

Meting van gassnelheid en volumedebiet in een gaskanaal

INHOUD

1	Toepassingsgebied	3
2	Principe	4
3	Uitrusting	6
3.1	<i>Standaard pitotbuis</i>	6
3.2	<i>S-type Pitotbuis</i>	7
3.3	<i>Micromanometer</i>	7
3.4	<i>Temperatuurmeter</i>	8
3.5	<i>Barometer</i>	8
3.6	<i>Manometer voor statische druk</i>	8
3.7	<i>Apparatuur voor gasanalyse</i>	8
4	Meetpunten	9
4.1	<i>Keuze van de sectie</i>	9
4.2	<i>Aantal meetpunten in ronde leidingen</i>	9
5	Uitvoering van de meting	13
6	Berekeningen	13
7	Kalibratie van pitotbuizen	14
8	Bepalen van de richting van de gasstroom	16
9	Aandachtspunten	17
9.1	<i>Aandachtspunten bij snelheidsmeting</i>	17
9.2	<i>Aandachtspunten bij de debietsbepaling</i>	17
10	Meetonzekerheid	18
11	Alternatieve methodes	20
12	Referenties	20

1 TOEPASSINGSGEBIED

Deze methode behandelt de meting van gassnelheid en debiet in schoorstenen en andere gaskanalen. De snelheidsmeting op verschillende punten is noodzakelijk omwille van een te verwachten snelheidsgradient over de kanaaldoorsnede. De bepaling van het gasdebiet is nodig om de emissiestroom (in kg/h of g/h) van de aanwezige polluenten te berekenen. Het totale volumedebiet wordt berekend als het product van de kanaaldoorsnede (m²) en de gemiddelde gassnelheid (m/s), die werd bepaald in een voorgeschreven reeks representatieve punten. Verder is een snelheidsmeting noodzakelijk in functie van een isokinetische bemonstering in geval van stofvormige componenten of bij aanwezigheid van druppels.

In sommige gevallen dient de snelheids- of debietsbepaling uitgevoerd omdat dit gegeven expliciet wordt gevraagd.

Zolang de Belgische norm NBN T 95-001 geldt, heeft deze voorrang op de ISO 10780. Dit betekent dat voor kritische toepassingen alleen de NBN T 95-001 rechtsgeldig is en conform deze norm gemeten moet worden voor de keuze van de meetpunten en de meetduur van 2 minuten. Voor niet kritische toepassingen kan naast ISO 10780 eventueel ook de EN 13284 (stofbepaling) gevolgd worden voor de keuze van de meetpunten.

Kritische toepassingen zijn die waar het gemeten debiet gebruikt wordt voor een toetsing of rapportering die door de wet wordt gevraagd, namelijk:

- voor emissiegrenswaarden afhankelijk van de massastroom in (k)g/h
- als de debietsmeting wordt gebruikt voor het opstellen van het emissiejaarverslag
- als de debietsmeting dient voor het opstellen van massabalansen, bv. voor solvent- of nutriëntentebalans

De gassnelheid wordt steeds uitgedrukt in meter per seconde, het rookgasdebiet wordt gewoonlijk in m³/h, in drie verschillende toestanden, uitgedrukt:

- rookgasdebiet in m³/h bij kanaalomstandigheden
- rookgasdebiet in Nm³/h, bij normaal omstandigheden (0°C en 101,3 kPa)
- droog rookgasdebiet bij normaalomstandigheden.

Deze methode beschrijft de meting van de gemiddelde snelheid in een sectie door "scanning" of traversering, d.i. de meting in een netwerk van punten gelegen op verschillende assen, met een standaard of een S-type pitotbuis.

De methode is toepasbaar onder volgende voorwaarden:

- een rechtlijnige en ongestoorde kanaallengte van minstens 6 (7) hydraulische diameters is beschikbaar waarin het meetpunt gesitueerd is met 4 (5) D_h stroomop- en 2 D_h stroomafwaarts, echter te verhogen tot 5 D_h indien het stroomafwaarts gelegen obstakel de monding aan de atmosfeer is
- Reynoldsgetal > 1200 en volledig uitgebouwde turbulente stroming. Het Reynoldsgetal $Re = (\rho \cdot v \cdot D_h) / \mu$ kan worden berekend uit de volumemassa, snelheid, hydraulische diameter en viscositeit μ : (symbolen zoals in vergelijking (3), μ in kg.m⁻¹s⁻¹ = 1,82.10⁻⁵ voor lucht bij 20 °C). (Noot: het misverstand bestaat dat laminaire stroming vereist is, maar wegens grotere wandeffecten en gradiënten kan het debiet bij laminaire stroming minder nauwkeurig worden gemeten. Wat wordt bedoeld is dat draaistromen en andere afwijkingen in de stromingsrichting

niet gewenst zijn. Voorwaarde is dat de resultante evenwijdig met het meetkanaal in elk punt positief moet zijn).

- de dynamische druk (pitotdruk) > 5 Pa bij traverseringsmetingen
- de stromingsrichting van het rookgas op elk monsternamepunt wijkt niet meer dan 15° af van de as van het rookgaskanaal.
- in de meetdoorsnede mag er geen negatieve stroming zijn

Buiten deze grenzen en in de buurt ervan wordt de methode minder betrouwbaar en neemt de meetonzekerheid toe.

2 PRINCIPE

De gemiddelde snelheid in de meetsectie wordt bepaald door met een pitotbuis gedurende een vastgestelde tijd op een aantal voorgeschreven punten van het kanaal te meten. Elk punt ligt in het zwaartepunt van een ringvormig deel (voor ronde kanalen) van het kanaal dat telkens dezelfde oppervlakte heeft. Het rookgasdebiet wordt berekend uit de gemiddelde snelheid van alle meetpunten, vermenigvuldigd met de oppervlakte van de kanaaldoorsnede.

Het vochtgehalte, de rookgassamenstelling, druk en de temperatuur worden gemeten om de volumemassa (dichtheid) van het rookgas te berekenen.

Bij een continue snelheidsmeting wordt een pitotbuis gebruikt die is opgesteld in een vast meetpunt en waarvan de dynamische druk continu wordt geregistreerd. Door een voorafgaande traverseringsmeting wordt een kalibratiefactor bepaald die de verhouding tussen de totale gemiddelde snelheid en de snelheid in het vaste punt weergeeft.

De meting berust op het theorema van Bernoulli:

$$P_{\text{tot}} = p_s + p_d \quad (1)$$

$$p_d = \Delta p = \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (2)$$

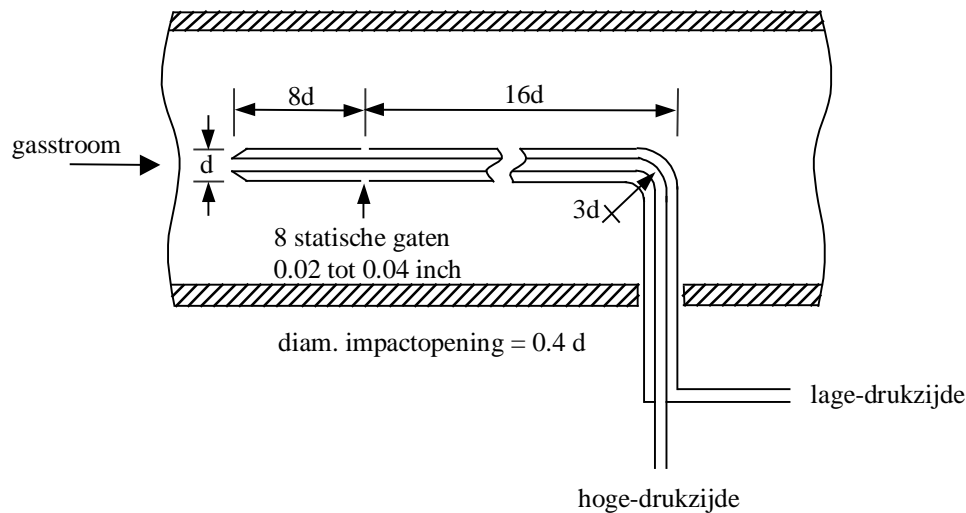
zodat:

$$v = K \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad (3)$$

met

P_{tot}	totaaldruk (Pa)	
p_s	statische druk (Pa)	
p_d	dynamische druk (Pa)	
Δp	gemeten drukverschil over pitotbuis = $p_d = P_{\text{tot}} - p_s$	(Pa)
ρ	volumemassa bij kanaalomstandigheden (kg/m ³)	
v	rookgassnelheid (m/s)	
K	kalibratiefactor van de Pitotbuis	

De dynamische druk Δp wordt gemeten als het verschil tussen de totaaldruk en de statische druk, dit is het drukverschil over de aansluitingen van de pitotbuis. De aflezing gebeurt door middel van een micromanometer.



Figuur 1: Principe van de gassnelheidsmeting in een kanaal met een pitotbuis

Wanneer een S-type pitotbuis wordt gebruikt, dan wordt een hoger drukverschil gemeten dan p_d volgens het theorema van Bernoulli. Hierdoor is het nodig een kalibratiefactor $K = 0,78$ tot $0,88$ in te voeren. De kalibratiefactor dient experimenteel bepaald door vergelijking met een standaardpitotbuis of een referentiesnelheid in een windtunnel.

Het gebruik van S-type pitotbuizen is aan te bevelen voor volgende omstandigheden waar de toepassing van standaardtypes problemen meebrengt:

- in gassen die stof en druppeltjes bevatten, om verstopping van de fijne gaatjes van de standaardpitotbuis te vermijden.
- bij lage stroomsnelheden, waar de hogere respons van de S-type pitotbuis grotere en dus nauwkeuriger meetbare drukverschillen oplevert.
- in kanalen waar slechts een kleine opening beschikbaar is, in combinatie met een grote wanddikte, waar een L-type niet doorheen kan.

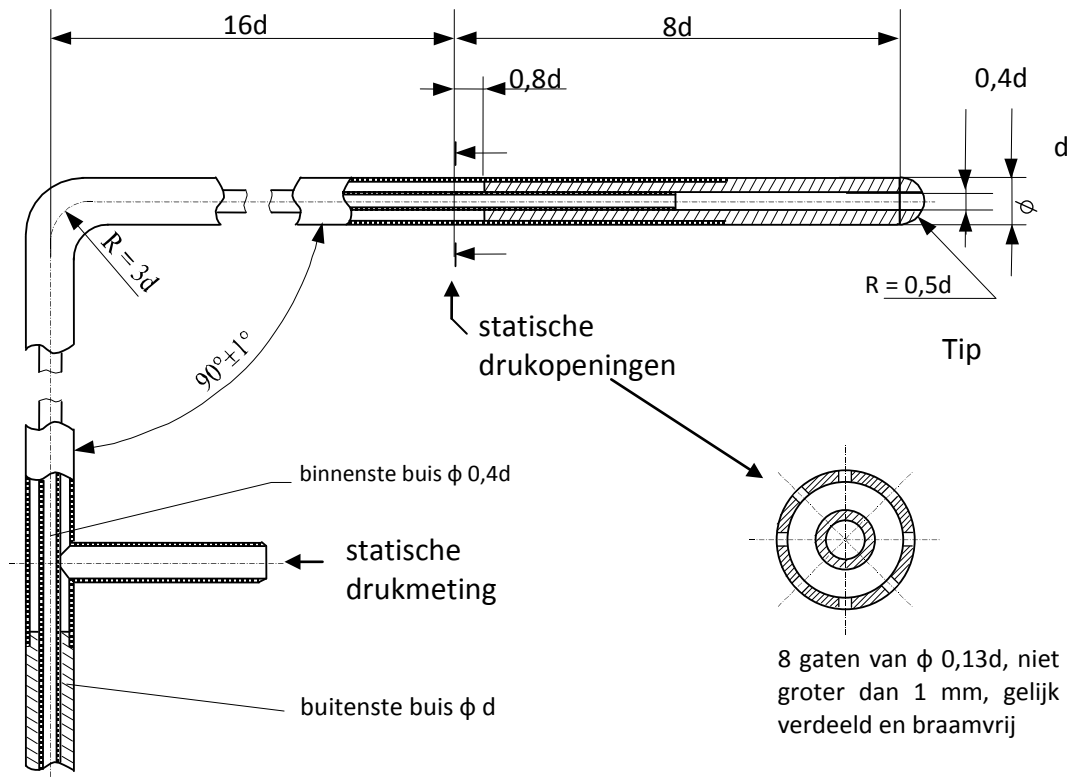
Het gebruik van een standaard of L-type pitotbuis is aan te bevelen omwille van de relatieve ongevoeligheid voor foutief uitlijnen tegenover de gasstroomrichting.

Zowel standaard als S-type pitotbuizen dienen in principe gekalibreerd te worden. Volgens de Belgische norm NBN T 95-001 is voor 3 types van standaardpitotbuis geen kalibratie nodig aangezien de ijkfactor voldoende dicht bij 1 ligt. Dit betreft de types AMCA, Cetiat en NPL. Deze types voldoen aan de vereiste dat de respons relatief ongevoelig is voor kleine afwijkingen in de positie van de sonde tegenover de stroming.

Voor het berekenen van de volumemassa van het rookgas moeten de totaaldruk, de temperatuur, de gassenstelling en het watergehalte bekend zijn of gemeten worden.

3 UITRUSTING

3.1 STANDAARD PITOTBUIS



Figuur 2: Standaard of L-type pitotbuis volgens ISO 10780

De standaard pitotbuis (Figuur 2) bestaat uit een cilindrische meetkop die loodrecht is gemonteerd op een lange lans, waarin eventueel afstandsmerktekens zijn gegraveerd. De tip heeft een sferische, ellipsoïdale of conische vorm met een centraal gaatje dat de totaaldruk opneemt. Op een voorgeschreven afstand van de tip bevinden zich verschillende zijdelings geboorde gaatjes die de statische druk opnemen. Aan het einde van de lans zijn twee nippels voor aansluiting van de leidingen van de micromanometer voorzien. Op de lans is een richtingsaanwijzer gemonteerd die parallel staat met de meetkop, waarmee de pitotbuis kan uitgericht worden met de tip in de richting tegen de stroom.

Het standaardtype pitotbuis wordt ook soms Prandtl of L-type genoemd. Figuur 2 is één voorbeeld van uitvoering met detailafmetingen. Voor de gedetailleerde afmetingen van andere types die aan normvereisten voldoen wordt verwezen naar ondermeer de NBN T 95-001, ISO 10780 en ISO 3966. Standaardtype pitotbuizen die aan deze vereisten voldoen kunnen meetresultaten volgens deze normen genereren. Pitotbuizen die aan de ISO 3966 voorschriften voldoen hebben een kalibratiefactor $K = 0,99 \pm 0,01$. Andere types of voorgaande types die in het veld worden gebruikt, moeten steeds worden gekalibreerd tegenover een referentie pitotbuis met gekende kalibratiefactor. Bij het ouder worden en door intensief gebruik kunnen vervormingen van ondermeer de tip optreden die herkalibratie noodzakelijk maken. Voor de meeste standaardtypes pitotbuizen ligt de kalibratiefactor tussen 0,98 en 1,00.

De tip van de standaard pitotbuis moet voldoen aan volgende vereisten:

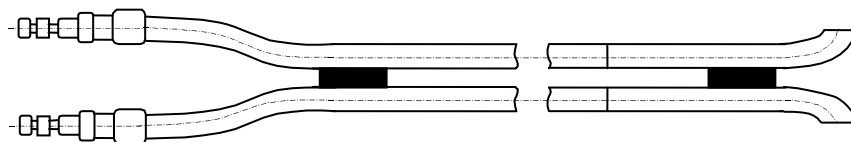
- ingeval er afwijkingen bestaan met de voorschriften van ISO 3966 moet de meetfout als functie van de hoek met de stromingsrichting worden nagegaan
- de kalibratiefactor van een pitotbuis mag niet meer dan $\pm 1,0\%$ afwijken van een referentie pitot en moet onveranderlijk blijven gedurende de levensduur van de pitotbuis. Een nieuwe pitotbuis dient gecontroleerd voor ingebruikname en bij elke gebeurtenis die twijfel doet ontstaan over de kalibratiefactor (vallen, vervorming van tip, corrosie...)
- De statische drukopeningen moeten kleiner zijn dan 1,6 mm diameter

3.2 S-TYPE PITOTBUIS

Een schematische voorstelling van een S-type pitotbuis is gegeven in figuur 3. Een meer precieze beschrijving van de vorm van de punten wordt gegeven in de normen ISO 10780 en ISO 3966. Indien het ontwerp voldoet aan de eisen van deze normen dan kan worden aangenomen dat de kalibratiefactor van $0,84 \pm 0,01$ is. Bij de ingebruikname van S-pitotbuizen kan eventueel worden afgezien van kalibratie indien de geometrische vorm voldoet aan de specificaties van de normen. Alle pitotbuizen die in het veld gebruikt worden, moeten gekalibreerd worden tegenover een referentiepitotbuis waarbij de frequentie afhangt van de gebruiksfrequentie.

Het gebruik van S-types is aangewezen bij gassen die druppeltjes of stof bevatten, omwille van de grotere openingen, typisch 4-10 mm.

Het is niet toelaatbaar om een S-type pitotbuis te dicht in de buurt van een thermokoppel of een stofsonde te gebruiken. Door de stuwing van de gasstroom rondom deze obstakels ontstaan namelijk druk- en richtingsveranderingen die tot foutieve metingen leiden. ISO 10780 geeft voorschriften over de te respecteren afstanden tot de openingen.



Figuur 3: S-type pitotbuis

3.3 MICROMANOMETER

De verschuldruk over een pitotbuis in een gasstroom dient gemeten met een micromanometer, bijvoorbeeld een vloeistofmanometer met instelbare helling, of met een gekalibreerde elektronische micromanometer met een kwantificatielimiet van 10 Pa. De uitgebreide meetonzekerheid mag maximaal 4% van de afgelezen waarde bedragen voor verschuldrukken vanaf 100 Pa en maximum 4 Pa absoluut voor verschuldrukken beneden 100 Pa.

Als manometervloeistof kan 95% ethanol met een rode of blauwe kleurstof aangewend, of beter een minerale olie met gekende dichtheid (opgelet: er bestaan manometerolies van verschillende merken met verschillende dichtheden, verwisseling kan tot ernstige fouten op de snelheidsmeting leiden). In principe dient een correctie toegepast voor de thermische uitzetting van de manometervloeistof.

Bij verschuldrukken van minder dan 10 Pa moet een manometer met een lagere kwantificatielimiet (5 Pa) gebruikt worden. Meetwaarden tussen 5 en 10 Pa moeten steeds gerapporteerd worden. Indien meetwaarden beneden de kwantificatielimiet van de manometer gerapporteerd worden, dan moet dit in het rapport aangegeven worden.

Zowel voor elektronische als voor vloeistofmanometers is kalibratie en/of regelmatige controle noodzakelijk.

3.4 TEMPERATUURMETER

De gastemperatuur dient te worden bepaald om de volumemassa te berekenen in elk punt waar de snelheid wordt gemeten. De gebruikte temperatuurvoeler moet voldoende fijn zijn om een snelle respons te geven en een geringe invloed van geleiding te ondergaan. De responstijd van het thermokoppel dient beneden 40 seconden te liggen. In bepaalde omstandigheden kan afscherming tegen warmtestraling gewenst zijn.

De sonde van de temperatuurmeter moet recht en stijf zijn, zodat op exact dezelfde meetpunten wordt gemeten als de gassnelheid. Een gecombineerde pitotbuis met vast gemonteerd thermokoppel (zonder aanzuigsonde) wordt aanbevolen, evenwel met inachtneming van de afstanden zoals in ISO 10780.

Thermokoppels of Pt-100 sensoren met een totale meetonzekerheid op het eindresultaat, dus inclusief die van alle onderdelen en uitleesapparaat, beneden 1% van de absolute temperatuur dienen te worden toegepast (NBN T 95-001).

3.5 BAROMETER

Een gekalibreerde barometer wordt gebruikt om de atmosferische druk te meten. De meetonzekerheid moet beter zijn dan 0,3% van de gemeten luchtdruk of 300 Pa (ISO 10780).

3.6 MANOMETER VOOR STATISCHE DRUK

Deze manometer dient te worden verbonden met de statische drukaansluiting van de pitotbuis. Om de onderdruk in een schouw (schouwtrek) te kunnen meten dient de meetonzekerheid van dezelfde orde te zijn als die van de micromanometer. De meetonzekerheid op de onderdruk is voor de snelheidsmeting van minder belang.

3.7 APPARATUUR VOOR GASANALYSE

Voor de snelheidsmeting zelf volstaan gasanalyses die in de volume-massabepaling van de rookgassen resulteren in een onzekerheid op de volumemassa van hoogstens $\pm 2\%$.

In de praktijk zal hiertoe een CO₂- en een zuurstofmeting volstaan, naast een meting van het watergehalte.

Voor de snelheidsmeting van een luchtstroom kan van een gasanalyse worden afgezien, en volstaat een vochtgehaltebepaling.

De uitgebreide meetonzekerheid op de vochtgehaltebepaling moet kleiner zijn dan $\pm 20\%$ van de meetwaarde.

4 MEETPUNTEN

4.1 KEUZE VAN DE SECTIE

De voorschriften voor het aantal meetpunten en de ligging van het meetvlak verschillen naargelang de norm. Voor kritische toepassingen dient voor de keuze van de meetpunten altijd de NBN T 95-001 gevolgd te worden aangezien deze norm de meest nauwkeurige bepaling geeft. Voor niet kritische toepassingen kan naast ISO 10780 eventueel ook de EN 13284 (stofbepaling) gevolgd worden voor de keuze van de meetpunten.

In de meetsectie moet de stroming wervelvrij zijn zonder dode zone en zonder terugstroming. De meetdoorsnede moet zich bevinden in een rechtlijnig deel met constante vorm en doorsnede en lengte van tenminste 6 x de hydraulische diameter D_h , waarbij:

$$D_h = 4 \cdot \frac{\text{Oppervlak doorsnede}}{\text{Omtrek doorsnede}} \quad (4)$$

Twee derden van dit rechtlijnig stuk leiding dient zich stroomopwaarts het meetpunt te bevinden. ISO 10780 vereist een meetpunt in een recht stuk van minstens 7 D_h , met 5 D_h stroomopwaarts, en minstens 5 D_h verwijderd van de uitstroom naar de atmosfeer.

De Belgische norm NBN T 95-001 bevat aanbevelingen om in de stroming kunstmatig rechte stukken aan te brengen indien niet aan deze voorwaarde kan worden voldaan.

De minimum uitlezing van de manometer dient groter te zijn dan 5 Pa.

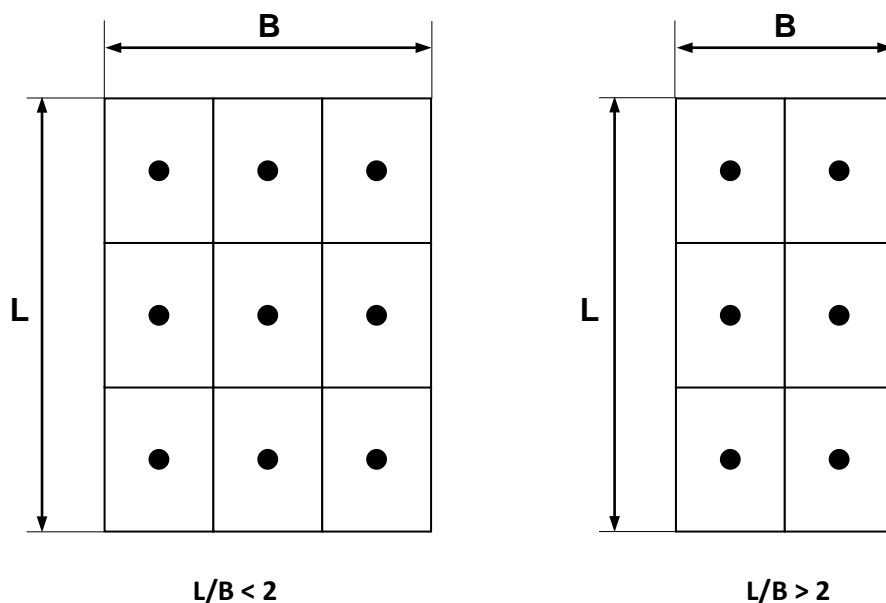
Voor de toegankelijkheid, veiligheid en de uitrusting van het meetplatform wordt verder verwezen naar het hoofdstuk over de inrichting van de meetplaats.

4.2 AANTAL MEETPUNTEN IN RONDE LEIDINGEN

Tabel 1: Aantal meetpunten in ronde leidingen volgens NBN T 95-001

Binnendiameter D in mm	N aantal punten	n aantal diameters
$D \leq 250$	1	1
$250 < D \leq 500$	5	2
$500 < D \leq 750$	9	2
$750 < D \leq 1000$	13	2
$1000 < D \leq 1500$	17	2
$1500 < D \leq 2500$	25	2
$2500 < D \leq 4000$	25	3
$4000 < D$	33	4

Figuur 4 schetst de ligging van de meetpunten volgens NBN T 95-001. De doorsnede wordt onderverdeeld in deelvlakjes van gelijke oppervlakte (geschaduwde en niet geschaduwde zones). In het zwaartepunt van elke deelvlakje wordt gemeten. De NBN norm geeft wiskundige uitdrukkingen voor elk zwaartepunt I_i en I_j resp. vóór en voorbij het middelpunt. Deze waarden worden ook in tabelvorm opgegeven. Tabel 3 geeft de posities voor het meest voorkomende geval waarbij over 2 diameters wordt gemeten. Voor andere gevallen wordt naar de norm verwezen.



Figuur 5: Schematische verdeling van rechthoekige doorsneden

Figuur 5 toont de indeling van rechthoekige meetdoorsneden. De sectie wordt verdeeld in gelijke deelvlakken waarvan de lengte niet meer dan 2 maal de breedte mag bedragen. De meetpunten worden gekozen in het midden van elk deelvlak. Wanneer de lengte van het kanaal groter is dan 2 maal de breedte ($L/B > 2$) dan dient de grootste afmeting L onderverdeeld in het grootste aantal deelvlakken.

Tabel 3: Ligging van de meetpunten in een ronde doorsnede voor 2 meetassen volgens NBN T 95-001

Volgnummer van het meetpunt	Aantal meetpunten per diameter					
	2	4	6	8	10	12
1	0,113	0,059	0,040	0,030	0,024	0,020
2	0,5	0,211	0,133	0,098	0,077	0,064
3	0,887	0,5	0,260	0,179	0,138	0,113
4		0,789	0,5	0,290	0,211	0,168
5		0,941	0,740	0,5	0,311	0,235
6			0,867	0,710	0,5	0,327
7			0,960	0,821	0,689	0,5
8				0,902	0,789	0,673
9				0,970	0,862	0,765
10					0,923	0,832
11					0,976	0,887
12						0,936
13						0,980
minimum aantal meetpunten, N	5	9	13	17	21	25
D_{max} mm	500	750	1000	1500	1500	2500

Tabel 4: Minimum aantal meetpunten in een ronde doorsnede volgens ISO 10780

Kanaal doorsnede m ²	kanaal diameter m	minimum aantal diameters	Minimum aantal punten per diameter middelpunt		Minimum aantal punten per vlak middelpunt	
			inbegrepen	niet inbegr.	inbegrepen	niet inbegr.
0,07 - 0,38	0,3 - 0,7	2	3	2	5	4
0,38 - 0,79	0,7 - 1	2	5	4	9	8
0,79 - 3,14	1 - 2	2	7	6	13	12
> 3,14	> 2	2	9	8	17	16

Tabel 5: Minimum aantal meetpunten in een rechthoekige doorsnede (ISO 10780)

Doorsnede sectie m ²	Minimum aantal toegangsopeningen	Minimum aantal meetpunten
0,07 - 0,38	2	4
0,38 - 1,5	3	9
> 1,5	4	16

Tabel 6: Minimum aantal meetpunten in een ronde doorsnede volgens EN 13248-1

Kanaal doorsnede m ²	kanaal diameter m	minimum aantal diameters	Minimum aantal punten per vlak
< 0,1	< 0,35	-	1
0,1 - 1,0	0,35 - 1,1	2	4
1,1 - 2,0	1,1 - 1,6	2	8
> 2,0	> 1,6	2	Minimum 12 en 4 per m ² (*)

(*) voor grote schouwen volstaan 20 meetpunten in het algemeen

Tabel 7: Minimum aantal meetpunten in een rechthoekige doorsnede volgens EN 13248-1

Kanaal doorsnede m ²	Minimum aantal verdelingen van de zijde (**)	Minimum aantal punten
< 0,1	-	1
0,1 tot 1,0	2	4
1,1 tot 2,0	3	9
> 2,0	≥ 3	Minimum 12 en 4 per m ² (*)

(*) voor grote schouwen volstaan 20 meetpunten in het algemeen

(**) In het algemeen worden beide zijden L₁ en L₂ van de rechthoekige doorsnede in een gelijk aantal delen verdeeld zodat oppervlakten bekomen worden met eenzelfde vorm als het gaskanaal. Indien L₁/L₂ > dan 2, dan zal L₁ in een groter aantal delen worden onderverdeeld dan L₂ zodat voor ieder van de deelvlakken geldt dat l₁/l₂ < 2.

5 UITVOERING VAN DE METING

De gassenstelling, het watergehalte en de druk en in het kanaal worden vooraf gemeten om de rookgasdichtheid te bepalen. Bij verbrandingsinstallaties en stookinstallaties kan de CO₂-concentratie eventueel berekend worden indien de O₂-concentratie gemeten wordt.

De temperatuur en de differentieeldruk worden per meetpunt bepaald.

- In elk voorgeschreven meetpunt wordt de gassnelheid gemeten. Voor kritische toepassingen bedraagt de meetduur 2 minuten. De gemiddelde aflezing wordt elektronisch geregistreerd of op zicht bepaald door de uitvoerder
- Een referentiepunt wordt gekozen om de stabiliteit van gassnelheid en temperatuur te controleren
 - ofwel wordt een tweede pitotbuis en temperatuursonde in het referentiepunt opgesteld
 - indien slechts 1 sonde beschikbaar is wordt minstens om de 10 minuten een meting in het referentiepunt herhaald

6 BEREKENINGEN

Voor de bepaling van de gassnelheid v_i in elk individueel meetpunt wordt de formule (3) toegepast. De volumemassa van het gas ρ voor natte rookgassen bij kanaalomstandigheden wordt als volgt bepaald uit de samenstelling van het rookgas. Bereken het gemiddeld moleculair gewicht M van het rookgas uit de molfracties in de natte rookgassen y_j (gelijk aan volumefractie) van alle hoofdbestanddelen ($y_j > 1\%$), met inbegrip van water ($j = N_2, O_2, CO_2, H_2O, \dots$):

$$M = \sum (y_j \cdot M_j) \quad (5)$$

met

- y_j = volume- of molfractie van de component j
- M_j = molecuulmassa van component j
- M = gemiddelde molecuulmassa van het gas

ρ_N , de rookgasdichtheid onder normaalomstandigheden (1013,25 hPa, 273,15 K) is dan:

$$\rho_N = M/22,4 \quad (6)$$

Omrekening naar kanaalomstandigheden gebeurt vervolgens via correctie voor temperatuur en druk:

$$\rho = \rho_N \cdot (P_k/1013,25) \cdot (273,15/T_k) \quad (7)$$

Indien de temperatuur meer dan 5% verschilt in de meetpunten dient volgens NBN T 95-001 de volumemassa in elk meetpunt afzonderlijk te worden bepaald.

De gemiddelde snelheid van de n gemeten punten wordt bekomen als

$$\bar{v} = \frac{\sum_j v_j}{n} \quad (8)$$

Het volumedebiet bij actuele condities van temperatuur, druk, watergehalte en zuurstofgehalte, volgt door vermenigvuldigen van de gemiddelde snelheid met de oppervlakte van de kanaaldoorsnede A, in m²:

$$Q = \bar{v} \cdot A \quad (9)$$

Het debiet in normaal kubieke meter Q_N wordt bekomen na correcties voor temperatuur en druk:

$$Q_N = Q \cdot \frac{273,15}{T_k} \cdot \frac{P_k}{1013,25} \quad (10)$$

waarbij P_k= absolute druk in de schouw in mbar (= atmosfeerdruk + statische druk)
T_k= temperatuur van het gas in K

Het debiet in normaal kubieke meter droog gas Q_{N,dr} wordt bekomen na correctie voor het watergehalte van het rookgas

$$Q_{N,dr} = Q_N \cdot \frac{100 - \%H_2O}{100} \quad (11)$$

waarbij %H₂O: watergehalte van de gasstroom in volumepercent

7 KALIBRATIE VAN PITOTBUIZEN

Kalibratie door kalibratie-instellingen

Pitotbuizen worden bij voorkeur gekalibreerd door hiervoor geaccrediteerde kalibratie-instellingen. Hierdoor kan de traceerbaarheid naar nationale standaarden of primaire fysische constanten worden gerealiseerd. Het kalibratiecertificaat dient een verwijzing naar de accreditatie van de instelling te bevatten en een waarde voor de kalibratie-onzekerheid.

Kalibratie in het eigen labo

Voorwaarden om een pitotbuis te kalibreren in het eigen laboratorium zijn:

- beschikken over een gedetailleerde kalibratieprocedure
- beschikken over een windtunnel die aan de normen voldoet (zie verder)
- evalueren van de kalibratie-onzekerheid bij elke kalibratie

Windtunnel

Voorwaarden waaraan een windtunnel dient te voldoen zijn ondermeer beschreven in ISO 10780. De windtunnel die voor het kalibreren van pitotbuizen wordt gebruikt moet een minimum diameter hebben van 30 cm en bovendien een voldoende grote doorsnede, zodat de ingebrachte pitotbuizen nooit meer dan 3% van het oppervlak innemen. De stabiliteit van de gasstroom moet beter zijn dan 1% gedurende de periode nodig om de standaard pitot en de te kalibreren pitotbuis af te lezen. De gassnelheid moet regelbaar zijn en moet minstens tot 18 m/s kunnen opgevoerd worden.

Kalibratieprocedure

Als referentie wordt een standaardpitotbuis met gekende kalibratiefactor gebruikt. De kalibratie gebeurt voor minstens 2 verschillende snelheden gespreid over het meetbereik (maar bij voorkeur niet bij lagere snelheden dan 5 m/s omwille van de grotere meetonzekerheid), in volgende stappen:

1. Lekdichtheid van aansluitingen controleren en micromanometer op zero afstellen door verbinden van de beide aansluitingen
2. De ventilator starten en wachten tot de windstroom gestabiliseerd is
3. Referentiepitotbuis inbrengen op een meetpunt waarvan vooraf getest werd dat er geen gradiënten of geen draaistromen aanwezig zijn. Dit meetpunt ligt bij voorkeur in het midden van de tunnel en zeker op minstens 10 cm van de wand. De meetopening wordt afgedicht zodat geen lucht in of uit kan lekken. De richting van de pitotbuis controleren. De dynamische druk Δp_{ref} , uitgedrukt in Pascal, noteren.
4. Referentiepitotbuis verwijderen en de te kalibreren pitotbuis op dezelfde plaats monteren. Opening rond pitotbuis afdichten, uitrichten en verschildruk noteren Δp_x in Pa
5. Herhaal stap 3 en 4 totdat een stel van drie bruikbare meetparen wordt bekomen
6. Bereken de kalibratiefactor K_x voor elk meetpaar met de onderstaande vergelijking en bepaal de gemiddelde kalibratiefactor. Als één van de bepaalde kalibratiefactoren meer dan 0,02 afwijkt van het gemiddelde dan wordt de kalibratie herhaald of wordt de pitotbuis vervangen. Een analoge voorwaarde wordt gesteld voor de afwijkingen tussen de factoren bepaald op de verschillende snelheidsniveaus.

$$K_x = K_{ref} \sqrt{\frac{\Delta p_{ref}}{\Delta p_x}} \quad (12)$$

7. Bij de kalibratie van S-type pitotbuizen wordt de kalibratiefactor achtereenvolgens bepaald met de ene en met de andere opening stroomopwaarts gericht. S-type pitotbuizen mogen enkel gebruikt worden als het verschil tussen de beide kalibratiefactoren kleiner of gelijk is aan 0,01.

Het gemiddelde van de bekomen kalibratiefactoren wordt gebruikt, ofwel - bij een groter aantal testsnelheden - een door regressie bekomen waarde.

Voor de kalibratieprocedure volgens ISO 10780 volstaan drie herhalingen per punt. Bij het bepalen van de kalibratie-onzekerheid is evenwel een groter aantal gegevens (minstens 6) vereist om de standaardonzekerheid te berekenen. Dit kan eenmalig gebeuren, ofwel kan deze worden berekend uit de verzameling van de gegevens bij alle snelheden, bv. via lineaire regressie.

Afwijkingen van de windtunnel en van de bovenstaande procedure kunnen aanvaardbaar zijn voor laboratoria die alleen voor eigen gebruik kalibreren. De invloed van deze afwijkingen op de kalibratie-onzekerheid dient wel te worden onderzocht en in rekening gebracht.

Bijvoorbeeld kan met de 2 pitotbuizen simultaan op een verschillend punt worden gewerkt. In dat geval dient ook het verschil in snelheid tussen de beide meetpunten geëvalueerd te worden.

Kalibratiefrequentie

De kalibratiefrequentie van pitotbuizen hangt af van het type en de gebruiksfrequentie.

- S-type pitotbuizen dienen steeds voor ingebruikname gekalibreerd (*)

(*) Noot: Ook voor S-type pitotbuizen bestaan vormvoorschriften die een kalibratie bij ingebruikname kunnen vervangen, bijvoorbeeld in EPA Method 2. Method 2G geeft aan hoe de opmeting van de criteria dient te gebeuren. Een laboratorium dat deze methode volgt dient te beschikken over een geëigende procedure, de nodige meetinstrumenten en een registratie van de opmetingen. Deze methode is niet geldig voor gecombineerde sondes (pitotbuis + aanzuigbek).

- Alle types die in het veld worden gebruikt dienen te worden gekalibreerd om de 1 tot 5 jaar, afhankelijk van de gebruiksfrequentie
- Voor standaard pitotbuizen die nieuw zijn of weinig gebruikt worden, zoals referentie pitotbuizen die het laboratorium niet verlaten, is geen kalibratie vereist op voorwaarde dat:
 1. een genormeerd type wordt gebruikt (NPL, Amca, Cetiat), ofwel een éénmalig gekalibreerde pitotbuis
 2. een natrekbare opvolging wordt uitgevoerd van de geometrische integriteit en van de lektheid

8 BEPALEN VAN DE RICHTING VAN DE GASSTROOM

Met standaard pitotbuis

Een standaardpitotbuis levert aanvaardbare metingen van de gassnelheid op zolang de richting van de buis niet meer dan 15° afwijkt van de stromingsrichting. Wanneer de afwijking groter wordt dan 15° vermindert de afgelezen dynamische druk snel. Bij 90° dwarsstelling wordt een negatieve druk afgelezen. Door de pitotbuis te draaien kan de richting voor het maximale drukverschil worden opgespoord. Deze richting komt overeen met de stromingsrichting. Op deze wijze kan de aanwezigheid van draaistromen of terugstroming worden aangetoond.

Met S-type pitotbuis

S-pitotbuizen laten een nauwkeurige meting van de gassnelheid toe op voorwaarde dat de richting van de gasstroom niet meer dan 15° afwijkt van de richting van de pitotbuis. Bij 90° dwarsstelling staan de drukopeningen van de S-pitotbuis parallel met de stroom en is de drukuitreading op de micromanometer nul. De richting van de gasstroom kan dus worden bepaald door de S-pitotbuis te draaien tot de manometer nul aanduidt. De stromingsrichting maakt dan een hoek van 90° met de richting van de pitotbuis.

9 AANDACHTSPUNTEN

9.1 AANDACHTSPUNTEN BIJ SNELHEIDSMETING

- De toestand van de pitotbuis is bepalend voor een goed resultaat van de snelheidsmeting. Rechtheid van de sonde en de tip, rechte hoek van de tip met de lans, en beschadigingen van de openingen dienen regelmatig te worden gecontroleerd en zo nodig hersteld.
- De positie van de pitotbuis in de opening moet goed recht zijn, om foute drukken te voorkomen en ook opdat de tip exact in de bedoelde meetpunten staat. Bij voorkeur een vaste montage met flens gebruiken zodat de pitotbuis vast zit en loodrecht op de beide assen van de leiding. Controleer regelmatig de positie in beide vlakken.
- De meetpunten dichtbij de wand zijn vaak onnauwkeuriger wegens invloed van wand en meetopening. Niet dichters dan 20 mm van de wand meten en de meetopening afdichten zonder uitstekende delen in de schouw.
- Kalibratiefactor van S-type pitotbuis is belangrijk voor de meetnauwkeurigheid
- Temperatuurmeting dient per meetpunt uitgevoerd; voldoende tijd laten voor het bereiken van de evenwichtstemperatuur; opletten voor invloed van buitenlucht bij het eerste meetpunt (bijvoorbeeld dichtst bijgelegen meetpunt laatst nemen).
- Variaties in de tijd van gassnelheid, watergehalte en gassamenstelling kunnen tot onnauwkeurige resultaten leiden. Meerdere bepalingen van deze parameters én de snelheid dienen toegepast bij fluctuerende condities. Een continue meting met een pitotbuis op één punt geeft een beeld van de schommelingen in snelheid.
- Maatregelen bij ongunstig gelegen meetdoorsneden: indien de ligging van de meetsectie niet voldoet aan de normvoorschriften dan kan de nauwkeurigheid worden opgevoerd door de snelheidsmeting op een groter aantal meetpunten (minstens het aantal volgens NBN norm, posities voor een grotere diameter kiezen) uit te voeren

9.2 AANDACHTSPUNTEN BIJ DE DEBIETSBEPALING

Bij rookgasdebietsmetingen worden in de praktijk soms grote afwijkingen tussen verschillende metingen of tussen de meting en de verwachte waarde vastgesteld.

- Een plausibiliteitscontrole van het gemeten rookgasdebiet is steeds aangewezen. Dit kan op de volgende manier:
 - toetsen van het resultaat aan vroegere metingen en/of informatie van de exploitant (bvb. nominaal ventilatordebiet)
 - vergelijking met het berekend of nominaal debiet, bijvoorbeeld voor verbrandingsprocessen, waar uit het gemeten zuurstofgehalte en het brandstofverbruik een berekening van de rookgasstroom mogelijk is.
 - vergelijkbaarheid nagaan van gemeten in- en uitgaande stromen van het proces
 - samentellen en vergelijken van de gemeten totale en samenstellende stromen
- Een toename van het aantal punten geeft een omgekeerd evenredige vermindering van de meetonzekerheid op de gemiddelde snelheid, en dus op het debiet. Bij twijfelgevallen is het steeds aan te raden het aantal meetpunten op te drijven.
- De nauwkeurigheid van de meting van de kanaalafmetingen heeft een grote invloed op de nauwkeurigheid van het berekende debiet (de oppervlakte is het kwadraat of product van de lineaire afmetingen). De maximum toegelaten afwijking op de diameter van de schouw bedraagt 2%.

- Bij sterk draaiende stroming (swirl) kan de stromingshoek als volgt worden bepaald:
 - Nivelleer de manometer en voer een zero uit
 - Maak een verbinding met de S-pitotbuis en voer een lekttest uit
 - Plaats de S-pitotbuis achtereenvolgens in ieder meetpunt zodat de vlakken van de openingen van de pitotbuis loodrecht op de meetdoorsnede staan (deze positie voor de S-pitotbuis is de 0°-referentie)
 - Registreer de differentieeldruk in elk punt. Als een verschildruk 0 in deze 0°-stand bekomen wordt, dan wil dit zeggen dat een aanvaardbare debietsconditie in dat punt bestaat. Als de verschildruk niet 0 is, dan moet de pitotbuis gedraaid worden totdat een 0-uitlezing op de manometer bekomen wordt. Registreer dan de draaiingshoek van de pitotbuis.
 - Als de draaiingshoek in elk punt minder dan 15° bedraagt dan is de debietsconditie in het gaskanaal aanvaardbaar. Indien niet, dan kan geen geldige meting met L- of S-pitotbuis uitgevoerd worden.

Wanneer de stromingsrichting niet parallel is met de as van de leiding, dan kunnen grotere snelheden worden gemeten dan wat met de werkelijke axiale stroom overeenkomt.

10 MEETONZEKERHEID

Bij de debietsbepaling komen in de praktijk frequent grote afwijkingen voor tussen laboratoria onderling en tussen verwachte en gemeten waarden. De oorzaak hiervan ligt vaak bij systematische fouten (bias) te wijten aan niet-conformiteit met de voorwaarden gesteld in het toepassingsgebied in paragraaf 1, of in afwijkingen van de meetapparatuur of van de ligging van de meetpunten. De volgende evaluatie gaat ervan uit dat de normen strikt worden nagevolgd, en houdt geen rekening met grote systematische afwijkingen.

De bepaling van de meetonzekerheid op de snelheidsmeting met een pitotbuis kan in drie stappen worden uitgevoerd:

1. Onzekerheid op de snelheidsmeting in één punt
2. Onzekerheid op de gemiddelde snelheid
3. Onzekerheid op het totaal debiet, in reële en standaardcondities

Om de verschillende onzekerheidsbijdragen op snelheids- en debietsmetingen te evalueren wordt eerst de GUM-benadering gevolgd. Deze methode laat toe de onzekerheid te berekenen in functie van de gassnelheid, en het effect van het aantal meetpunten en de kanaalomstandigheden te onderzoeken.

De variabelen die volgens de berekening van het debiet bijdragen in de meetonzekerheid zijn:

- pitotfactor K, onzekerheid volgens certificaat of eigen kalibratie
- Δp
- ρ , zelf bepaald uit gassamenstelling, watergehalte, temperatuur en druk
- schouwafmetingen of diameter D
- temperatuur en druk in de schouw

Andere factoren die niet in de formules zijn terug te vinden:

- variaties in functie van de tijd
- variaties in gassamenstelling en watergehalte
- afwijkende positie van de pitotbuis

- herhaalbaarheid

Onzekerheid op de plaatselijke snelheidsmeting

Door toepassing van de foutenpropagatieregels voor de gecombineerde meetonzekerheid volgens de GUM:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (13)$$

op vergelijking (3) bekomt men de volgende uitdrukking voor de meetonzekerheid bij de snelheidsmeting op 1 punt in functie van de samenstellende meetonzekerheden:

$$\frac{u_c^2(v)}{v^2} = \frac{u^2(K)}{K^2} + \frac{u^2(\Delta p)}{4 \cdot \Delta p^2} + \frac{u^2(\rho)}{4 \cdot \rho^2} \quad (14)$$

Onzekerheid op de gemiddelde snelheid

De gemiddelde snelheid van de n gemeten punten wordt bekomen uit (8) waardoor de meetonzekerheid op het gemiddelde overeenkomt met

$$u^2(\bar{v}) = \frac{1}{n^2} \sum_j u^2(v_j) \quad (15)$$

Hierbij wordt opgemerkt dat de standaardonzekerheid op de gemiddelde gassnelheid daalt met een stijgend aantal meetpunten.

Onzekerheid op het volumedebiet

Het volumedebiet wordt uit de gemiddelde snelheid berekend door vermenigvuldiging met de oppervlakte van de kanaaldoorsnede volgens vergelijking (9), waardoor de meetonzekerheid op het gemiddelde overeenkomt met:

$$\frac{u^2(Q)}{Q^2} = \frac{u^2(\bar{v})}{\bar{v}^2} + \frac{u^2(A)}{A^2} \quad (16)$$

Voor cirkelvormige doorsneden met diameter D geldt: $\frac{u^2(A)}{A^2} = 4 \times \frac{u^2(D)}{D^2}$

De verdere evaluatie van de meetonzekerheid op Q_N en $Q_{N,dr}$ aan de hand van formules (10) en (11) ligt voor de hand en wordt hier niet verder uitgewerkt.

11 ALTERNATIEVE METHODES

De beperkingen van de snelheidsmeting met Pitotbuis werden in het toepassings- gebied gegeven. De meest voorkomende problemen zijn te lage snelheden (< 5 Pa), afwezigheid van een conforme meetsectie, of een stroming die niet voldoet aan de homogeniteits- en stabiliteitsvoorwaarden van de normen.

In sommige van deze gevallen (en enkel in deze gevallen) kan een alternatieve meettechniek een oplossing bieden:

- schroefanemometer of hittedraadanemometer voor lagere gassnelheden (differentieeldrukken < 5 Pa)
- meting van de totale gasstroom met behulp van gastellers, meetflens of elektronische meettoestellen (swirlmeter e.d.) ... in geval van te kleine kanalen
- tracergasmeting van het integraal debiet bij ongunstige meetsecties
- laser-doppler anemometer voor 2- of 3-D bepaling van het stromingsveld

12 REFERENTIES

NBN T 95-001: 1979

Bepaling van het volumedebiet van een gas in een leiding met behulp van een pitotbuis

ISO 10780: 1994

Stationary source emissions - Measurement of velocity and volume flowrate of gas streams in ducts

ISO 14164: 1999

Stationary source emissions - Determination of the volume flowrate of gas streams in ducts - Automated method

EPA Method 1: 2011

Sample & velocity Traverses for stationary sources

EPA Method 2: 2000

Determination of stack gas velocity and volumetric flow rate (type S pitot tube) 2/2000

ISO 3966: 2008

Measurement of fluid flow in closed conduits – velocity area method using pitot static tubes

EN 13284-1: 2001

Stationary source emissions - Determination of low range mass concentration of dust – Part 1: Manual gravimetric method

Environment Agency

Method Implementation Document for EN 13284

BS EN 13284-1: 2002

Stationary source emissions – Determination of low range mass concentration of dust – Part 1: Manual gravimetric method