

**Code van Goede Praktijk
Meting van Diffuse VOS-emissies**

Deel 1: Meting van het volumedebiet van diffuse emissies

R. De Fré, J. Van Deun, W. Swaans

Onderzoek uitgevoerd door het referentielaboratorium Lucht

Projectenmanager	J. Theunis
Projectverantwoordelijke	R. De Fré
met medewerking van	E. Damen
	N. Moonen
	R. Brabers

**2006/MIM/R/133
September 2006**

Inhoud

Samenvatting	4
Deel 1 Principes en theorie.....	6
1. Theoretische achtergrond bij de hittedraadanemometer.....	6
2. Twee hoofdprincipes van thermische anemometers.....	7
3. Constante temperatuur hittedraad-anemometers (CTA).....	8
4. Praktische uitvoeringen van thermische anemometers.....	10
5. Vleugelrad of schroefanemometer	11
6. Uitdrukking van gasdebieten bij diffuse emissies	12
7. Respons op invalshoek van de stroming.....	13
Deel 2 Experimenteel onderzoek van de diffuse debietsmeting	17
1. Meting volumedebiet van windtunnel in functie van centrale snelheid	17
2. Kalibratie van thermische sondes tegenover de referentie pitotbuis	21
2.1 Eerste kalibratie	21
2.2 Stabiliteit van de kalibratie.....	24
3. Kalibratie van de vleugelradanemometer	25
4. Uitdrukkingswijze van gasdebieten bij diffuse emissies	28
5. Responstijd en uitmiddelingstijd.....	28
5.1 Testen in windtunnel.....	28
5.2 Uitmiddelingstijd bij diffuse emissies.....	30
6. Onderzoek naar effect van hoek met de stroming.....	34
6.1 Onderzoek naar effect van draaihoek of “yaw” van de thermische sondes	34
6.2 Onderzoek naar effect van helling of “pitch” van de thermische sondes	37
6.3 Hoekgevoeligheid van de vleugelradsonde.....	39
7. Meting van debiet aan in- en uitstroom van ventilatorroosters.....	41
7.1 Experimenteel opzet.....	41
7.2 Vorm en afmetingen van ventilatorrooster (uitlaatzijde).....	41
7.3 Metingen aan ventilatorrooster met pitotbuis.....	42
7.4 Metingen aan ventilatorrooster met hittedraad anemometer.....	44
7.5 Groter aantal meetpunten en berekening.....	47
7.6 Meting van debiet door een inlaatrooster.....	50
7.7 Rond rooster met sterke draaistroom	52
8. Meting van debiet door rechthoekig raam met thermische anemometers	54
8.1 Metingen in open raam.....	54
8.2 Metingen in open raam met stroomdeflector	58
8.3 Metingen in open raam met horizontale lamellen	59
8.4 Metingen in open raam met lamellen op 45°	61
9. Meting van debiet door deuren en poorten	62
9.1 Meting van gedwongen ventilatiedebiet door open poort.....	62
9.2 Meting van natuurlijke trek door openstaande poort	67
Deel 3 Praktische voorschriften meetmethodiek van de diffuse debietsmeting.....	71
1. Keuze van de anemometer	71
1.1 Minimum vereisten	71
1.2 Toelichting.....	71
2. Controle en kalibratie van hittedraad-anemometers.....	72
2.1 Minimum vereisten	72
2.2 Praktisch gebruik van kalibratiefactoren.....	73
3. Keuze van het meetvlak	73

4.	Aantal en ligging van de meetpunten en meetduur	74
5.	Meting van volumestromen aan ventilatorroosters	75
6.	Meting van volumestromen aan open ramen	75
7.	Metingen van volumestromen aan deuren en poorten.....	76
8.	Meetonzekerheid	77
8.1	Algemeen.....	77
8.2	Factoren die bijdragen tot de meetonzekerheid.....	78
8.3	In de praktijk vastgestelde afwijkingen.....	79
	Referenties	80

SAMENVATTING

Binnen het programma 2005 van VITO als referentielaboratorium Lucht werd voor de bepaling van diffuse VOS emissies een code van goede praktijk voor het meten van de volumestromen van diffuse emissies opgesteld.

Het kenmerk van diffuse emissies is dat ze "niet-geleid" zijn, dit betekent dat de openingen waardoor deze emissies ontsnappen niet voldoen aan de definitie van een gaskanaal waarin het debiet kan worden gemeten volgens bestaande normmethodes zoals ISO 10780 en NBN T95-001. Deze normen geven voorwaarden voor de keuze van de meetsectie, het aantal en de ligging van de meetpunten, en de meting van de gassnelheid om het totaal debiet door het kanaal te bepalen.

Deze code behandelt de gevallen waarin de emissie niet ontsnapt door een kanaal of leiding, maar waar wel een duidelijk geometrisch afgelijnd meetvlak aanwezig is waar de diffuse emissies doorheen gaan, en waarin de snelheid van de ontwijkende luchtstroom kan worden gemeten. Dit betreft in de praktijk bijvoorbeeld ventilatieroosters, ramen, vensters, deuren en poorten van gebouwen waarin de diffuse emissies plaats vinden.

Typische kenmerken die leiden tot problemen bij het bepalen van de luchtstroom door dergelijke openingen zijn:

- de snelheid van de stroming is klein (< 2 m/s), zodat meting met een pitotbuis niet meer tot voldoende nauwkeurige resultaten leidt
- de meetvlakken zijn over het algemeen vrij groot
- de stroming is niet homogeen verdeeld doorheen het meetvlak
- de richting van de stroming is niet altijd loodrecht op de stroming

Bijkomende kenmerken van diffuse emissiestromen die werden vastgesteld in de loop van dit onderzoek en die de meting bemoeilijken zijn de grote gevoeligheid aan externe factoren zoals temperatuur- en druk, die op hun beurt afhankelijk zijn van openen en sluiten van andere ramen en deuren, obstakels of bewegingen in de ruimte, windsnelheid buiten...

De thermische (of "hittedraad") anemometer werd gekozen als standaard instrument om diffuse debieten te meten. De belangrijkste reden hiervoor is de gevoeligheid van dit instrument voor lage snelheden (0,2 tot 2 m/s).

De vleugelrad- of schroefanemometer is iets minder gevoelig voor lage snelheden, aangezien de schroef nog niet in beweging komt bij lage stromingssnelheid. In de literatuur en de technische specificaties van deze toestellen worden aanloopsnelheden opgegeven rond 0,4 m/s. Daarom werd de schroefanemometer niet als de eerste keuze weerhouden. In de loop van het experimenteel onderzoek is echter gebleken dat de hittedraad anemometers op enkele punten minder goede resultaten opleverden dan verwacht, namelijk voor afwijkingen van de kalibratiefactor (voor enkele van de geteste types), de respons op draaiende en schuine stromingsrichtingen en de gevoeligheid voor temperatuurverschillen. Op deze punten blijkt de vleugelrad anemometer over eigenschappen te beschikken die hem in veel praktijkgevallen een gelijkwaardig of beter alternatief maken. Door de zichtbare draaiing van de schroef kan met de vleugelrad anemometer ook het verschil in richting van de stroom (positief of negatief) worden vastgesteld. Verder heeft de vleugelradanemometer een groter meetoppervlak, en een duidelijker herkenbare oriëntatie van het meetvlak waardoor de

gebruikers meer vertrouwen blijken te hebben in dit instrument dan in de thermische anemometer.

Om de uitvoerbaarheid van diffuse-debietsmetingen in de praktijk te demonstreren en praktische oplossingen voor probleemsituaties uit te werken werden een aantal simulaties opgezet. Nauwkeurig gekende debietsstromen werden gegenereerd met een windtunnel, waarvan het debiet wordt gekalibreerd met standaard pitotbuizen. Deze gekalibreerde volumestroom werd vervolgens doorheen typische diffuse openingen met een groter oppervlak gestuurd zoals roosters, ramen en deuren. Hierop werden debietsmetingen verricht, via snelheidsmetingen met de gevoelige anemometers in een netwerk van punten.

Doordat de minder gunstige eigenschappen van de thermische anemometers pas in de loop van het onderzoek werden vastgesteld is het testprogramma niet volledig uitgevoerd voor beide types anemometers, en werd het experimenteel onderzoek in 2006 - na praktijkervaring - aangevuld met een beperkt aantal proeven met de vleugelradanemometer.

Het derde deel van de code is een leidraad voor de meting van diffuse debieten in verschillende typische situaties. De code geeft geen rigoureuze procedures zoals die in normen worden gedefinieerd, maar formuleert richtlijnen op basis van de uitgevoerde experimenteel werk. Een uitgebreide veldvalidatie, met nog meer verschillende situaties, verschillende laboratoria en instrumenten lag evenwel niet binnen de mogelijkheden.

In de loop van het jaar 2006 werden wel een aantal van de beschreven technieken in de praktijk uitgetest bij de bepaling van diffuse VOS emissies in de grafische sector. Deze resultaten zijn niet opgenomen in het experimenteel deel van dit verslag.

Verder dient bemerkt te worden dat ook bij afwezigheid van meetbare luchtstromen er toch nog uitwisseling van materie plaats vindt door turbulente stromingen en diffusie. In dat geval komen diffuse emissies voor in de meest letterlijke betekenis. Voor deze situatie is deze code niet van toepassing en dient overgegaan op de meting van de volumestroom door middel van tracergastechnieken, waarbij het aantal luchtverversingen per uur van de beschouwde ruimte of het ventilatievoud wordt bepaald.

DEEL 1 PRINCIPES EN THEORIE

1. Theoretische achtergrond bij de hittedraadanemometer

Een elektrisch verwarmde draad in een gasstroom bereikt een stabiele temperatuur wanneer het toegeleverde elektrisch vermogen gelijk is aan het warmteverlies ten gevolge van het (convectief) warmteverlies dat ontstaat door het temperatuurverschil:

$$I^2 \cdot R_d = h \cdot A_d \cdot (T_d - T_g) \quad (1)$$

waarin

I	Elektrische stroom door de draad
R_d	Elektrische weerstand van de draad
h	Warmte-overdrachtscoëfficiënt
A_d	Geprojecteerde oppervlakte van de draad
T_d	Temperatuur van de draad
T_g	Temperatuur van de gasstroom

De warmte-overdrachtscoëfficiënt **h** is een functie van de snelheid van de gasstroom **v**

$$h = a + b \cdot v^c \quad (2)$$

waarin a, b en c coëfficiënten zijn die uit kalibratie worden bekomen (**c ≈ 0.5**).

Vergelijking (2) is afgeleid uit de in 1914 door King vastgestelde correlatie:

$$Nu = A + B \cdot Re^{0,5} \quad (3)$$

die het verband geeft tussen de dimensieloze Nusselt- en Reynoldsgetallen voor het warmteverlies van een oneindige lange cilindrische draad in een onsamendrukbare gasstroom met laag Reynoldsgetal (A en B zijn constanten).

Ter herinnering: het Nusselt getal is een dimensieloze grootheid die de verhouding geeft tussen de warmte-overdrachtscoëfficiënt van de grenslaag in lucht **h**, de draaddiameter **d** en warmtegeleidingscoëfficiënt **λ** van lucht:

$$Nu = \frac{h \cdot d}{\lambda} \quad (4)$$

h is in het algemeen een functie van de stromingseigenschappen en van de geometrie van het voorwerp, in casu de draad. Vergelijking (2) geeft de specifieke empirische uitdrukking voor een oneindig lange draad.

Het Reynolds getal is een dimensieloze grootheid die de verhouding tussen de inertiekrachten van een stroom en de visceuse krachten binnen het fluïdum (de schuifspanning) weergeeft.

$$\mathbf{Re} = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \quad (5)$$

waarin ρ de dichtheid van lucht in kg/m^3 , v de gassnelheid, μ de dynamische viscositeit ($\text{N}\cdot\text{s/m}^2$) en d een karakteristieke afmeting is, meestal de hydraulische diameter van de leiding, maar hier de diameter van de draad.

Het Reynoldsgetal is een maat voor de bereidheid van een stroming om zijn richting aan te passen aan obstakels. De stroming van gassen in leidingen gaat over van laminair naar turbulent wanneer het Reynoldsgetal boven 2000 stijgt.

De elektrische weerstand van de draad \mathbf{R}_d is zelf ook afhankelijk van de temperatuur volgens:

$$\mathbf{R}_d = \mathbf{R}_{\text{ref}} \left[1 + \alpha (T_d - T_{\text{ref}}) \right] \quad (6)$$

waarin

α	Thermische weerstandscoefficiënt van materiaal van draad
T_{ref}	Referentietemperatuur
\mathbf{R}_{ref}	Weerstand bij referentietemperatuur T_{ref}

Door combinatie van de bovenstaande drie vergelijkingen kan de warmte-overdrachtscoëfficiënt \mathbf{h} geëlimineerd worden, en bekomt men de volgende uitdrukking voor de gassnelheid:

$$v^c = \frac{1}{b} \cdot \left\{ \frac{I^2 \cdot \mathbf{R}_{\text{ref}} [1 + \alpha (T_d - T_{\text{ref}})]}{A_d \cdot (T_d - T_g)} - a \right\} \quad (7)$$

2. Twee hoofdprincipes van thermische anemometers

Volgens het principe dat bij de regeling en meting van de temperatuur van de sensor wordt toegepast kunnen twee types thermische anemometers worden onderscheiden:

- thermische anemometer met constante-temperatuur (CTA)
- thermische anemometer met constante elektrische stroom

Naargelang het gekozen principe wordt de uitdrukking (7) herleid tot een eenvoudiger relatie met twee tot drie constanten.

De types met constante temperatuur zijn het meest verspreid omwille van hun betere reacties op wisselende stromingen. De hittedraad moet namelijk voldoende boven de gastemperatuur worden opgewarmd om een goed meetbare warmteoverdracht naar de

gasstroom te bekomen. Wanneer bij een constante-stroomtype de gassnelheid plotseling terugvalt bestaat daardoor het risico dat de draad doorbrandt. Tevens is de kwaliteit van de meting niet gegarandeerd bij hogere temperaturen van de draad omdat de geldigheid van de basisvergelijkingen (2) en (3) in het gedrang komt als gevolg van warmteverliezen door straling, resp. van de niet-lineariteit van de weerstandstoename met de temperatuur.

Omgekeerd, wanneer de gassnelheid zeer groot wordt dan kan bij het constante-stroomtype de draad volledig afgekoeld worden waardoor het temperatuurverschil met de omgeving zeer klein wordt, hetgeen leidt tot minder nauwkeurige metingen. De constante-temperatuur hittedraadanemometer is dus beter aangepast aan hoge en lage gassnelheden en houdt daardoor minder gevoelig aan niet-lineaire respons zoals afgeleid uit bovenstaande vergelijkingen.

3. Constante temperatuur hittedraad-anemometers (CTA)

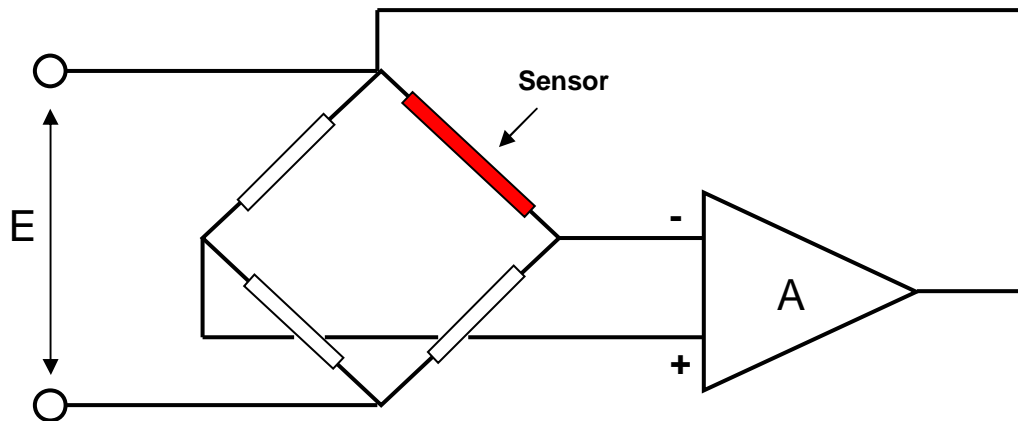
Een hittedraadanemometer met constante temperatuur en instelbare stroomsterkte biedt het voordeel dat ook de elektrische weerstand van de draad constant blijft, zodat de beide variabelen T_d en R_d kunnen opgenomen worden in het constante deel van de vergelijking.

De temperatuur van het gas T_g wordt continu gemeten en in rekening gebracht, waardoor de snelheid van de gasstroom kan herleid worden als enkel functie van de te leveren elektrische stroom (en T_g). Bemerkt ook dat de afhankelijkheid van de stroomsterkte kwadratisch is, waardoor de hittedraadanemometer, net als de pitotbuis, gevoeliger wordt bij hogere snelheden.

(noot: Hoentzsch beweert in zijn folders het tegenovergestelde over de HTA sondes, doch dit dient geïnterpreteerd als de relatieve gevoeligheid in vergelijking met pitot of turbine die bij lagere snelheid gunstiger wordt voor de thermische anemometer)

Elektronisch meetprincipe van de CTA hittedraad-anemometer

Hittedraad-anemometers met constante temperatuur (CTA) werken volgens het elektronisch schema in fig. 1. Aangezien de weerstand van de hittedraad (sensor) evenredig is met de temperatuur, betekent het constant houden van de temperatuur in feite het constant houden van de weerstand van de sensor. Daardoor is het niet nodig een afzonderlijke temperatuurmeting op de draad aan te brengen. In de praktijk worden ondermeer met platina gecoate wolframdraden gebruikt. De waarde van de weerstand wordt gecontroleerd met een Wheatstone brug. De spanning E die moet worden aangelegd om de brug in evenwicht te houden geeft een maat voor de warmteoverdracht van de hittedraad naar de luchtstroom.



Figuur 1. Schema van elektronische regeling van constante temperatuur thermische anemometer (CTA)

Wanneer de brug in evenwicht is de brugspanning nul en wordt er geen spanningsverschil doorgegeven aan de versterker A. Als er nu een daling van de weerstand van de sensor optreedt door afkoeling - op zijn beurt veroorzaakt door een grotere gassnelheid - dan wordt het evenwicht verstoord en krijgt de servo versterker een positieve inputspanning, waardoor, na aanzienlijke versterking, de spanning E over de brug wordt opgevoerd. Daarmee stijgt de stroom door de sensor, die weer opwarmt totdat het evenwicht is hersteld. Dit evenwicht wordt bereikt als de versterker geen spanningsverschil ondervindt, hetgeen betekent dat de weerstand en dus de temperatuur van de sensor weer de oorspronkelijke waarde heeft.

Door de hoge gain van de versterker en de geringe thermische inertie van de sensor kunnen zeer snel responderende systemen worden gebouwd, die in staat zijn kortdurende fluctuaties in de snelheid te registreren. Voor een hittedraad kan de cut-off frequentie verschillende kHz bedragen en voor hete-films tot 1 MHz.

Het warmteverlies van de sensor in de gasstroom is gelijk aan het toegevoerd elektrisch vermogen E_d^2/R , waarbij E_d het spanningsverlies is over de sensor en R zijn elektrische weerstand. Als de eigenschappen van het gas constant zijn wordt uitdrukking (7) daarmee benaderd door

$$E_d^2 = A'' + B' \cdot v^{0.5} \quad (8)$$

waarin A'' en B'' constanten zijn. In de praktijk wordt de spanning E over de Wheatstone brug gemeten, die zelf met een constante verschilt van de sensorspanning, zodat:

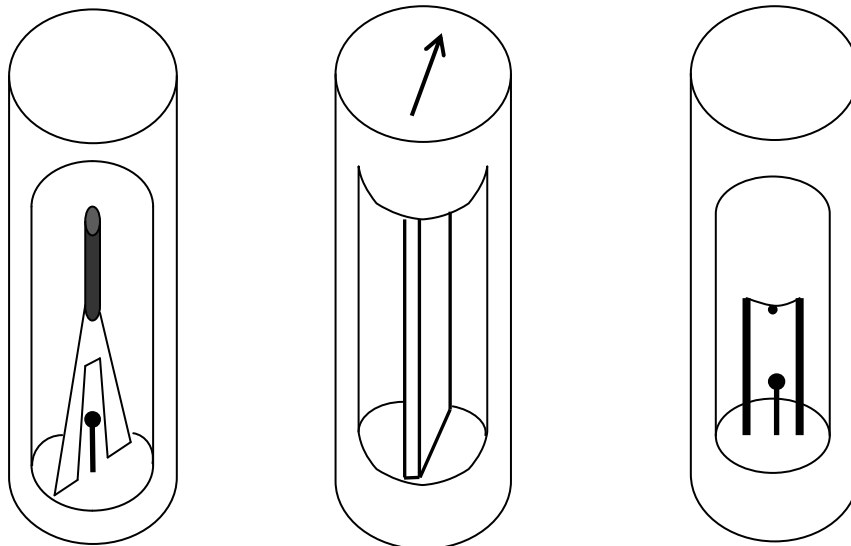
$$E^2 - A'^2 = B' \cdot v^{0.5} \quad (9)$$

De constante A' kan benaderend worden gelijkgesteld aan de spanning E_0 over de brug, gemeten bij nulnelheid van het gas. Deze benadering veronderstelt dat de warmteverliezen door geleiding naar de verbindingen of drager van de sensor niet veranderen met de gassnelheid, en is toepasbaar voor praktische metingen waarbij niet de hoogste nauwkeurigheid wordt vereist.

In de praktijk veranderen de constanten A' en B' en de exponent met de sensor en met de snelheid, en daarom is het nodig elke sensor individueel te kalibreren. Een exponent van 0,45 benadert beter de waarden die in de praktijk worden gevonden.

4. Praktische uitvoeringen van thermische anemometers

De sensoren van een thermische anemometer zijn ofwel uitgevoerd als hittedraad, als bolletje ofwel als een vlakke sensor. Voor de praktische meting van gasstromen worden deze sensoren in een meetkop en op een sonde gemonteerd. De meetkoppen bestaan in verschillende uitvoeringen, bijvoorbeeld een ronde draad in de lengterichting van de sonde, een draadje gemonteerd in de dwarsrichting van de sonde of een plaatje bestaande uit dunne laag van een geleidend materiaal dat is afgezet op een niet geleidend substraat (filmsensor). Het sensorelement kan zeer klein worden uitgevoerd, waardoor een snelle respons en een hoge ruimtelijke resolutie mogelijk zijn. In figuur 2 worden de meetkoppen van de verder geteste thermische anemometers voorgesteld. Strikt genomen kunnen alleen het eerste en het derde type als "hittedraad-anemometer" worden aangeduid.



Figuur 2: Verschillende types sensoren van geteste hittedraad-anemometers

Links: Cilindrisch axiaal element met afzonderlijke gastemperatuursensor (type TSI)

Midden: Vlakke of "film" sensor met richtingsmerkteken (type Höntzsch)

Rechts: Dunne radiale draad met afzonderlijke gastemperatuursensor (type Testo)

Er dient opgemerkt dat de meeste op de markt beschikbare toestellen nauwelijks voorzien zijn van begeleidende informatie over de toegepaste werkingsprincipes, over de ingestelde temperatuur of stroom, en over de mathematische vergelijkingen die in de interne software van de toestellen worden toegepast om de weergegeven snelheid te berekenen.

Aangezien geen universele kalibratie mogelijk is moeten deze sensoren worden gekalibreerd, en dit is volgens de bijgeleverde informatie uitgevoerd door de producent. In het ideale geval wordt gekalibreerd in een stroom met lage turbulentie en gekende snelheid. De positie van de sensor bij kalibratie dient dezelfde te zijn als bij gebruik van het toestel.

De bijregeling na kalibratie kon bij geen van de geteste toestellen door de gebruiker zelf worden uitgevoerd.

Verder in de hoofdstukken over het experimenteel onderzoek en de conclusies hieruit wordt beschreven hoe een controle op de kwaliteit van de kalibratie van een individuele hittedraad-anemometer mogelijk is.

5. Vleugelrad of schroefanemometer

De vleugelrad of schroefanemometer bestaat uit een schroef die in de richting van de gasstroom wordt gehouden en daardoor begint mee te draaien. De omwentelingen van het rad worden mechanisch via een telwerk, of elektronisch via een naderingssensor gemeten, en omgezet in een windsnelheid, eventueel rekening houdend met een kalibratiefactor.

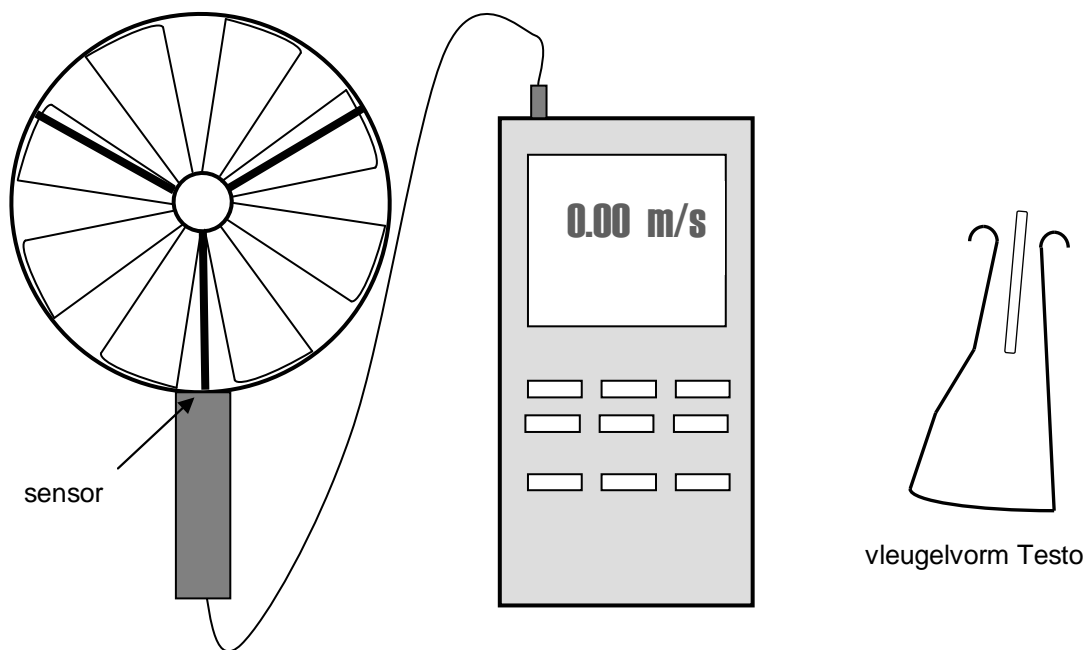
Voor de toepassing bij diffuse emissies is het van belang een schroefanemometer met lage aanloopsnelheid te gebruiken. Dit betekent in de praktijk dat de schroef zeer licht moet gelagerd zijn, en een voldoende grote diameter en een groot aantal bladen bezitten met groot oppervlak. Typische waarden voor het meetbereik zijn 0,25 m/s tot maximum 30 m/s voor commercieel verkrijgbare vleugelradanemometers met 10 cm schroefdiameter en 8 bladen. De sondes met een diameter van enkele centimeter, die worden gebruikt om windsnelheden te meten in kanalen, zijn wegens de hogere aanloopsnelheid niet geschikt voor meting van diffuse debieten.

Er bestaan uitvoeringen met een losse schroef op een handvat (fig. 3) of op een verlengbare telescopische sonde, en instrumenten waarbij de schroef vast is gemonteerd op de uitleeseenheid. Deze laatste uitvoering is minder geschikt voor metingen aan diffuse emissies, omdat de meter zelf een groot geprojecteerd oppervlak heeft dat weerstand biedt en de luchtstroom beïnvloedt.

Ook anemometers met kleinere schroefdiameters (2 en 5 cm) zijn minder geschikt voor het meten van diffuse emissies, aangezien ze pas beginnen te draaien bij snelheden rond 0,5 m/s. Deze toestellen dienen vooral voor het meten van luchtstromen in kanalen, als aanvulling voor de pitotbuis in het lagere meetbereik.

De hier geteste vleugelrad anemometer is van het merk Testo en heeft volgende kenmerken:

- diameter van het rad 10 cm, 8 schoepen, hoek 45°
- diameter van mantel rond rad: 10,5 cm; lengte mantel: 4,2 cm
- uitleeseenheid Testo 445



Figuur 3. Vleugelradanemometer met digitale uitleeseenheid

De mantel dient als bevestiging voor het handvat, de sensor en de assteunen. Deze laatste bestaan uit 3 ronde staafjes onder een hoek van 120° met elkaar en aan weerszijden van het rad, die in de mantel zijn geschroefd. Zoals bij de meeste vleugelradanemometers zijn de schroefblaadjes van het Testo instrument vlak (en niet helicoidaal) waardoor wel de hoek van 45° met de stroom, maar niet de spoed (in centimeter) constant is voor elke diameter van de schroef. Bijgevolg beweegt het schroefblad zich niet op ideale manier in de luchtstroom en treedt er steeds slip op, die tegengestelde richtingen heeft in het midden en aan de buitenkant van de schroef. Het blad heeft in het midden een uitgestulpte versteviging en heeft een asymmetrische vorm met verbreding aan de buitenzijde (fig. 3). Bij hogere snelheden (20 m/s) produceert de schroef daardoor een fluitend geluid, en wordt ze minder geschikt als meetinstrument.

6. Uitdrukking van gasdebieten bij diffuse emissies

Bij diffuse emissies treden er in het algemeen geen grote temperatuur- of drukverschillen op bij metingen op verschillende plaatsen en tijdstippen - in tegenstelling tot geleide emissies door schouwen. Het is daarom gebruikelijk de debieten uit te drukken in reële omstandigheden (m^3/h) en geen correcties voor temperatuur, druk en watergehalte toe te passen. Zonder bijkomende specificaties neemt men aan dat de standaardomstandigheden dezelfde zijn als voor luchtkwaliteitsnormen, namelijk 293 K en 1013 mbar.

De uitdrukking van de gasdebieten moet in principe op dezelfde basis gebeuren als de concentratiemetingen, zodat het product van beide de correcte emissiestroom oplevert. Concentratiemetingen voor industriële hygiëne of met PID of passieve samplers worden over het algemeen bij reële omstandigheden gerapporteerd. Bij FID, dat een verwarmd

toestel is worden de resultaten soms in mg/Nm^3 uitgedrukt, hetgeen dan ofwel dient omgerekend, ofwel met een debiet in Nm^3/h vermenigvuldigd om de massastroom te bekomen.

Wanneer het temperatuurverschil tussen twee gelijke volumestromen lucht $10\text{ }^\circ\text{C}$ bedraagt, dan is er een verschil van 3,5 % in massastroom. Gezien de beperkte nauwkeurigheid van de debietsbepaling is deze afwijking verwaarloosbaar en is het in algemeen niet nodig de volumestromen om te rekenen naar normaalomstandigheden.

Bij grotere temperatuurverschillen kan het aangewezen zijn temperatuurscorrecties door te voeren en de volumestromen om te zetten naar dezelfde omstandigheden. Dit is bijvoorbeeld het geval wanneer voor berekeningen van de luchthuishouding koude en warme luchtstromen dienen samengeteld of afgetrokken. In de winter wanneer het temperatuurverschil tussen binnen en buiten meer dan $20\text{ }^\circ\text{C}$ kunnen hierdoor fouten van meer dan 7 % ontstaan, en is bijgevolg een correctie aangewezen.

Correcties voor watergehalte worden in het algemeen niet toegepast bij metingen van diffuse emissies. Het watergehalte van de lucht bedraagt in onze streken meestal niet meer dan 2,5 % (80 % relatieve vochtigheid bij $25\text{ }^\circ\text{C}$) en varieert binnen één dag zelden meer dan 1%.

7. Respons op invalshoek van de stroming

De hoeken waaronder een sonde kan afwijken van loodrechtheid/evenwijdigheid met de stroming worden in het Engels aangeduid met "yaw" en "pitch". Deze termen die bewegingen in de driedimensionale ruimte aangeven komen ook voor in mechanica, bouwkunde en luchtvaart. De vertaling volgens Van Dale Engels-Nederlands woordenboek:

Pitch (zelfst. nw.): helling, schuinte (dak), spoed (schroefdraad), steek (tandwiel)
To pitch (werkw.): stampen, steigeren, bokken

Yaw (zelfst. nw.): giering, gierslag, slingering
To yaw (werkw.): gieren, niet op koers blijven, zwalken

In lucht- en scheepvaarttermen is draaien om de lengteas "rollen" (Eng: roll), en dit is in feite de juiste benaming met wat hier als "yaw" van de pitotbuis wordt omschreven.

Wij zullen hier gebruik maken van de termen "draaihoek" voor "yaw" en van helling of zwenkhoek voor "pitch". Voor de toepassing op de luchtstromen zijn er twee situaties te onderscheiden:

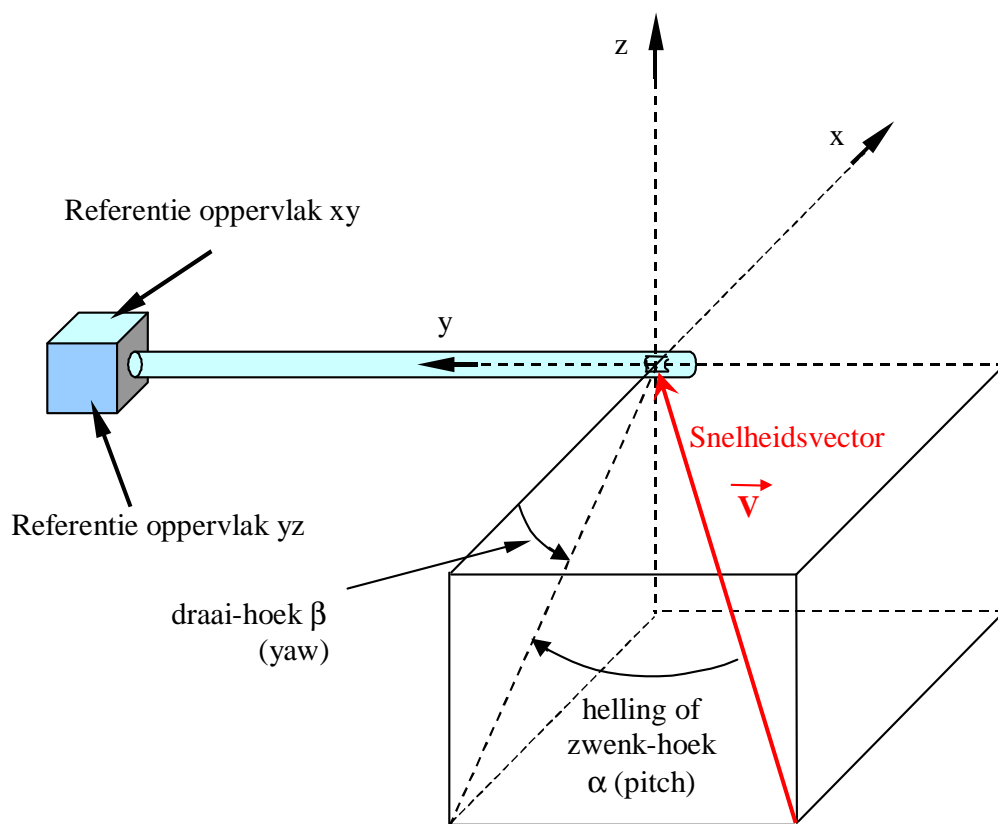
1. de sonde neemt een afwijkende positie in tegenover het meetvlak
2. de stroming heeft een afwijkende richting en gaat niet loodrecht door het meetvlak.

De draai- en hellingshoeken kunnen dus zowel op de stroming als op de sonde worden toegepast. In figuur 4 is de tweede situatie afgebeeld, waarbij de stroming in twee vlakken een hoek maakt met z-as, die de stromingsrichting loodrecht op het meevlak (x,y) voorstelt.

Om de effecten van afwijkende hoeken op een sonde te onderzoeken wordt een windtunnel met quasi perfecte parallelle stroming, loodrecht op de assen van het meetvlak gebruikt, en wordt de sonde in verschillende afwijkende posities gezet.

De eerste situatie dient door de operator in de praktijk beperkt door zorgvuldige opstelling van de sonde in de meetopening. Voor de tweede situatie dienen in principe metingen uitgevoerd om de grootte van het effect in te schatten. Verder kunnen dan ofwel correcties worden toegepast, ofwel grenzen afgebakend waarbinnen nog aanvaardbare resultaten worden bekomen.

De zin van de draai- en hellingshoeken - positief of negatief - wordt, in navolging van EPA Method 2F als volgt gedefinieerd (fig. 4):



Figuur 4. Ruimtelijke voorstelling van afwijkende hoeken in een gasstroom (stroming met negatieve pitch en yaw - naar EPA Method 2F)

Positieve draaihoek of yaw: de hoek is positief als de sonde, van achter bekeken met de wijzers van het uurwerk wordt megedraaid; de stroming heeft een positieve "yaw" als de operator de impactopening van de sonde in de stroom richt door met de wijzers van de klok mee te draaien

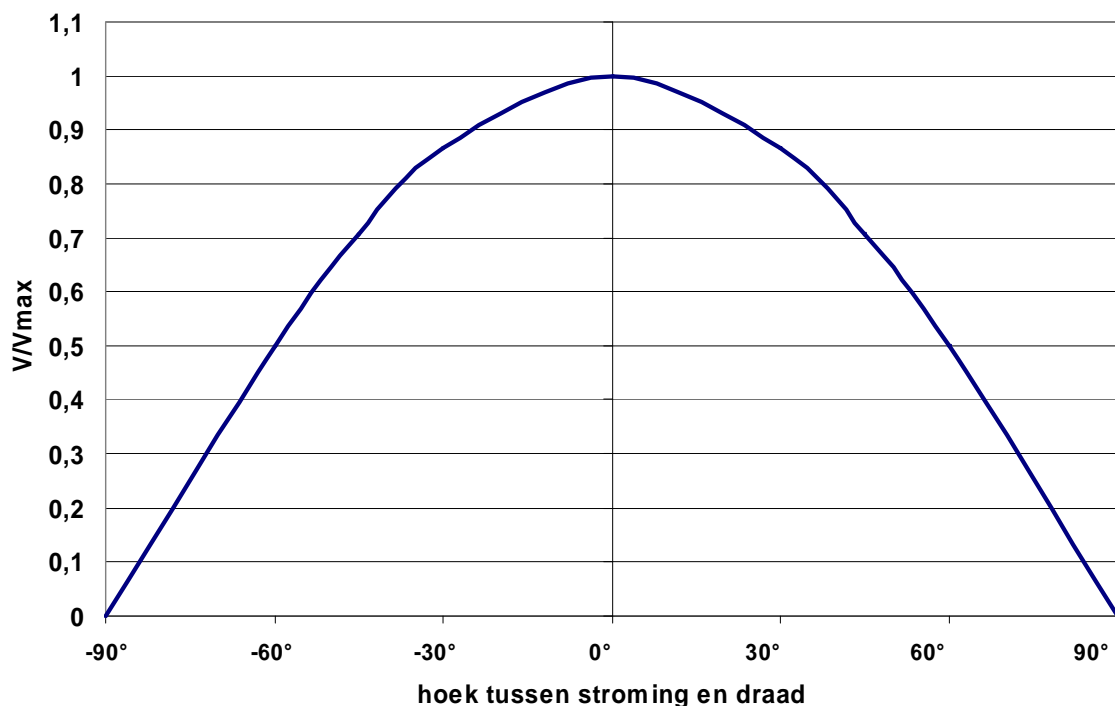
Positieve hellingshoek of pitch: als voor een verticale opwaartse stroming de achterkant van de sonde omhoog wordt geheven en de tip naar beneden, dus in de richting van de stroom; de stroming heeft een positieve "pitch" als de vector van de stroom tegenover de as van de verticale schouw weg wijst van de operator.

Wanneer een cilindrische hittedraad sensor (van het eerste type in figuur 2) verdraaid wordt rond de y-as, waarbij de draai-hoek β verandert, is er theoretisch geen effect op de afkoeling en dus op de gemeten snelheid. In de realiteit is de sensor evenwel in een behuizing gemonteerd die wel degelijk een hoekafhankelijkheid teweeg brengt die experimenteel dient gemeten.

Wanneer een cilindrische hittedraad sensor zo wordt geplaatst dat zijn as niet loodrecht op de stroomrichting staat, zodat de helling α niet gelijk is aan nul, dan is er een component in de stroming die parallel is met de as (y) van de sensor. Indien de sensor oneindig lang zou zijn, dan zou deze parallelle snelheidscomponent geen koeling van de hittedraad veroorzaken. De effectieve snelheid die wel tot afkoeling van de sensor leidt is in dit geval:

$$v_{\text{eff}} = v \cdot \cos \alpha$$

waarin α de "pitch"-hoek tussen de stromingsvector en de normaal op de as van de sensor is. De theoretische respons van de hittedraad anemometer op de hoek met de stroming is voorgesteld in figuur 5. Bemerk dat naargelang de montage van de hittedraad in de sonde deze hoek zowel de pitch als de yaw kan voorstellen



Figuur 5. Theoretische respons van hittedraad-anemometer op hoek met de stroming

In het geval van reële sensoren is de draad niet oneindig lang, is de temperatuur niet constant over de lengte van de draad en zijn er aerodynamische verstoringen door de bevestiging van de draad en de behuizing van de sensor. In de praktijk is het dus voor elk

type sensor van belang om experimenteel na te gaan hoe de anemometer zich gedraagt bij wisselende hellingshoek α en draaihoek β .

Hittedraad en hete-film sensoren kunnen alleen de absolute waarde van de snelheid bepalen, en niet de zin (richting) van de stromingsvector, aangezien het warmteverlies gelijk is voor tegengestelde waarden van de snelheidsvector. Dit geldt voor het sensor-element zelf. In de praktijk zijn de commercieel beschikbare sensoren voorzien van een omhulsel dat mede de luchtstroom dirigeert en dus een bijkomende richtingsafhankelijkheid aan de meetkop geeft.

De verder geteste sondes van het merk Höntzsch zijn voorzien van een merkteken dat de te gebruiken stromingszin aangeeft.

Indien de theoretische curve in figuur 5 ook de werkelijke de respons van de anemometer weergeeft, dan kan het instrument gebruikt worden om de juiste richting van een stroming op te zoeken. Wanneer in dat geval de sonde wordt gedraaid totdat de maximale respons wordt bekomen dan staat de hittedraad van de sensor loodrecht gericht op de stromingsrichting.

Pitotbuizen, zowel van het standaard als van het S-type blijken in de praktijk te voldoen aan de regel dat de maximale respons wordt bekomen in de stromingsrichting zoals in figuur 5. Door deze eigenschap kunnen ze in schouwen worden gebruikt om de juiste stromingsrichting te bepalen.

In het volgende deel wordt experimenteel aangetoond dat de hier geteste hittedraadsondes minder geschikte responscurves vertonen voor de bepaling van de stromingsrichting.

DEEL 2 EXPERIMENTEEL ONDERZOEK VAN DE DIFFUSE DEBIETSMETING

Het onderzoek wordt uitgevoerd met de windtunnel als bron van een gekalibreerde volumestroom. De windtunnel van VITO heeft een diameter van 50 cm en kan door middel van een frequentiesturing ingesteld worden op windsnelheden tussen 3 m/s en 20 m/s, hetgeen overeenkomt met volumedebieten tussen 2000 m³/h en 14 000 m³/h.

In de windtunnel wordt met behulp van stroomrichters en voldoende afstanden tot elke verstoring een quasi ideale luchtstroom opgebouwd op het referentiemeetpunt. In het meetvlak van dit punt kan de stroom voldoende nauwkeurig worden bepaald door met een standaard pitotbuis de gassnelheid te meten in een netwerk van punten, en het daaruit berekende totaaldebiet wordt gebruikt als referentie-debiet bij dit onderzoek.

De luchtstroom uit de windtunnel wordt zonder verliezen gekoppeld aan diverse opstellingen die diffuse emissies voorstellen waarvan het debiet experimenteel wordt bepaald.

1. Meting volumedebiet van windtunnel in functie van centrale snelheid

De windtunnel wordt gebruikt als gekalibreerde bron voor een diffuus debiet dat uit een rooster of deur ontsnapt. De kalibratie van dit debiet wordt hier beschreven.

Het totaal debiet door de windtunnel wordt gemeten met een standaard pitotbuis op de volgens NBN T95-001 voorgeschreven meetpunten. Volgens NBN T95-001 en ISO 10780 volstaan 5 meetpunten verdeeld over 2 meetassen bij een diameter tot 50 cm, maar dienen voor diameters groter dan 50 cm 9 meetpunten te worden gekozen.

In feite blijkt de interne diameter van de windtunnel bij opmeting in het referentiepunt 49,5 cm en volstaan volgens de geldende normen voor cirkelvormige kanalen in feite 5 meetpunten, verdeeld over 2 diameters.

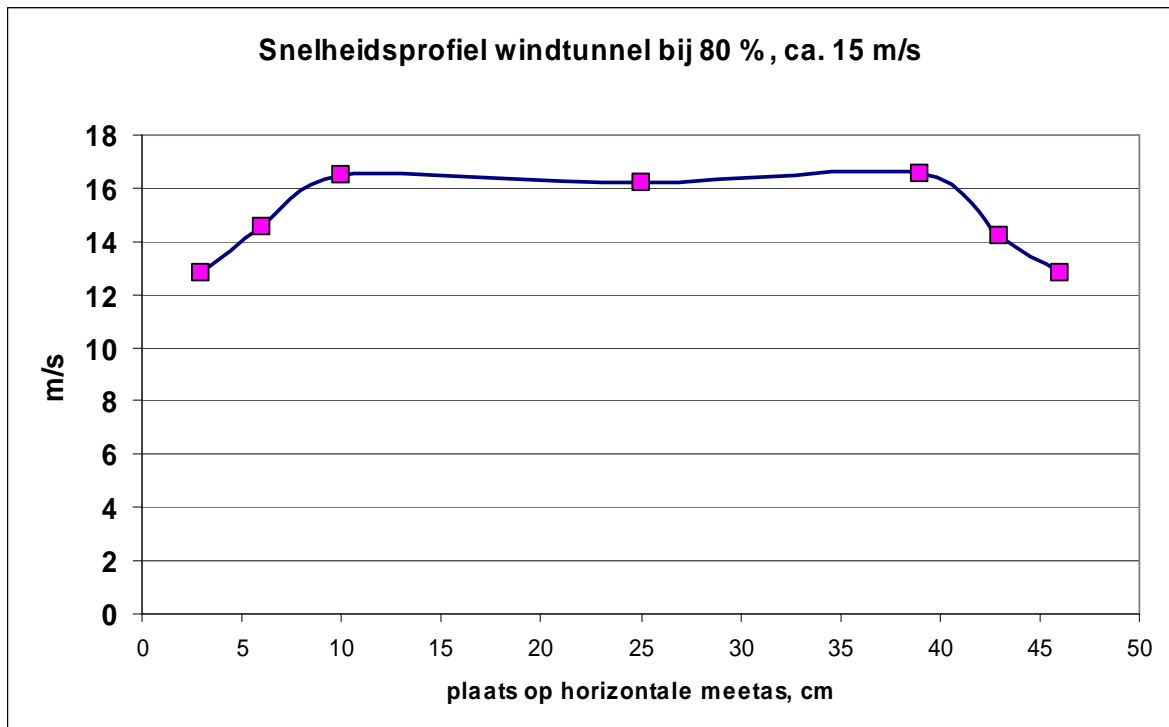
Omwille van de nauwkeurigheid werd nagegaan of er een verschillend resultaat wordt bekomen door het verhogen van het aantal meetpunten van 5 tot 9.

Een voorbeeld van een snelheidsprofiel in de windtunnel wordt gegeven in figuur 6. Dit profiel is typisch voor een volledig uitgebouwde turbulente stroming en vertoont een plateau in het midden en een afname van snelheid dichtbij de wand. Het plateau is een geschikte zone om ijkingen van pitotbuizen en andere sondes uit te voeren.

Bij toename van het aantal meetpunten, bij grotere kanaaldiameters, worden vooral aan de rand van het kanaal meer punten toegevoegd. Dit komt omdat de berekening erop is gebaseerd dat elk meetpunt zich bevindt in het zwaartepunt van een ring met gelijke oppervlakte. De buitenste ringen zijn smaller, en bijgevolg liggen de meetpunten daar dichter bij elkaar. Nochtans is het niet toegelaten om te dicht bij de wand te meten. Reden hiervoor is dat er beïnvloeding van de stroming optreedt door de nabijheid van wand en pitotbuis, evenals door de meetopening zelf. Verder is het niet goed mogelijk op enkele centimeter nauwkeurig de sonde te positioneren.

Ook omwille van de nauwkeurigheid van de debietsbepaling blijkt het nodig meerdere meetpunten te kiezen nabij de wanden, omdat daar de snelheden meest verschillen (zie profiel in figuur 5).

Een referentiepitotbuis blijft gedurende deze metingen in het middelpunt, zodat deze meetwaarde, gemiddelde over de meetcyclus, daarna als indicator voor het volumedebiet kan worden gebruikt. Deze metingen werden uitgevoerd bij ca. 3 m/s (laagst haalbare snelheid) en 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s. Elke volledige cyclus werd 3 maal herhaald.



Figuur 6. Snelheidsprofiel in de windtunnel bij 15 m/s (frequentiesturing 80 %)

De windtunnel werd bij deze proeven "onbelast" gemeten, dit wil zeggen dat het debiet vrij uitstroomt aan de uitlaatzijde. Wel dient ook in deze omstandigheden arbeid verricht door de ventilator om de wrijvingskrachten te overwinnen, en deze arbeid neemt toe naargelang de snelheid stijgt. In het referentiemeetvlak is dit merkbaar aan de stijgende onderdruk (meer negatieve statische druk) bij stijgende snelheden. Aangezien het referentie-meetpunt zich aan de onderdrukzijde van de ventilator bevindt, dient een kleine drukcorrectie te worden toegepast om het uitstromend debiet onder standaard- of omgevingsomstandigheden te berekenen.

In de praktijk blijkt het debiet van de windtunnel ook beïnvloed te worden door andere omgevingsfactoren zoals de afstand van obstakels tegenover de inlaat en de uitlaat, de drukvariaties door openen en sluiten van deuren in het gebouw, de atmosferische druk, de omgevingstemperatuur enz. Het effect van al deze factoren samen manifesteert zich in kleine schommelingen van het debiet van de windtunnel in functie de tijd. Daarom werd bij alle proeven het debiet berekend met de geïntegreerde werkelijk gemeten snelheid in het middelpunt.

De resultaten van de debietsbepalingen van de windtunnel zijn gegeven in tabel 1.

Het verschil in debiet bepaald met 9 of met 5 punten bedraagt hoogstens 4,4 % bij 5 m/s. Aangezien het verschil tussen twee opeenvolgende debietsbepalingen al enkele percenten bedraagt is dit verschil niet relevant in verhouding tot de hier vereiste nauwkeurigheid.

Ingeval de snelheid op 5 punten wordt bepaald zijn de meetpunten volgens NBN T95-001 of ISO 10780 ("general rule") verdeeld over twee assen en gelegen op volgende afstanden van de wand (in % van de binnendiameter): 11,3 - 50- 88,7 %

Voor 9 meetpunten zijn deze afstanden: 5,9 - 21,1 - 50 - 78,9 - 94,1 %.

Tabel 1. Debietsbepaling van de windtunnel door snelheidsmeting op 5 en op 9 punten

Instelling windtunnel	Debietsmeting 5 punten Q5, m³/h	Debietsmeting 9 punten Q9, m³/h	Verhouding Q5/Q9 %
3 m/s (1 %)	2171 2171 2209	2267 2265 2244	
gemiddeld	2184	2259	96,7%
3 m/s (herhaling na 9 maand)	1895 1904 1918	1954	
gemiddeld	1906	1954	97,5%
5 m/s (16 %)	3573 3550 3550	3689 3724 3754	
gemiddeld	3558	3722	95,6%
10 m/s (45 %)	6579 6902 6664	6487 6595 6657	
gemiddeld	6715	6580	102,1%
15 m/s (80 %)	10055 9902 9976	10071 9972 10043	
gemiddeld	9978	10029	99,5%

Tabel 2. Debietsbepalingen op de windtunnel

Instelling windtunnel	Debiet m³/h	V in referentie m/s	V gemiddeld m/s	V_{ref}/V_{gem}
0,1 %	2169	3,66	3,15	1,16
	2169	3,66	3,15	1,16
	2207	3,66	3,21	1,14
16 %	3569	5,92	5,19	1,14
	3547	5,92	5,16	1,15
	3547	5,92	5,16	1,15
45 %	6572	10,82	9,54	1,13
	6895	11,05	10,01	1,10
	6658	10,82	9,67	1,12
80 %	10045	16,20	14,56	1,11
	9892	15,99	14,34	1,12
	9966	16,20	14,45	1,12
Herhaling				
3 m/s	1895	2,74	3,07	1,12
	1904	2,75	3,07	1,12
	1918	2,77	3,06	1,10
5 m/s	2802	4,05	4,55	1,12
	2779	4,01	4,60	1,15
	2773	4,00	4,60	1,15
10 m/s	5990	8,65	9,70	1,12
	5994	8,65	9,68	1,12
	6022	8,69	9,72	1,12
15 m/s	9019	13,02	14,61	1,12
	9090	13,12	14,65	1,12
	8987	12,97	14,76	1,14

Conclusies

- Het verband tussen de snelheid bepaald met de referentiepitotbuis in het middelpunt, en de gemiddelde snelheid in 5 punten verdeeld over 2 diameters (tabel 2), waarmee het tunneldebiet wordt berekend, ligt tussen 1,10 en 1,16, en kan gemiddeld voor alle hier beschouwde snelheden worden benaderd door de factor 1,12
- het luchtdebiet door de windtunnel bij een vaste waarde van het ingesteld regime (toerental) varieert enigszins in functie van de omgevingsfactoren die de weerstand van het verplaatste luchtvolume beïnvloeden (openen van deuren van de kamer, afstand tussen obstakels en in- en uitgang van de tunnel enz...). Registratie van dit debiet via de registratie van de snelheid op het referentiepunt is daarom aangewezen.

2. Kalibratie van thermische sondes tegenover de referentie pitotbuis

2.1 Eerste kalibratie

Alle gebruikte hittedraadsondes werden gekalibreerd binnen het normale snelheidsbereik van de windtunnel tussen 3 tot 20 m/s zoals een pitotbuis. Volgens ISO 10780 norm kan dit voor een pitotbuis gebeuren bij 3 snelheden met telkens 3 herhalingen. Om inzicht te krijgen in het gedrag van de hittedraad anemometers is het beter een curve op te stellen bij verschillende snelheden over het volledige snelheidsbereik in vergelijking met de standaard pitotbuis.

De resultaten van deze kalibraties, uitgevoerd met 5 sondes op 8 snelheden, telkens met 3 herhalingen zijn weergegeven in tabel 3.

Tabel 3. Kalibratie van de hittedraad-anemometers tussen 3 en 20 m/s

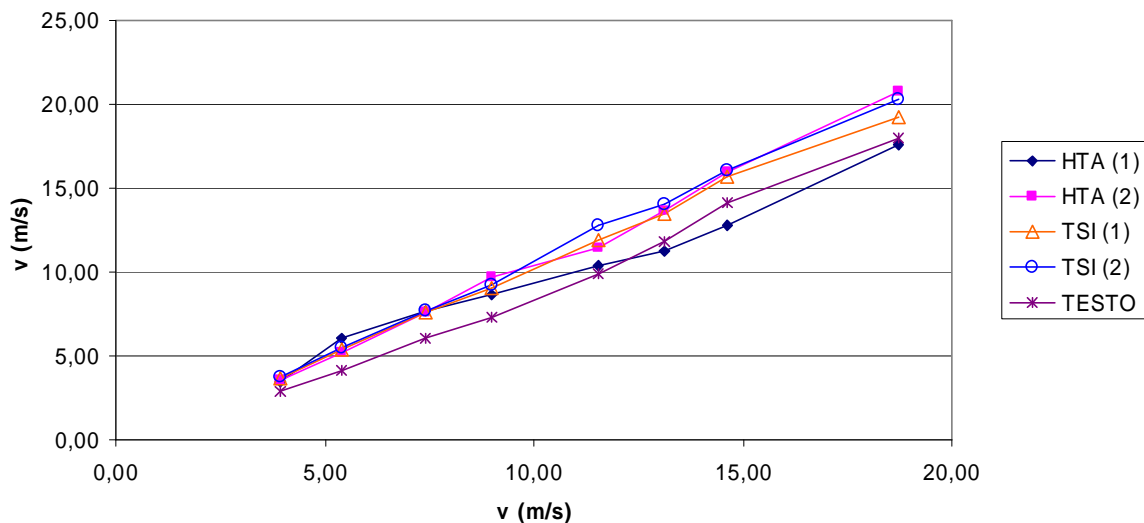
Cyclus 1	100%	70%	60%	50%	33%	23%	11%	1 %
	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
HTA (1)	17,62	12,80	11,29	10,43	8,63	7,70	6,10	3,47
HTA (2)	20,76	15,95	13,66	11,48	9,70	7,58	5,21	3,60
TSI (1)	19,20	15,70	13,50	11,95	9,05	7,55	5,40	3,70
TSI (2)	20,30	16,10	14,01	12,75	9,20	7,70	5,45	3,77
Testo 445	17,95	14,10	11,80	9,90	7,30	6,01	4,17	2,84
Std Pitot	18,72	14,63	13,14	11,53	9,01	7,43	5,42	3,94

Cyclus 2	100%	70%	60%	50%	33%	23%	11%	1 %
	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
HTA (1)	17,76	13,35	12,20	10,27	8,46	7,40	5,00	3,50
HTA (2)	20,70	16,10	13,36	11,87	9,30	7,26	4,96	3,78
TSI (1)	19,30	15,70	13,45	11,95	8,85	7,20	5,15	3,60
TSI (2)	20,20	16,10	14,10	12,80	9,10	7,40	5,20	3,64
Testo 445	17,90	14,10	12,10	10,70	8,35	6,72	4,87	3,35
Std Pitot	18,58	14,57	13,14	11,53	8,81	7,08	4,92	3,22

Cyclus 3	100%	70%	60%	50%	33%	23%	11%	1 %
	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
HTA (1)	17,93	13,25	12,20	10,02	8,84	7,34	4,97	3,46
HTA (2)	21,04	16,25	13,70	11,66	9,16	7,27	4,87	3,62
TSI (1)	19,30	15,70	13,60	11,95	8,95	7,35	5,30	3,55
TSI (2)	20,50	16,10	14,10	12,35	9,14	7,45	5,55	3,70
Testo 445	17,90	15,00	13,20	11,30	7,21	6,56	4,80	3,36
Std Pitot	18,81	14,69	13,14	11,53	8,62	7,08	4,92	3,22

De grafiek met de gegevens van cyclus 1 van deze kalibraties voor de vijf geteste sondes wordt weergegeven in figuur 7.

Kalibratie hittedraad-anemometers - cyclus 1



Figuur 7. Grafische voorstelling van kalibratie van 5 hittedraad-anemometers tegenover de standaard pitotbuis tussen 3 en 20 m/s in de windtunnel

Als kalibratievergelijking tussen de waarden van de pitotbuis (x) en die van de thermische anemometers (y) wordt een lineair verband aangenomen. Bij de lineaire regressie voor het bepalen van de kalibratielijnen werd zowel de algemene lineaire vergelijking:

$$y = a \cdot x + b$$

als de vergelijking met één constante:

$$y = A \cdot x$$

uitgetest, waarbij in het laatste geval de rechte door de oorsprong geforceerd wordt. Dit veronderstelt dat een nulnelheid steeds overeenkomt met een nulsignaal van het meettoestel, hetgeen hier het geval was voor alle toestellen. De berekende coëfficiënten en de correlatiecoëfficiënten van de regressie worden gegeven in tabel 4.

Tabel 4. Kalibratierechten van thermische sondes tussen 3 en 20 m/s (maart 2005)

	richtings- coëfficiënt a	intercept b	correlatie- coëfficiënt r²	A y = Ax	correlatie- coëfficiënt r²
HTA (1)	0,883	0,634	0,9867	0,9338	0,9827
HTA (2)	1,124	-0,652	0,9936	1,0725	0,9911
TSI (1)	1,043	-0,054	0,9975	1,0384	0,9975
TSI (2)	1,103	-0,266	0,9977	1,0814	0,9973
Testo 445	0,985	-0,524	0,9852	0,9437	0,9831

Bespreking kalibratierechten $y = ax + b$

Er wordt vastgesteld dat er behoorlijke verschillen bestaan tussen sondes van hetzelfde merk en type onderling en ook tussen sondes van verschillende makelij. Het betreft hier allemaal nieuwe sondes met een kalibratiecertificaat van de leverancier.

(Noot: weliswaar is geen van de certificaten afgeleverd door een officiële kalibratieorganisatie).

Het verschil tussen de richtingscoëfficiënten en 1 is een maat voor de systematische afwijking of de juistheid van de thermische sondes. Bij 3 van de 5 sondes bedraagt de afwijking van de richting in absolute waarde meer dan 10 %.

Echter, het intercept of het afgesneden stuk op de y-as, dat theoretisch nul zou moeten zijn, is dit bij benadering slechts bij één sonde, namelijk bij TSI(1) met $b = -0,045$. Voor de overige sondes blijkt dat een negatief intercept ($b < 0$) overeenkomt met $a < 1$ en een positief intercept ($b > 0$) met $a > 1$, met andere woorden het intercept compenseert voor de afwijking van de richtingscoëfficiënt van 1. Een gevolg hiervan is dat de ijkingen op hogere snelheid leiden tot onbruikbare resultaten bij de lage snelheid, terwijl de sondes hoofdzakelijk bij deze lagere snelheden dienen gebruikt te worden.

De regressiecoëfficiënten liggen voldoende dicht bij 1 om aan te nemen dat een lineaire benadering van de respons van de anemometers aanvaardbaar is. Bij de beoordeling op zicht wordt vastgesteld dat één sonde namelijk HTA(1) een duidelijk S-vormig gebogen ijkcurve lijkt te vertonen (figuur 7).

Bij deze ijkingen dient echter steeds bemerkt dat er een zekere spreiding op de resultaten ontstaat, zowel op x als op y –waarden, tengevolge van onzekerheidsfactoren, zoals meetonzekerheid (o.m. gevolg van foutjes bij de positionering van de sonde, van afleesfouten enzovoort), maar ook variaties van de windtunnel door omgevingsomstandigheden. De variaties veroorzaakt door deze effecten maakt het onmogelijk afwijkingen van enkele percenten met zekerheid te detecteren. Daarom wordt hier niet verder ingegaan op het al dan niet lineair zijn van de hittedraad-sondes.

Bespreking kalibratievergelijkingen $y = Ax$

De correlatie zonder constante, of met zero-intercept is weergegeven in de twee laatste kolommen van tabel 4.

De correlatiecoëfficiënten zijn in dit geval iets kleiner, maar de verschillen zijn vrij gering.

De belangrijkste vaststelling is echter dat alle richtingscoëfficiënten, behalve voor Testo, nu aanzienlijk dichter bij 1 liggen.

Zeer lage snelheden niet goed kunnen worden gesimuleerd, maar vooral kunnen ze niet goed worden gemeten. Wel wordt vastgesteld dat alle anemometers zoals verwacht een nul-uitlezing geven in stilstaande lucht.

Dit is een reden te meer om de kalibratievergelijking $y = Ax$ te gebruiken.

Thermische anemometers worden bij voorkeur gekalibreerd volgens de kalibratievergelijking $y = A \cdot x$ en niet volgens de vergelijking $y = a \cdot x + b$

2.2 Stabiliteit van de kalibratie

De kalibratie van de hittedraad-anemometers werd op dezelfde manier als hierboven herhaald in december 2005. De gegevens en de bekomen kalibratievergelijkingen worden gegeven in tabel 5 en tabel 6.

Er worden afwijkingen tegenover de eerste kalibraties vastgesteld. Voor enkele sondes, namelijk HTA(1) en Testo 445 blijken deze afwijkingen groter dan 10%.

Tabel 5. Kalibratie van de hittedraad-anemometers tussen 3 en 20 m/s (december 2005)

Cyclus 1	100 %	70 %	60 %	50 %	33 %	23 %	11 %	1 %
	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
HTA (1)	20,41	17,29	14,90	12,97	9,54	6,84	5,15	3,21
HTA (2)	21,13	16,55	14,72	12,15	10,46	7,60	5,43	3,74
TSI (1)	20,80	17,90	14,50	12,70	9,85	8,10	5,85	3,65
TSI (2)	21,90	17,90	15,30	13,70	10,50	8,20	5,65	3,59
Testo 445	14,40	11,48	10,35	9,01	6,75	5,40	4,06	2,49
Std Pitot	19,88	17,60	14,10	12,38	9,20	7,50	5,38	3,36
Pstat (Pa)	-650	-420	-330	-255	-150	-100	-50	-21

Cyclus 2	100 %	70 %	60 %	50 %	33 %	23 %	11 %	1 %
	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
HTA (1)	21,85	17,16	14,79	12,20	9,28	7,15	5,19	3,14
HTA (2)	21,36	16,84	14,83	13,02	9,88	7,80	4,86	3,57
TSI (1)	20,50	16,70	14,50	12,90	9,85	8,10	5,65	3,69
TSI (2)	20,80	16,90	15,30	13,50	10,70	8,35	5,75	3,73
Testo 445	13,74	11,24	10,06	8,72	6,47	5,42	3,89	2,51
Std Pitot	19,84	15,90	14,12	12,30	9,31	7,50	5,29	3,32

Cyclus 3	100 %	70 %	60 %	50 %	33 %	23 %	11 %	1 %
	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
HTA (1)	21,95	17,40	14,93	12,64	10,04	7,53	4,78	3,40
HTA (2)	22,66	17,85	15,68	12,97	9,34	6,82	5,39	3,71
TSI (1)	21,20	17,30	14,80	13,10	10,00	8,20	5,75	3,70
TSI (2)	21,90	17,60	15,80	13,50	10,60	8,40	5,95	3,73
Testo 445	14,10	11,65	10,40	9,23	6,81	5,52	3,96	2,56
Std Pitot	19,90	15,99	14,22	12,44	9,45	7,70	5,38	3,27

Tabel 6. Kalibratierechten van thermische sondes tussen 3 en 20 m/s (december 2005)

model:	y = ax + b			y = Ax	
	richtings- coëfficiënt a	intercept b	correlatie- coëfficiënt r ²	A	correlatie- coëfficiënt r ²
HTA (1)	1,219	-1,174	0,9925	1,0447	0,9898
HTA (2)	1,207	-0,853	0,9929	1,0559	0,9842
TSI (1)	1,137	-0,100	0,9942	1,0482	0,9980
TSI (2)	1,180	-0,130	0,9947	1,0857	0,9955
Testo 445	0,768	-0,004	0,9953	0,7125	0,9939

3. Kalibratie van de vleugelradanemometer

De vleugelrad anemometer werd in de windtunnel gekalibreerd door vergelijking met de standaard pitotbuis. Aangezien het rad met handvat een relatief groot geprojecteerde oppervlak heeft van 0,015 m³, hetgeen overeenkomt met ongeveer 10 % van de doorsnede van de windtunnel (0,16 m²), is niet voldaan aan de voorwaarde voor kalibratie in de windtunnel volgens ISO 10780. Deze norm stelt dat voor kalibratie van een pitotbuis en/of sonde, de geprojecteerde oppervlakte niet meer dan 3 % van de doorsnede van de tunnel mag innemen. Bijgevolg dient een compromis gezocht en kan de kalibratie op 2 manieren worden doorgevoerd:

1. Simultaan, met de standaard pitotbuis parallel gemonteerd naast het schroefrad, dat zich in het middelpunt van de tunnel bevindt. Deze optie heeft het voordeel dat de beide instrumenten tegelijkertijd meten, maar als nadeel dat een relatief groot oppervlakte van de windtunnel in beslag wordt genomen, waardoor de stroming dient uit te wijken en te versnellen, en bovendien dat de pitotbuis enkele centimeter uit de buurt van het rad dient te blijven en dus niet in het midden en niet op hetzelfde punt zit als het schroefrad
2. Om beurt een meting met de standaardpitotbuis en met het vleugelrad. Deze optie heeft als voordeel dat op exact hetzelfde punt kan worden gemeten in het midden van de tunnel, maar anderzijds is er geen simultane meting (hetgeen wordt gecompenseerd door de stabiliteit van de windtunnel die volgens ISO 10780 binnen de 1 % dient te liggen) en is het effect van de verschillende ingenomen oppervlakte niet gelijk bij referentiemeting en kalibratie.

De bekomen kalibratieresultaten zijn samengevat in tabel 7 en figuur 8.

Bij elke snelheid werden 6 bepalingen verricht, en de tabel 7 geeft de gemiddelden telkens met de bijhorende standaardafwijkingen. Uit de cijfers in de laatste kolom wordt vastgesteld dat de snelheid in de windtunnel door de aanwezigheid van het vleugelrad wordt verhoogd, tot 6 - 7 % bij de hoogste snelheden. Daarom wordt ervoor gekozen als beste benadering

van de referentiesnelheid $V_{ref, s}$ te nemen, dit is de referentiewaarde waarbij het rad simultaan met de referentie pitotbuis in de tunnel aanwezig is.

Tabel 7. Samenvatting van kalibratiedata van de Testo vleugelrad anemometer

$V_{ref, 0}$ Ref. pitot alleen	$V_{ref, S}$ Simultaan rad n = 6	V_{rad} n = 6	$V_{ref, S}/V_{ref, 0}$
m/s	m/s	m/s	
0,0	0,0 ± 0,00	0,0 ± 0,00	
2,4	2,5 ± 0,01	2,7 ± 0,01	1,026
3,2	3,1 ± 0,03	3,3 ± 0,01	0,995
3,6	3,7 ± 0,07	4,0 ± 0,05	1,043
4,5	4,7 ± 0,06	5,0 ± 0,06	1,060
5,3	5,7 ± 0,06	6,0 ± 0,05	1,064
6,3	6,6 ± 0,07	6,9 ± 0,10	1,058
9,3	9,7 ± 0,04	10,0 ± 0,11	1,052
11,4	12,2 ± 0,12	12,4 ± 0,24	1,070
13,7	14,5 ± 0,18	14,9 ± 0,09	1,062

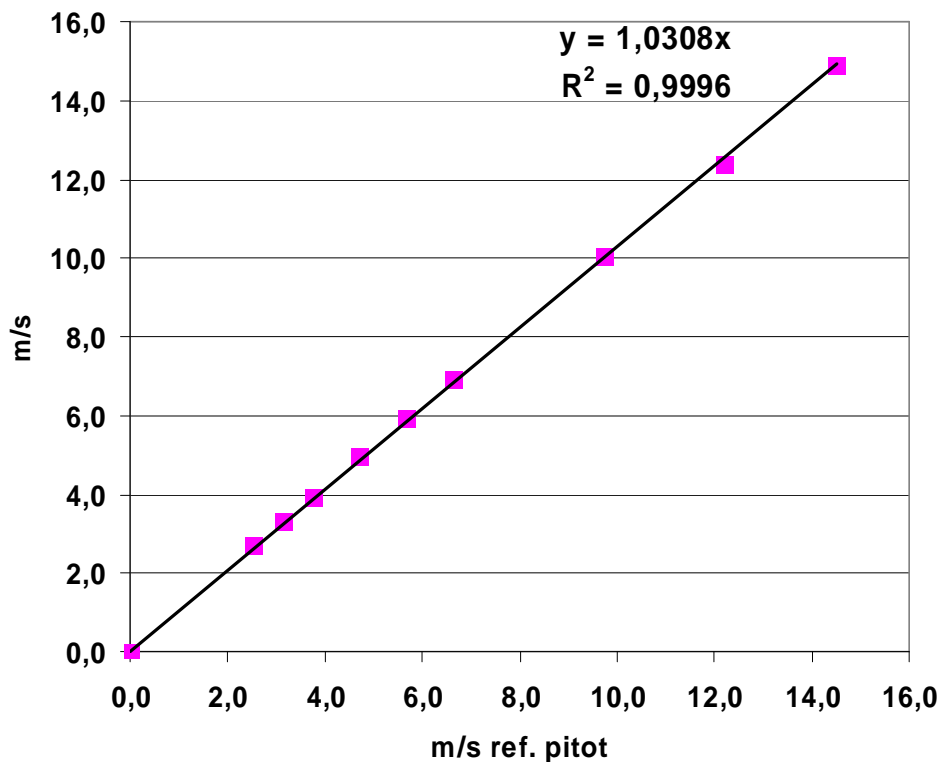
Tabel 8. Kalibratierechten van vleugelrad anemometer tussen 0 en 15 m/s

Referentie snelheid	$y = ax + b$			$y = Ax$	
	richtings- coëfficiënt a	intercept b	correlatie- coëfficiënt r^2	A	correlatie- coëfficiënt r^2
Simultaan	1,018	0,119	0,9998	1,031	0,9996
Beurtelings	1,089	0,033	0,9997	1,093	0,9997

Van de twee mogelijke vormen van de kalibratierechte $y = ax + b$ of $y = Ax$, wordt de voorkeur gegeven aan de laatste. Als referentiesnelheid x wordt de simultaan gemeten snelheid met de referentie pitotbuis genomen, omdat die als meest realistisch wordt aanzien. De meest realistische ijklijn is dan in figuur 8 gegeven. De respons van de schroefrad anemometer blijkt dus zeer lineair te zijn in het geteste gebied, en de gemiddelde afwijking van 3% van de rechte $y = x$ is voldoende laag om deze schroefrad anemometer zonder correctie op de aflezing te gebruiken.

Een ander besluit uit deze kalibraties is ook dat het handvat van de schroefrad anemometer een ruimtelijk obstakel is dat een goede kalibratie in de weg staat. Bij de meest recente versies van vele leveranciers is de afleeseenheid bovendien vast aangebouwd aan de turbine, hetgeen de ingenomen oppervlakte in de stroming en vandaar ook de luchtweerstand nog drastisch verhoogt.

Volgens ISO 10780 kunnen dergelijke toestellen alleen in zeer grote windtunnels worden gekalibreerd.



Figuur 8. Kalibratie van vleugelrad anemometer Testo tegenover standaard pitotbuis (simultaan) tussen 0 en 15 m/s in de windtunnel

Meetbereik

Het door de fabrikant opgegeven meetbereik van de Testo vleugelrad anemometer is 0,25 tot 30 m/s.

De laagste aflezing op het scherm is 0,23 m/s en dit komt overeen met de snelheid waarbij het rad begint te draaien. Lagere windsnelheden kunnen de schroef niet in beweging zetten en zijn dus niet detecteerbaar.

Bij snelheden van 20 m/s en hoger begint het rad lawaai te maken, en wordt een te lage snelheid afgelezen. Praktisch dient het meetbereik dus beperkt tot 15 m/s.

De laagste snelheden kunnen niet goed worden gekalibreerd met de windtunnel omdat de pitotbuis onnauwkeurig wordt beneden 2 m/s. Het nulpunt werd bij de kalibratierechten mee gemeten, maar tussen 0 en 2,5 m/s ontbreken kalibratiegegevens.

Meetonzekerheid op windsnelheid

De belangrijkste factoren in de meetonzekerheid bij het bepalen van een individuele gassnelheid met een vleugelradanemometer zijn:

- de onzekerheid op de referentiesnelheid (tunnel + standaard pitotbuis); deze is van de orde van 10 % bij de laagste snelheid en 2-3 % bij de hoogste snelheden
- de systematische kalibratie-afwijking indien deze niet in rekening wordt gebracht (wat gewoonlijk het geval is). Deze afwijking bedraagt volgens de kalibratierechte gemiddeld 3,1 % in het interval van 0 tot 15 m/s, met waarden die variëren van 8 % bij 2,5 m/s tot 2 à 3 % bij de hoogste snelheden

Samengevat bedraagt de meetonzekerheid op een snelheid gemeten met de vleugelrad anemometer in een ideale gasstroom, van ongeveer 3 % bij 15 m/s tot 13 % bij snelheden rond 2,5 m/s (en hoger bij lagere snelheden)

4. Uitdrukkingswijze van gasdebieten bij diffuse emissies

Bij diffuse emissies treden er in het algemeen geen grote temperatuur- of drukverschillen op bij metingen op verschillende plaatsen en tijdstippen - in tegenstelling tot geleide emissies door schouwen. Het is daarom gebruikelijk de debieten uit te drukken in reële omstandigheden (m^3/h) en geen correcties voor temperatuur, druk en watergehalte toe te passen. Zonder bijkomende specificaties neemt men aan dat de standaardomstandigheden 293 K en 1013 mbar zijn.

De uitdrukking van de gasdebieten moet in principe op dezelfde basis gebeuren als de concentratiemetingen, zodat het product van beide de correcte emissiestroom oplevert. Concentratiemetingen voor industriële hygiëne of met PID of passieve samplers worden over het algemeen bij reële omstandigheden gerapporteerd. Bij FID, dat een verwarmd toestel is worden de resultaten soms in mg/Nm^3 uitgedrukt, hetgeen dan ofwel dient omgerekend, ofwel met een debiet in Nm^3/h vermenigvuldigd om de massastroom te bekomen.

Wanneer het temperatuurverschil tussen twee gelijke volumestromen lucht 10 °C bedraagt, dan is er een verschil van 3,5 % in massastroom. Gezien de beperkte nauwkeurigheid van de debietsbepaling is deze afwijking verwaarloosbaar en is het in algemeen niet nodig de volumestromen om te rekenen naar normaalomstandigheden.

Bij grotere temperatuurverschillen kan het aangewezen zijn temperatuurscorrecties door te voeren en de volumestromen om te zetten naar dezelfde omstandigheden. Dit is bijvoorbeeld het geval wanneer voor berekeningen van de luchthuishouding koude en warme luchtstromen dienen samengeteld of afgetrokken. In de winter wanneer het temperatuurverschil tussen binnen en buiten meer dan 20 °C kunnen hierdoor fouten van meer dan 7 % ontstaan, en is bijgevolg een correctie aangewezen.

Correcties voor watergehalte worden in het algemeen niet toegepast bij metingen van diffuse emissies. Het watergehalte van de lucht bedraagt in onze streken meestal niet meer dan 2,5 % (80 % relatieve vochtigheid bij 25 °C) en varieert binnen één dag zelden meer dan 1%.

5. Responstijd en uitmiddelingstijd

5.1 Testen in windtunnel

De responstijd van een thermische sonde of een pitotbuis is niet eenvoudig te bepalen omdat het niet mogelijk is een luchtstroom te genereren die absoluut stabiel is in de tijd.

De windtunnel werkt steeds in het turbulente regime, en dit geldt ook voor de meeste praktische toepassingen waarbij luchtstromen dienen gemeten. De referentie luchtstroom vertoont dus inherent willekeurige schommelingen op zeer korte termijn (< 1 seconde). Op iets langere termijn ontstaan ook schommelingen door externe invloedsfactoren zoals

temperatuur, drukschommelingen in het lokaal, weerstanden in de luchtstroom (in, vóór en na de windtunnel), netspanning....

Deze combinatie van onstabiele toestanden maakt het onmogelijk de responstijd van een sonde te bepalen door onderzoek van de respons na een plotse snelheidswijziging (T_{90} of T_{10} bepalingen).

De responstijd wordt daarom afgeleid uit parallelmetingen op de windtunnel en het meest geschikt uitmiddelingsinterval wordt empirisch bepaald bij enkele windsnelheden.

Voor metingen in kanalen wordt standaard een 2-minuutsgemiddelde bepaald op elk punt. Aangezien dit in de praktijk door "visuele" integratie gebeurt, heeft de strikte duur van de periode weinig betekenis. De uitmiddelingsperiode dient steeds een veelvoud ($> 5 \times$) te zijn van de responstijd van het meettoestel.

In de praktijk stellen we vast dat de responstijd bij snelheidsmetingen, zowel van pitotbuis als van thermische anemometers van de grootteorde van enkele seconden is, en dat fluctuaties in de stroom over periodes van seconden kunnen worden waargenomen. Dit wordt verder experimenteel gestaafd.

Thermische anemometers kunnen in principe veel sneller reageren dan pitotbuizen, en dus kortere middelingstijden gebruiken.

Figuur 9 toont een parallelle meting met de referentie pitotbuis en een thermische anemometer. De pitotbuis is verbonden met een elektronische manometer die elke 20 seconden een gemiddelde geeft. De thermische anemometer werd op 2 seconden uitmiddelingsperiode ingesteld en de uitlezingen werden manueel genoteerd.

De beide registraties zijn weergegeven in een periode van 240 seconden gedurende dewelke in de windtunnel ook een geringe korte-termijn drift werd geïnduceerd. Hierdoor wordt aangetoond dat de beide meetsystemen voldoende snel reageren op deze fluctuaties, aangezien ze hetzelfde patroon van fluctuaties weergeven (NB: de figuur geeft geen correct beeld van de stabiliteit van de windtunnel).

In tabel 9 worden de snelheidsmetingen in de windtunnel met de TSI(2) thermische anemometer voor 3 m/s en 10 m/s (resultaten genoteerd om de 2 seconden) uitgemiddeld over 30 seconden en over 1 minuut. Uit de vergelijking van beide middelingstijden blijkt het grootste waargenomen verschil tussen 30 seconden- of 1-minuutwaarden voor dezelfde periode maximaal 0,03 m/s te bedragen. Dit verschil wordt nog hoofdzakelijk toegeschreven aan drift van de windtunnel, aangezien de resultaten bij 3 m/s werden bekomen voor de periode met abnormale drift die in figuur 9 is weergegeven.

Besluit hieruit is dat 30 seconden uitmiddelingsperiode zeker voldoende is bij gebruik van deze thermische anemometer in een stabiele luchtstroom.

Voor de vleugelradanemometer bedraagt de responstijd minder dan 5 seconden. De responstijd wordt hier praktisch uitsluitend bepaald door de inertie van het rad. Deze inertie bewijst ook haar nut bij het dempen van korte-termijnschommelingen, en leidt tot minder wisselvallige aflezingen bij diffuse emissies met lage gassnelheden.

Tabel 9. Snelheidsmeting op de windtunnel op 3 en 10 m/s met thermische anemometer: uitmiddeling over 30 seconden en 1 minuut leidt tot hetzelfde resultaat

Windtunnel instelling 3 m/s 30 seconden gemiddelden			minuutsgemiddelden		
gem	st. afw.	st. afw.	gem	st. afw	st. afw.
m/s	m/s	%	m/s	m/s	%
3,76	0,02	0,54			
3,75	0,01	0,33	3,76	0,02	0,45
3,71	0,02	0,46			
3,72	0,01	0,32	3,72	0,01	0,40
3,69	0,01	0,33			
3,70	0,03	0,77	3,70	0,02	0,60
3,71	0,04	0,95			
3,66	0,02	0,55	3,69	0,04	1,06

Windtunnel instelling 10 m/s 30 seconden gemiddelden			minuutsgemiddelden		
gem	st. afw.	st. afw.	gem	st. afw	st. afw.
m/s	m/s	%	m/s	m/s	%
9,90	0,05	0,47			
9,90	0,05	0,49	9,90	0,05	0,47
9,89	0,02	0,21			
9,89	0,03	0,34	9,89	0,03	0,28
9,92	0,03	0,26			
9,86	0,04	0,45	9,89	0,05	0,46
9,86	0,03	0,30			
9,86	0,03	0,30	9,86	0,03	0,30

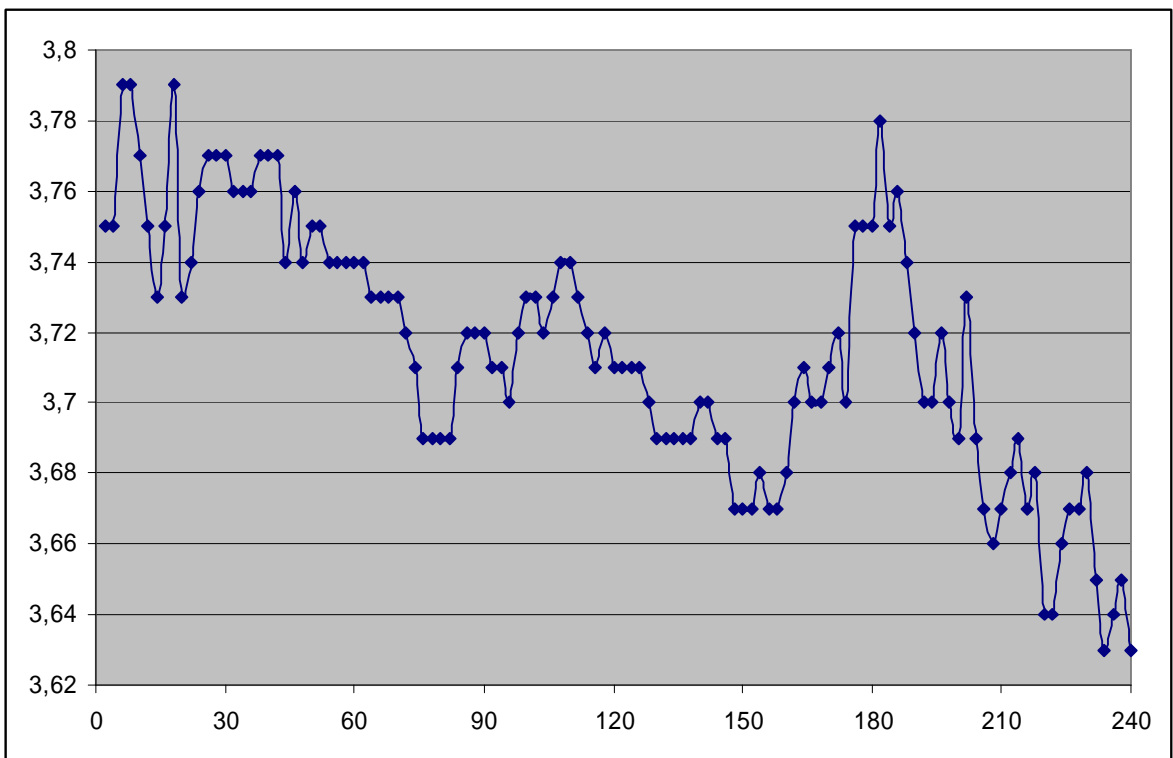
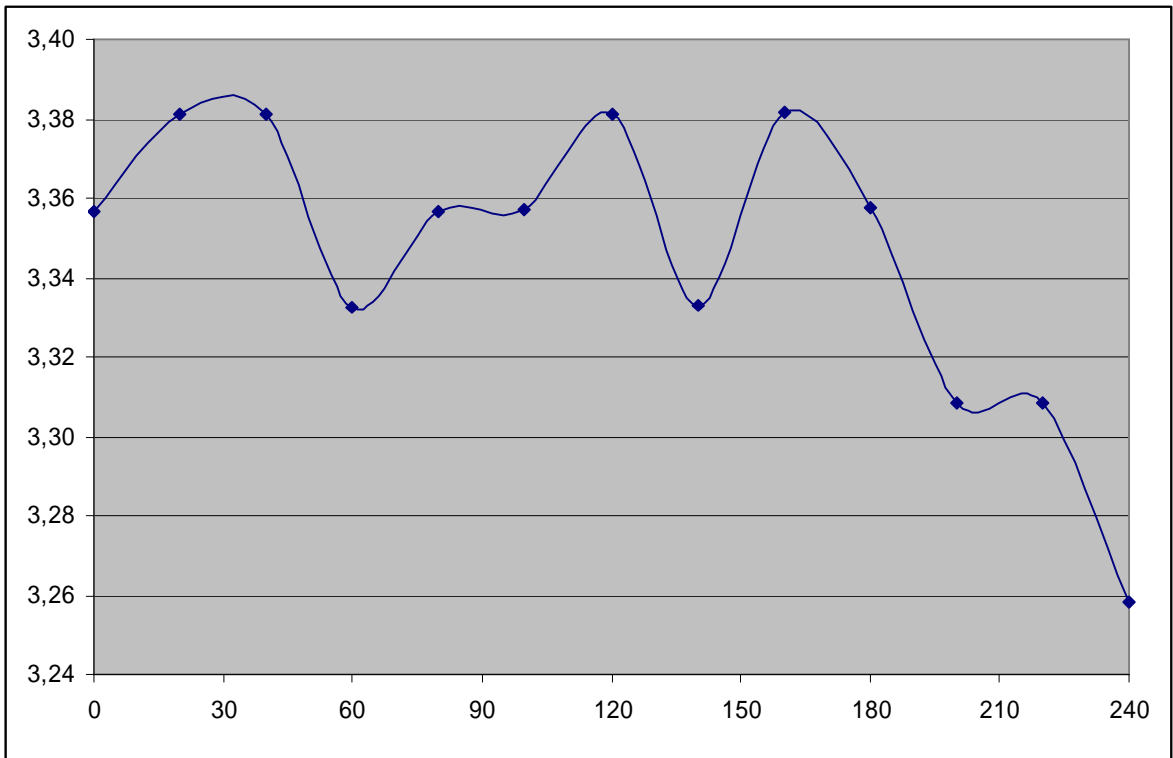
5.2 Uitmiddelingstijd bij diffuse emissies

Bij diffuse emissies die uit grotere openingen ontsnappen is de stromingsnelheid in het algemeen lager dan bij geleide emissies, en op een gegeven meetpunt minder stabiel in de tijd.

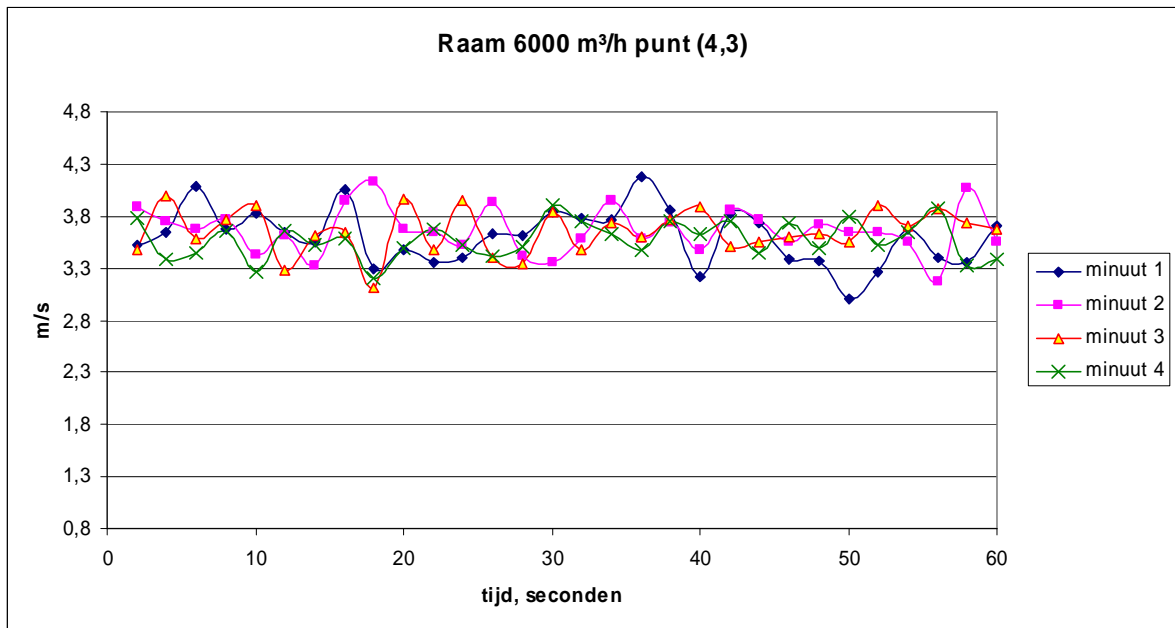
De uitmiddelingstijd zal in dit geval meer bepaald worden door de schommelingen van de te meten luchtstroom zelf.

De testen werden uitgevoerd bij debieten van 2000 m³/h en 6000 m³/h door een rechthoekig raam, telkens op een drietal meetpunten.

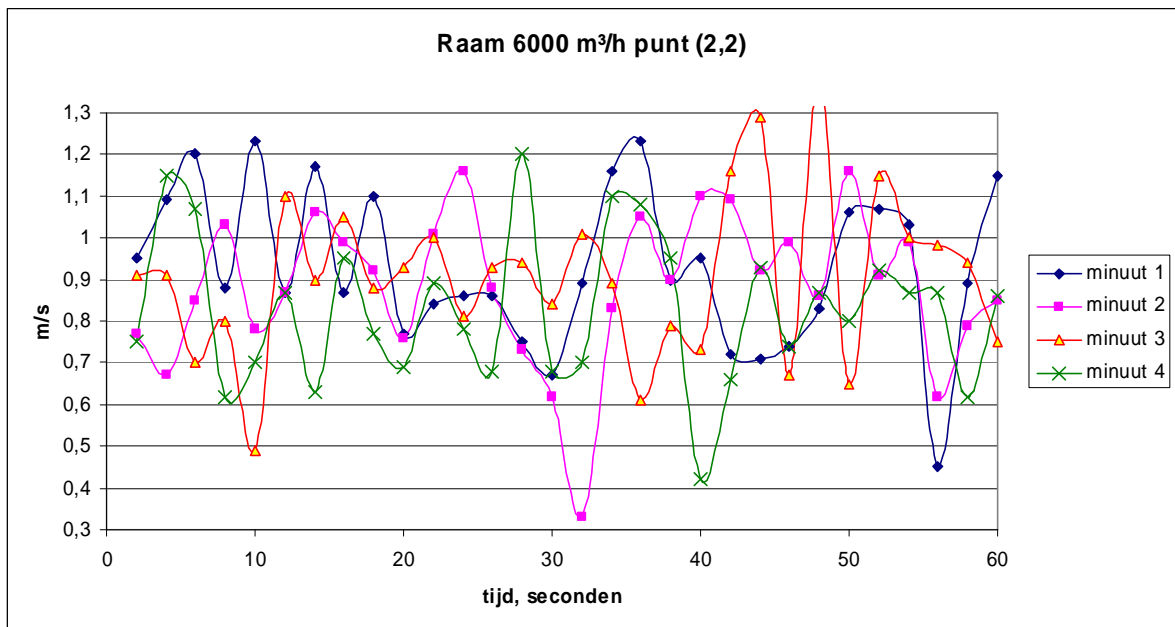
De meetwaarden van de thermische anemometer werden per 2 seconden genoteerd en uitgezet in functie van de tijd. Voor 4 opeenvolgende minuten werden de minuutswaarden berekend (tabel 10) en in grafiek (figuur 10 en 11) uitgezet.



Figuur 9. Vergelijking van snelheid (m/s) gemeten door referentie pitotbuis met uitmiddelingstijd 20 s (boven) en thermische anemometer TSI(2) per 2 s in windtunnel



Figuur 10. Vier achtereenvolgende minuutswaarden bepaald met thermische anemometer in zelfde meetpunt bij luchtstroom door rechthoekig raam (3,61-3,66-3,65-3,58 m/s)



Figuur 11. Vier achtereenvolgende minuutswaarden bepaald met thermische anemometer in zelfde meetpunt bij luchtstroom door rechthoekig raam (0,93-0,88-0,91-0,83 m/s)

Tabel 10. Opeenvolgend gemeten minuutswaarden bij uitstroom door een raam

Debiet 6000 m ³ /h	minuut 1	minuut 2	minuut 3	minuut 4
Punt (2,1)				
snelheid, m/s	1,83	1,85	1,85	1,90
stand. afw., m/s	0,22	0,21	0,17	0,20
% stand. afw.	12,3	11,1	9,2	10,5
Punt (2,2)				
snelheid, m/s	0,93	0,88	0,91	0,83
stand. afw., m/s	0,19	0,18	0,19	0,18
% stand. afw.	20,4	20,4	21,5	21,7
Punt (3,4)				
snelheid, m/s	3,61	3,66	3,65	3,58
stand. afw., m/s	0,27	0,22	0,22	0,18
% stand. afw.	7,5	6,1	5,9	4,9

Debiet 2000 m ³ /h	minuut 1	minuut 2	minuut 3	minuut 4
Punt (2,1)				
snelheid, m/s	0,61	0,58	0,57	0,57
stand. afw., m/s	0,11	0,08	0,09	0,09
% stand. afw.	17,2	14,1	15,3	15,8
Punt (2,2)				
snelheid, m/s	0,37	0,32	0,38	0,36
stand. afw., m/s	0,07	0,08	0,10	0,07
% stand. afw.	19,5	24,4	27,1	20,4
Punt (3,4)				
snelheid, m/s	1,53	1,55	1,51	1,53
stand. afw., m/s	0,15	0,14	0,13	0,13
% stand. afw.	9,8	9,1	8,5	8,3

De 12 punten waarop de snelheden werden gemeten liggen op 3 assen, en de voorstelling (4,3) zijn de (x,y) coördinaten, kijkend in de richting van de stroom, en met (0,0) links onderaan.

De relatieve standaardafwijkingen op de gemeten snelheden werden berekend op basis van de 30 metingen gedurende 2 seconden. Deze standaardafwijkingen, die in de windtunnel meestal beneden 0,5 % liggen, hebben hier waarden tussen 5 en 27 %, waarbij de hoogste relatieve waarde optreedt bij de laagste snelheden. Deze standaardafwijking is overwegend een maat voor de onstabiele van de stroming.

Uit tabel 10 volgt dat de vier opeenvolgende minuutsgemiddelden in alle situaties weinig verschillende resultaten opleveren. Bijgevolg is 1 minuut zeker een aanvaardbare uitmiddelingstijd bij de meting. Uit de figuren blijkt dat de schommelingen van de snelheid een periode van 5 - 6 seconden hebben, zodat er ongeveer 10 gehele periodes per minuut worden opgenomen.

In principe zijn 5 dergelijke periodes voldoende en kunnen ook halve-minuutswaarden nog worden toegepast.

Bij meting van debieten van diffuse emissies door roosters en ramen kunnen korte tijdsgemiddelden van 30 seconden worden toegepast. Bij een luchtstroom die constant blijft in de tijd geeft dit vrijwel hetzelfde resultaat als minuuts- en tweeminuutsgemiddelden

6. Onderzoek naar effect van hoek met de stroming

6.1 Onderzoek naar effect van draaihoek of “yaw” van de thermische sondes

Van de drie geteste types werd telkens 1 exemplaar gekozen om de hoekafhankelijkheid te onderzoeken in de windtunnel. De snelheden van 3 m/s en 10 m/s werden gegenereerd in de windtunnel en de sonde werden op het middelpunt geïnstalleerd en voorzien van een schaal waarop de hoeken konden worden afgelezen.

De testen met verdraaiing van de sondes om de lengte-as werden uitgevoerd tussen 0° tot 90° met standen om de 15°. Aangezien de sondes symmetrisch zijn werden er geen testen uitgevoerd met negatieve draaihoeken. De grafiek tussen -90° en 0° is het spiegelbeeld van die tussen 0° en 90°.

De experimentele gegevens zijn samengevat in tabel 11 en figuur 12.

Tabel 11. Effect van de draaihoek (yaw) op de respons van drie hittedraad anemometers bij 3 en 10 m/s

Yaw	Höntzsch		TSI		Testo	
	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
0°	3,58	11,24	3,32	10,5	2,27	6,87
15°	3,56	11,67	3,34	11,2	2,4	7,47
30°	3,62	13,52	3,24	11,2	2,66	8,51
45°	3,38	11,76	3,25	9,85	0,64	1,65
60°	0,64	6,3	0,42	1,07	0,47	1,2
75°	0,54	4,53	0,15	0,71	0,14	0,7
90°	0,57	1,41	0,2	1,2	0,14	0,73
Referentie	3,3 m/s	10,5 m/s	3,4 m/s	10,0 m/s	3,4 m/s	10,0 m/s

Uit de resultaten in tabel 11 en figuur 12 kunnen de volgende conclusies getrokken worden in verband met de draaihoek van de hittedraadanemometers:

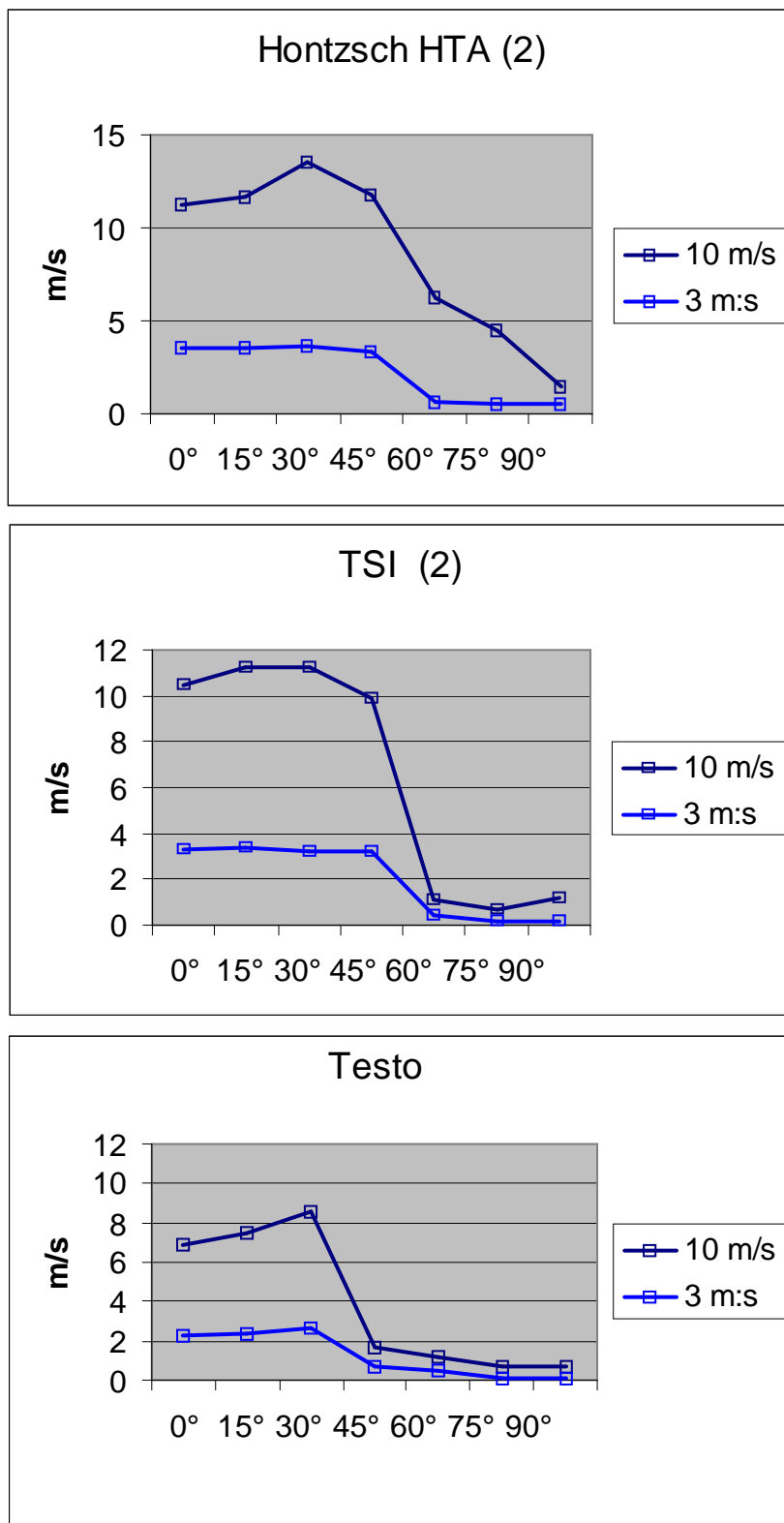
- geen van de drie geteste sondes vertoont het ideale gedrag van een geleidelijk afnemende gemeten snelheid volgens de cosinuscurve $v_{\text{eff}} = v \cdot \cos \alpha$ (figuur 5); in

werkelijkheid komt alleen bij Testo de montage van de hittedraad overeen met de definitie van de draaihoek volgens figuur 4.

- er wordt een schijnbare toename van gemeten snelheid vastgesteld bij gedraaide sondes tot 30° ; dit effect is meest uitgesproken bij de hogere windsnelheid van 10 m/s
- bij grotere draaihoeken dan 60° daalt de gemeten waarde sneller dan theoretisch verwacht en wordt nauwelijks nog een snelheid gemeten.

De verklaring waarom schijnbaar hogere snelheden kunnen worden gemeten met een licht gedraaide sonde wordt gevonden in een toename van de turbulentie als gevolg van de scherpe rand van de uitsparing aan de tip van de sonde (zie figuur 2). Indien deze rand een hoek maakt met de stroming, dan ontstaat er een wervel die over het verwarmd element stroomt. Hierdoor neemt de turbulentie toe en daardoor stijgt de warmte-overdrachtscoëfficiënt, hetgeen door het meetsysteem wordt omgerekend naar een hogere gassnelheid.

Dat bij grotere draaihoeken van de sondes een sterkere afname dan theoretisch wordt gemeten vindt zijn verklaring in het feit dat de omhulsels van de sonde vanaf een bepaalde hoek effectief de windstroming over de hittedraad afschermen.



Figuur 12. Meting van effect van de draaihoek (yaw) op snelheidsmeting met drie types van thermische anemometers bij 3 en 10 m/s

6.2 Onderzoek naar effect van helling of “pitch” van de thermische sondes

Dezelfde drie geteste types van anemometer werden onder dezelfde omstandigheden getest voor het onderzoek naar het effect van een afwijkende pitch hoek op de snelheidsmeting bij snelheden van 3 m/s en 10 m/s. De hellingshoek is beperkt tussen -45° en $+45^\circ$, omdat de sonde niet onbeperkt in de meetopening kan bewegen, en omdat de sonde dient vooruitgeschoven met een lengte $D/(2 \cdot \cos \alpha)$ - met D = diameter windtunnel en α de hellingshoek - om de tip van de sonde in het midden van de windtunnel te houden.

De metingen werden verricht op posities om de 15° en de resultaten zijn weergegeven in tabel 12 en figuur 13.

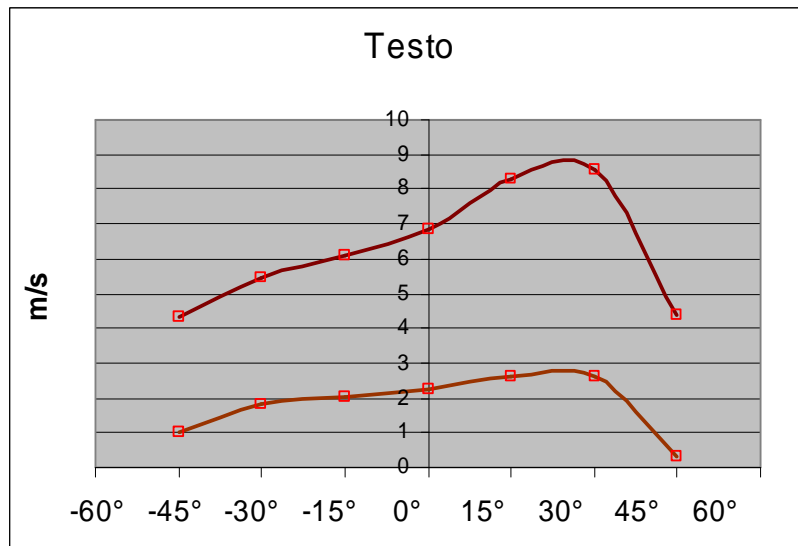
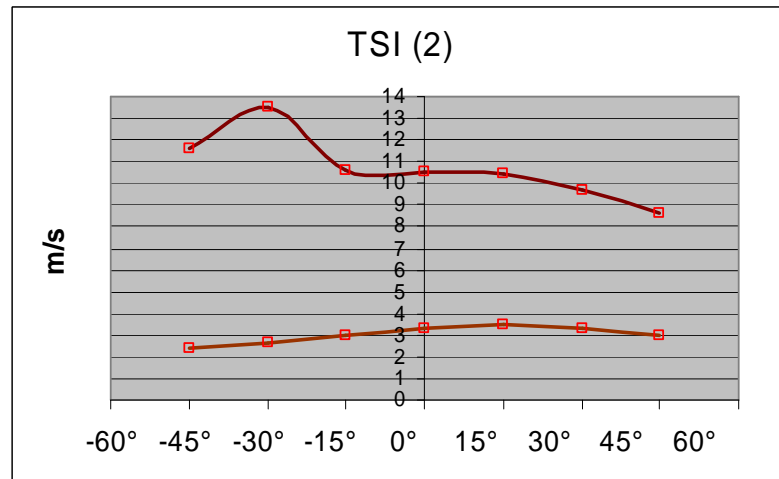
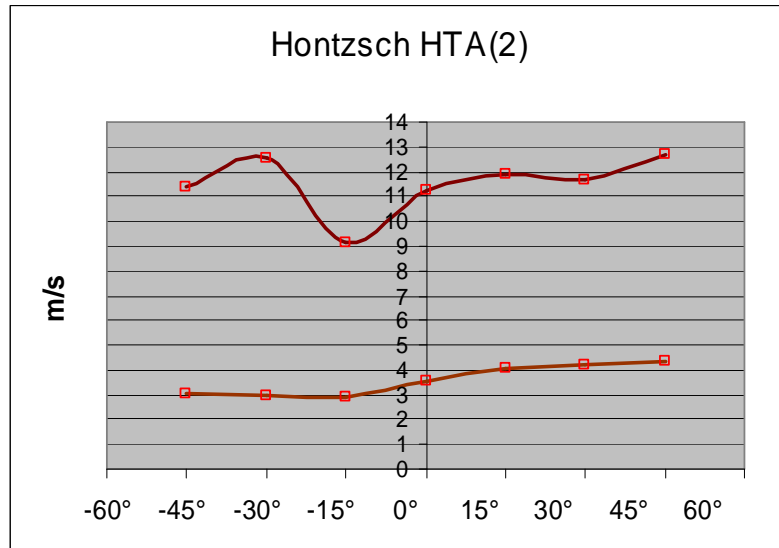
Tabel 12 Effect van de hellingshoek (pitch) op de respons van drie hittedraadanemometers bij 3 en 10 m/s

Pitch	Höntzsch		TSI		Testo	
	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
-45°	3,08	11,41	2,42	11,6	1,01	4,34
-30°	3,01	12,52	2,67	13,5	1,8	5,46
-15°	2,88	9,17	2,99	10,6	2,03	6,11
0°	3,58	11,24	3,32	10,5	2,27	6,87
15°	4,08	11,90	3,51	10,4	2,63	8,28
30°	4,21	11,68	3,31	9,70	2,64	8,58
45°	4,37	12,69	2,97	8,60	0,31	4,37
Referentie	3,3 m/s	10,5 m/s	3,3 m/s	10,0 m/s	3,2 m/s	10,0 m/s

De belangrijkste conclusies van dit onderzoek zijn:

- geen van de thermische anemometers vertoont een correcte respons wanneer de luchtstroom niet loodrecht invalt op de lans, maar daarmee een hellingshoek (pitch) vormt. Alle sondes geven in de één of andere hellingsrichting een stijging van de gemeten snelheid
- alle sondes vertonen een asymmetrische respons op de pitch-hoek
- de afwijkingen van de gemeten snelheid door een afwijkende hellingshoek (pitch) zijn relatief veel sterker bij 10 m/s dan bij 3 m/s; ook de asymmetrie en de grilligheid van de pitchcurve blijkt telkens toe te nemen met de gassnelheid
- de TSI sondes hebben de vlakste respons rond de neutrale positie $\alpha = 0^\circ$, en zijn daardoor minst gevoelig voor kleine uitlijningsfouten

Uit de combinatie van de resultaten van het yaw en pitch onderzoek valt te besluiten dat geen van de hier onderzochte thermische hittedraad-anemometers geschikt is om de richting van een gasstroom mee te bepalen.



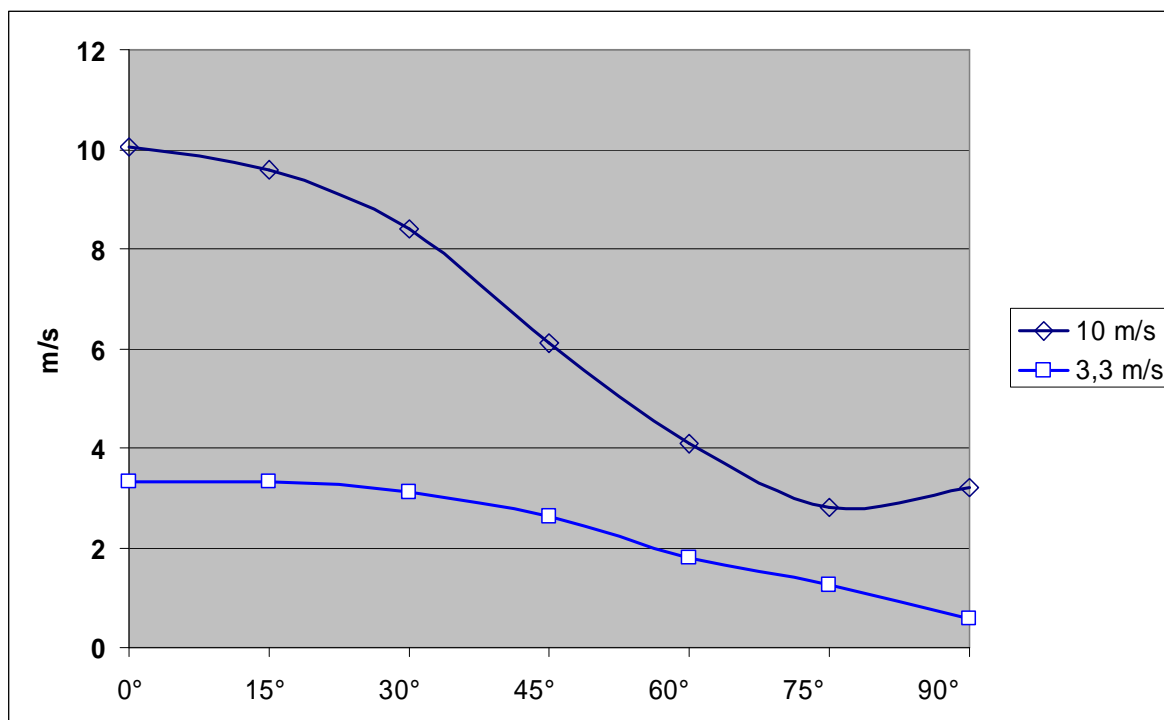
Figuur 13. Effect van de hellingshoek (pitch) op de snelheidsmeting met drie types van thermische anemometers bij 3 en 10 m/s

6.3 Hoekgevoeligheid van de vleugelradsonde

De vleugelrad anemometer werd in de windtunnel getest voor dezelfde yaw- en pitch-hoeken als de thermische anemometers. De metingen werden 6 maal herhaald en de gemiddelde resultaten zijn samengevat in tabel 13. Standaardafwijkingen op de 6 metingen werden berekend, maar worden niet gegeven aangezien ze van de grootteorde van 0,02 m/s zijn, wat wijst op een goede herhaalbaarheid van de proeven. Als referentiesnelheid wordt de simultaan gemeten snelheid in de tunnel opgegeven. De reden hiervoor is dat de schroefanemometer door zijn grote oppervlakte een lichtjes verhoogde snelheid in de windtunnel veroorzaakt in vergelijking met de referentiesnelheid die in de tunnel wordt gemeten als de volledige doorsnede vrij is (op de referentie pitotbuis na).

Tabel 13. Effect van draaihoek (yaw) op meting met vleugelradsonde bij 2 snelheden

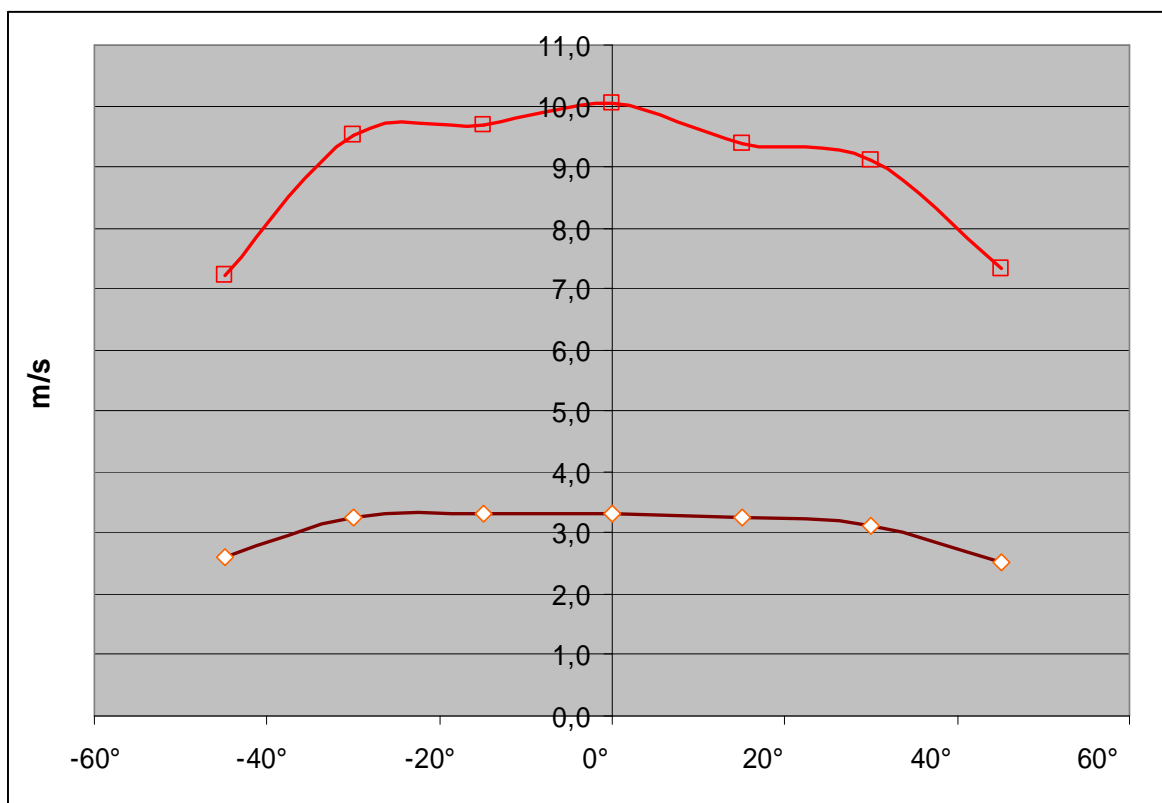
	Schroef	Tunnel	Schroef	Tunnel
	m/s	m/s	m/s	m/s
0°	3,3	3,1	10,0	9,7
15°	3,3	3,2	9,6	10,0
30°	3,1	3,2	8,4	10,4
45°	2,6	3,2	6,1	10,3
60°	1,8	3,3	4,1	10,1
75°	1,2	3,3	2,8	10,1
90°	0,6	3,4	3,2	10,4
Referentie (tunnel vrij)		3,2		9,3



Figuur 14. Effect van draaihoek (yaw) op meting met vleugelradsonde

Tabel 14. Effect van zwenkhoek (pitch) op meting met vleugelradsonde bij 2 snelheden

	Schroef	Tunnel	Schroef	Tunnel
	m/s	m/s	m/s	m/s
-45°	2,6	3,1	7,2	9,5
-30°	3,2	3,2	9,5	9,6
-15°	3,3	3,2	9,7	9,7
0°	3,3	3,1	10,0	9,7
15°	3,3	3,2	9,4	9,3
30°	3,1	3,1	9,1	9,4
45°	2,5	3,1	7,3	9,2
Referentie (tunnel vrij)		3,2		9,3



Figuur 15. Effect van zwenkhoek (pitch) op meting met vleugelradsonde bij 2 snelheden

Voor beide gevallen van afwijkende stromingshoek wordt vastgesteld dat de vleugelradsonde beter de ideale cosinuscurve van figuur 5 benadert, en geen opmerkelijke artefacten vertoont, behalve dat bij draaihoek 90° de snelheid niet geheel op nul terugvalt. Voor diffuse emissies met niet goed gerichte stroming zijn bijgevolg meer waarheidsgetrouwe resultaten te verwachten dan met de hier geteste thermische sondes.

7. Meting van debiet aan in- en uitstroom van ventilatorroosters

7.1 Experimenteel opzet

Het uitstromen van een luchtstroom via een ventilator die in een opening is gemonteerd, is een veel voorkomend geval van een diffuse emissie. De luchtstroom is in dit geval niet gekanaliseerd, maar nog wel betrekkelijk goed afgebakend.

Aan de voorwaarden die een luchtstroom in een kanaal geschikt maken voor debietsbepaling via snelheidsmeting in een netwerk van punten wordt in dit geval echter niet voldaan. De belangrijkste van deze voorwaarden zijn:

- rechtlijnig kanaal met een constante diameter, zodat een goed uitgebouwde stroming met een vlak profiel wordt bekomen
- voldoende afstand stroomop- en stroomafwaarts tot verstoringen
- geen of weinig draaiing van de stroming, of afwijking van de axiale stromingsrichting

De bedoeling van dit onderzoek is om na te gaan hoe en met welke nauwkeurigheid dergelijk ventilatordebiet kan gemeten worden, door toepassing van de klassieke normmethodes, en met een meer uitgebreid net van meetpunten.

Als proefstand werd de uitlaat van de windtunnel gebruikt, waarbij verschillende debieten en verschillende uitstroomsituaties werden gegenereerd.

De windtunnel heeft een diameter van 50 cm (49,5 cm inw.) en de motor bevindt zich achter de ventilator aan de uitstroomzijde. De ventilator is een tienbladige schroef met draairichting tegen de klok, bekeken vanuit de uitstroomzijde.

De experimentele metingen worden in de volgende paragrafen gerapporteerd. Samengevat omvat het uitgevoerd programma de volgende punten:

- meting op de blaaszijde van het ventilatorrooster in een standaard netwerk van punten volgens de normen voor snelheidsmeting (in een kanaal) NBN T95-001 en ISO 10780 met pitotbuis
- meting op de blaaszijde van ventilatorrooster met hittedraadanemometer (meer punten dan NBN of ISO worden gemeten om het profiel goed te registreren)
- vergelijking van het resultaat met het gelijktijdig gemeten werkelijk debiet van windtunnel
- meting van hetzelfde debiet aan het ingangrooster van de windtunnel, als een geval van een bijna ideale gelijkmatige stromingsrichting
- inbrengen van stroomdeflector (hoek 45°) vóór rooster en herhaling van de metingen om invloed van sterk draaiende stroom na te gaan; de 4 bladen van de deflector zijn zichtbaar na de ventilator in figuur 20

7.2 Vorm en afmetingen van ventilatorrooster (uitlaatzijde)

De vorm van de uitlaatopening kort na de ventilator is rond, en het uitstroomvlak is voorzien van een draadrooster dat lichtjes bol staat. De doorsnede van het uitstroomstuk heeft een hyperbolische vorm en kan best omschreven worden als trompetvormig.

Door de trompetvorm van het rooster is het moeilijk een exacte diameter te bepalen van de opening die effectief doorstroomd wordt. De fysische buitendiameter van 685 mm wordt in de berekeningen aangenomen.

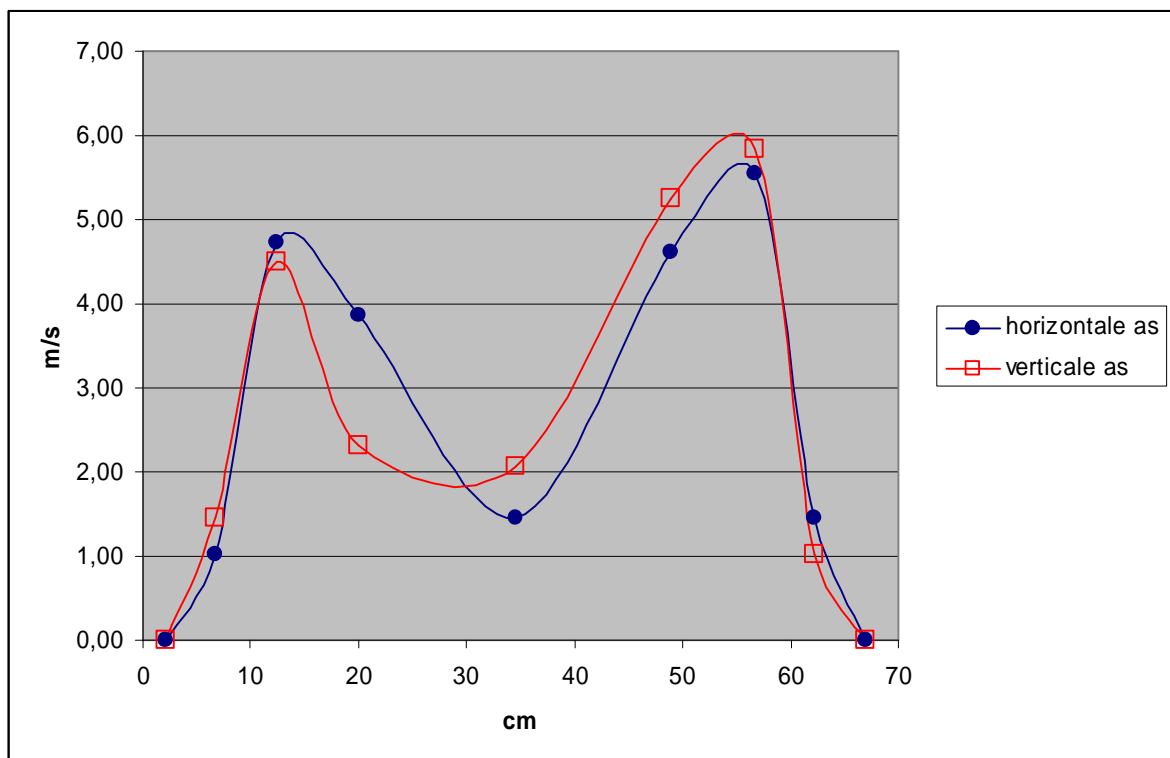
7.3 Metingen aan ventilatorrooster met pitotbuis

Bij deze proef worden in een standaardnetwerk van 9 punten op elke as metingen uitgevoerd met een S-type Pitotbuis. Het S-type werd gekozen omdat ze gevoeliger is en dus nauwkeuriger bij lagere snelheden kan meten. Bovendien kan het S-type praktisch volledig in het vlak van het rooster worden opgesteld. De standaard pitotbuis is minder geschikt wegens de lagere gevoeligheid en de grotere diepte van de sonde in de stromingsrichting.

De kalibratiefactor van de gebruikte S-pitotbuis werd onmiddellijk voorafgaand aan de test bij dezelfde instellingen van de windtunnel bepaald, en bedroeg:

Instelling windtunnel	Snelheid referentiepunt, m/s	Pitot kalibratiefactor
010	3,80	0,787
390	10,37	0,820
Gemiddeld		0,80

De gemiddelde kalibratiefactor van 0,80 werd toegepast voor de twee snelheidsmetingen op het rooster. De resultaten zijn weergegeven in figuur 16 en tabel 15.



Figuur 16. Snelheidsmeting op rond ventilatorrooster met S-type pitotbuis

Enkele vaststellingen bij de gemeten snelheidsprofielen in figuur 16:

- Er worden tussen de meetpunten grote snelheidsverschillen gemeten. Hiervoor bestaan volgens de normen voor debietsbepaling in kanalen geen grenzen, maar als regel wordt gesteld dat in dergelijk geval meer punten moeten worden bemeaten. Voor diffuse emissies is deze situatie eerder regel dan uitzondering
- Voor vijf van de negen punten ligt de snelheid beneden het minimum van 3 m/s ($\Delta p > 5$ Pa) waarbij volgens NBN T95-001 en ISO 10780 kan worden gemeten
- Bij de meetpunten op tweede positie wordt telkens een snelheid van ongeveer 1 m/s gemeten. Deze snelheid is in feite te laag voor een betrouwbare meting met pitotbuis. Hier wordt toch nog een redelijk resultaat bekomen door de goed gecontroleerde laboratoriumomstandigheden bij de windtunnel, en het gebruik van een stabiele gesofistikeerde elektronische manometer, die door een PC wordt uitgelezen
- Met de pitotbuis wordt in de buitenste punten nul als snelheid gemeten. Dit dient toegeschreven aan de ongevoeligheid van de pitotbuis op lage snelheden. De thermische anemometers zijn wel in staat om de lage snelheid op deze punten te meten
- In het middelpunt vertonen de snelheidsprofielen een minimum, als gevolg van de montage van de ventilatormotor in het midden van de windtunnel, op ongeveer 50 cm vóór het meetpunt
- Er werd tweemaal in het middelpunt gemeten, éénmaal op de verticale en éénmaal op de horizontale as- telkens met een verschillend resultaat. Dit werd ook later nog vastgesteld bij de proeven met thermische anemometers en kan enerzijds worden toegeschreven aan kleine verschillen in positionering. Anderzijds speelt hier ook de vorm van de sondes (langwerpig), of de opening van de pitotbuis, (ellipsvormig). In een veld met sterke gradiënten geven deze vormen een verschillende respons in horizontale en in verticale positie

Tabel 15 . Snelheidsmeting en debietsbepaling met S-type pitotbuis op rond rooster

Afstand tot rand, cm	Windtunnel op 3 m/s		Windtunnel op 10 m/s	
	diameter 1 verticaal	diameter 2 horizontaal	diameter 1 verticaal	diameter 2 horizontaal
2,1	0,00	0,00	0,00	0,00
6,8	1,46	1,03	2,73	3,58
12,4	4,50	4,73	11,77	12,69
20,0	2,31	3,86	5,66	9,80
34,5	2,06	1,46	4,00	4,50
49,0	5,26	4,61	13,26	11,91
56,6	5,84	5,56	15,11	13,06
62,2	1,03	1,46	3,72	5,37
66,9	0,00	0,00	0,00	0,00
gemiddeld		2,55		6,64
Debiet m³/h		3437		8940
Referentiedebiet		2338		6359
Afwijking %		+ 47 %		+ 40,6 %

De resultaten in tabel 15 tonen aan dat de snelheidsmetingen met pitotbuis op het rooster tot aanzienlijke overschattingen leiden (47 % en 41 %). De radiale componenten van de snelheid, dit is de draaiing van de uitstroom, kan worden aangewezen als de vermoedelijke oorzaak van deze afwijkingen.

7.4 Metingen aan ventilatorrooster met hittedraad anemometer

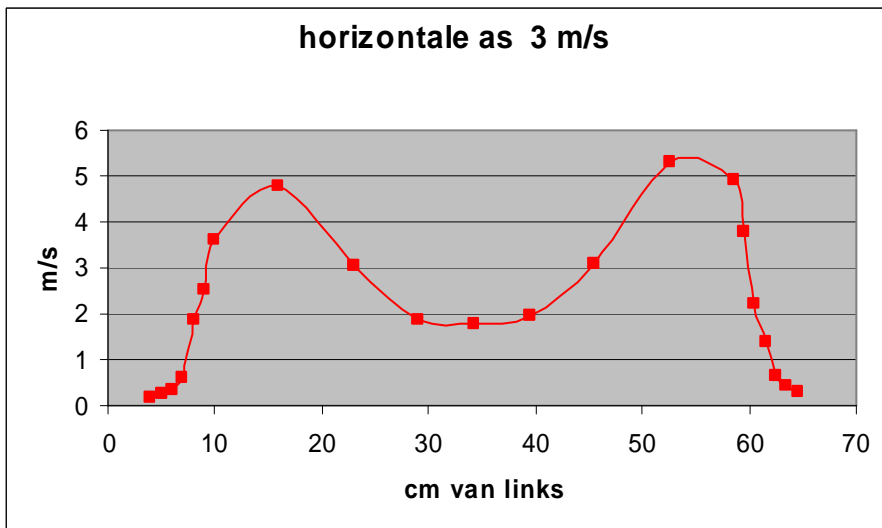
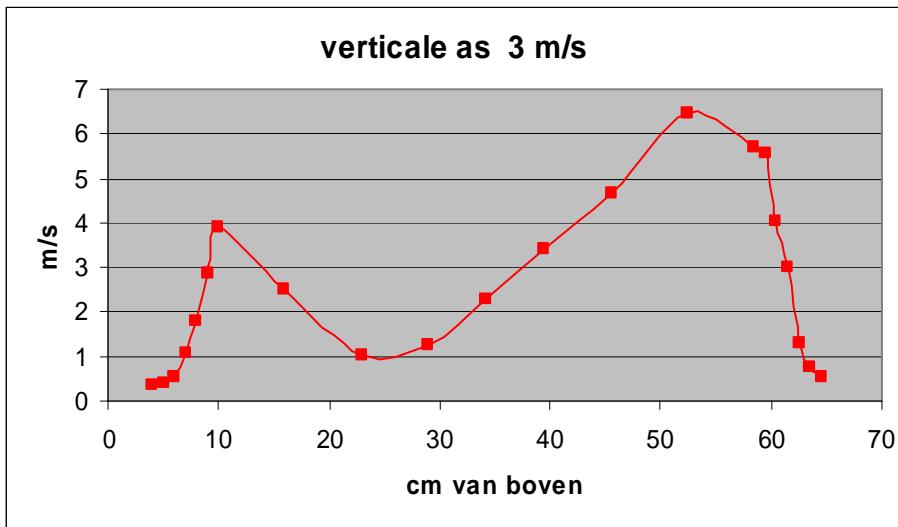
De metingen werden uitgevoerd met de hittedraad anemometer TSI(2). Om een behoorlijk beeld te krijgen van de onregelmatigheid van het stromingsprofiel werd op een groot aantal meetpunten gemeten, en deze resultaten werden grafisch voorgesteld. Figuren 16 en 17 geven hiervan voorbeelden bij 3 m/s en 10 m/s. De snelheden in de NBN punten werden daarna telkens van deze grafieken afgelezen.

Vastgesteld wordt dat de profielen sterke snelheidsgradiënten vertonen en niet symmetrisch zijn.

Een bijzonderheid die herhaaldelijk en bij alle metingen werd vastgesteld was dat op het middelpunt telkens twee verschillende waarden van de snelheid worden genoteerd naargelang de sonde horizontaal of verticaal, ofwel 45° naar boven of 45° naar beneden werd gemonteerd. De normen voor debietsbepaling schrijven voor om slechts 1 punt op het middelpunt uit te voeren. Om met het verschil in respons rekening te houden werd hier het gemiddelde van de 2 metingen op het middelpunt in rekening gebracht.

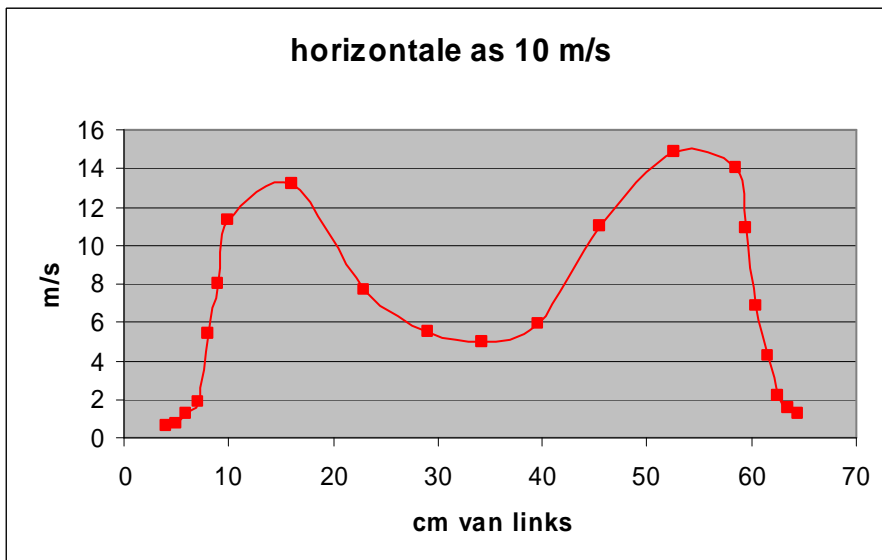
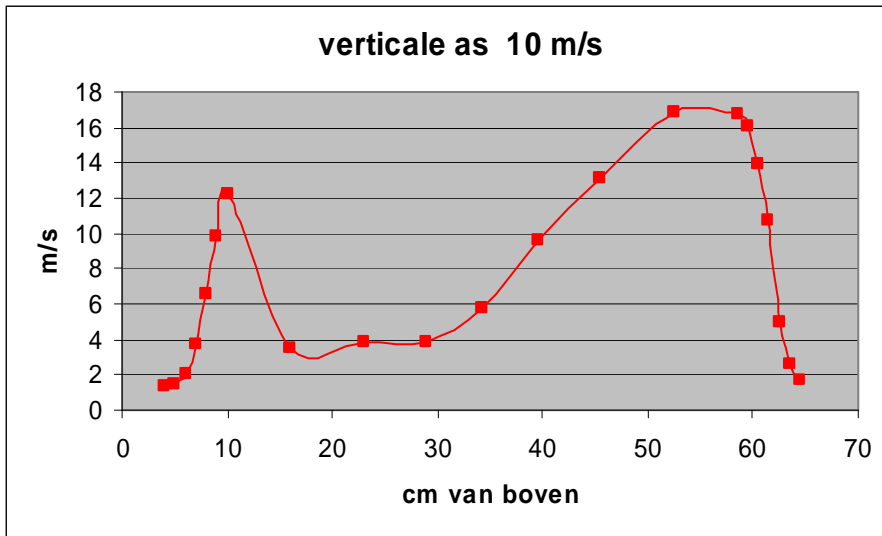
De resultaten van deze metingen in tabel 16 en figuur 17 tonen aan dat bij 3 en 10 m/s in de windtunnel een overschatting van de gemeten snelheid op het rooster van 30 % resp. 26 % optreedt. Deze resultaten liggen dicht bij de referentiewaarde dan met de pitotbuis, en dit resultaat wordt nog beter indien met de zelf bepaalde kalibratiefactor van 1,086 van de thermische anemometer wordt rekening gehouden.

Verder wordt onderzocht of de nauwkeurigheid van de debietsbepaling kan opgevoerd worden door keuze van een groter aantal meetpunten.



Figuur 17. Snelheidsprofiel gemeten na ventilatorrooster op 2 assen in 42 meetpunten

De lage snelheid die wordt gemeten in het midden van het ventilatorrooster is het gevolg van de positie van de motor op deze plaats. De zeer lage snelheden aan de buitenzijde worden veroorzaakt door de trompetvorm van de uitstroomflens. De asymmetrie van de profielen, die vooral duidelijk is over de verticale as, wordt veroorzaakt door obstakels (zoals de bedrading van de motor), maar vooral door botsing van de draaistroom met de motorsteun (een trapeziumvormig geplooid plaat), die blijkbaar als stroomuitrichter werkzaam is, en een aanzienlijke versnelling van de luchtstroom veroorzaakt langs de zijde waarop de draaiende stroom op de plaat botst.



Figuur 18. Snelheid gemeten na ventilatorrooster op 2 assen in 42 meetpunten.

Tabel 16. Snelheden gemeten op rond rooster, 9 meetpunten volgens NBN-ISO (TSI thermische anemometer)

Afstand tot rand, cm	3 m/s		10 m/s	
	diameter 1 verticaal	diameter 2 horizontaal	diameter 1 verticaal	diameter 2 horizontaal
4,04	0,38	0,18	1,33	0,61
14,45	2,86	4,70	4,93	13,21
34,25	2,27	1,78	5,80	5,00
54,05	6,43	5,44	16,98	14,97
64,46	0,53	0,32	1,66	1,23
gemiddeld		2,54		6,70
Debiet m³/h		3370		8892
Referentiedebiet		2598		7060
Afwijking %		+ 30 %		+ 26 %

Tabel 17. Debiet door rond rooster door snelheidsmeting op 5 punten

Afstand tot rand, cm	3 m/s	
	diameter 1 verticaal	diameter 2 horizontaal
7,74	1,08	1,61
34,25	2,27	1,78
60,76	3,5	1,88
gemiddelde		2,02
Debiet, m³/h		2678
Referentiedebiet		2598
Afwijking		+ 3,1 %

Bij de meting op een kleiner aantal dan de voorgeschreven 9 punten (zie tabel 17 met slechts 5 punten) wordt een resultaat bekomen dat dicht bij het werkelijk debiet ligt. Deze overeenkomst moet echter veeleer aan toeval worden toegeschreven.

7.5 Groter aantal meetpunten en berekening

Bij sterke snelheidsgradiënten, zoals in figuur 17 en 18, kan overwogen worden een groter aantal meetpunten te kiezen om het snelheidsprofiel nauwkeuriger te kunnen omschrijven. Uit deze figuren kan worden afgeleid dat voor een goede omschrijving van onregelmatige profielen de verhouding van de snelheid tussen twee naastliggende meetpunten bij voorkeur niet meer dan een factor 1,5 bedraagt.

De keuze van de meetpunten is in dat geval echter niet meer in overeenstemming met de NBN of ISO regels, en de uitmiddeling om tot een gemiddelde snelheid voor de gehele sectie te komen vergt een speciale bewerking.

In de ISO- en NBN- normen worden de meetpunten zodanig gekozen dat de snelheden zondermeer kunnen worden uitgemiddeld om een gemiddelde snelheid over de sectie te bekomen. Daartoe werden deze meetpunten gekozen in de zwaartepunten van ringvormige secties met gelijke oppervlakte. Deze normen veronderstellen dat er geen al te grote snelheidsgradiënten op te treden, maar dit is nooit het geval in de buurt van de wanden.

De volgende twee regels kunnen worden toegepast op een willekeurige sequentie van meetpunten om de algemeen gemiddelde snelheid door een cirkelvormige doorsnede te bepalen:

1. weging van de gemeten snelheid in elk punt met het kwadraat van de afstand tot het middelpunt; de gemiddelde snelheid wordt dan

$$\bar{v} = \frac{\sum v_i \cdot r_i^2}{\sum r_i^2}$$

Deze interpolatie houdt onvoldoende rekening het aantal gekozen meetpunten en met hun onderlinge afstand en is daardoor alleen van toepassing voor een set van gelijkmatig verspreide bemonsteringspunten

2. indeling in banden met een gemiddelde snelheid $(v_{i-1} + v_i)/2$, en weging met een factor die evenredig is met de oppervlakte van elke band, namelijk $\text{abs}(r_{i-1}^2 - r_i^2)$

$$\bar{v} = \frac{\sum \frac{(v_{i-1} + v_i)}{2} \cdot |r_{i-1}^2 - r_i^2|}{\sum |r_{i-1}^2 - r_i^2|}$$

Deze interpolatiemethode houdt wel rekening met de breedte van elke band en is dus ongevoelig aan de keuze van de meetpunten, zodat bij sterke gradiënten méér punten kunnen worden gemeten en ingevoerd.

In beide benaderingen is r_i de afstand van elk meetpunt tot het middelpunt van de ronde sectie, $r_i = \text{abs}(D/2 - x_i)$, waarbij D de diameter en x_i de insteekdiepte, of afstand tot de rand van de sonde. Het punt $x_0 = 0$ komt overeen met de rand, en v_0 is de snelheid aan de rand., De gemiddelde snelheid \bar{v} wordt voor elke diameter (meetas) afzonderlijk berekend.

Bij de eerste benadering telt het middelpunt niet mee, aangezien het gewicht ervan nul is.

Bij de tweede benadering, waarin met banden wordt gewerkt, dient een waarde ingevoerd voor de snelheid aan de wand v_0 . Theoretisch kan deze gelijkgesteld worden aan nul.

Ook in deze benadering wordt aan het middelpunt een gering gewicht toegekend, zodat het de onzekerheid over de snelheid in het middelpunt bij verschillende posities van de sonde nauwelijks een rol speelt.

Deze interpolatiebenaderingen verschillen van de ISO of NBN regels. Volgens deze normen worden de meetpunten zodanig gekozen dat de snelheden zondermeer kunnen worden uitgemiddeld om een gemiddelde snelheid over de sectie te bekomen. Daartoe zijn deze meetpunten gekozen in de zwaartepunten van ringvormige secties met dezelfde oppervlakte.

Deze normen veronderstellen dat er geen al te grote snelheidsgradiënten optreden, maar dit is nooit het geval in de buurt van de wanden.

De tweede benadering levert ongeveer hetzelfde resultaat op op voorwaarde dat men aanneemt dat de snelheden aan de wand gelijk zijn aan de snelheid op het dichtste resp. verste meetpunt. Deze benadering strookt in geen geval met de werkelijkheid voor het rooster dat hier werd gemeten. Figuur 17 en 18 illustreren duidelijk dat de snelheid naar nul gaat op de rand van het rooster. In deze situatie hangt dit nauw samen met de trompetvorm van de uitlaat.

Om het effect van deze verschillende interpolatiemethodes te illustreren werden de data van de metingen op het inlaatrooster (tabel 19), een vrij egaal snelheidsprofiel. Het blijkt dat de NBN-ISO methode ongeveer overeenkomt met de tweede methode waarbij de wandsnelheid wordt gelijkgesteld aan de snelheid in het eerste meetpunt. Wanneer we vergelijken met de gecorrigeerde referentiesnelheid in de windtunnel (laatste rij in tabel 18), dan wordt besloten dan de interpolatie per band, met wandsnelheid = 0 tot de beste overeenstemming leidt in beide gevallen.

Tabel 18 Interpolatiemethodes van snelheden tot gemiddelde op rond rooster - illustratie van verschillende benaderingen op inlaatrooster windtunnel

	gemiddelde	afwijking NBN-ISO	gemiddelde	afwijking NBN-ISO
Interpolatiemethode	m/s		m/s	
NBN - ISO punten	3,91		11,0	
1. per punt ~ r²	4,10	+ 5 %	11,67	+ 6 %
2. per band met wandsnelheid = 0	3,48	- 11 %	9,80	-11 %
2. per band met wandsnelheid = v₁	3,88	- 0,8 %	10,96	-0,4 %
Referentiesnelheid tunnel	3,39		9,18	

Wanneer beide interpolatiemethodes worden toegepast op de data van de roostermetingen bij 10 m/s (data figuur 18) dan is de uitkomst:

Referentiedebiet gemeten in windtunnel:	8892 m ³ /h
Interpolatie 1 (geen punt aan wand)	8014 m ³ /h (- 9,9 %)
Interpolatie 2 wandsnelheid nul	9504 m ³ /h (+ 6,8 %)
Interpolatie 2 wandsnelheid zoals laatste punt	9680 m ³ /h (+ 8,9 %)

Deze data lijken tot dezelfde conclusie te leiden, namelijk dat de interpolatie in banden met wandsnelheid nul de beste benadering geeft. Niettemin laten deze gegevens niet toe de interpolatiemethode zelf te beoordelen, omdat de draaiing van de stroom een te sterke positieve fout veroorzaakt.

7.6 Meting van debiet door een inlaatrooster

De snelheidsmeting aan het inlaatrooster van de windtunnel werd uitgevoerd met de TSI(2) hittedraad-anemometer op de 9 punten volgens NBN en ISO norm.

De resultaten van deze metingen zijn voorgesteld in tabel 19 en figuur 19.

De afwijkingen tussen het gemeten debiet aan de inlaat met de anemometer en de referentiemeting met pitotbuis in de windtunnel bedraagt resp. +15,3 % en +19,8 %.

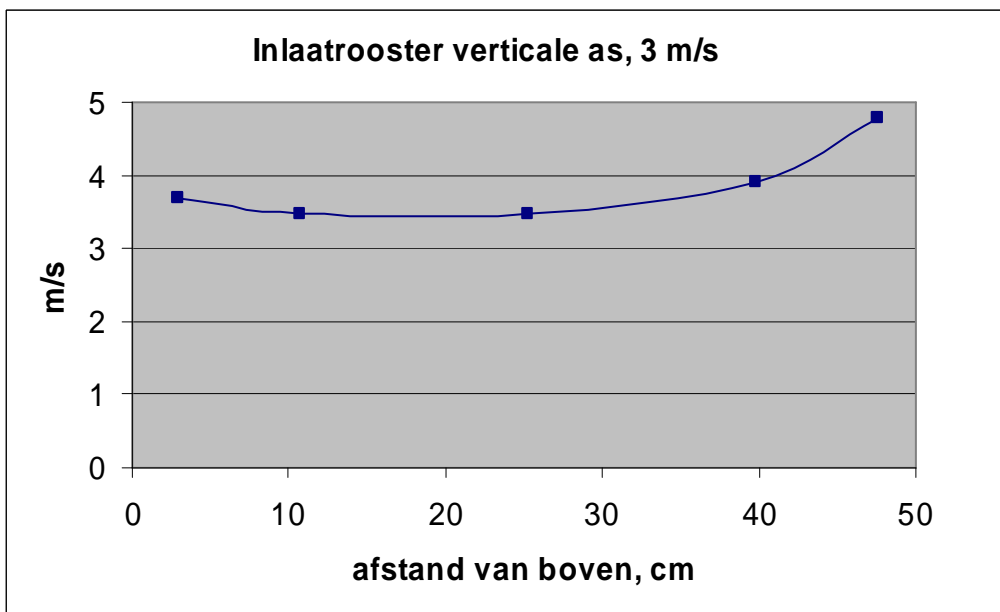
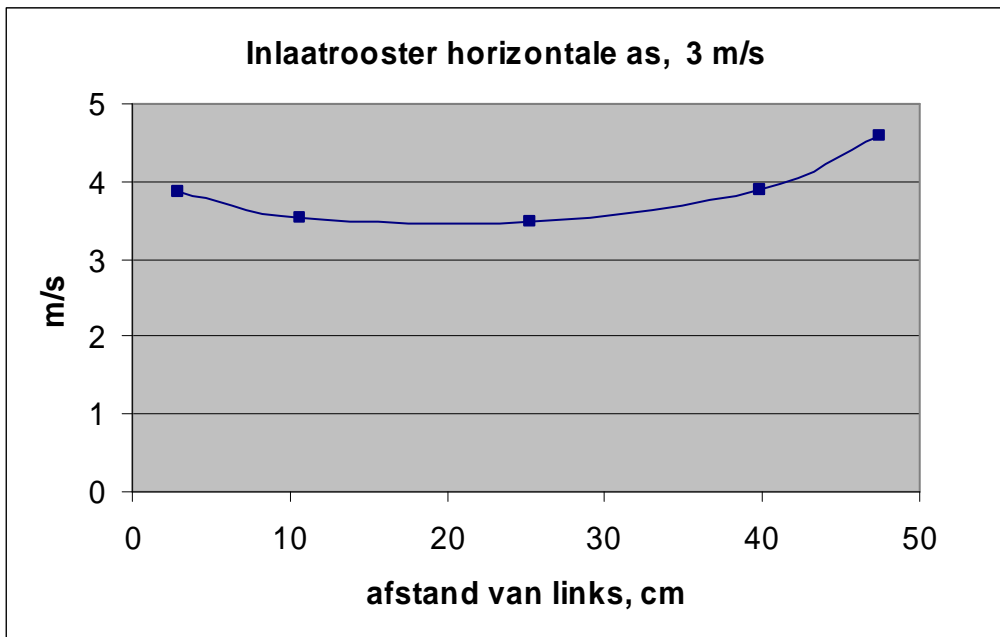
Hierbij werd geen rekening gehouden met de kalibratiefactor van 1,086 die voor deze sonde werd bepaald (zie tabel 4 en 6). Als deze factor wordt toegepast bedragen de afwijkingen tussen gemeten en referentiedebieten resp. +6,2 % en +10,3 %.

Uit de figuur 19 blijkt dat aan het zuidzijde van de windtunnel geen grote verschillen in snelheid tussen de punten optreedt, m.a.w. dat een vrij vlakke snelheidsverdeling aanwezig is.

Tabel 19. Snelheidsmeting aan inlaatrooster

Afstand	Horizontale as	Verticale as	Debiet gemeten
cm	m/s	m/s	m ³ /h
3,0	3,9	3,69	
10,7	3,5	3,48	
25,3	3,5	3,47	
39,8	3,9	3,9	
47,5	4,6	4,78	
gemiddeld:	3,91		2710
Ref. pitot:	3,80		2351
3,0	11,6	10,2	
10,7	8,5	8,75	
25,3	10,0	10,7	
39,8	10,6	11,3	
47,5	13,4	14,3	
gemiddeld:	11,00		7619
Ref. pitot:	10,28		6359

De aanzuigzijde van de windtunnel kan worden beschouwd als een inlaat met een vrij ideaal stromingspatroon. Op dit punt wordt praktisch stilstaande lucht uit de kamerruimte aangezogen. Dit betekent dat de aanstroomzone zeer kort is. Weliswaar leidt dit tot een grote contractie van de stroming (d.i. grote versnelling van de lucht op korte afstand, of een sterke vernauwing van de stroomlijnen, wat ook een zekere "pitch"-hoek van de stroom meebrengt), maar wegens verdere afwezigheid van verstoringen in deze aanstroomzone worden geen sterke gradiënten of draaiingen in de stroom verwacht ter hoogte van de inlaat.



Figuur 19. Snelheidsprofiel gemeten aan rond inlaatrooster van 50 cm van de windtunnel met hittedraad anemometer TSI(2) bij 3 m/s

Bij nader toezien op de snelheidsprofielen (figuur 19) blijkt dat deze toch niet helemaal ideaal zijn. De vastgestelde afwijkingen bij de beide profielen zijn:

- de snelheidsprofielen zijn niet volkomen vlak zijn, maar hebben een minimum in het midden
- er is een beperkte asymmetrie in het profiel, waarbij de hoogste intredesnelheid op de twee assen links resp. beneden wordt gemeten

De verklaring van deze lichte abnormaliteit wordt toegeschreven aan verschillen in de weerstand die de toetredende lucht vanuit verschillende richtingen ondervindt. Voor deze proef was de ingang van de windtunnel namelijk tot op minder dan 1 meter van de muur verschoven, met als gevolg dat de vrije aanstroming de sterkste weerstand ondervindt in het midden. De gemeten snelheden blijken inderdaad het hoogst aan kant waar zich het minste obstakels in de windvang bevinden.

Samengevat kan worden besloten dat meting aan dit inlaatrooster aanvaardbare resultaten oplevert (met een overschatting beneden 20%) wanneer de gestandaardiseerde meetpunten voor meting in kanalen worden gekozen.

Voor toepassing in de praktijk bij aanzuigopeningen dient erop gewezen dat het aanstroomprofiel van buitenlucht naar de tunnel sterk trechtervormig is, zodat alleen in het vlak van het rooster zelf aanvaardbare resultaten te verwachten zijn (in tegenstelling tot uitstroomopeningen, waar tot op 20 cm afstand kan worden gemeten - bron Testo).

7.7 Rond rooster met sterke draaistroom

De snelheidsmeting aan het inlaatrooster van de windtunnel werd uitgevoerd met de TSI(2) hittedraad-anemometer op de 9 punten volgens NBN en ISO norm.

Tabel 20. Snelheden gemeten op rond rooster met deflectoren 45° rechts, 9 meetpunten volgens NBN-ISO (TSI)

Afstand tot rand, cm	3 m/s		10 m/s	
	diameter 1 verticaal	diameter 2 horizontaal	diameter 1 verticaal	diameter 2 horizontaal
4,04	0,36	0,25	1,34	1,31
14,45	2,86	4,43	10,1	14,4
34,25	2,79	2,78	8,25	8,5
54,05	5,55	6,4	16,8	18,1
64,46	1	1,18	3,64	5,1
gemiddeld		2,76		8,80
Debiet m³/h		3658		11670
Referentiedebiet		2414		6530
Afwijking %		+ 52 %		+ 79 %

Tabel 21. Snelheden gemeten op rond rooster met deflectoren 45° links, 9 meetpunten volgens NBN-ISO (TSI)

Afstand tot rand, cm	3 m/s		10 m/s	
	diameter 1 verticaal	diameter 2 horizontaal	diameter 1 verticaal	diameter 2 horizontaal
4,04	0,34	0,21	1,21	0,65
14,45	4,48	5,25	9,25	8,4
34,25	0,79	0,78	2,54	2,46

54,05	3,47	3,05	11,5	8,9
64,46	1,11	1,69	4,22	5,65
gemiddeld		2,27		5,81
Debiet m³/h		3005		7707
Referentiedebiet		2578		6992
Afwijking %		+ 17 %		+ 10 %

Wanneer de deflectoren naar rechts staan en de draaistroom in tegengestelde richting breken (tabel 20 - de schroef draait naar links wanneer men in de uitlaat van de tunnel kijkt) worden nog grotere afwijkingen van het referentiedebiet gemeten (resp. +52 % en +79 %). De afwijking neemt bovendien toe met de snelheid. Deze afwijking wordt toegeschreven aan toenemende turbulentie door de stand van de vinnen.

Wanneer de deflectoren naar links gericht staan (tabel 21) versterken ze weliswaar de draaistroom, maar wordt een aanvaardbaar resultaat bekomen voor het totaal gemeten debiet (resp. +17 % en +10 %). Alle hier gegeven waarden gelden zonder correctie voor de kalibratiefactor 1,086 van de thermische anemometer.

8. Meting van debiet door rechthoekig raam met thermische anemometers

8.1 Metingen in open raam

De uitgang van de windtunnel werd via een overgangstuk verbonden met een vierkant raam met zijde 85,7 cm. Figuur 20 toont de koppeling met de windtunnel en het open raam.

In dit raam werd met drie verschillende thermische anemometers het debiet bepaald op de punten volgens NBN en ISO normen voor rechthoekige doorsneden. In 12 punten werden de snelheden als 2-minuutsgemiddelden gemeten om het debiet te bepalen.

Het debiet van de windtunnel werd gedurende deze proef continu geregistreerd aan de aanzuigzijde van de ventilator. Tegelijk werd onderdruk, temperatuur en atmosfeer continu gemeten, zodat het werkelijk debiet bij normale atmosferische omstandigheden aan de uitlaatzijde kon worden berekend.

Tabel 22. Snelheidsmeting met Höntzsch (HTA2) in vierkant raam 2000 m³/h

		Snelheden gemeten op 12-punten-rooster			
		Diameter	1	2	3
		hoogte van boven	14,3	42,9	71,4
Meetpunt			m/s	m/s	m/s
1	10,7 cm		1,90	1,58	0,59
2	32,1 cm		2,49	1,06	0,56
3	53,6 cm		2,37	0,74	0,70
4	75,0 cm		2,28	2,45	0,88
				Q_d (m³/h):	3878
Windtunnel:	v_{ref}, m/s:		3,25 ± 0,03	Q_{ref} (m³/h):	2007
				verhouding:	1,93

Tabel 23. Snelheidsmeting met Höntzsch (HTA2) in vierkant raam 6000 m³/h

		Snelheden gemeten op 12-punten-rooster			
		Diameter	1	2	3
		hoogte van boven	14,3	42,9	71,4
Meetpunt			m/s	m/s	m/s
1	10,7 cm		4,76	4,60	2,21
2	32,1 cm		5,66	3,85	2,36
3	53,6 cm		5,77	2,78	2,91
4	75,0 cm		5,90	7,00	4,01
				Q_d (m³/h):	11416
Windtunnel:	v_{ref}, m/s:		9,95 ± 0,04	Q_{ref} (m³/h):	6153
				verhouding:	1,86



Figuur 20. Verbinding van windtunnel met open raam

Tabel 24. Snelheidsmeting met TSI (2) in vierkant raam 2000 m³/h

		Snelheden gemeten op 12-punten-rooster		
		1	2	3
	Diameter			
	hoogte van boven	14,3	42,9	71,4
Meetpunt		m/s	m/s	m/s
1	10,7 cm	0,94	0,37	0,60
2	32,1 cm	0,95	0,36	0,63
3	53,6 cm	0,96	0,33	0,71
4	75,0 cm	0,97	1,16	0,96
			Q_d (m³/h):	1970
Windtunnel:	v_{ref}, m/s:	3,20 ± 0,06	Q_{ref} (m³/h):	1981
			verhouding:	0,994

Tabel 25. Snelheidsmeting met TSI (2) in vierkant raam 6000 m³/h

		Snelheden gemeten op 12-punten-rooster		
		1	2	3
	Diameter			
	hoogte van boven	14,3	42,9	71,4
Meetpunt		m/s	m/s	m/s
1	10,7 cm	2,30	1,62	1,90
2	32,1 cm	2,90	1,33	2,00
3	53,6 cm	2,86	1,21	2,16
4	75,0 cm	3,20	3,90	3,32
			Q_d (m³/h):	6324
Windtunnel:	v_{ref}, m/s:	9,77 ± 0,32^(*)	Q_{ref} (m³/h):	6041
			verhouding:	1,047

(*) de grotere standaardafwijking op de referentiesnelheid wordt veroorzaakt doordat de diameter 3 op een volgende dag werd gemeten bij licht verschillende atmosferische omstandigheden; snelheidsverschil bedroeg ongeveer -0,5 m/s, temperatuurverschil -2 °C, en barometerdruk -14 mbar.

Tabel 26. Snelheidsmeting met Testo 445 in vierkant raam 2000 m³/h

		Snelheden gemeten op 12-punten-rooster		
		1	2	3
	Diameter			
	hoogte van boven	14,3	42,9	71,4
Meetpunt		m/s	m/s	m/s
1	10,7 cm	0,39	0,29	0,63
2	32,1 cm	0,65	0,20	0,36
3	53,6 cm	0,72	0,45	0,24
4	75,0 cm	0,81	1,20	0,55
			Q_d (m³/h):	1430
Windtunnel:	v_{ref}, m/s:	3,21 ± 0,03	Q_{ref} (m³/h):	1987
			verhouding:	0,72

Tabel 27. Snelheidsmeting met Testo 445 in vierkant raam 6000 m³/h

		Snelheden gemeten op 12-punten-rooster		
		1	2	3
	Diameter			
	hoogte van boven	14,3	42,9	71,4
Meetpunt		m/s	m/s	m/s
1	10,7 cm	1,67	1,82	0,76
2	32,1 cm	1,17	0,96	2,66
3	53,6 cm	0,97	0,44	2,17
4	75,0 cm	1,75	2,50	2,75
			Q_d (m³/h):	4324
Windtunnel:	v_{ref}, m/s:	9,92 ± 0,09	Q_{ref} (m³/h):	6137
			verhouding:	0,704

De gegevens van tabel 22 t.e.m. 27 werden niet gecorrigeerd voor de ijkfactoren van de verschillende thermische anemometers. Het is duidelijk dat van de drie geteste anemometers alleen de TSI een resultaat oplevert dat goed in de buurt komt van het werkelijke debiet.

Voor deze anemometer, en met snelheidsmeting op de punten volgens NBN of ISO norm worden zeer beperkte afwijkingen van het referentiedebiet bekomen (resp. -0,6 % en 4,7 % bij 2000 en 6000 m³/h), zodat de toegepaste methode als geschikt kan worden beschouwd.

De Höntzsch geeft een overschatting met bijna een factor 2, en de Testo geeft een onderschatting met 30 %.

Indien de kalibratiefactor (0,71) voor de Testo 445 wordt verrekend dan worden wel aanvaardbare resultaten bekomen met deze hittedraad anemometer.

8.2 Metingen in open raam met stroomdeflector

De deflector bestaat uit 4 vlakke bladen die op elk een verstelbaar asje zijn gemonteerd en dus toelaten aan de luchtstroom een draaiende beweging rond de as van ventilator en windtunnel mee te geven. Drie bladen van de deflector, in parallelle stand met de stroom zijn zichtbaar op figuur 20, tweede deel.

De metingen werden alleen uitgevoerd met de TSI(2) anemometer met de deflectoren 45° gedraaid naar links, waarbij ze de reeds aanwezige draaiing van de ventilatorschroef versterken, of naar rechts, waarbij ze de een tegengestelde draaiing induceren.

Tabel 28. Snelheidsmeting met TSI (2) in vierkant raam 2000 m³/h, deflectoren links

		Snelheden gemeten op 12-punten-rooster		
		1	2	3
	Diameter			
	hoogte van boven	14,3	42,9	71,4
Meetpunt		m/s	m/s	m/s
1	10,7 cm	0,22	0,24	0,74
2	32,1 cm	0,47	0,41	0,65
3	53,6 cm	0,53	0,42	1,05
4	75,0 cm	1,77	1,65	1,97
			Q_d (m³/h):	2230
Windtunnel:	v_{ref}, m/s:	3,16	Q_{ref} (m³/h):	1957
			verhouding:	1,139

Tabel 29. Snelheidsmeting met TSI (2) in vierkant raam 6000 m³/h, deflectoren links

		Snelheden gemeten op 12-punten-rooster		
		1	2	3
	Diameter			
	hoogte van boven	14,3	42,9	71,4
Meetpunt		m/s	m/s	m/s
1	10,7 cm	1,81	1,22	2,95
2	32,1 cm	0,75	0,53	2,15
3	53,6 cm	1,74	1,05	3,37
4	75,0 cm	4,65	4,96	6,95
			Q_d (m³/h):	7079
Windtunnel:	v_{ref}, m/s:	9,71	Q_{ref} (m³/h):	6005
			verhouding:	1,179

Tabel 30. Snelheidsmeting met TSI (2) in vierkant raam 2000 m³/h, deflectoren rechts

		Snelheden gemeten op 12-punten-rooster		
		1	2	3
	Diameter			
	hoogte van boven	14,3	42,9	71,4
Meetpunt		m/s	m/s	m/s
1	10,7 cm	1,14	0,48	0,61
2	32,1 cm	0,80	0,23	0,37
3	53,6 cm	0,86	0,28	0,57
4	75,0 cm	1,38	1,37	1,56
			Q_d (m³/h):	2126
Windtunnel:	v_{ref}, m/s:	3,13	Q_{ref} (m³/h):	1936
			verhouding:	1,098

Tabel 31. Snelheidsmeting met TSI (2) in vierkant raam 6000 m³/h, deflectoren rechts

		Snelheden gemeten op 12-punten-rooster		
		1	2	3
	Diameter			
	hoogte van boven	14,3	42,9	71,4
Meetpunt		m/s	m/s	m/s
1	10,7 cm	2,69	1,51	2,16
2	32,1 cm	2,27	1,15	1,17
3	53,6 cm	2,32	0,72	1,49
4	75,0 cm	3,63	5,45	4,96
			Q_d (m³/h):	6504
Windtunnel:	v_{ref}, m/s:	9,49	Q_{ref} (m³/h):	5869
			verhouding:	1,108

Uit de grootteorde van de afwijkingen kan worden besloten dat draaistromen een grote invloed hebben op de meetonzekerheid bij metingen van diffuse emissiestromen.

8.3 Metingen in open raam met horizontale lamellen

Om aan de luchtstroom een afwijkende stromingsrichting met gekende hoek te geven werd een lamellensysteem in het raam gemonteerd. De lamellen zijn verbonden via een systeem van hefboompjes, zodat ze tegelijk in een willekeurige hoek kunnen versteld worden om een afwijkende richting te geven aan de uitstromende lucht (figuur 21).

De debietsmeting werd eerst uitgevoerd met de lamellen in horizontale positie op de genormeerde punten met de TSI (2) thermische anemometer. Deze resultaten zijn samengevat in tabellen 32 en 33.



Figuur 21. Snelheidsmeting met thermische anemometer TSI(2) in raam met lamellen in horizontale stand

Tabel 32. Snelheidsmeting met TSI (2) in vierkant raam 2000 m³/h, lamellen horizontaal

		Snelheden gemeten op 12-punten-rooster		
		1	2	3
	Diameter	14,3	42,9	71,4
	hoogte van boven			
Meetpunt		m/s	m/s	m/s
1	10,7 cm	0,97	0,85	0,81
2	32,1 cm	0,69	0,23	0,51
3	53,6 cm	0,87	0,35	0,73
4	75,0 cm	1,35	1,48	1,49
			Q_d (m³/h):	2276
Windtunnel:			Q_{ref} (m³/h):	1964
			verhouding:	1,159

Tabel 33. Snelheidsmeting met TSI (2) in vierkant raam 6000 m³/h, lamellen horizontaal

		Snelheden gemeten op 12-punten-rooster		
Diameter		1	2	3
hoogte van boven		14,3	42,9	71,4
Meetpunt		m/s	m/s	m/s
1	10,7 cm	2,53	2,55	2,82
2	32,1 cm	2,29	0,88	1,76
3	53,6 cm	2,61	1,48	2,46
4	75,0 cm	3,56	4,62	5,30
			Q_d (m³/h):	7240
Windtunnel:			Q_{ref} (m³/h):	6154
			verhouding:	1,176

Uit deze metingen wordt vastgesteld, door vergelijking met tabellen 24 en 25, dat het aanbrengen van het raam in overigens gelijke omstandigheden leidt tot hogere meetwaarden van het debiet. Dit is onverwacht, omdat van het beter uitrichten van de stroom door de lamellen een nauwkeuriger resultaat werd verwacht. Vermoedelijk heeft de toegenomen turbulentie kort achter de lamellen een grotere afkoeling van de thermische anemometer veroorzaakt, en aldus tot een grotere positieve afwijking op de gemeten snelheden geleid.

8.4 Metingen in open raam met lamellen op 45°

Om de luchtstroom een afwijkende stromingsrichting met gekende hoek te geven werd het lamellensysteem in het raam op 45° naar beneden ingesteld. Alle lamellen vormen dezelfde hoek met de as van de stroom, zodat deze verplicht is af te buigen bij uitrede uit het raam. De debietsmeting met de lamellen op 45° werd uitgevoerd met elk van de drie types van thermische anemometers, op hetzelfde 12-punten rooster volgens NBN norm als in de voorgaande experimenten, en voor dezelfde twee debieten van de windtunnel. De sondes werden gepositioneerd volgens de as van het raam (dus zonder rekening te houden met de stromingsrichting). In tabel 34 worden de resultaten voor het totaaldebiet weergegeven.

Tabel 34. Resultaten van debietsmeting met drie thermische anemometers op een open raam met stroming onder een hoek van 45°

	Q_{ref}	Q_{gem}	Q_{gem}/Q_{ref}	Q_{ref}	Q_{gem}	Q_{gem}/Q_{ref}
	m³/h	m³/h		m³/h	m³/h	
HTA(2)	2019	6476	3,208	6109	15701	2,570
TSI(2)	1957	2939	1,502	5994	10230	1,707
Testo	1966	963	0,490	5891	3909	0,663

De resultaten in tabel 34 tonen zeer grote verschillen tussen werkelijk en gemeten debiet, met een factor 6 verschil tussen hoogste en laagste resultaat bij een debiet rond 2000 m³/h en een factor 4 bij een debiet rond 6000 m³/h. Het Höntzsch toestel produceert buitenmatig grote positieve afwijkingen, en deze zijn ook veel groter dan op basis van de positieve yaw-respons (figuur 12) van dit toestel kon verwacht worden. Opmerkelijk is ook dat het Testo instrument als enige veel te lage meetwaarden oplevert.

Uit de grootteorde van de afwijkingen kan wel worden besloten dat de stromingsrichting een doorslaggevende factor zal zijn voor de meetonzekerheid bij metingen van diffuse emissiestromen.

9. Meting van debiet door deuren en poorten

9.1 Meting van gedwongen ventilatiedebiet door open poort

Een luchtdichte verbinding werd gebouwd op de uitgang windtunnel naar een naastgelegen kamer. In de windtunnel konden nauwkeurig de in deze kamer ingeblazen luchtdebieten (Q_{ref}) worden gemeten via snelheidsbepaling in het referentiepunt.

Voor de uitstroomopening van de windtunnel werd een verticaal scherm opgesteld zodat de ingeblazen lucht in alle richtingen wordt verspreid.

Het diffuus emissiedebiet (Q_{dif}) ontsnapt naar buiten via een openstaande poort. De poort van deze kamer bestaat uit twee vleugels zodat verschillende emissie-secties van een rechthoekige poort of deur konden worden gesimuleerd (grootteorde van 1 tot 6 m²).

De meetpunten voor de diffuse debietsmetingen werden gekozen in het vlak van de geopende deur, op een rooster volgens een NBN T95-001 (of ISO 10780). Op elk punt werd gedurende 2 minuten de snelheid gemeten. Gedurende al deze bepalingen in het vlak van de deur wordt de snelheid in de windtunnel op het referentiepunt geregistreerd, zodat het totaal emissiedebiet goed gekend is. De hoge-precisie elektronische manometer op de pitotbuis van de windtunnel maakt 20-seconden-gemiddelden, en deze worden samengevoegd tot 2-minuutsgemiddelden, die overeenkomen met de meetduur in elk meetpunt.

Tabel 35 en figuur 22 geeft de meetresultaten voor de instelling van de windtunnel op 3 m/s en tabel 36 en figuur 23 voor de instelling van de windtunnel op 10 m/s. Bij beide sets van gegevens werd de TSI(2) thermische anemometer gebruikt en werd geen correctie gemaakt voor de kalibratiefactor van 1,086.

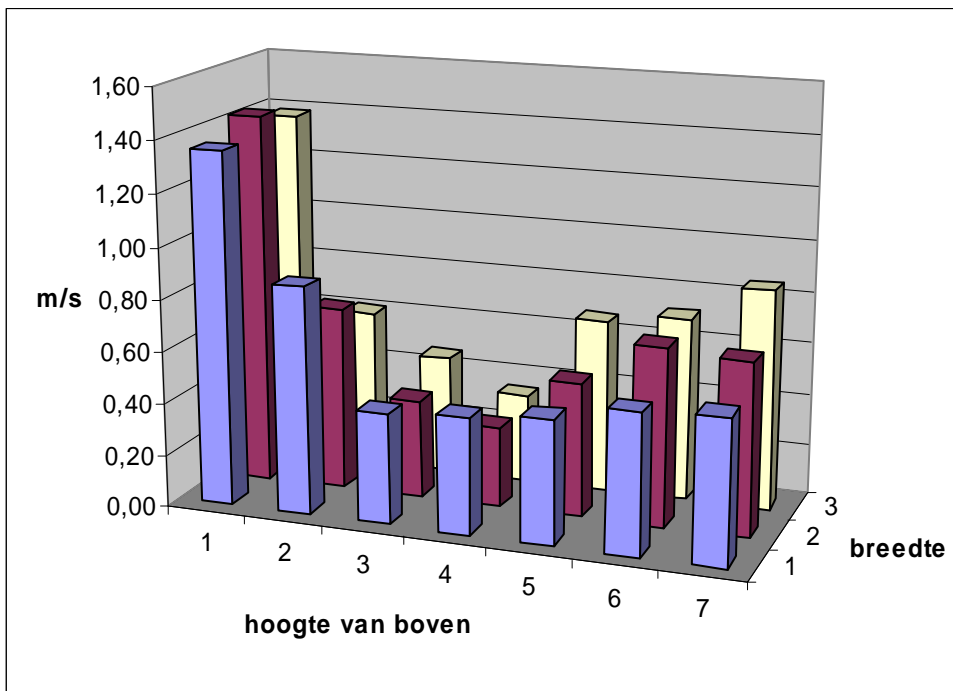
De snelheidsprofielen in de figuren zijn voorgesteld als Excel blokdiagrammen om ruimtelijk inzicht in de snelheidsverdelingen te geven (deze voorstelling is niet helemaal op schaal wat betreft de verhouding tussen verticale en horizontale afstanden).

In beide gevallen worden de hoogste snelheden gemeten aan de bovenzijde van de poort. Bij de laagste instelling van de windtunnel wordt een grote afwijking vastgesteld tussen debiet door de windtunnel en diffuus debiet, namelijk een factor 2,68.

Bij de tweede proef, met grotere snelheid is er een redelijke overeenkomst (factor 0,962).

Tabel 35. Meting van gedwongen ventilatiestroom door openstaande poort met instelling van de windtunnel op 3 m/s

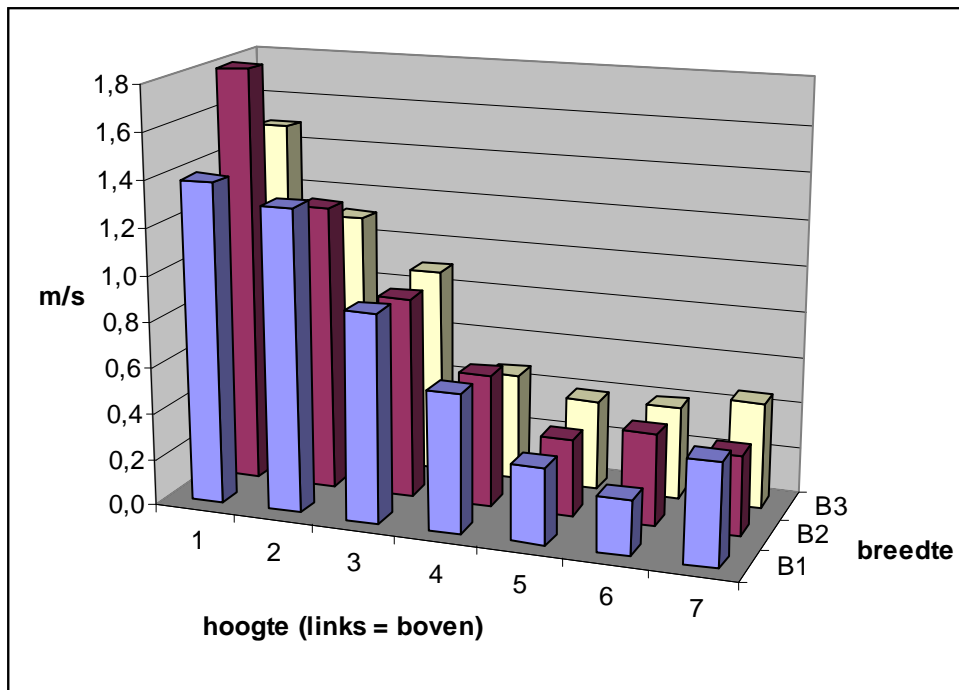
		Snelheden gemeten op 21-punten-rooster			
		afstand (breedte):	15,0 cm	44,9 cm	74,8 cm
Diameter	hoogte van boven	m/s	m/s	m/s	
1	17,3 cm	1,36	1,43	1,38	
2	34,6 cm	0,88	0,71	0,61	
3	51,9 cm	0,43	0,38	0,46	
4	86,4 cm	0,45	0,31	0,34	
5	121,0 cm	0,48	0,52	0,67	
6	155,6 cm	0,54	0,69	0,71	
7	190,1 cm	0,56	0,67	0,85	
			Q _d (m ³ /h):	5370	
Windtunnel:	v _{ref} , m/s:	3,24 ± 0,04	Q _{ref} (m ³ /h):	2003	
			verhouding:	2,68	



Figuur 22. Snelheidsmeting op 21 punten in poort van 2,4 x 0,9 m voor diffusedebietsbepaling (debiet 2000 m³/h)

Tabel 36. Meting van gedwongen ventilatiestroom door openstaande poort met instelling van de windtunnel op 10 m/s

		Snelheden gemeten op 21-punten-rooster			
		afstand (breedte):	15,0 cm	44,9 cm	74,8 cm
Diameter	hoogte van boven	m/s	m/s	m/s	
1	17,3 cm	1,39	1,80	1,49	
2	34,6 cm	1,31	1,23	1,11	
3	51,9 cm	0,90	0,87	0,90	
4	86,4 cm	0,60	0,57	0,47	
5	121,0 cm	0,33	0,33	0,39	
6	155,6 cm	0,24	0,40	0,40	
7	190,1 cm	0,44	0,35	0,46	
			Q_d (m ³ /h):	5947	
Windtunnel:	v_{ref} , m/s:	10,00 ± 0,05	Q_{ref} (m ³ /h):	6183	
			verhouding:	0,962	



Figuur 23. Snelheidsmeting op 21 punten in poort van 2,4 x 0,9 m voor diffusedebietsbepaling (debiet 6200 m³/h)

Tabel 37. Meting van gedwongen ventilatiestroom door openstaande poort met thermische en schroefanemometer

		Snelheden gemeten op 21-punten-rooster		
afstand (breedte):		15,0 cm	44,9 cm	74,8 cm
Thermische anemometer				
Diameter	hoogte van boven	m/s	m/s	m/s
1	17,3 cm	0,83	0,84	0,75
2	34,6 cm	0,57	0,56	0,66
3	51,9 cm	0,58	0,52	0,49
4	86,4 cm	0,28	0,33	0,36
5	121,0 cm	-0,08	-0,29	-0,39
6	155,6 cm	-0,42	-0,43	-0,53
7	190,1 cm	-0,40	-0,39	-0,40
		Q_d (m ³ /h):		1427
Windtunnel:	v_{ref} , m/s:	2,75 ± 0,04	Q_{ref} (m ³ /h):	1904
		verhouding:		0,749
Schroefanemometer				
Diameter	hoogte van boven	m/s	m/s	m/s
1	17,3 cm	1,05	1,03	1,11
2	34,6 cm	0,69	0,75	0,90
3	51,9 cm	0,46	0,53	0,61
4	86,4 cm	0,40	0,35	0,46
5	121,0 cm	0,00	-0,30	-0,43
6	155,6 cm	-0,20	-0,56	-0,61
7	190,1 cm	-0,64	-0,57	-0,60
		Q_d (m ³ /h):		1838
		Q_d/Q_{ref}		0,965

Bespreking

Bij de laagste snelheid van de windtunnel werden rond het midden van de poort (diameters 3, 4 en 5) lage, maar sterk veranderlijke snelheden genoteerd. De windsnelheid buiten speelt hierbij een grote rol. Wanneer de windsnelheid toeneemt is het niet mogelijk een stabiele snelheidsmeting te bekommen op deze plaats. Op enkele dagen met te sterke wind werden de proeven om deze reden uitgesteld.

Voor het lage debiet van de windtunnel van 2000 m³/h wordt een groot verschil tussen het werkelijk ingeblazen en het gemeten diffuus debiet vastgesteld, terwijl voor het driemaal hogere debiet van 6200 m³/h deze overeenkomst aanvaardbaar is.

Het grote verschil in overeenkomst tussen de beide proeven blijkt verklaard te kunnen worden door het verschillend aandeel van de thermische convectie. Op figuur 22 is namelijk te zien dat ongeveer op halve hoogte, in de omgeving van punt 3 of 4 een minimum voorkomt in de gemeten snelheden. In de punten die lager liggen dan punt 4 (punten 5-6-7) neemt de snelheid weer toe. Aanvankelijk werd nog niet vastgesteld dat bij deze punten

instroom van buitenlucht lucht optreedt, aangezien de uitgelezen snelheid op de thermische anemometers geen teken heeft .

Bij verdere proeven werd de stromingsrichting aangetoond door middel van rooksporen, papierstrookjes, of een licht wollen draadje dat aan de sonde werd vastgeknoopt.

Anderzijds werd bij deze proeven vastgesteld dat in de onderste punten steeds aanzienlijk lagere temperaturen dan de kamertemperatuur in de stroming voorkwamen, m.a.w. het ging om koude buitenlucht die in het lokaal binnenstroomt. De proeven werden uitgevoerd bij kamertemperaturen rond 20 °C en buitentemperaturen die varieerden van 0 tot 10 °C.

Dezelfde proeven konden niet identieke worden herhaald onder dezelfde omstandigheden, gezien de meetduur van ongeveer anderhalf uur en de veranderende buitenomstandigheden (temperatuur, wind). In dit opzicht lijkt het aangewezen de totale meetduur te beperken tot niet meer dan 1 uur.

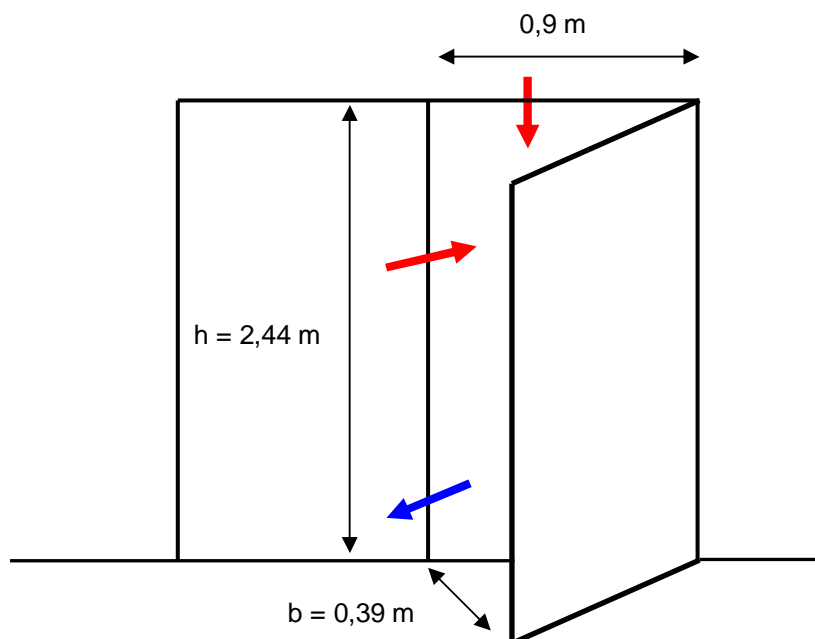
Aangezien de binnenkomende stroming in feite een tegengestelde richting heeft dient ze in mindering gebracht van het netto-uitstromend debiet.

Wanneer we aannemen dat alle onderste punten (diameters 5-6-7) een inwaartse stromingsrichting hebben, dan wordt het totaal uitstromende debiet 2378 m³/h.

Wanneer we voor elke verticale aannemen dat beneden het punt met de laagste snelheid van die as tegengestelde stroming voorkomt (punt 4, 5 en 5 op elke as), dan berekent men een

Bij de sterkere stroming in figuur blijkt ook een minimum te worden vastgesteld, maar hier liggen deze punten lager (resp. 6, 5 en 5 op elk van de verticale assen). Ook de gemeten snelheid in de onderste punten is kleiner dan bij de proef met 2000 m³/h.

9.2 Meting van natuurlijke trek door openstaande poort

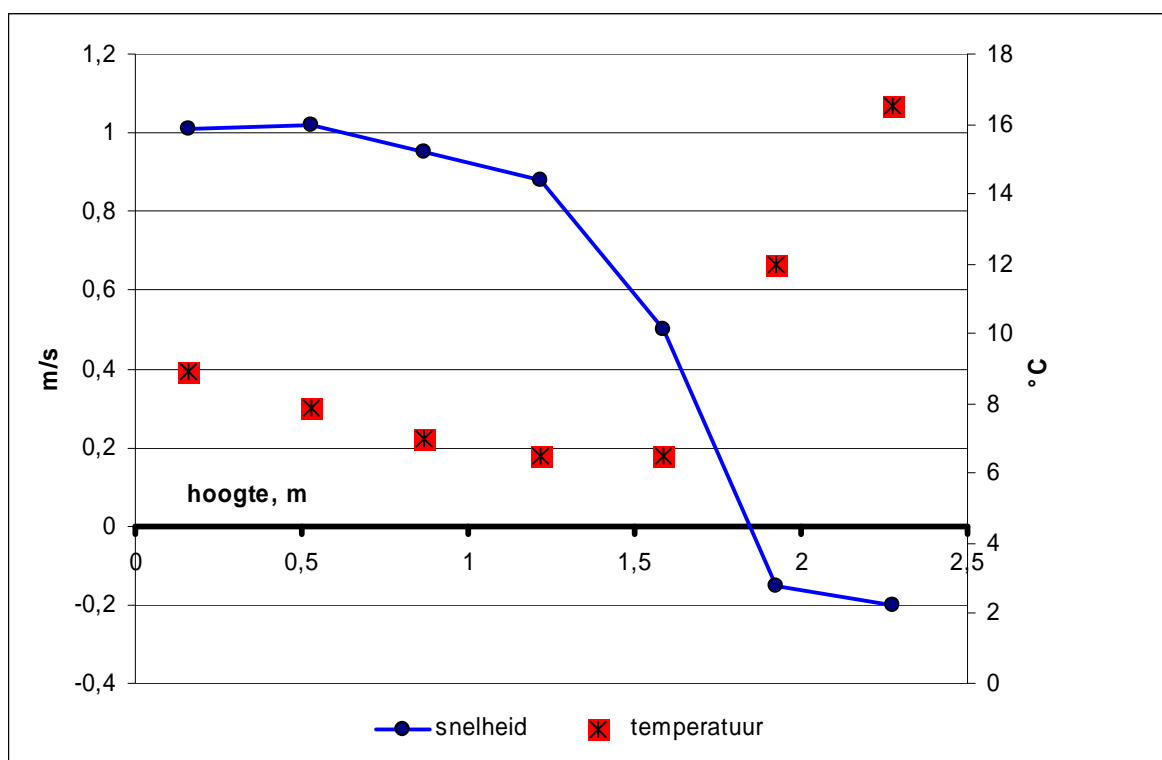


Figuur 24. Debietsmeting bij natuurlijke ventilatie door half geopende poort.

Deze meting werd uitgevoerd bij natuurlijke ventilatie, zonder geforceerde stroming. De situatie is weergegeven in figuur 24. Van een poort met twee helften met een hoogte van 243,5 cm werd één helft half open gezet, zodat een opening ontstond van 39,2 cm. In het verticale vlak werden 7 meetpunten gekozen, telkens in het midden van een rechthoekig oppervlak. Aan de bovenkant werd in het driehoekig topvlak de verticale uitwaartse snelheid gemeten in het midden en op 10 cm van de basis. Tabel 38 geeft een samenvatting de resultaten, en figuur 25 toont de gemeten snelheden en temperaturen.

Tabel 38. Meting van debiet door halfopen poort met thermische anemometer (TSI(2), 2-minuutsgemiddelden)

	hoogte	Temperatuur	Snelheid
Punt nr.	m	°C	m/s
1	0,16	8,9	1,01
2	0,53	7,9	1,02
3	0,87	7	0,95
4	1,22	6,5	0,88
5	1,59	6,5	0,5
6	1,93	12	-0,15
7	2,28	16,5	-0,2
topvlak 1	2,44	17	-0,3
topvlak 2	2,44	19	-0,3



Figuur 24. Snelheids- en temperatuurprofiel bij natuurlijke trek door open poort.

De inkomende luchtstroom heeft een positief en de uitgaande stroom een negatief teken. De gebruikte hittedraad anemometer TSI(2) meet echter geen verschil tussen positieve en negatieve snelheden. Om het teken van de stroming te kunnen bepalen dient dus een hulpmiddel toegepast. In dit geval werd aan de sonde, enkele centimeter verwijderd van de sensor, een licht wollen draadje gebonden, dat de zin van de stroom aangeeft. Ook werd bij de laagste snelheden regelmatig een rookspoor gebruikt om de richting van de stroming te verifiëren.

Vastgesteld werd dat onderaan door de opening koude lucht binnenstroomt en dat bovenaan warme lucht buitenstroomt. Het keerpunt, waar de snelheid door nul gaat, werd experimenteel opgespoord, en blijkt op 1,76 m hoogte te liggen. Dit is tevens het punt in de grafiek waar de snelheid door nul gaat. Wel werd vastgesteld dat in de punten in deze omgeving sterke schommelingen van de snelheid voorkomen. Ook werd vastgesteld dat op de meetpunten in de buurt van het keerpunt, de stroming soms positief en soms negatief was.

Het verticale vlak van de opening werd gesplitst in een deel met inwaartse stroming van 1,76 x 0,39 m waardoor, na vermenigvuldigen met de gemiddelde snelheid 0,872 m/s, het debiet "in" wordt bekomen. Het uitgaande debiet is de som van de stroming door het bovenste stuk van het verticale vlak (0,675 x 0,39 m x 0,175 m/s) en de neerwaarts gerichte stroom door het driehoekig topvlak (0,45 x 0,39 m x 0,3 m/s). Dit leidt tot de volgende balans van in- en uitgaande stroming, die theoretisch een nulverschil zou moeten opleveren.

Debiet in: 2166 m³/h
Debiet uit: 357 m³/h
Verschil: 1810 m³/h

Het verschil op deze balans is onverwacht groot. Het is ook duidelijk in figuur 24 dat een veel groter deel van de snelheidscurve positief is. Weliswaar moet bij deze curve ook de negatieve stroom door het topvlak nog in rekening gebracht, maar deze is relatief klein (hier m³/h). Het verschil tussen in- en uitstroom is dermate groot dat deze methode om het ventilatiedebiet te bepalen als weinig nauwkeurig moet worden beschouwd.

Bepaling van ventilatiedebiet met tracergas

Voorafgaand aan deze proef werd het ventilatiedebiet van dezelfde kamer en dezelfde situatie met helium tracergas gemeten.

Het resultaat hiervan is een halfwaardetijd van het tracergas van 7.07 minuten, bepaald als het gemiddelde van 3 halfwaardeperiodes na stopzetten van de heliumlozing. Voor deze bepaling wordt de grafiek van de heliumconcentratie gemaakt, en wordt een zo lang mogelijk stuk met eenduidige daling van de concentratie geselecteerd, in dit geval een daling van 50 tot 6,25 ppm He boven de achtergrondwaarde van 4,5 ppm.

Hieruit wordt het gemiddeld ventilatiedebiet van 1130 m³/h berekend, of 5,85 verversingen per uur, rekening houdend met het kamervolume van 193 m³.

Verklaringen van de vastgestelde afwijkingen

De grote afwijkingen die met de thermische anemometer worden bekomen zijn niet volledig verklaard. Op basis van de waarnemingen gedurende deze meting worden als mogelijke verklaringen vooropgesteld:

- Afwijkende stromingshoeken door het meetvlak, o.m. beïnvloed door stand van deur
- Te sterke fluctuaties van de lokale gassnelheid in de tijd; wanneer de anemometer werd ingesteld op uitlezing per seconde dan is er in verschillende punten een verhouding van een factor 3 tussen de hoogste en de laagste uitlezing
- Te sterke snelheidsverschillen in de ruimte
- Gebrekkige respons van de meettoestellen op situaties met sterke temperatuurverschillen. Zo wordt bijvoorbeeld vastgesteld dat de temperatuurcurve niet monotoon stijgend is van onder naar boven. Vermoedelijk is dit te wijten aan te trage respons van de temperatuurvoeler in de sensor.
- Artefact dat koude binnenkomende lucht de sensor afkoelt (veroorzaakt overschatting debiet) en ontsnappende warme lucht de sensor opwarmt (negatieve bias)
- Ontsnappen van warme lucht door andere openingen dan de deur (kieren in ramen, deuren en plafond - de afwerking van de hall weliswaar zonder zichtbare lekken maar "technisch", bv. zonder pleisterwerk) kan een deel van het deficit verklaren. De opwaartse druk door een temperatuurverschil van ca. 20° en het oppervlak zijn aanzienlijk, maar het lijkt niet waarschijnlijk dat dit effect een groot deel van het "verloren" debiet van 1810 m³/h voor zijn rekening neemt.

Besluiten in verband met metingen van natuurlijke trek

Bij de uitstroming van deuren en poorten door natuurlijke trek kunnen grote onzekerheden optreden als gevolg van verschillende factoren:

- Thermische effecten kunnen doorslaggevend indien grote temperatuurverschillen optreden. Het verschil in dichtheid tussen warme en koude lucht is in dat geval de drijvende kracht van de stroming. Dit temperatuurverschil kan problemen opleveren voor de juistheid van een thermische anemometer
- Positieve en negatieve stroming kan voorkomen en beide dienen in rekening gebracht. De stromingsrichting dient steeds door bijkomende hulpmiddelen zoals rooksporen of een wollen draadje gedetecteerd indien het meettoestel zelf geen onderscheid maakt tussen positieve en negatieve stroming
- Door de configuratie van de opening kunnen afwijkende stromingshoeken optreden
- Alternatieve methodes zijn aangewezen om de meetonzekerheid te beperken in geval van natuurlijke trek. De tracergastechniek biedt de meeste zekerheid omtrent het werkelijk ventilatiedebiet wanneer tegelijk verschillende ongunstige factoren voor de debietsmeting optreden.

DEEL 3 PRAKTISCHE VOORSCHRIFTEN MEETMETHODIEK VAN DE DIFFUSE DEBIETSMETING

1. Keuze van de anemometer

1.1 Minimum vereisten

Voor de meting van diffuse emissiedebieten dient een anemometer te voldoen aan volgende minimum vereisten:

- Meetbereik: 0,3 m/s tot 15 m/s
- Juistheid: < 10% over het volledige meetbereik, inclusief alle factoren, kalibratie-onzekerheid, systematische afwijkingen en lineariteit
- Responstijd < 10 seconden; bij voorkeur < 2 seconden
- Invloed van draaihoek en zwenkhoek: beperkte afwijking van de ideale cosinus-curve.

Noot: hier wordt geen kwantitatief criterium gesteld omdat de geteste thermische anemometers niet kunnen voldoen aan dezelfde performanties als het vleugelrad of de pitotbuis op dit punt. In sommige omstandigheden bij diffuse emissies is deze karakteristiek wel doorslaggevend voor de meetfout, en het is duidelijk dat nog technologische verbeteringen nodig zijn aan de huidige thermische anemometers. Anderzijds is de uitdrukkingvorm voor dergelijk criterium niet eenvoudig. Een redelijk criterium zou bijvoorbeeld zijn: een maximale afwijking van 20% van de cosinuscurve voor alle draai- en zwenkhoeken tussen 0° en 45° bij testsnelheden van 3 en 10 m/s.

1.2 Toelichting

Voor de keuze van een hittedraad-anemometer bestaan er geen normen of criteria waarmee een toestel kan worden vergeleken, zoals die wel voor de pitotbuis kunnen teruggevonden worden, bijvoorbeeld in de normen ISO 10780 en EPA Method 2, of voor automatische systemen in . De criteria in deze normen betreffen voorschriften over de afmetingen van de tip, de geometrische vorm en de bijhorende marges voor de kalibratiefactoren.

De fysische wetmatigheden waarop de respons van een hittedraad-anemometer steunt - in tegenstelling tot de pitotbuis - zijn eerder van empirische aard. Dit betekent dat er geen rigoureuze vergelijking bestaat zoals de wet van Bernouilli voor de Pitotbuis, waarvan het eenvoudig verband tussen stuwdruk en gassnelheid, $\Delta p = \frac{1}{2} \rho v^2$, over een zeer groot bereik geldig blijft zowel voor turbulente als voor laminaire stroming. In plaats daarvan bestaat er een exponentieel verband, waarvan de exponenten worden aangepast bij de kalibratie. De kalibratievergelijking en de ingestelde kalibratiefactoren blijven bij commerciële thermische anemometers evenwel verborgen voor de gebruiker.

De drie geteste hittedraad anemometers verschillen onderling sterk in uitvoering van het sensorelement en in de metrologische kenmerken.

Van alle geteste types werden hier met de TSI types de beste scores behaald wat betreft de meest kritische criteria

- de juistheid van de kalibratie ($< 10\%$ fout), en de lineariteit van de kalibratie
- de relatieve stabiliteit van de kalibratie in de tijd
- de minst ongunstige respons op verkeerde positionering

Deze drie criteria kunnen door de gebruiker slechts worden getest op voorwaarde dat een windtunnel, of een andere kalibratie-opstelling ter beschikking staat.

Uit de foutieve originele kalibraties kan worden afgeleid dat de kleinere windtunnels die door de leveranciers worden gebruikt over het algemeen niet geschikt zijn om de toestellen degelijk te testen.

Andere praktische criteria die het gebruik vergemakkelijken zijn ondermeer:

- fysische robuustheid, lengte van de sonde...
- mogelijkheid om gemiddelden te genereren voor verschillende uitmiddelingstijden
- aansluitbaarheid op een PC met dataregistratie
- bedieningsgemak van de software
- zuinigheid op batterijen...

Alle thermische anemometers konden bij de testen zonder problemen worden gebruikt, maar geen enkele scoort uitstekend op de praktische criteria. Sommige kenmerken - zoals PC-aansluiting - kunnen bij de aankoop op bestelling worden bepaald.

Thermische anemometers met een symmetrisch uitzicht en asymmetrische respons zoals Höntzsch zijn minder aan te raden omwille van de grote kans op vergissingen bij het positioneren.

De anemometer van Testo vertoonde zeer grote afwijkingen van de kalibratie, maar heeft overigens door zijn ontwerp een redelijke respons op afwijkende stromingshoeken.

De uitgevoerde testen hadden niet de bedoeling om een representatief deel van de beschikbare thermische anemometers te overzien. Wel worden de eigenschappen van de betere toestellen als minimum criteria naar voor geschoven.

2. Controle en kalibratie van hittedraad-anemometers

2.1 Minimum vereisten

Voor de meting van diffuse emissiedebieten dient een anemometer te voldoen aan volgende minimum vereisten:

- Afwijking van de kalibratiefactor beneden 10% ($0,90 < A < 1,10$ in $y = A \cdot x$ kalibratiecurve)
- Lineariteit, correlatiecoëfficiënt $R^2 > 0,99$ bij kalibratiecurve $y = A \cdot x$
- Nulrespons $0,0$ m/s

De geteste hittedraad-anemometers worden geleverd met een kalibratie-attest van de leverancier. Door de leveranciers worden in de bijgeleverde handleidingen aanbevelingen geformuleerd voor de herkalibratie op regelmatige basis, bijvoorbeeld jaarlijks voor TSI.

Reeds bij de eerste kalibraties, voordat de toestellen ooit werden gebruikt in reële omstandigheden werden belangrijke onderlinge verschillen vastgesteld, ook bij nieuwe identieke toestellen van dezelfde leverancier.

Deze verschillen - met ijkfactoren voor vijf toestellen gelegen tussen 0,93 en 1,08 - geven reeds een grootteorde aan van de kalibratienauwkeurigheid die kan worden verwacht bij thermische anemometers.

De stabiliteit van de kalibraties van de onderzochte toestellen op langere termijn werd getest door twee ijkingen uit te voeren met een interval van 9 maanden. Hierbij werden onderling nog grotere verschillen vastgesteld, zelfs bij identieke toestellen van dezelfde leverancier.

De herleidbaarheid (naar nationale of internationale metrologische standaarden) van deze kalibraties is bovendien problematisch. De certificaten bevatten namelijk geen verwijzing naar een geaccrediteerde kalibratie-organisatie. Behalve dit zijn er ook geen criteria beschikbaar om een hittedraad anemometer geschikt voor ijking te verklaren en is dus ook geen geschiktheidsproef of -attest beschikbaar.

Mede gezien de prijs van deze toestellen lijkt het opsturen naar het buitenland voor een herkalibratie niet verantwoord.

2.2 Praktisch gebruik van kalibratiefactoren

- De huidige thermische en vleugelrad-anemometers bevatten intern een kalibratiefactor, maar bieden geen mogelijkheid tot bijstellen hiervan door de gebruiker. Aangezien de doorsnee gebruiker niet over betrouwbare kalibratiemogelijkheden beschikt worden in de praktijk geen ijkfactoren verrekend, en wordt voortgegaan op de kalibratie door de leverancier. De metingen gebeuren dus in de praktijk steeds zonder correctie voor de kalibratiefactor. De afwijkingen op de kalibratiefactoren worden in de meetonzekerheid verrekend.

3. Keuze van het meetvlak

Ligging van het meetvlak

Het meetvlak komt overeen met de opening waardoor de diffuse emissie plaatsvindt. Vooral bij lage stroomsnelheden van diffuse emissies dient zo dicht mogelijk in het vlak zelf te worden gemeten. Bij hogere snelheden (> 3 m/s) kan op beperkte afstanden (10 - 20 cm) buiten dit vlak worden gemeten, althans voor de centrale punten van het meetvlak. Vanaf de opening vindt uitdeining van de pluim plaats die resulteert in een grotere effectieve sectie en tragere snelheden, die aan de randen op de kortste afstand meetbaar is.

Oriëntatie van meetvlak en sonde

Als meetvlak wordt steeds een plat vlak gekozen met de kleinst mogelijke oppervlakte. In de praktijk wordt dit vlak gevormd door de randen van de opening. Wanneer deze begrenzing niet volledig in één vlak liggen wordt een geprojecteerd oppervlak gekozen

waarin zich twee of meer randen bevinden, met zo klein mogelijk oppervlak, en op zo klein mogelijke afstand van alle de randen.

Indien noodzakelijk (zie voorbeeld in figuur 24) worden twee of meer vlakken gekozen die aan deze definitie voldoen.

Oriëntatie van meetvlak en sonde

De sonde wordt steeds zodanig in het meetvlak georiënteerd dat ze de stroming loodrecht door het meetvlak meet. Een correcte hoekrespons van de anemometer is om die reden belangrijker dan bij geleide emissies.

4. Aantal en ligging van de meetpunten en meetduur

Minimaal aantal meetpunten

Voor de bepaling van het minimum aantal meetpunten in het meetvlak wordt verwezen naar ISO 10780. Het minimaal aantal meetpunten voor ronde en rechthoekige secties volgens deze norm wordt in onderstaande tabel gegeven.

Tabel 39. Minimum aantal meetpunten voor meting van debieten van diffuse emissies

Meetvlak met ronde doorsnede			Rechthoekige doorsnede		
tot diameter (m)	aantal meetassen	aantal meetpunten	tot diameter (m ²)	aantal meetassen	aantal meetpunten
0,7	2	4 of 5 (*)	0,38	2	4
1	2	8 of 9 (*)	1,5	3	9
2	2	12 of 13(*)	> 1,5	4	16
>2	2	16 of 17(*)			

(*) het laagste aantal bij ronde doorsnede is zonder het middelpunt ("general rule"), het hoogste aantal ("tangential rule") mét middelpunt

Maximaal aantal meetpunten

Bij diffuse emissies de stabiliteit van de stroming in de tijd meestal niet gegarandeerd, omdat ze vaak sterk wordt beïnvloed door buitentemperatuur, windsnelheid enzovoort. Daardoor is de meting in een sectie steeds een momentopname wordt de meetduur best beperkt te worden in de tijd tot 1 uur of korter.

Bij veranderde omstandigheden dient een volledige traversering van het meetvlak opnieuw te worden uitgevoerd.

Ligging van de meetpunten

Voor de berekening van de coördinaten van de meetpunten in ronde en rechthoekige secties wordt verwezen naar ISO 10780 of NBN T95-001.

De nauwkeurigheid van positionering blijkt een probleem bij stromingen uit openingen, wegens gebrek aan referentiepunten in de open sectie. Het markeren van de coördinaten met viltstift of met plakband op de randen of op het rooster van de opening is aangewezen. Het gebruik van een vast statief waarop de positie kan worden afgemeten (zie bijvb. figuur 21) wordt aanbevolen, omdat het vasthouden in de hand van de sonde tot foute positionering kan leiden.

Meetduur per punt

De meetduur per punt kan worden beperkt tot 20 à 30 seconden bij integratie op zicht. Het toepassen van een langere meetduur per punt, van 1 tot maximaal 2 minuten (zoals voorgeschreven door NBN-norm) is alleen zinvol indien het meettoestel is uitgerust met elektronische tijdsuïtmiddeling. In dat geval dient het toestel ingesteld op uitmiddelen over de toegepaste meetduur.

5. Meting van volumestromen aan ventilatorroosters

Geschikte meettoestellen

Thermische anemometer, vleugelrad anemometer, S-type Pitotbuis (bij stroomsnelheid boven 2 m/s). De thermische anemometer geeft een beter resultaat dan de pitotbuis. De vleugelrad anemometer werd niet in deze situatie getest, maar wordt geacht, wegens zijn vrij correcte hoekrespons, hier het beste resultaat op te leveren.

Ligging van meetvlak, meetpunten en meetduur

zie de algemene voorschriften voor ronde en rechthoekige doorsneden onder 2 en 3.

Groter aantal meetpunten

Door de "schaduw" van de motor of motorsteunen kunnen "dode zones" of sterke gradiënten ontstaan in het stromingsprofiel. Wanneer de verhouding tussen de snelheden gemeten in twee naburige meetpunten meer dan 1,5 bedraagt, dan is het aangewezen tussenliggende meetpunten te kiezen. Om de gemiddelde snelheid correct te bepalen wanneer de meetpunten willekeurig (niet volgens de normen) zijn gekozen dient de volgende interpolatieformule te worden toegepast waarbij v_i de snelheid gemeten in elk punt en r_i de afstand tot het middelpunt.

$$\bar{v} = \frac{\sum \frac{(v_{i-1} + v_i)}{2} \cdot |r_{i-1}^2 - r_i^2|}{\sum |r_{i-1}^2 - r_i^2|}$$

De snelheid aan de wand v_0 wordt hierbij best gelijkgesteld aan nul.

Voorzieningen om de stroom uit te richten

Aangezien de draaiing en de afwijkende stromingshoeken van de luchtstroom na de ventilator belangrijke positieve fouten veroorzaken kan eventueel gebruik worden gemaakt van montages om de stroom te stabiliseren en uit te richten.

6. Meting van volumestromen aan open ramen

Geschikte meettoestellen

Thermische anemometers, vleugelrad anemometer, en eventueel pitotbuis bij stroomsnelheden boven 2 m/s zijn bruikbaar. De thermische anemometer gaf de beste resultaten bij de uitgevoerde testen zonder geïnduceerde afwijkende stromingshoeken. De vleugelrad anemometer werd niet in deze situatie getest, maar wordt geacht, wegens zijn vrij correcte hoekrespons, het beste resultaat op te leveren wanneer sterk afwijkende stromingshoeken optreden.

Ligging van meetvlak, meetpunten en meetduur

zie de algemene voorschriften voor ronde en rechthoekige doorsneden onder 2. en 3.

7. Metingen van volumestromen aan deuren en poorten

Geschikte meettoestellen

Metingen van volumestromen aan deuren en poorten kunnen zowel met thermische anemometers en vleugelradanemometers worden uitgevoerd indien snelheden tussen 0,3 m/s en 2 m/s dienen gemeten, die bij deuren frequent voorkomen. Pitotbuizen zijn in het algemeen niet geschikt, maar kunnen worden gebruikt indien in alle meetpunten hogere snelheden dan 2 m/s voorkomen.

Ligging van meetvlak, meetpunten en meetduur

zie de algemene voorschriften voor ronde en rechthoekige doorsneden onder 2. en 3.

Richtlijnen bij metingen van uitstroom naar de buitenlucht

- Bij meting van de stroming doorheen een poort moet de richting van de stroom vastgesteld worden op elk punt en op het meetblad worden opgetekend. Voor de bepaling van de stroomrichting kan een licht wollen draadje worden gebruikt dat aan de sonde wordt vastgeknoopt. Andere mogelijkheden zijn een rookspoor of lichte papierstrookjes.
- Bij de berekening van de diffuse emissiestroom doorheen een poort is het aangewezen de zones van uitstroom en van instroom af te bakenen door snelheidsmetingen op meer meetpunten in de buurt van het keerpunt. De zones met verschillende stromingsrichting dienen te worden verrekend als positief en negatief debiet.
- Indien op een groot aantal van de meetpunten negatieve stroming voorkomt is het resultaat voor het diffuus emissiedebiet via snelheidsmeting minder nauwkeurig.
- Wanneer er een temperatuurverschil bestaat tussen binnen- en buitenlucht, dan is het aangewezen samen met de snelheidsmeting op elk punt een temperatuurmeting uit te voeren. De temperatuur van de stroom kan ook worden gebruikt om het verschil tussen in- en uitstromende lucht vast te stellen. De temperatuursonde dient hiertoe evenwel een snelle respons te hebben (orde 10 seconden, zoals anemometer).
- De windrichting en windsnelheid bepaalt mede de uitstroom van lucht uit een kamer. Bij hevige of sterk veranderlijke wind is het niet aan te bevelen diffuse debieten te meten, omdat de omstandigheden per meetpunt te sterk kunnen variëren.

Alternatief voor lage ventilatiedebieten

Bij metingen van volumestromen aan deuren en poorten is een voldoende eenduidige stroming nodig. Het blijkt dat de meest nauwkeurige resultaten worden behaald wanneer snelheden boven 1 m/s op veel meetpunten voorkomen. Wanneer tegelijk negatieve en positieve stromen optreden door hetzelfde meetvlak blijkt de kwaliteit van het resultaat in sommige gevallen twijfelachtig.

Volumedebieten met zeer lage snelheden en sterke thermische gradiënt, in het bijzonder natuurlijke trek, kunnen niet nauwkeurig worden gemeten met anemometers. Bepaling met tracerassen is hiervoor meer aangewezen.

8. Meetonzekerheid

8.1 Algemeen

Een volledige evaluatie van de meetonzekerheid op basis van de GUM steunt op de vergelijking

$$u^2(Q_{m^3/h}) = \sum_{i=1}^m \left[\left(\frac{\partial Q_{m^3/h}}{\partial x_i} \right)^2 \times u^2(x_i) \right] \quad (10)$$

waarbij ervan wordt uitgegaan dat het debiet Q in een wiskundige formule kan worden uitgedrukt in functie van de belangrijkste parameters x_i (met $i = 1, 2, \dots, m$) die tot de meetonzekerheid van het debiet bijdragen via hun eigen meetonzekerheid $u(x_i)$, waarbij dan de termen

$$\frac{\partial Q_{m^3/h}}{\partial x_i} \quad (11)$$

de partiële afgeleiden zijn van Q naar elk van deze relevante parameters, die de gewichtsfactoren zijn voor elke onzekerheidsbijdrage $u(x_i)$.

In de meest voorkomende eenvoudige gevallen komt uitdrukking (10) overeen met de gekende regel dat voor producten en quotiënten de totale meetonzekerheid wordt berekend als vierkantswortel uit de kwadratensom voor de relatieve fouten, terwijl voor sommen en verschillen dezelfde regel geldt voor de absolute fouten.

Voor ingewikkelde wiskundige verbanden zoals uitdrukking (7) voor thermische anemometers kan in theorie uitdrukking (10) rigoureus worden toegepast.

Bij de snelheidsmeting op meerdere punten is het debiet gelijk aan de som van de producten van de snelheid in elk deelvlak met de oppervlakte van het deelvlak A_j :

$$Q = \sum v_j \cdot A_j \quad (12)$$

In het algemeen worden de deelvlakken A_j van gelijke oppervlakte gekozen, zodat het debiet bekomen wordt door de gemiddelde snelheid te vermenigvuldigen met de totale oppervlakte van de meetsectie A_t .

$$Q = \sum \bar{v} \cdot A_t = A_t \cdot \sum \frac{v_j}{n} \quad (13)$$

Door toepassen van de foutenpropagatieregels (10) op vergelijking (13) volgt dat de onzekerheid bij toenemend aantal meetpunten n ongeveer afneemt met $1/\sqrt{n}$. Bij een oneindig aantal meetpunten gaat theoretisch de meetonzekerheid naar nul, maar dit is alleen het geval indien alleen toevallige fouten aanwezig zijn ("Central Limit Theorem" van de Gaussiaanse verdeling). Dit soort van meetonzekerheden, waarvan de omvang via statistische methodes kan ingeschat worden, wordt volgens de GUM aangeduid als Type A onzekerheid.

Uit het eerste deel is gebleken dat de theoretische uitdrukkingen voor de snelheid gemeten met thermische of vleugelrad anemometers niet toegankelijk zijn voor de gebruiker, zodat de analytische GUM benadering op dit punt niet toepasbaar is. De onzekerheid van de snelheidsmeting met deze toestellen kan dus best worden ingeschat aan de hand van de kalibratiegegevens.

Effecten van temperatuur en druk van de gasstroom op de meetonzekerheid zouden eventueel wel analytisch volgens GUM methode kunnen worden benaderd, maar deze worden voor diffuse emissies als marginaal beschouwd, gezien de beperkte marge waarin deze parameters variëren, en de uitdrukking van resultaten in reële omstandigheden van temperatuur en druk.

Het experimenteel onderzoek heeft anderzijds aangetoond dat grote onzekerheden van type B, zogenaamde systematische afwijkingen, de doorslag geven in de meetnauwkeurigheid voor het totaal debiet bij diffuse emissies.

Tevens blijkt dat in de grote meerderheid van de bestudeerde gevallen met de thermische anemometers positieve systematische afwijkingen voorkomen, d.i. een overschatting van de diffuse emissiedebieten, zie bijvoorbeeld het korte overzicht van afwijkingen in tabel 40.

De best bruikbare schattingsmethodes zijn bijgevolg, ofwel de factoren die hieronder worden opgesomd voor het specifieke geval te weerhouden, een numerieke inschatting te maken en de totale meetonzekerheid af te leiden uit de kwadratensom, ofwel de range van in de praktijk vastgestelde afwijkingen (8.3) te gebruiken als raming van de grootteorde van de meetonzekerheid voor typische situaties.

8.2 Factoren die bijdragen tot de meetonzekerheid

De volgende factoren leveren een niet te verwaarlozen bijdrage tot de meetonzekerheid bij diffuse debietstromen:

- foute positionering van de sonde op de meetpunten
 - diepte - hoogte (?)
 - yaw (+)
 - pitch (+)
- onrepresentativiteit van de meetpunten
 - de gemiddelde snelheid van alle meetpunten wijkt af van het werkelijk gemiddelde (+)
- kalibratie-onzekerheid van de meetsonde (+)
- onstabielheid van de stroming in de tijd (+)
- effect van turbulentie van de stroming, vooral op thermische anemometers (+)
- systematische fout door temperatuurverschillen tussen in- en uitstroom (+)
 - afkoeling door koude lucht wordt door TA als stroming gemeten; onderschatting van uitstroom en overschatting van koude instroom (?)

- systematische fout door afwijkende stromingshoek (+)
 - effect op respons van sonde (+)
 - niet corrigeren voor werkelijke stroom loodrecht door vlak (+)
- correcties voor temperatuur, druk, en watergehalte van de gasstroom (-)
 - het niet uitvoeren van deze correcties kan als verwaarloosbaar worden beschouwd

De belangrijkste factoren zijn met een (+) teken gemerkt, de minder belangrijke met een (-) teken. Bij de factoren met een vraagteken (?) is bij sommige proeven een belangrijk effect genoteerd, maar het is niet zeker of dit effect steeds een belangrijke rol speelt.

Het blijkt dat vele van de doorslaggevende factoren in de meetonzekerheid onmogelijk in te schatten zijn, tenzij via experimentele weg voor de concrete omstandigheden.

8.3 In de praktijk vastgestelde afwijkingen

In tabel 40 zijn de afwijkingen samengevat die kunnen optreden bij de meting van diffuse debietstromen als indicatie voor de meetonzekerheid die in de praktijk kan verwacht worden. Wanneer verschillende resultaten beschikbaar zijn worden de hoogste en de laagste waarde opgegeven. Voor de thermisch anemometers zijn voor de verschillende types van openingen alleen de cijfers met het beste instrument (TSI) weerhouden. Voor het vleugelrad zijn slechts enkele data beschikbaar

Tabel 40. Vastgestelde afwijkingen van de juiste waarde van het referentiedebiet als indicatie voor meetonzekerheid bij diffuse debietmetingen

Situatie	Afwijkingen	
	Thermische anemometer	Vleugelrad
Windtunnel (kalibratie)	-29 % tot +9 %	+3 %
Ventilator uitlaatrooster	+3 % tot +47 %	
Ventilatorrooster - extra draaiing	+10 % tot +79 %	
Rond inlaatrooster	+15 % tot +20 %	
Rechthoekig raam	-0,6 % tot +4,7 %	
Rechthoekig raam draaistroom	+9,8 % tot +18 %	
Rechthoekig raam hoek stroming 45°	+50 % tot +71 %	
Open poort, zonder bepaling stroomrichting	-4 % tot +168 %	
Open poort, met bepaling stroomrichting	-25 % tot -3,5%	-3,5 %
Natuurlijke trek, met bepaling stroomrichting	> 100% (*)	

(*) geen referentiedebiet beschikbaar, raming gebaseerd op verschil met ventilatiedebietbepaling met tracer

REFERENTIES

ISO 10780 Stationary source emissions - Measurement of velocity and volume flowrate of gas streams in ducts (1994)

NBN T95-001 Bepaling van het volumedebiet van een gas in een leiding met behulp van een Pitotbuis (1979)

EPA Method 2 - Determination of stack gas velocity and volumetric flow rate - type S Pitot tube (2000)

ISO 14164 Stationary source emissions - Determination of the volume flowrate of gas streams in ducts - Automated method (1999)