie van beide anemometers.



Figuur 4-9 De responslengtes bepaald door de ISO methode bij acceleratie van beide anemometers.

De meting vanuit stilstand naar 5 m/s geeft de grootste verschillen tussen de responslengtes verkregen met ISO en FIT. Voor beide sensoren geeft ISO een grotere responslengte waarde dan FIT. Dit komt omdat het 'dipje' na het 30% punt komt, zodat ISO een grotere responstijd geeft. Bij versnellen van 5 naar 15 m/s geeft ISO een behoorlijk lagere responslengte dan FIT, maar enkel voor anemometer 1.

De standaarddeviatie is het kleinst bij de metingen vanuit stilstand. Bij de fit van de eerste anemometer valt op dat de standaarddeviatie van 5 naar 10 m/s hoger is dan de rest. De waarden behorende bij de acceleratie van 10 naar 15 m/s en van 13 naar 20 m/s hebben eveneens een grote standaarddeviatie. De standaarddeviatie is in de meeste gevallen groter voor de ISO methode dan voor FIT.

Tabel 4-4 Overzicht van alle bepaalde responslengtes voor acceleratie en de gemiddelde waarden.

	FIT 1			FIT 2			ISO 1			ISO 2		
	D	±	σ	D	±	σ	D	±	σ	D	±	σ
0 → 5	3.26	±	0.15	3.38	±	0.12	3.43	±	0.18	3.57	±	0.12
0 → 10	3.50	±	0.10	3.48	±	0.14	3.49	±	0.22	3.46	±	0.11
0 → 15	3.42	±	0.10	3.47	±	0.15	3.47	±	0.23	3.45	±	0.20
5 → 10	3.09	±	0.31	3.30	±	0.31	2.94	±	0.43	3.28	±	0.33
5 → 15	3.39	±	0.22	3.49	±	0.25	3.20	±	0.24	3.55	±	0.25
10 → 15	-	±	-	3.10	±	0.66	-	±	-	3.12	±	0.70
13 → 20*	2.25	±	0.32	2.39	±	0.58	2.20	±	0.83	2.47	±	0.80
Alle	3.15	±	0.46	3.23	±	0.39	3.12	±	0.50	3.27	±	0.39
Alle*	3.33	±	0.16	3.37	±	0.15	3.30	±	0.24	3.41	±	0.17

De resultaten verkregen bij verschillende snelheden tonen dat de responslengte afneemt als de eindsnelheid toeneemt met gelijkblijvende snelheidsverandering (0→5, 5→10, 10→15, 13→20 en 0→10, 5→15, 13→20) en dat de responslengte afneemt als de snelheidsverandering vermindert bij gelijke eindsnelheid (0→15, 5→15, 10→15 en 0→10, 5→10). Het moet echter worden opgemerkt dat de afhankelijkheid van de responslengte van

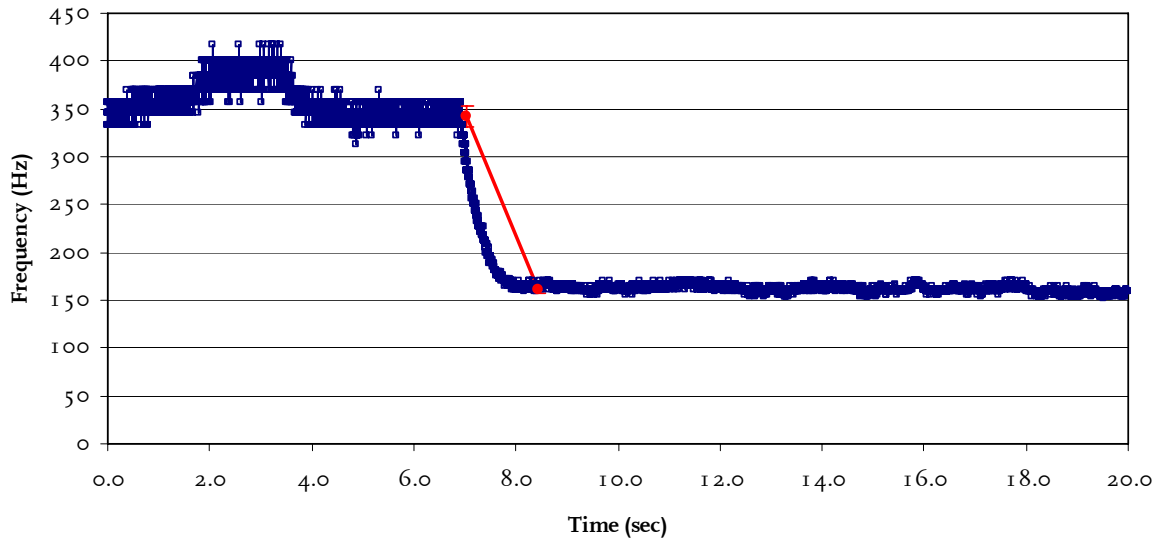
windsnelheid en –verandering binnen de onzekerheidsmarges van de metingen valt. Enkel de responslengte verkregen bij 13→20 wijkt significant af, maar deze metingen hadden een grote onzekerheid vanwege de tijdsresolutie van de metingen.

De gemiddelde responslengte van beide sensoren en methoden komen goed overeen. De responslengte van 13 naar 20 m/s wordt buiten beschouwing gelaten omdat deze als enige niet binnen de foutenmarge overeenkomt met de anderen dan zijn de gemiddelde responslengtes een stuk hoger en de standaard deviatie lager. De gemiddelde responslengtes voor acceleratie voor alle snelheden en beide sensoren zijn  $3,19 \pm 0,41$  m voor FIT en  $3,20 \pm 0,42$  m voor ISO. Zonder de responslengte van 13 naar 20 m/s zijn de gemiddelde responslengtes voor acceleratie volgens FIT en ISO  $3,35 \pm 0,15$  en  $3,36 \pm 0,20$  m, respectievelijk.

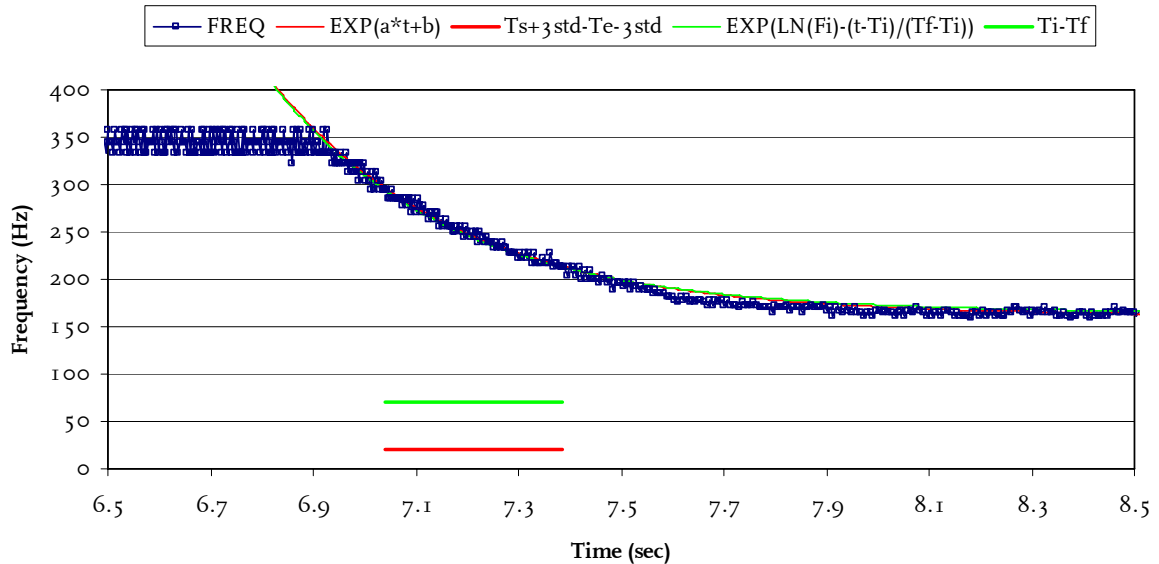


### 4.2.2.3 Deceleratie

Het bepalen van de responslengte bij vertragen is geïllustreerd in figuur 4-10 en 4-11. De analyse is op dezelfde wijze uitgevoerd als voor acceleratie, zij het dat enkele formules zijn aangepast (zie bijlage 2 voor details). Figuur 4-10 toont de metingen, het gebied van de verandering en de gemiddelde frequentie voor en na de verandering. In dit geval zijn de eerste 1500 meetpunten in de eerste 4 seconden overgeslagen omdat de initiële windsnelheid niet stabiel was. Figuur 4.11 toont het gebied van de verandering in meer detail en geeft de resultaten van de ISO en FIT methode.



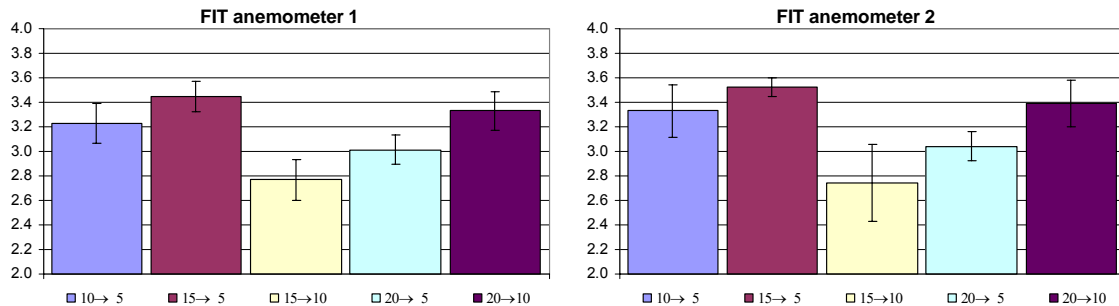
Figuur 4-10 De meting van deceleratie van 20 naar 10 m/s voor anemometer 2 (run 1). De eerste 4 seconden zijn niet meegenomen in de data-analyse.



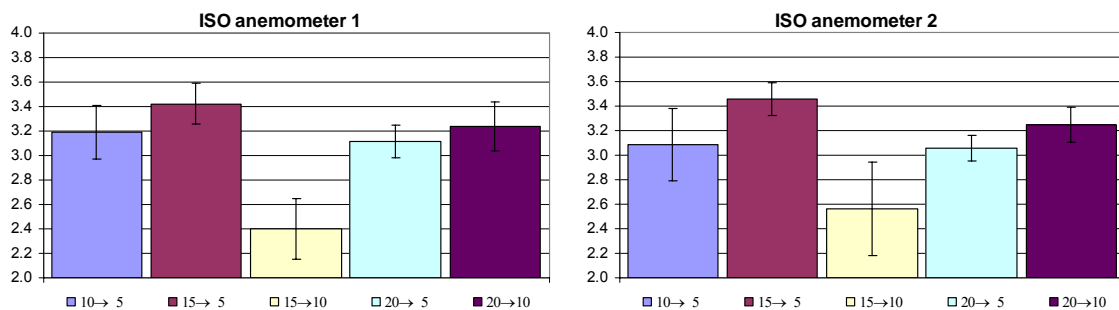
Figuur 4-11 Illustratie van de resultaten van de data-analyse voor deceleratie van 20 naar 10 m/s voor anemometer 2 (run 1).

De responslengtes van de metingen voor deceleratie zijn gegeven in bijlage 4. In figuur 4-12, 4-13 en tabel 4-5 zijn de mediaan en de standaard deviatie van de responslengtes verkregen bij de verschillende snelheden gegeven. We zien dat bij de meeste metingen, net als bij acceleratie, de bepaalde responslengte tussen 3 en 3,4 m

ligt. De waarde die afwijkt, is de responslengte voor deceleratie van 15 naar 10 m/s. Beide anemometers geven in dat geval een veel lagere responslengte van 2,8 m voor de FIT methode en 2,5 m volgens ISO. Bij deze kleine snelheidsverandering bij grote snelheid, dus weinig verschil en met relatief weinig meetpunten, is het lastig een goede fit te krijgen. Dit uit zich in een hogere standaard deviatie. Hetzelfde is te zien bij deceleratie van 10 naar 5 m/s, maar daar is het effect op de response lengte veel kleiner. De responslengtes van beide anemometers tonen hetzelfde gedrag.



Figuur 4-12 De responslengtes bepaald door de FIT methode bij deceleratie van beide anemometers.



Figuur 4-13 De responslengtes bepaald door de ISO methode bij deceleratie van beide anemometers.

De resultaten verkregen bij verschillende snelheden tonen voor deceleratie bijna hetzelfde gedrag als voor acceleratie, namelijk dat de responslengte afneemt als de eindsnelheid toeneemt met gelijkblijvende snelheidsverandering (10→5, 15→10 en 15→5, 20→10) en dat de responslengte afneemt als de snelheidsverandering vermindert bij gelijke eindsnelheid (15→5, 10→5 en 20→10, 15→10). Merk op dat de lage responslengte voor 20→5 niet past in de afnemende responslengte voor 20→5, 15→5, 10→5. De afhankelijkheid van de responslengte van windsnelheid en –verandering is voor deceleratie iets groter dan voor acceleratie, maar ligt nog steeds binnen de onzekerheidsmarges van de metingen, uitgezonderd de responslengte verkregen bij 15→10, en in mindere mate 20→5.

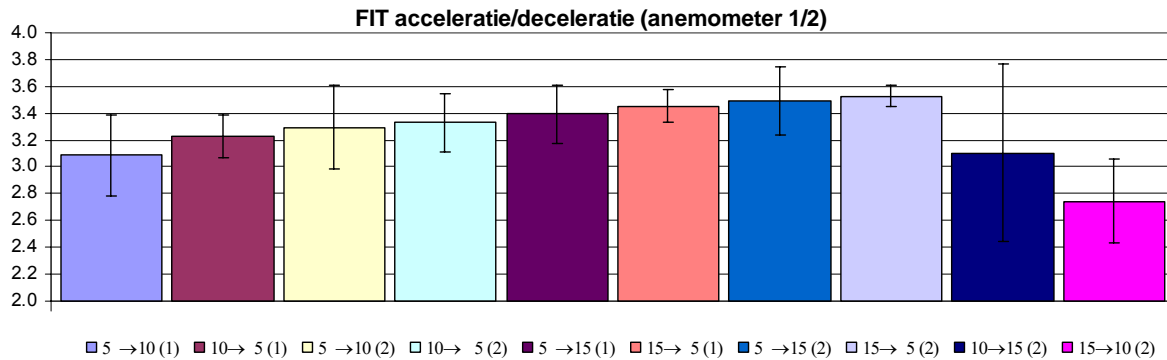
Tabel 4-5 Overzicht van alle bepaalde responslengtes voor deceleratie en de gemiddelde waarden.

	FIT 1			FIT 2			ISO 1			ISO 2		
	D	±	σ	D	±	σ	D	±	σ	D	±	σ
10→5	3.23	±	0.16	3.33	±	0.22	3.19	±	0.22	3.09	±	0.29
15→5	3.45	±	0.12	3.53	±	0.08	3.42	±	0.17	3.45	±	0.13
15→10*	2.77	±	0.17	2.74	±	0.31	2.40	±	0.25	2.56	±	0.38
20→5	3.01	±	0.12	3.04	±	0.12	3.12	±	0.13	3.06	±	0.10
20→10	3.33	±	0.16	3.39	±	0.19	3.24	±	0.20	3.25	±	0.14
Alle	3.16	±	0.27	3.21	±	0.31	3.07	±	0.39	3.08	±	0.33
Alle*	3.26	±	0.19	3.32	±	0.20	3.24	±	0.13	3.21	±	0.18

De gemiddelde responslengte van beide sensoren en methoden komen goed overeen. De gemiddelde responslengtes voor deceleratie voor alle snelheden en beide sensoren zijn  $3,18 \pm 0,28$  m voor FIT en  $3,08 \pm 0,34$  m voor ISO. Zonder de responslengte van 15 naar 10 m/s zijn de gemiddelde responslengtes voor deceleratie volgens FIT en ISO  $3,29 \pm 0,18$  en  $3,23 \pm 0,15$  m, respectievelijk.

#### 4.2.2.4 Vergelijking responslengtes acceleratie en deceleratie

De responslengtes van acceleratie en deceleratie zijn met elkaar vergeleken in figuur 4-14. De resultaten laten zien dat de responslengtes voor deceleratie iets groter zijn dan voor acceleratie, enkel de resultaten van anemometer 2 voor 10 naar 15m/s en vice versa komen hiermee niet overeen. De verwachting dat de responslengte voor deceleratie groter zou zijn dan voor acceleratie wordt dus bevestigd, maar het verschil is echter minimaal. De verschillen tussen deceleratie en acceleratie zijn echter klein en van dezelfde orde als de verschillen tussen de responslengtes van anemometer 1 en 2, waarbij die van anemometer 2 groter zijn dan die van sensor 1.



Figuur 4-14 De vergelijking van de responslengtes voor acceleratie en deceleratie voor anemometer 1 en 2 voor 3 overeenkomstige start- en eindsnelheden.

Tabel 4-6 Overzicht van gemiddelde responslengtes voor acceleratie en deceleratie.

	FIT 1			FIT 2			ISO 1			ISO 2		
	<i>D</i>	±	σ	<i>D</i>	±	σ	<i>D</i>	±	σ	<i>D</i>	±	σ
Alle	3.15	±	0.37	3.22	±	0.35	3.10	±	0.43	3.19	±	0.36
Alle*	3.30	±	0.16	3.35	±	0.22	3.28	±	0.22	3.33	±	0.24

De gemiddelde waarden van de responslengte verkregen met de FIT methode voor alle snelheden zijn voor acceleratie  $3,35 \pm 0,15$  m ( $3,19 \pm 0,41$  m inclusief de afwijkende responslengte van 13 naar 20 m/s) en voor deceleratie  $3,29 \pm 0,18$  m ( $3,18 \pm 0,28$  m inclusief de afwijkende responslengte van 15 naar 10 m/s). De gemiddelde responslengtes voor deceleratie zijn dus iets kleiner dan voor acceleratie (inclusief acceleratie vanuit stilstand). Aangezien de verschillen tussen acceleratie en deceleratie klein zijn kunnen we concluderen dat de responslengtes voor versnellen en vertragen gelijk zijn. Tabel 4-6 geeft de gemiddelde resultaten van de responslengte als er geen onderscheid gemaakt wordt tussen acceleratie en deceleratie, Anemometer 2 geeft een iets grotere responslengte dan anemometer 1, maar dit verschil ligt ruim binnen de onzekerheidsmarge. Anemometer 1 en 2 gecombineerd geeft een gemiddelde responslengte verkregen met de FIT methode van  $3,19 \pm 0,35$  m ( $3,33 \pm 0,16$  m indien de afwijkende responslengte van 13 naar 20 m/s en 15 naar 10 m/s niet worden meegenomen). Deze responslengte is iets groter dan de waarde van  $2,9 \pm 0,4$  m die eerder door het KNMI voor de oudere versie van de KNMI cup anemometer is bepaald, maar het verschil komt overeen binnen de onzekerheidsmarges.

## 5. Conclusies en aanbevelingen

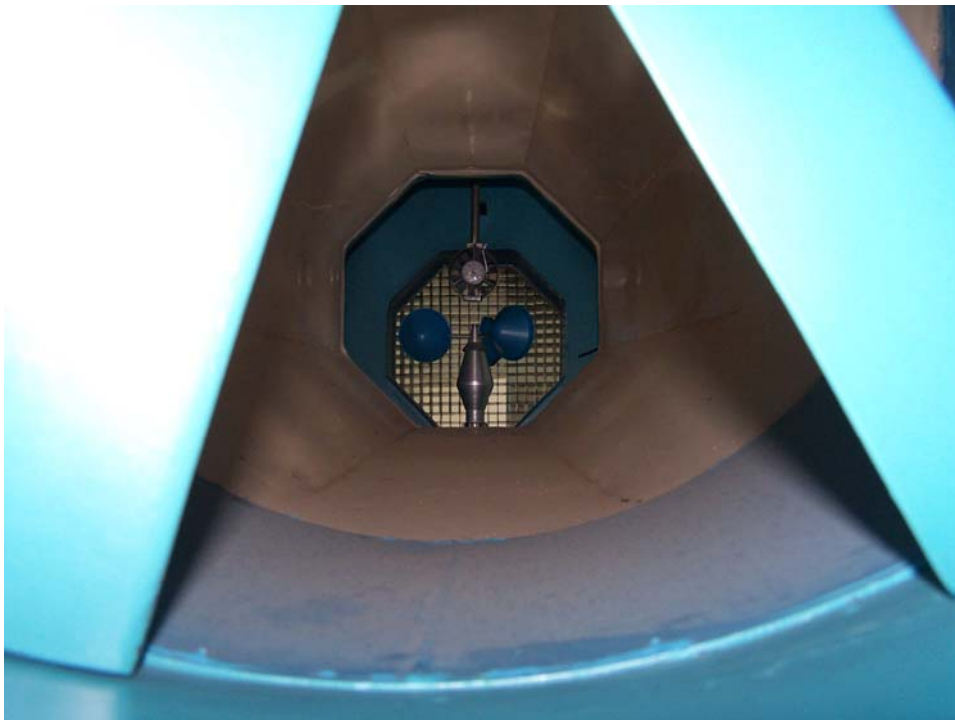
### 5.1 Conclusies

De aanloopsnelheid van de KNMI cup anemometer is bepaald op  $0,15 \pm 0,07$  m/s. Beide anemometers geven dezelfde waarde, maar sensor 1 toonde een grotere variatie tussen de individuele metingen.

De responslengte voor acceleratie en deceleratie zijn gelijk en is bepaald op  $3,2 \pm 0,4$  m ( $3,3 \pm 0,2$  m indien de afwijkende responslengte van 13 naar 20 m/s en 15 naar 10 m/s niet worden meegenomen). Deze responslengte is iets groter dan de eerder bepaalde waarde van  $2,9 \pm 0,4$  m, maar het verschil komt overeen binnen de onzekerheidsmarges.

De beste methode om de responslengte te bepalen is de FIT methode aangezien deze minder gevoelig is voor verstoringen door individuele meetpunten dan de ISO methode en het fitbereik indien noodzakelijk eenvoudig handmatig is aan te passen. De FIT methode geeft in het algemeen minder variatie in de resultaten dan de ISO methode, maar gemiddeld komen de resultaten van FIT en ISO goed met elkaar overeen.

### 5.2 Aanbevelingen



*Figuur 5-1 De KNMI cup anemometer in de KNMI wind tunnel. De grootte van de sensor in relatie tot de cross sectie van de windtunnel is duidelijk te zien.*

Wanneer men in de toekomst opnieuw de responslengte wil bepalen, zijn er een aantal zaken die de metingen kunnen verbeteren.

- De metingen moeten in een grotere windtunnel kunnen plaatsvinden. Hierdoor kan de 5% variatie in de snelheid van de windtunnel worden gereduceerd, het effect van turbulente storingen door de “blokkade” van de sensor op de windsnelheid worden beperkt alsmede het uitdempen van de verstoring bij de verandering worden verbeterd en kan er ook getest worden op hogere snelheden.
- Het systeem om de anemometer met een andere snelheid dan de windtunnelsnelheid te laten draaien moet worden verbeterd. Het gebruik van perslucht leidt tot een grote verstoring van het windveld in de tunnel en de geforceerde snelheid toont fluctuaties. Er valt hier te denken aan een elektromotor die m.b.v. een koppeling het cupstel van de anemometer aandrijft en losgekoppeld kan worden tijdens de metingen.

- Voor het meten van het signaal uit de anemometer moet gekeken worden naar een meetinstrument dat de periodetijd nauwkeuriger kan meten. Door gebruik te maken van een specifiek hardware ontwerp voor dit doel moet een tijdsresolutie van  $1 \mu\text{s}$  eenvoudig te realiseren zijn.
- De snelheid van de windtunnel moet worden meegenomen. Dit is de snelheid die de maat is voor de aanloopsnelheid van de cup anemometer en om de responslengte te bepalen uit de responstijd.
- De afhankelijkheid van de aanloopsnelheid van de cup anemometer van de beginstand van het cupstel t.o.v. de luchtstroom moet worden onderzocht.
- De analyse van de meetreeksen in Excel is arbeidsintensief en moet worden geautomatiseerd door specifieke software hiervoor te maken om eenvoudig meerdere meetseries te kunnen (re)processen.
- In dit onderzoek is gebruik gemaakt van 2 gereviseerde en geijkte anemometers. Het effect van vervuiling/veroudering door operationeel gebruik en het verlopen van de ijking op de responslengte moet worden onderzocht.

## 6. Literatuur

- Bijma, J.R.: DW0-SIAM WIND, versie 1.0, KNMI, INSA Documentnummer ID-30-051, De Bilt, 28 maart 2006.
- Busch, N.E., Kristensen, L.: Cup anemometer overspeeding, *J. Appl. Meteorology* Vol. 15, 1328-1332, 1976.
- Curvers, A., Schuurman, J.J.: Nauwkeurigheid van windmetingen en internationale intercalibratie van anemometers, ECN-RX-90-003, Petten, 5<sup>de</sup> Nationale Windenergie Conferentie, Lunteren 21-22 februari, 1990.
- Dahlberg, J.Å., Pedersen, T.F., Busche, P.: ACCUWIND – Methods for classification of cup anemometers, Risø report 1555 (EN), Roskilde, Denmark, 2006.
- Handboek Waarnemingen, Hoofdstuk 5 – Wind, KNMI, De Bilt, versie maart 2001.
- Hayashi, T.: Dynamic response of a cup anemometer, *J. Atmos. Oceanic Technology* Vol. 4, 281-287, 1987.
- ISO: Meteorology – Wind measurements – Part 1: Wind tunnel test methods for rotating anemometer performance, ISO/FDIS 17713-1, Final draft, 2007.
- Kristensen, L.: Cup anemometer behavior in turbulent environments, *J. Appl. Meteorology* Vol. 15, 5-17, 1998.
- MacCready, P.B.: Mean wind speed measurements in turbulence, *J. Appl. Meteorology* Vol. 5, 219-225, 1966.
- MacCready, P.B., Jex, H.R.: Response characteristics and meteorological utilization of propeller and vane wind sensors, *J. Appl. Meteorology* Vol. 3, 182-193, 1964.
- Monna, W.A.A.: Comparative investigation of dynamic properties of some propeller vanes, Wetenschappelijk Rapport WR 78-11, KNMI, De Bilt, 1978.
- Monna, W.A.A.: De KNMI-windtunnel, Technisch Rapport TR 32, KNMI, De Bilt, 1983.
- Monna, W.A.A., Driedonks, A.G.M.: Experimental data on the dynamic properties of several propeller vanes, *J. Appl. Meteorology* Vol. 18, 699-702, 1979.
- SWANET, Synoptisch Waarneemnet Nederland 2005, Intern Rapport IR 2005-02, KNMI, De Bilt, 2005.
- Painting, D.: Guidance on the establishment of algorithms for use in synoptic automatic weather stations – processing of surface wind data, Instruments and observing methods report no. 47, WMO/TD-No. 452, WMO, Genève, 1991.
- Sparks, W.R., Jones, D.W., Hatton, D.B.: Acceleration and deceleration of a cup anemometer in a wind tunnel and in natural turbulence, IOM report 74, TD 1028, WMO Technical Conference, Beijing, 23-27 October, 2000.
- Wieringa, J., Rijkoort, P.J.: Windklimaat van Nederland, KNMI, Staatsuitgeverij, Den Haag 1983.
- WMO: Guide to meteorological instruments and methods of observation, Sixth edition, WMO-No. 8, WMO, Genève, 1996.

## Symbolenlijst

$I$	= traagheidsmoment van de rotor ( $0,7 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2$ )
$M$	= moment op de rotor
$\rho$	= dichtheid van lucht
$R$	= afstand van centrum cup tot rotor as (0,1 m)
$A$	= oppervlakte van het cupvlak = ( $7,54 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ )
$U$	= windsnelheid
$\omega$	= hoeksnelheid van de rotor
$C_A$	= acceleratie coëfficiënt van cup anemometer
$C_A$	= deceleratie coëfficiënt van cup anemometer
$C_{DH}$	= weerstandcoëfficiënt van de holle zijde van de cup
$C_{DL}$	= weerstandcoëfficiënt van de bolle zijde van de cup
$A_0, A_1$	= constanten
$B_0, B_1, B_2$	= wrijvingsconstanten
$V_o$	= aanloopsnelheid van anemometer
$U_e$	= windsnelheid na stapverandering
$V_e$	= anemometer windsnelheid na stapverandering
$U_s$	= windsnelheid voor stapverandering
$V_s$	= anemometer windsnelheid voor stapverandering
$V_t = \lambda_0 R \omega$	= snelheid van anemometer op bepaalde tijd
$\tau$	= responstijd, tijd die nodig is om 63% van de eindsnelheid te bereiken
$\lambda_0 R$	= ijkfactor van anemometer (1,982 m)
$D = \tau U$	= responslengte, lengte van een horizontale kolom lucht die de anemometer moet passeren om 63% van de stapverandering te bereiken ( $2,9 \pm 0,4 \text{ m}$ )

Waardes voor enkele parameters van de KNMI cup anemometer zijn gegeven tussen haakjes volgens Monna en Driedonks (1979).

## Bijlagen

### Bijlage 1 Theorie

De bewegingsvergelijking van een cup anemometer wordt gegeven door (Hayashi, 1987):

$$I \frac{d\omega}{dt} = M .$$

(zie de symbolenlijst voor een uitleg van de parameters). De verandering in hoeksnelheid van de cup anemometer is evenredig het ondervonden koppel en omgekeerd evenredig met het traagheidsmoment. Dit laatste wordt bepaald door de massa/omvang van het van het roterende deel van de anemometer. Het koppel dat wordt uitgeoefend op een anemometer met 2 cups vertikaal op de windrichting wordt gegeven door (Dahlberg et al., 2006):

$$M = \frac{1}{2} \rho R A \left[ (U - R\omega)^2 C_{DH} - (U + R\omega)^2 C_{DL} \right] - (B_0 + B_1\omega + B_2\omega^2).$$

De eerste term binnen de vierkante haken geeft het koppel dat de holle kant van de cup ondervindt, de tweede term de bolle kant. Aangezien de weerstandcoëfficiënt van de holle zijde van de cup groter is dan die van de bolle zijde  $C_{DH} > C_{DL}$  zal de anemometer bij voldoende wind gaan draaien met een bepaalde hoeksnelheid  $\omega$ . De druk die door de wind wordt uitgeoefend op de bolle kant van de cup, moet worden afgetrokken van de druk die wordt uitgeoefend op de holle kant. Merk op dat hiervoor de relatieve snelheid van de wind t.o.v. de cups gebruikt wordt. De druk die overblijft wordt vermenigvuldigd met de luchtdichtheid en de oppervlakte van de cup en de afstand ervan tot de rotatie as. Alle weerstanden door wrijving van het lager en turbulentie worden hier nog van afgetrokken.

Doordat tijdens het draaien de bolle kant van de cups tegen de wind in beweegt, zal de snelheid waarmee de cups ronddraaien lager zijn dan de windsnelheid. Uit windtunnelproeven kan de verhouding tussen de werkelijke windsnelheid en cup anemometer snelheid bepaald worden. Hieruit wordt de ijkfactor  $\lambda_0 R$  verkregen die het verband tussen gemeten hoeksnelheid en werkelijke windsnelheid geeft. Bij het nieuwste type anemometers van het KNMI is deze ijkfactor 1,982 m.

$$U = \lambda_0 R \omega .$$

Deze lineaire relatie beschrijft het verband tussen windsnelheid en anemometer snelheid voldoende nauwkeurig (Kristensen, 1998), waarbij soms ook een kleine offset wordt gebruikt. Bij lage windsnelheden treden afwijkingen op door wrijving. De parameter die meestal gebruikt wordt om deze wrijving te karakteriseren is de zogenaamde aanloopsnelheid (WMO, 1996). De aanloopsnelheid  $V_0$  is de minimale windsnelheid die nodig is om de wrijving in het lager van de anemometer te overwinnen en deze te laten draaien. Bij hoge windsnelheden de cup anemometer de windsnelheid onderschatten ten gevolge van turbulentie.

Bovengenoemde bewegingsvergelijking moet worden opgelost voor een gemiddelde ondervonden koppel van een cup anemometer met 3 cups. Er zijn verschillende benaderingen in omloop voor bovengenoemde bewegingsvergelijking (Sparks et al, 2000). De meest gebruikelijke zijn (MacCready en Jex, 1964):

$$\frac{d\omega}{dt} = C_0 U^2 - C_1 \omega U$$

en (Hayashi, 1987)

$$\frac{dV}{dt} = C_A (U^2 - V^2)$$

waarin  $C_0$ ,  $C_1$  en  $C_A$  constanten zijn die louter door het instrument en de luchtdichtheid bepaald worden. Merk op dat Hayashi aparte constanten  $C_A$  en  $C_D$  hanteert voor acceleratie en deceleratie, terwijl Sparks et al (2000) verschillende vergelijkingen gebruiken voor acceleratie en deceleratie.

De oplossing van de voorgaande vergelijkingen voor een stapverandering van de windsnelheid is bij benadering van de vorm (Painting, 1991)

$$\omega \propto V = U_e + (U_s - U_e) \exp(-t / \tau)$$



waarbij  $U_s$  en  $U_e$  respectievelijk de windsnelheid voor en na de instantane verandering is en  $\tau$  is de responstijd die omgekeerd evenredig is met de constanten  $C_1$  en  $C_A$ . De responstijd is de tijdsduur die de anemometer nodig heeft om 63% ( $1-1/e$ ) van een stapverandering van de windsnelheid te bereiken. Bovenstaande vergelijking wordt door ISO (2007) gehanteerd voor zowel acceleratie als deceleratie, waarbij de responstijd verschilt.

De responstijd  $\tau$  is afhankelijk van de heersende windsnelheid. Bij een grote snelheid zal de cup anemometer zich sneller kunnen aanpassen aan de snelheidsverandering. Als  $U_s < U_e$  resulteert dit in een kleinere responstijd voor een sprong van  $U_s$  naar  $U_e$  dan vice versa. Fluctuaties in de windsnelheid zullen daarom leiden tot een overschatting van gemiddelde wind door de cup anemometer (MacCready, 1966). Naast horizontale, zullen ook de verticale snelheidsfluctuaties een bijdrage leveren aan deze overschatting van de gemiddelde wind door de cup anemometer (Busch en Kristensen, 1976). Deze overschatting wordt die in de literatuur aangeduid als “overspeeding.

De afhankelijkheid van de responstijd van de heersende windsnelheid wordt in eerste orde onderdrukt door niet de responstijd maar de responselengte

$$D = U_e \tau$$

te gebruiken (WMO, 1996) waarbij voor de snelheid de snelheid na de stapverandering wordt gebruikt. De responslengte is de lengte van de luchtkolom die de anemometer moet passeren om bij een plotselinge verandering van de windsnelheid 63% van het verschil te overbruggen.

## Bijlage 2 Data-analyse

De bepaling van de responslengte gebeurt in Excel volgens:

- Open een nieuwe meting en kopieer/plak de meetgegevens (PERIODE, TIJD en SNELHEID) in de spreadsheet voor data-analyse.
- Verwijder hierbij rijen met oude metingen die niet worden overschreven en zorg dat de kolommen met berekeningen over alle rijen worden uitgevoerd.
- Het aantal meetpunten wordt automatisch bepaald met  $NN=MATCH(9999, TIJD:TIJD,1)$ .
- Het startpunt NO van de metingen is default 1, maar indien gewenst kan de analyse later worden gestart indien aan het begin foutieve metingen aanwezig zijn.
- De frequentie  $FREQ(i)=1/PERIODE(i)$  wordt bepaald voor elk meetpunt  $i$  en de standaard deviatie van de frequentie van alle voorafgaande metingen  $FMINSTD(i)=STDEV(FREQ(1):FREQ(i))$ .
- Het gebied waar de verandering plaatsvindt wordt automatisch bepaald. Hiervoor wordt voor elke meting getest volgens  $T0(i)=IF(AND(FMINSTD(i+9)-FMINSTD(i-1)>1, FMINSTD(i+4)-FMINSTD(i-1)>0.5, FMINSTD(i)>FMINSTD(i-1)+0.1),T0(i-1)+1,FALSE)$ . Default is T0 FALSE maar in het gebied van de verandering zal deze een oplopende teller zijn.
- De verandering start bij de laatste meting waarbij aan bovenstaand criterium niet is voldaan  $NS=MATCH(1,T0(NC):T0(9999),0)+NC-1$  en eindigt een meting boven het grootste getal  $NE=MATCH(9999,T0(NC):T0(9999),1)+NC+1$ . Indien gewenst kan ook een ondergrens NC aan de verandering worden gezet om verstoringen bij aanvang van de test te voorkomen.
- De gemiddelde frequentie en de bijbehorende standaard deviatie voor en na de verandering worden bepaald door  $FS=AVERAGE(FREQ(NO):FREQ(NS))$ ,  $FSSTDEV=STDEV(FREQ(NO):FREQ(NS))$ ,  $FE=AVERAGE(FREQ(NE):FREQ(NN))$ ,  $FESTDEV=STDEV(FREQ(NE):FREQ(NN))$ .
- Vervolgens kan de meting worden bepaald waarop 30 en 74% van de verandering wordt bereikt uit  $NI=MATCH(FS+0.3*(FE-FS),FREQ(1):FREQ(NN),1)$  en  $NF=MATCH(FS+0.74*(FE-FS),FREQ(1):FREQ(NN),1)$ , waarbij met match type 1 gezocht wordt naar de grootste waarde kleiner of gelijk aan de 30 of 74% waarde. Merk op bij deceleratie gezocht wordt met match type -1 omdat dan de kleinste waarde groter of gelijk aan de 30 of 74% grens wordt gezocht.
- Deze indices kunnen vervolgens worden gebruikt om het tijdstip TI en TF te bepalen waarop 30% en 74% van de verandering worden bereikt. Hiervoor wordt met CONCATENATE de referentie naar het veld met de tijd voor de index weggeschreven en met INDIRECT wordt de waarde uitgelezen  $TI=TIJD(NI)$  en  $TF=TIJD(NF)$ .
- De responsetijd volgens de ISO methode volgt uit  $TISO=(TF-TI)/(LN(0.7)-LN(0.26))$ .
- De relatieve onzekerheid in TISO wordt bepaald door de verschillen verkregen als de 2 omliggende tijdstippen voor TI en TF in de berekening worden gebruikt. De relatieve fout in de begin- en eindsnelheid is hierbij opgeteld omdat deze direct de tijdstippen TI en TF beïnvloeden. De onzekerheid wordt dus gegeven door  $SQRT(POWER(TIJD(NI+1)-TIJD(NI-1))/2/TISO,2)+POWER((TIJD(NF+1)-TIJD(NF-1))/2/TISO,2))+SQRT(POWER(FSSTDEV/FS,2)+POWER(FESTDEV/FE,2))$
- Het verwachte exponentiele verloop wordt gegeven door  $LNISO(i)=LN(FE-FI)+(TIJD(i)-TI)/(-TISO)$  en  $ISO(i)=FI-(FI-FF)/(1-EXP((TF-TI)/(-TISO)))*(1-EXP((TIJD(i)-TI)/(-TISO)))$ , waarbij beide curves bij TI en TS door, respectievelijk, FI en FS gaan. Merk tevens op dat de curves niet geldig zijn voor tijdstippen voor de verandering. Bij deceleratie wordt (FI-FE) gebruikt in plaats van (FE-FI) in het verloop van LNISO.
- Het frequentiebereik van de fit ligt tussen  $FS+3*FSSTDEV$  en  $FE-3*FESTDEV$  waarbij de corresponderende meetpunten range bepaald wordt door  $MATCH(FS+3*FSSTDEV, FREQ(1):FREQ(NS),1)+1$  en  $MATCH(FE-3*FESTDEV, FREQ(1):FREQ(NS),1)-1$ . In de uiteindelijke analyse is het fit bereik gelijk gesteld aan de 30 en 74% grenzen van ISO.
- De responsetijd volgens de FIT methode wordt bepaald door een lineaire fit met de functie LINEST aan TIJD en  $LN(FREQ(i))=LN(FE-FREQ(i))$  over het fitbereik. De LINEST functie berekent met de methode van de kleinste kwadraten de rechte lijn die het beste past bij alle meetgegevens in het fitbereik. Merk op dat bij deceleratie  $LN(FREQ(i)-FE)$  wordt gebruikt.
- De responsetijd wordt gegeven door  $TFIT=-1/SLOPE$  waarbij SLOPE de richtingscoëfficiënt van de lineaire fit is. De fit geeft tevens de offset van de fit, de standaard fout van SLOPE en van de fit, de correlatie coëfficiënt en het residu van de fit.
- Het verwachte exponentiele verloop wordt gegeven door  $LN(FIT(i))=SLOPE*TIJD(i)+OFFSET$  en  $FIT(i)=FE-EXP(LN(FIT(i)))$ . Merk op dat ook hier bij deceleratie  $FIT(i)=EXP(LN(FIT(i)))-FE$  en dat de curves niet geldig zijn voor tijdstippen voor de verandering.

- Voor beide bepalingen zijn tot slot de correlatie coëfficiënt, standaard fout, en het residu tussen LNxxx(i) en LNFREQ(i) over bovengenoemde fit bereik middels de functies RSQ(),SQRT(SUMXMY2(---)/NMIN1) en SUMXMY2(---), respectievelijk, met NMIN1 het aantal vrijheidsgraden (=aantal meetpunten in de fit - 1=NF-NI+1).
- De standaard fout van de SLOPE van de fit wordt gebruikt voor de onzekerheid in de responsetijd. De relatieve fout in de eindsnelheid is hierbij opgeteld omdat deze als constante in de fit wordt meegenomen. . De onzekerheid wordt dus gegeven door STDERR/SLOPE+FESTDEV/FE.
- De responselengte wordt bepaald uit DISO=TISO\*FE/32\*1,916 en analoog voor FIT. Hierbij is 32 het aantal pulsen per omwenteling en 1,961 de ijkfactor inclusief een correctiefactor voor de verstoring van anemometer in de KNMI wind tunnel.
- De onzekerheid in de responslengte wordt bepaald voor ISO en FIT uit de onzekerheden van de responsetijd en de eindsnelheid, die hier onafhankelijk worden verondersteld, met de wortel van de som van de kwadraten.
- Er is gebruik gemaakt van dynamische referenties. Deze zijn geconstrueerd met CONTATENATE en met INDIRECT gebruikt in formules zodat start waarden en bereik eenvoudig handmatig aan te passen zijn en worden gebruikt in de verdere bewerkingen.

### ***Bijlage 3 Meetcondities***

In onderstaande tabel zijn temperatuur, relatieve luchtvochtigheid en luchtdruk weergegeven voor alle meetseries.

Datum	Meting	Temperatuur [°C]	Relatieve luchtvochtigheid [%]	Luchtdruk [hPa]
22-05-07	Acceleratie 0-5 m/s anemometer 1	22,7	52	1020
24-05-07	Alle andere metingen voor anemometer 1	23,6	45	1015
04-06-07	Alle metingen voor anemometer 2	24,1	46	1022

## Bijlage 4 Meetresultaten

### Aanloopsnelheid

Cup anemometer 1				Cup anemometer 2			
Run	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>1</sub> -V <sub>10</sub>	Run	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>1</sub> -V <sub>10</sub>
1	0.03	0.03	0.04	1	0.02	0.04	0.03
2	0.26	0.26	0.24	2	0.07	0.14	0.13
3	0.02	0.02	0.03	3	0.21	0.20	0.17
4	0.01	0.08	0.10	4	0.04	0.05	0.04
5	0.61	0.58	0.45	5	0.11	0.12	0.11
6	0.02	0.02	0.03	6	0.07	0.07	0.11
7	0.15	0.16	0.17	7	0.05	0.05	0.08
8	0.18	0.19	0.15	8	0.18	0.18	0.22
9	-	-	-	9	0.20	0.41	0.24
<>	0.16	0.17	0.15	<>	0.12	0.15	0.14
σ	0.20	0.19	0.14	σ	0.07	0.12	0.07

### Responselengte voor acceleratie

0 → 5	Anemometer 1	Anemometer 2	Anemometer 1	Anemometer 2
Run	D <sub>FIT</sub> ± σ <sub>D</sub>	D <sub>FIT</sub> ± σ <sub>D</sub>	D <sub>ISO</sub> ± σ <sub>D</sub>	D <sub>ISO</sub> ± σ <sub>D</sub>
1	3.16 ± 0.24	3.32 ± 0.30	3.28 ± 0.43	3.69 ± 0.50
2	3.21 ± 0.23	3.20 ± 0.27	3.27 ± 0.42	3.59 ± 0.47
3	3.26 ± 0.27	3.36 ± 0.28	3.45 ± 0.44	3.45 ± 0.44
4	3.69 ± 0.35	3.41 ± 0.31	3.86 ± 0.53	3.51 ± 0.47
5	3.40 ± 0.29	3.56 ± 0.35	3.41 ± 0.45	3.73 ± 0.52
6	3.22 ± 0.29	3.43 ± 0.30	3.36 ± 0.46	3.75 ± 0.48
7	3.40 ± 0.31	3.40 ± 0.30	3.45 ± 0.46	3.68 ± 0.48
8	3.26 ± 0.26	3.31 ± 0.30	3.55 ± 0.44	3.57 ± 0.47
9	3.13 ± 0.20	3.24 ± 0.30	3.30 ± 0.40	3.41 ± 0.47
10	3.30 ± 0.24	3.46 ± 0.31	3.52 ± 0.41	3.57 ± 0.47
11	3.35 ± 0.29	3.57 ± 0.34	3.61 ± 0.46	3.55 ± 0.49
12	3.26 ± 0.29	3.29 ± 0.26	3.27 ± 0.46	3.41 ± 0.42
All	3.26 ± 0.15	3.38 ± 0.12	3.43 ± 0.18	3.57 ± 0.12

0 → 10	Anemometer 1	Anemometer 2	Anemometer 1	Anemometer 2
Run	D <sub>FIT</sub> ± σ <sub>D</sub>	D <sub>FIT</sub> ± σ <sub>D</sub>	D <sub>ISO</sub> ± σ <sub>D</sub>	D <sub>ISO</sub> ± σ <sub>D</sub>
1	3.51 ± 0.20	3.59 ± 0.21	3.76 ± 0.39	3.58 ± 0.40
2	3.68 ± 0.21	3.64 ± 0.19	3.79 ± 0.39	3.54 ± 0.36
3	3.63 ± 0.21	3.62 ± 0.22	3.62 ± 0.37	3.40 ± 0.36
4	3.40 ± 0.20	3.47 ± 0.19	3.70 ± 0.40	3.39 ± 0.35
5	3.52 ± 0.18	3.49 ± 0.22	3.48 ± 0.35	3.48 ± 0.37
6	3.47 ± 0.19	3.48 ± 0.22	3.26 ± 0.34	3.33 ± 0.37
7	3.75 ± 0.22	3.54 ± 0.19	3.92 ± 0.39	3.70 ± 0.37
8	3.41 ± 0.21	3.43 ± 0.19	3.38 ± 0.37	3.57 ± 0.37
9	3.55 ± 0.25	3.19 ± 0.21	3.50 ± 0.40	3.36 ± 0.38
10	3.50 ± 0.21	3.38 ± 0.23	3.47 ± 0.40	3.40 ± 0.39
11	3.48 ± 0.17	3.31 ± 0.21	3.31 ± 0.34	3.45 ± 0.39
12	3.49 ± 0.19	3.66 ± 0.23	3.30 ± 0.37	3.55 ± 0.37
All	3.50 ± 0.10	3.48 ± 0.14	3.49 ± 0.22	3.46 ± 0.11

0 → 15	Anemometer 1	Anemometer 2	Anemometer 1	Anemometer 2
Run	$D_{FIT} \pm \sigma_D$	$D_{FIT} \pm \sigma_D$	$D_{ISO} \pm \sigma_D$	$D_{ISO} \pm \sigma_D$
1	3.31 ± 0.19	3.56 ± 0.22	3.17 ± 0.37	3.55 ± 0.39
2	3.39 ± 0.19	3.43 ± 0.19	3.57 ± 0.38	3.34 ± 0.36
3	3.38 ± 0.19	3.31 ± 0.19	3.21 ± 0.34	3.41 ± 0.37
4	3.40 ± 0.19	3.46 ± 0.17	3.36 ± 0.36	3.35 ± 0.33
5	3.36 ± 0.18	3.29 ± 0.18	3.88 ± 0.40	3.40 ± 0.37
6	3.43 ± 0.19	3.53 ± 0.19	3.45 ± 0.37	3.54 ± 0.38
7	3.56 ± 0.21	3.72 ± 0.19	3.34 ± 0.37	4.01 ± 0.37
8	3.46 ± 0.21	3.39 ± 0.20	3.48 ± 0.37	3.49 ± 0.38
9	3.61 ± 0.21	3.72 ± 0.21	3.58 ± 0.37	3.48 ± 0.38
10	3.60 ± 0.21	3.47 ± 0.19	3.77 ± 0.41	3.37 ± 0.36
All	3.42 ± 0.10	3.47 ± 0.15	3.47 ± 0.23	3.45 ± 0.20

5 → 10	Anemometer 1	Anemometer 2	Anemometer 1	Anemometer 2
Run	$D_{FIT} \pm \sigma_D$	$D_{FIT} \pm \sigma_D$	$D_{ISO} \pm \sigma_D$	$D_{ISO} \pm \sigma_D$
1	3.29 ± 0.17	3.38 ± 0.17	2.79 ± 0.25	3.41 ± 0.29
2	3.41 ± 0.16	3.59 ± 0.18	3.81 ± 0.42	3.52 ± 0.32
3	3.38 ± 0.16	2.98 ± 0.15	3.64 ± 0.62	3.03 ± 0.27
4	2.70 ± 0.14	3.90 ± 0.21	2.91 ± 0.31	3.65 ± 0.32
5	2.90 ± 0.17	3.30 ± 0.18	2.87 ± 0.25	3.32 ± 0.27
6	3.07 ± 0.17	3.22 ± 0.16	2.91 ± 0.36	3.37 ± 0.27
7	2.69 ± 0.15	2.81 ± 0.17	2.61 ± 0.30	2.53 ± 0.24
8	3.05 ± 0.16	3.55 ± 0.19	2.61 ± 0.23	3.46 ± 0.30
9	2.98 ± 0.14	3.47 ± 0.19	3.28 ± 0.28	3.21 ± 0.30
10	3.77 ± 0.20	3.39 ± 0.17	3.58 ± 0.27	3.28 ± 0.32
11	3.14 ± 0.16	3.14 ± 0.20	3.59 ± 0.28	3.00 ± 0.27
12	3.10 ± 0.18	3.18 ± 0.17	2.96 ± 0.32	3.18 ± 0.35
13	- ± -	2.83 ± 0.15	- ± -	2.66 ± 0.25
All	3.09 ± 0.31	3.30 ± 0.31	2.94 ± 0.43	3.28 ± 0.33

5 → 15	Anemometer 1	Anemometer 2	Anemometer 1	Anemometer 2
Run	$D_{FIT} \pm \sigma_D$	$D_{FIT} \pm \sigma_D$	$D_{ISO} \pm \sigma_D$	$D_{ISO} \pm \sigma_D$
1	3.50 ± 0.21	3.51 ± 0.18	3.19 ± 0.36	3.74 ± 0.47
2	3.43 ± 0.21	2.87 ± 0.17	3.55 ± 0.31	2.92 ± 0.33
3	3.19 ± 0.17	3.32 ± 0.19	3.39 ± 0.46	3.77 ± 0.39
4	3.50 ± 0.22	3.53 ± 0.21	3.13 ± 0.43	3.41 ± 0.40
5	3.17 ± 0.18	3.89 ± 0.19	2.99 ± 0.38	3.85 ± 0.46
6	3.28 ± 0.19	3.72 ± 0.20	3.03 ± 0.40	3.79 ± 0.47
7	3.35 ± 0.20	3.48 ± 0.19	2.98 ± 0.40	3.34 ± 0.36
8	3.00 ± 0.17	3.44 ± 0.18	3.06 ± 0.36	3.68 ± 0.43
9	3.61 ± 0.20	3.58 ± 0.19	3.21 ± 0.46	3.31 ± 0.37
10	3.35 ± 0.18	3.21 ± 0.17	3.43 ± 0.45	3.30 ± 0.37
11	3.75 ± 0.23	3.47 ± 0.18	3.23 ± 0.40	3.60 ± 0.47
12	3.00 ± 0.16	3.31 ± 0.19	2.86 ± 0.31	3.43 ± 0.38
13	3.49 ± 0.21	3.59 ± 0.19	3.29 ± 0.31	3.57 ± 0.33
14	3.45 ± 0.18	3.76 ± 0.20	3.73 ± 0.38	3.53 ± 0.33
All	3.39 ± 0.22	3.49 ± 0.25	3.20 ± 0.24	3.55 ± 0.25

10 → 15	Anemometer 1	Anemometer 2	Anemometer 1	Anemometer 2
Run	$D_{FIT} \pm \sigma_D$	$D_{FIT} \pm \sigma_D$	$D_{ISO} \pm \sigma_D$	$D_{ISO} \pm \sigma_D$
1	- ± -	1.50 ± 0.23	- ± -	1.70 ± 0.16
2	- ± -	2.34 ± 0.25	- ± -	2.03 ± 0.19
3	- ± -	3.21 ± 0.27	- ± -	2.80 ± 0.20
4	- ± -	2.00 ± 0.18	- ± -	2.82 ± 0.21
5	- ± -	2.43 ± 0.24	- ± -	2.24 ± 0.18
6	- ± -	3.10 ± 0.24	- ± -	3.22 ± 0.23
7	- ± -	4.03 ± 0.44	- ± -	3.12 ± 0.22
8	- ± -	2.79 ± 0.20	- ± -	3.19 ± 0.23
9	- ± -	2.65 ± 0.26	- ± -	2.90 ± 0.21
10	- ± -	3.33 ± 0.26	- ± -	3.93 ± 0.27
11	- ± -	3.11 ± 0.26	- ± -	3.55 ± 0.25
12	- ± -	3.24 ± 0.27	- ± -	3.16 ± 0.23
13	- ± -	3.32 ± 0.25	- ± -	4.12 ± 0.26
All	- ± -	3.10 ± 0.66	- ± -	3.12 ± 0.70

13 → 20	Anemometer 1	Anemometer 2	Anemometer 1	Anemometer 2
Run	$D_{FIT} \pm \sigma_D$	$D_{FIT} \pm \sigma_D$	$D_{ISO} \pm \sigma_D$	$D_{ISO} \pm \sigma_D$
1	2.24 ± 0.27	2.12 ± 0.23	3.07 ± 0.24	2.22 ± 0.21
2	2.55 ± 0.31	3.87 ± 0.42	2.20 ± 0.20	3.73 ± 0.29
3	1.89 ± 0.24	2.63 ± 0.28	1.75 ± 0.16	3.11 ± 0.25
4	2.10 ± 0.29	2.88 ± 0.35	2.66 ± 0.21	2.45 ± 0.22
5	1.98 ± 0.22	2.31 ± 0.25	2.84 ± 0.23	2.49 ± 0.21
6	2.28 ± 0.25	2.49 ± 0.33	2.09 ± 0.21	4.04 ± 0.30
7	2.26 ± 0.23	1.72 ± 0.26	2.49 ± 0.22	3.97 ± 0.28
8	2.83 ± 0.30	2.15 ± 0.28	4.67 ± 0.28	1.84 ± 0.18
9	2.25 ± 0.21	2.24 ± 0.23	2.15 ± 0.20	2.34 ± 0.21
10	2.82 ± 0.49	2.48 ± 0.32	1.87 ± 0.19	2.37 ± 0.21
11	2.04 ± 0.29	- ± -	1.88 ± 0.17	- ± -
All	2.25 ± 0.32	2.39 ± 0.58	2.20 ± 0.83	2.47 ± 0.80

### *Responslengte voor deceleratie*

10 → 5	Anemometer 1	Anemometer 2	Anemometer 1	Anemometer 2
Run	$D_{FIT} \pm \sigma_D$	$D_{FIT} \pm \sigma_D$	$D_{ISO} \pm \sigma_D$	$D_{ISO} \pm \sigma_D$
1	3.53 ± 0.12	3.40 ± 0.12	3.46 ± 0.18	3.17 ± 0.15
2	3.31 ± 0.11	3.35 ± 0.12	3.36 ± 0.18	3.29 ± 0.17
3	3.17 ± 0.11	3.36 ± 0.13	3.01 ± 0.19	3.10 ± 0.15
4	3.43 ± 0.12	3.77 ± 0.12	3.16 ± 0.18	3.83 ± 0.17
5	3.42 ± 0.12	3.06 ± 0.12	3.34 ± 0.18	2.84 ± 0.14
6	3.15 ± 0.13	3.29 ± 0.11	3.07 ± 0.25	3.27 ± 0.15
7	3.25 ± 0.12	3.45 ± 0.13	3.30 ± 0.20	3.07 ± 0.15
8	3.20 ± 0.10	2.98 ± 0.10	2.94 ± 0.16	2.92 ± 0.15
9	3.06 ± 0.12	3.32 ± 0.12	2.79 ± 0.16	2.98 ± 0.15
10	3.07 ± 0.10	3.16 ± 0.11	2.83 ± 0.17	2.96 ± 0.15
11	3.02 ± 0.11	3.44 ± 0.11	3.34 ± 0.22	3.45 ± 0.16
12	3.30 ± 0.12	3.07 ± 0.13	3.22 ± 0.17	2.79 ± 0.16
All	3.23 ± 0.16	3.33 ± 0.22	3.19 ± 0.22	3.09 ± 0.29

15 → 5	Anemometer 1	Anemometer 2	Anemometer 1	Anemometer 2
Run	$D_{FIT} \pm \sigma_D$	$D_{FIT} \pm \sigma_D$	$D_{ISO} \pm \sigma_D$	$D_{ISO} \pm \sigma_D$
1	3.51 ± 0.11	3.58 ± 0.11	3.51 ± 0.17	3.45 ± 0.14
2	3.63 ± 0.11	3.47 ± 0.11	3.44 ± 0.16	3.32 ± 0.15
3	3.42 ± 0.10	3.52 ± 0.10	3.32 ± 0.16	3.53 ± 0.15
4	3.46 ± 0.12	3.44 ± 0.10	3.15 ± 0.14	3.39 ± 0.16
5	3.67 ± 0.12	3.56 ± 0.12	3.54 ± 0.18	3.48 ± 0.16
6	3.63 ± 0.11	3.58 ± 0.11	3.50 ± 0.16	3.35 ± 0.15
7	3.28 ± 0.10	3.55 ± 0.10	3.07 ± 0.13	3.57 ± 0.15
8	3.24 ± 0.10	3.63 ± 0.11	3.18 ± 0.15	3.58 ± 0.16
9	3.35 ± 0.11	3.47 ± 0.10	3.35 ± 0.16	3.49 ± 0.16
10	3.56 ± 0.10	3.40 ± 0.11	3.55 ± 0.14	3.26 ± 0.15
11	3.44 ± 0.11	3.39 ± 0.11	3.16 ± 0.14	3.26 ± 0.15
12	3.42 ± 0.10	3.62 ± 0.11	3.32 ± 0.15	3.75 ± 0.17
13	3.58 ± 0.10	3.48 ± 0.11	3.58 ± 0.16	3.44 ± 0.15
14	3.51 ± 0.12	3.54 ± 0.11	3.60 ± 0.18	3.46 ± 0.16
15	3.34 ± 0.10	- ± -	3.30 ± 0.16	- ± -
16	3.55 ± 0.11	- ± -	3.39 ± 0.16	- ± -
17	3.42 ± 0.11	- ± -	3.52 ± 0.17	- ± -
18	3.42 ± 0.11	- ± -	3.54 ± 0.17	- ± -
All	3.45 ± 0.12	3.53 ± 0.08	3.42 ± 0.17	3.45 ± 0.13

15 → 10	Anemometer 1	Anemometer 2	Anemometer 1	Anemometer 2
Run	$D_{FIT} \pm \sigma_D$	$D_{FIT} \pm \sigma_D$	$D_{ISO} \pm \sigma_D$	$D_{ISO} \pm \sigma_D$
1	2.48 ± 0.16	3.24 ± 0.18	2.47 ± 0.18	3.25 ± 0.19
2	2.77 ± 0.23	3.46 ± 0.21	2.08 ± 0.16	3.36 ± 0.19
3	2.85 ± 0.20	2.61 ± 0.16	2.53 ± 0.21	2.58 ± 0.16
4	2.56 ± 0.18	2.73 ± 0.19	2.31 ± 0.17	2.39 ± 0.15
5	2.77 ± 0.20	2.64 ± 0.17	2.24 ± 0.15	2.55 ± 0.16
6	2.80 ± 0.22	3.06 ± 0.23	2.37 ± 0.16	2.31 ± 0.15
7	2.65 ± 0.16	2.76 ± 0.16	2.51 ± 0.18	2.86 ± 0.18
8	2.53 ± 0.21	2.54 ± 0.15	2.32 ± 0.15	2.46 ± 0.16
9	2.54 ± 0.17	2.89 ± 0.16	2.34 ± 0.18	3.14 ± 0.19
10	3.09 ± 0.18	2.53 ± 0.15	3.05 ± 0.20	2.54 ± 0.17
11	2.80 ± 0.18	- ± -	2.70 ± 0.18	- ± -
12	2.79 ± 0.22	- ± -	2.09 ± 0.16	- ± -
13	2.58 ± 0.20	- ± -	2.43 ± 0.17	- ± -
14	2.84 ± 0.22	- ± -	2.57 ± 0.17	- ± -
All	2.77 ± 0.17	2.74 ± 0.31	2.40 ± 0.25	2.56 ± 0.38



20 → 5	Anemometer 1	Anemometer 2	Anemometer 1	Anemometer 2
Run	$D_{FIT} \pm \sigma_D$	$D_{FIT} \pm \sigma_D$	$D_{ISO} \pm \sigma_D$	$D_{ISO} \pm \sigma_D$
1	3.27 ± 0.09	2.92 ± 0.10	3.27 ± 0.16	3.01 ± 0.15
2	2.88 ± 0.11	3.07 ± 0.09	2.89 ± 0.26	3.09 ± 0.14
3	2.85 ± 0.08	2.93 ± 0.08	2.92 ± 0.15	2.90 ± 0.13
4	3.05 ± 0.10	3.03 ± 0.09	3.13 ± 0.17	3.00 ± 0.14
5	3.00 ± 0.08	3.00 ± 0.09	3.01 ± 0.16	3.07 ± 0.16
6	3.01 ± 0.08	3.22 ± 0.10	3.13 ± 0.15	3.10 ± 0.15
7	3.05 ± 0.10	3.08 ± 0.10	3.12 ± 0.17	3.11 ± 0.14
8	2.93 ± 0.09	3.23 ± 0.10	3.03 ± 0.17	3.26 ± 0.15
9	3.08 ± 0.08	2.98 ± 0.10	3.22 ± 0.16	2.97 ± 0.15
10	2.94 ± 0.09	3.05 ± 0.10	2.87 ± 0.16	2.96 ± 0.23
11	3.13 ± 0.10	2.93 ± 0.08	3.15 ± 0.16	3.04 ± 0.15
12	- ± -	3.23 ± 0.10	- ± -	3.22 ± 0.15
All	3.01 ± 0.12	3.04 ± 0.12	3.12 ± 0.13	3.06 ± 0.10

20 → 10	Anemometer 1	Anemometer 2	Anemometer 1	Anemometer 2
Run	$D_{FIT} \pm \sigma_D$	$D_{FIT} \pm \sigma_D$	$D_{ISO} \pm \sigma_D$	$D_{ISO} \pm \sigma_D$
1	3.46 ± 0.15	3.57 ± 0.17	3.62 ± 0.18	3.22 ± 0.29
2	3.32 ± 0.17	3.53 ± 0.17	3.10 ± 0.19	3.45 ± 0.19
3	3.27 ± 0.15	3.27 ± 0.13	3.34 ± 0.18	3.25 ± 0.17
4	3.36 ± 0.17	3.32 ± 0.16	3.18 ± 0.18	3.07 ± 0.18
5	3.48 ± 0.17	3.39 ± 0.16	3.11 ± 0.18	3.07 ± 0.18
6	3.33 ± 0.15	3.21 ± 0.15	3.24 ± 0.18	3.12 ± 0.18
7	3.18 ± 0.15	3.68 ± 0.17	3.12 ± 0.19	3.30 ± 0.18
8	3.38 ± 0.15	3.55 ± 0.18	3.54 ± 0.20	3.39 ± 0.19
9	3.37 ± 0.16	3.15 ± 0.14	3.19 ± 0.20	3.29 ± 0.19
10	3.61 ± 0.17	3.71 ± 0.17	3.38 ± 0.20	3.45 ± 0.19
11	3.59 ± 0.17	3.37 ± 0.15	3.66 ± 0.20	3.11 ± 0.17
12	3.12 ± 0.14	- ± -	3.31 ± 0.22	- ± -
13	3.19 ± 0.15	- ± -	3.13 ± 0.18	- ± -
14	3.30 ± 0.17	- ± -	3.26 ± 0.22	- ± -
15	3.07 ± 0.14	- ± -	3.02 ± 0.21	- ± -
16	3.30 ± 0.15	- ± -	3.26 ± 0.19	- ± -
17	3.53 ± 0.15	- ± -	3.52 ± 0.23	- ± -
18	3.13 ± 0.16	- ± -	2.96 ± 0.18	- ± -
19	3.35 ± 0.14	- ± -	3.24 ± 0.19	- ± -
All	3.33 ± 0.16	3.39 ± 0.19	3.24 ± 0.20	3.25 ± 0.14

**Responstijd acceleratie vanaf en deceleratie naar stilstand**

5 → 0	Anemometer 1	Anemometer 2	Anemometer 1	Anemometer 2
Run	$\tau_{FIT} \pm \sigma_{\tau}$	$\tau_{FIT} \pm \sigma_{\tau}$	$\tau_{ISO} \pm \sigma_{\tau}$	$\tau_{ISO} \pm \sigma_{\tau}$
1	4.23 ± 0.05	4.11 ± 0.04	4.28 ± 0.12	4.10 ± 0.10
2	3.74 ± 0.03	4.26 ± 0.04	3.76 ± 0.12	4.23 ± 0.09
3	4.00 ± 0.04	4.27 ± 0.05	3.94 ± 0.11	4.26 ± 0.12
4	4.02 ± 0.04	4.69 ± 0.05	4.05 ± 0.12	4.75 ± 0.11
5	4.16 ± 0.04	6.10 ± 0.06	4.15 ± 0.11	6.17 ± 0.17
6	4.26 ± 0.04	4.65 ± 0.04	4.24 ± 0.12	4.68 ± 0.05
7	4.06 ± 0.04	- ± -	4.06 ± 0.12	- ± -
8	4.04 ± 0.04	- ± -	4.06 ± 0.13	- ± -
9	4.65 ± 0.05	- ± -	4.59 ± 0.12	- ± -
10	3.88 ± 0.04	- ± -	3.87 ± 0.12	- ± -
All	4.05 ± 0.25	4.46 ± 0.73	4.06 ± 0.23	4.47 ± 0.76

10 → 0	Anemometer 1	Anemometer 2	Anemometer 1	Anemometer 2
Run	$\tau_{FIT} \pm \sigma_{\tau}$	$\tau_{FIT} \pm \sigma_{\tau}$	$\tau_{ISO} \pm \sigma_{\tau}$	$\tau_{ISO} \pm \sigma_{\tau}$
1	2.17 ± 0.02	2.23 ± 0.02	2.19 ± 0.07	2.29 ± 0.06
2	2.24 ± 0.02	2.50 ± 0.03	2.24 ± 0.08	2.46 ± 0.07
3	2.33 ± 0.02	2.36 ± 0.03	2.37 ± 0.07	2.37 ± 0.07
4	2.22 ± 0.02	2.32 ± 0.03	2.24 ± 0.07	2.34 ± 0.06
5	2.40 ± 0.02	2.24 ± 0.02	2.39 ± 0.07	2.26 ± 0.06
6	2.51 ± 0.03	- ± -	2.55 ± 0.08	- ± -
7	2.32 ± 0.02	- ± -	2.34 ± 0.07	- ± -
8	2.10 ± 0.02	- ± -	2.14 ± 0.06	- ± -
9	2.15 ± 0.02	- ± -	2.16 ± 0.06	- ± -
10	2.32 ± 0.02	- ± -	2.30 ± 0.07	- ± -
11	2.32 ± 0.02	- ± -	2.33 ± 0.08	- ± -
All	2.32 ± 0.12	2.32 ± 0.11	2.30 ± 0.12	2.34 ± 0.08

0 → 5	Anemometer 1	Anemometer 2	Anemometer 1	Anemometer 2
Run	$\tau_{FIT} \pm \sigma_{\tau}$	$\tau_{FIT} \pm \sigma_{\tau}$	$\tau_{ISO} \pm \sigma_{\tau}$	$\tau_{ISO} \pm \sigma_{\tau}$
1	0.62 ± 0.04	0.66 ± 0.05	0.65 ± 0.08	0.74 ± 0.09
2	0.63 ± 0.04	0.64 ± 0.04	0.64 ± 0.08	0.72 ± 0.09
3	0.64 ± 0.04	0.67 ± 0.04	0.68 ± 0.08	0.68 ± 0.08
4	0.72 ± 0.05	0.67 ± 0.05	0.76 ± 0.09	0.70 ± 0.08
5	0.67 ± 0.05	0.70 ± 0.05	0.67 ± 0.08	0.74 ± 0.09
6	0.63 ± 0.04	0.69 ± 0.05	0.66 ± 0.08	0.75 ± 0.09
7	0.67 ± 0.05	0.68 ± 0.05	0.67 ± 0.08	0.73 ± 0.09
8	0.64 ± 0.04	0.65 ± 0.05	0.70 ± 0.08	0.70 ± 0.08
9	0.62 ± 0.03	0.65 ± 0.05	0.65 ± 0.08	0.68 ± 0.09
10	0.65 ± 0.04	0.69 ± 0.05	0.69 ± 0.08	0.71 ± 0.09
11	0.65 ± 0.04	0.71 ± 0.05	0.70 ± 0.08	0.70 ± 0.09
12	0.64 ± 0.04	0.65 ± 0.04	0.64 ± 0.08	0.67 ± 0.08
All	0.64 ± 0.03	0.67 ± 0.02	0.67 ± 0.03	0.71 ± 0.02

0 → 10	Anemometer 1	Anemometer 2	Anemometer 1	Anemometer 2
Run	$\bar{\tau}_{FIT} \pm \sigma_{\tau}$	$\bar{\tau}_{FIT} \pm \sigma_{\tau}$	$\bar{\tau}_{ISO} \pm \sigma_{\tau}$	$\bar{\tau}_{ISO} \pm \sigma_{\tau}$
1	0.34 ± 0.02	0.36 ± 0.02	0.37 ± 0.04	0.36 ± 0.04
2	0.36 ± 0.02	0.37 ± 0.02	0.37 ± 0.04	0.36 ± 0.03
3	0.35 ± 0.02	0.36 ± 0.02	0.35 ± 0.03	0.34 ± 0.03
4	0.33 ± 0.02	0.35 ± 0.02	0.36 ± 0.04	0.34 ± 0.03
5	0.34 ± 0.01	0.35 ± 0.02	0.33 ± 0.03	0.35 ± 0.04
6	0.33 ± 0.02	0.35 ± 0.02	0.31 ± 0.03	0.34 ± 0.04
7	0.36 ± 0.02	0.36 ± 0.02	0.38 ± 0.04	0.37 ± 0.04
8	0.33 ± 0.02	0.35 ± 0.02	0.33 ± 0.03	0.36 ± 0.04
9	0.34 ± 0.02	0.32 ± 0.02	0.34 ± 0.04	0.34 ± 0.04
10	0.34 ± 0.02	0.34 ± 0.02	0.33 ± 0.04	0.34 ± 0.04
11	0.33 ± 0.01	0.33 ± 0.02	0.32 ± 0.03	0.35 ± 0.04
12	0.33 ± 0.02	0.37 ± 0.02	0.32 ± 0.03	0.36 ± 0.04
All	0.34 ± 0.01	0.35 ± 0.01	0.34 ± 0.02	0.35 ± 0.01





