Ministerieel besluit van 29 april 2025 --- Belgisch Staatsblad van 07 mei 2025

http://www.emis.vito.be

Meting van gassnelheid en volumedebiet in een gaskanaal

INHOUD

1 Toepassingsgebied 3

2 Principe van de meting met pitotbuis 4

3 Uitrusting 6

3.1 Pitotbuis 6

3.1.1 Standaard pitotbuis 6

3.1.2 S-Pitotbuis 7

3.2 Verschildrukmanometer 8

3.3 Temperatuurmeter 8

3.4 Barometer 8

3.5 Apparatuur voor gasanalyse 9

4 Meetpunten 9

5 Uitvoering van de meting 9

6 Berekeningen 10

7 Kalibratie van Pitotbuizen 11

8 Bepalen van de richting van de gasstroom 13

9 Aandachtspunten 14

9.1 Aandachtspunten bij snelheidsmeting 14

9.2 Aandachtspunten bij de debietsbepaling 14

10 Meetonzekerheid 15

11 Referenties 17

Ministerieel besluit van 29 april 2025 --- Belgisch Staatsblad van 07 mei 2025

http://www.emis.vito.be

emis

Ministerieel besluit van 29 april 2025 --- Belgisch Staatsblad van 07 mei 2025

http://www.emis.vito.be

1 TOEPASSINGSGEBIED

Voor de bepaling van gassnelheid en debiet in schoorstenen en andere gaskanalen is volgende norm van toepassing, tenzij andere bepalingen in deze procedure zijn opgenomen:
NBN EN ISO 16911-1
Emissies van stationaire bronnen – Handmatige en geautomatiseerde bepaling van de stroomsnelheid en het debiet in afgaskanalen – Deel 1: Handmatige referentiemethode

De norm is toepasbaar voor cirkelvormige en rechthoekige afgaskanalen met meetplaatsen ingericht volgens de vereisten van procedure LUC/0/001 en 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 in een meetvlak. De axiale gassnelheid in verschillende punten wordt gemeten met een Pitotbuis (L type, S-type of 2D- en 3D-type pitotbuis) of een vleugelradanemometer. Selectiecriteria voor het gebruik van de verschillende types van Pitotbuizen en de vleugelradanemometer zijn in de NBN EN ISO 16911-1 opgenomen. Een S-type Pitotbuis wordt aanbevolen voor gebruik in kleine meetopeningen en bij gecombineerde sondes, bij aanwezigheid van druppels en hogere stofconcentraties. Bij gassnelheden lager dan 5 m/s of differentieeldrukken kleiner dan 5 Pa, zal het gebruik van een vleugelradanemometer mogelijk tot een lagere meetonzekerheid leiden dan het gebruik van een Pitotbuis. Bij de aanwezigheid van wervelingen in het afgaskanaal, kan een 3D-type Pitotbuis toegepast worden.

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 (m^2) 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.

Volgende alternatieve methoden voor de bepaling van het debiet zijn eveneens in de norm NBN EN ISO 16911-1 beschreven en voor gedefinieerde doeleinden toegelaten:

- berekening van het debiet vanuit het energieverbruik bij een verbrandingsproces;
- tracergas verdunningsmethode: het debiet wordt bepaald vanuit de verdunning van een gekende concentratie van een geïnjecteerde tracer;
- tracer transit time: het volumedebiet wordt bepaald aan de hand van de tijd dat een tracergas nodig heeft om een bepaalde afstand af te leggen

De voorliggende compendiumprocedure behandelt de bepaling van de gemiddelde gassnelheid en het gasdebiet in een meetdoorsnede met behulp van Pitotbuis of anemometer.

De gassnelheid wordt steeds uitgedrukt in meter per seconde, het afgasdebiet wordt gewoonlijk in m^3/h, in drie verschillende toestanden, uitgedrukt:

- afgasdebiet in m^3/h bij kanaalomstandigheden
- afgasdebiet in Nm^3/h, bij normaal omstandigheden (0°C en 101,3 kPa)
- droog afgasdebiet bij normaalomstandigheden.

Ministerieel besluit van 29 april 2025 --- Belgisch Staatsblad van 07 mei 2025
http://www.emis.vito.be

2 PRINCIPE VAN DE METING MET PITOTBUIS

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. Het afgasdebiet wordt berekend uit de gemiddelde snelheid van alle meetpunten, vermenigvuldigd met de oppervlakte van de kanaaldoorsnede:

$$Q = \bar{v} \times S \times 3600$$

met : Q = gasvolumedebiet in m^3/h, nat
$\bar{v}$ = gemiddelde gassnelheid in m/s
S = oppervlakte van de meetdoorsnede in m^2

De meting met Pitotbuis berust op het theorema van Bernoulli:

$$P_{tot} = p_C + p_d \qquad (1)$$

$$p_d = \Delta p = \frac{\rho . v^2}{2} \qquad (2)$$

zodat:

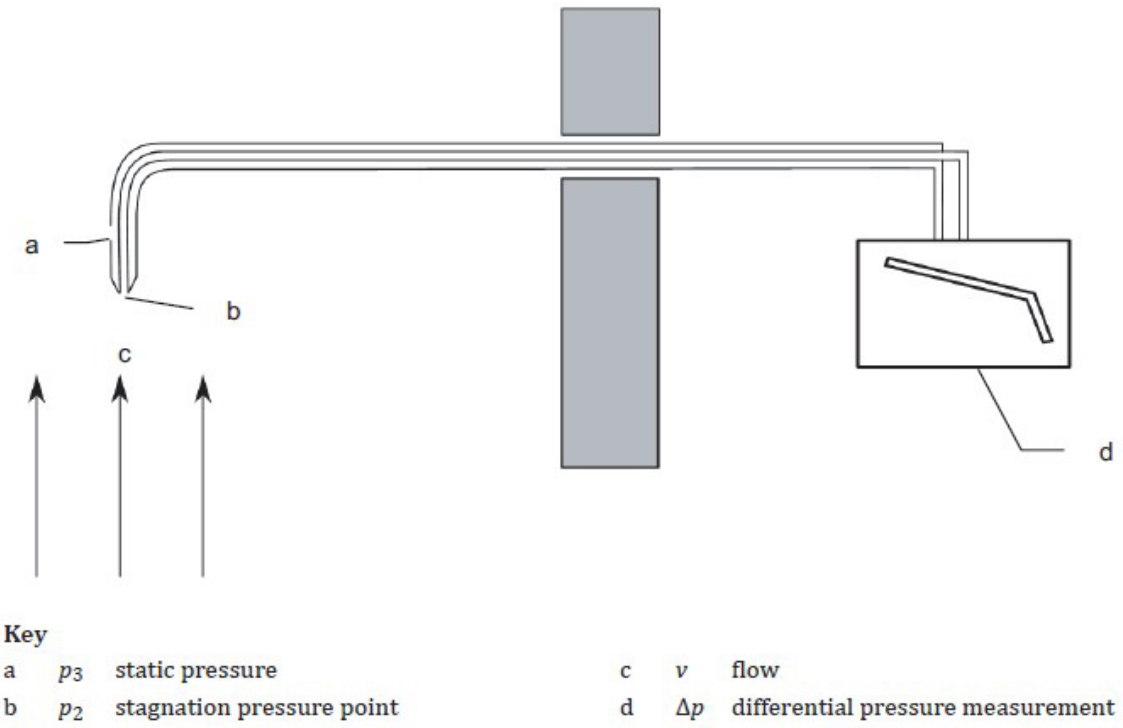
$$v = K.\sqrt{\frac{2 . \Delta p}{\rho}} \qquad (3)$$

met

P_{tot}	totaaldruk (Pa) in het afgaskanaal	
P_C	absolute druk in het afgaskanaal = patm + pstat (gem)	
p_d	dynamische druk (Pa)	
Δp	gemeten drukverschil over Pitotbuis = $p_d = P_{tot} - p_C$	(Pa)
ρ	dichtheid bij kanaalomstandigheden (kg/m^3)	
v	afgassnelheid (m/s)	
K	kalibratiefactor van de Pitotbuis	

Het basisprincipe van een Pitotbuis is dat één drukopening beïnvloed wordt door het stromend gas en één of meerdere andere drukopeningen worden blootgesteld aan de absolute druk in het gaskanaal (kanaaldruk). De dynamische druk Δp wordt gemeten als het verschil tussen de totaaldruk en de absolute druk, dit is het drukverschil over de aansluitingen van de Pitotbuis. De aflezing gebeurt door middel van een micromanometer.
Het vochtgehalte, de afgassamenstelling, absolute druk en de temperatuur worden gemeten om de dichtheid van het afgas te berekenen.

Ministerieel besluit van 29 april 2025 --- Belgisch Staatsblad van 07 mei 2025



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.
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.

De normen ISO 10780 en EN 13284-1 geven aan dat een S-type Pitotbuis gevoeliger is aan het foutief uitlijnen tegenover de gasstroomrichting. Volgens de norm NBN EN ISO 16911 wijst een laboratorium-evaluatie echter uit dat zowel L- als S-type Pitotbuizen een gelijke respons vertonen ten opzichte van het foutief uitlijnen tegenover de gasstroom. Indien de foutieve uitlijning van de Pitotbuizen tot 15 tot 20° beperkt blijft, dan werd geen significante (<1%) wijziging van de snelheidsuitlezing vastgesteld.

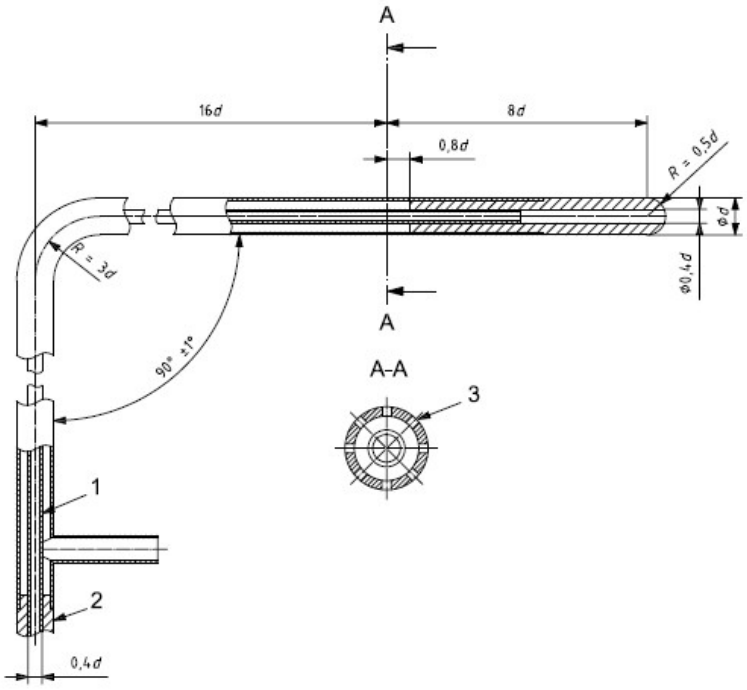
Voor het berekenen van de dichtheid van het afgas moeten de absolute druk in het afgaskanaal, de temperatuur, de gassamenstelling en het watergehalte bekend zijn of gemeten worden.

http://www.emis.vito.be

3 UITRUSTING

3.1 PITOTBUIS

3.1.1 STANDAARD PITOTBUIS



1 binnendiameter buis
2 buitendiameter buis
3 8 openingen van een diameter 0,13*d*, niet groter dan 1 mm, gelijk verdeeld en braamvrij

Figuur 2: Standaard of L-type Pitotbuis volgens NBN EN ISO 16911-1 (AMCA type)

De standaard Pitotbuis bestaat uit een cilindrische meetkop die loodrecht is gemonteerd op een lange lans, waarin eventueel afstandsmerktekens zijn gegraveerd. De tip heeft een sferische, ellipsoidale 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 absolute 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.

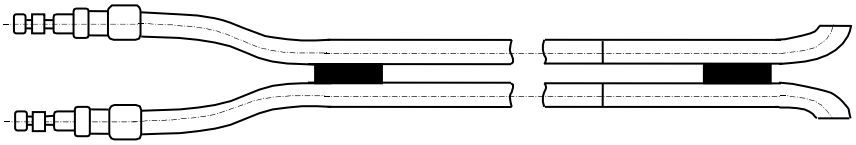
Figuur 2 is één voorbeeld van uitvoering met detailafmetingen volgens de NBN EN ISO 16911 (AMCA type). Andere types die aan normvereisten voldoen zijn in deze norm opgenomen.

Ministerieel besluit van 29 april 2025 --- Belgisch Staatsblad van 07 mei 2025
http://www.emis.vito.be

Ministerieel besluit van 29 april 2025 --- Belgisch Staatsblad van 07 mei 2025
http://www.emis.vito.be

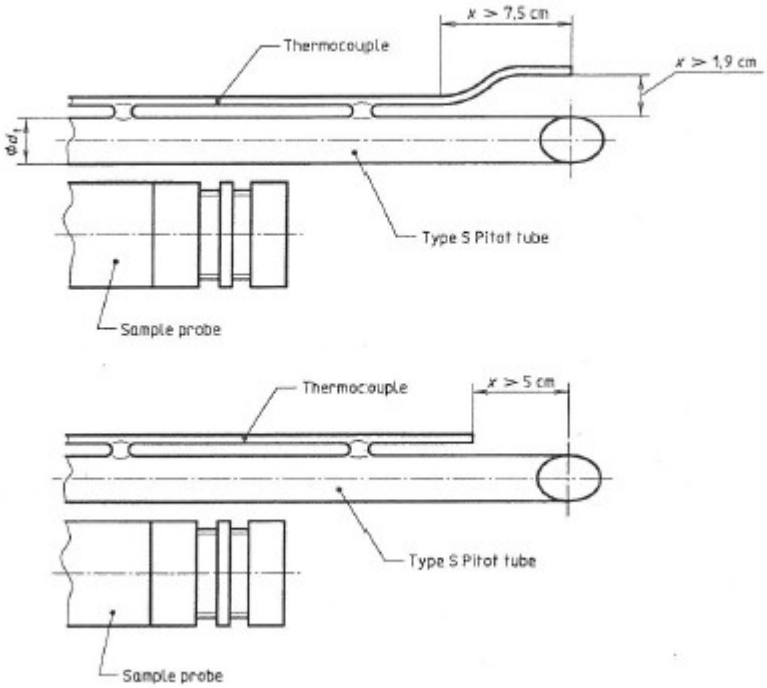
3.1.2 S-PITOTBUIS

Een schematische voorstelling van een S-type Pitotbuis is gegeven in figuur 3. Het gebruik van S-types is aangewezen bij gassen die druppeltjes of stof bevatten, omwille van de grotere openingen, typisch 4-10 mm. Conform de NBN EN ISO 16911 zijn eveneens andere types van Pitotbuizen zoals 2D en 3D type Pitotbuizen toegelaten.



Figuur 3: S-type Pitotbuis en oriëntering in de gasstroom

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 onderstaande voorschriften (zie Figuur 4) over de te respecteren afstanden tot de openingen. Bij gebruik van een gecombineerde S-pitotbuis+thermokoppel of aanzuigsonde+S pitotbuis+thermokoppel moet het thermokoppel en/of aanzuignozzle dus ver genoeg van de openingen van de pitotbuis verwijderd blijven.



Figuur 4: Vereiste afstanden van het thermokoppel tot de openingen van de S Pitotbuis om foutieve snelheidsmetingen te verhinderen

Voor de debietsmeting binnen een wettelijk kader mag enkel een pitotbuis (eventueel gecombineerd met thermokoppel) gebruikt worden en dus geen aanzuigsonde voorzien van thermokoppel en pitotbuis.

3.2 VERSCHILDRUKMANOMETER

De verschildruk over een Pitotbuis in een gasstroom dient gemeten met een micromanometer, bijvoorbeeld een vloeistofmanometer met instelbare helling, of met een gekalibreerde elektronische micromanometer. De minimum afleesbare verschildruk moet 5 Pa bedragen.

De elektronische drukverschilmeter is vaak gevoeliger voor fluctuaties in de afgassnelheid. Indien fluctuaties van de verschildrukken van meer dan 10% van de gemiddelde uitlezing voorkomen, dan is demping van het signaal noodzakelijk (NBN EN ISO 16911 A.2.2.3).

Als manometervloeistof voor de vloeistofmanometer 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).

Zowel voor elektronische als voor vloeistofmanometers is kalibratie en/of regelmatige controle noodzakelijk. De uitgebreide meetonzekerheid mag maximaal 1% van de afgelezen waarde bedragen of maximum 4 Pa absoluut (grootste van beide waarden).

3.3 TEMPERATUURMETER

De gastemperatuur dient te worden bepaald om de dichtheid 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.

3.4 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).

Ministerieel besluit van 29 april 2025 --- Belgisch Staatsblad van 07 mei 2025
http://www.emis.vito.be
emis

Ministerieel besluit van 29 april 2025 --- Belgisch Staatsblad van 07 mei 2025

http://www.emis.vito.be

3.5 APPARATUUR VOOR GASANALYSE

Voor de snelheidsmeting zelf volstaan gasanalyses die in de dichtheidsbepaling van de afgassen resulteren in een onzekerheid op de dichtheid ≤ 0,05 kg/m^3.
In de praktijk zal hiertoe een CO_2- 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 ± 20% van de meetwaarde.

4 MEETPUNTEN

De keuze van de meetsectie, het meetvlak en het aantal meetpunten gebeurt volgens procedure LUC/0/001. De meetpunten zijn representatieve punten voor gebieden met gelijke oppervlaktes. Voor cirkelvormige afgaskanalen worden in de NBN EN 15259 twee schema's voor bepaling van gelijke oppervlakken gegeven: de algemene methode en de tangentiële methode. De gassnelheid in het centrale punt bij de algemene methode is geen maat voor de gemiddelde snelheid in het centraal oppervlak, maar geeft eerder een maximale waarde. Daarom is de tangentiële methode te verkiezen voor de bepaling van het debiet. Bij deze methode is er geen punt in het middelpunt van het afgaskanaal gelokaliseerd.

5 UITVOERING VAN DE METING

De gassamenstelling, het watergehalte en de absolute druk in het afgaskanaal worden vooraf gemeten om de afgasdichtheid te bepalen. Bij verbrandingsinstallaties en stookinstallaties kan de CO_2-concentratie eventueel berekend worden indien de O_2-concentratie gemeten wordt. De temperatuur en de differentieeldruk of snelheid worden per meetpunt bepaald.

- Bij snelheidsmetingen op basis van verschildrukmetingen, dient de gemiddelde differentieeldruk over ten minste 1 minuut in elk voorgeschreven meetpunt gemeten te worden.
- De gemiddelde aflezing wordt elektronisch geregistreerd of op zicht bepaald door de uitvoerder. Minimum 3 ogenblikkelijke meetwaarden over een minuut verspreid zijn beschikbaar voor berekening van dit gemiddelde. Bij sterk fluctuerende verschildrukken is een uitlezing op zicht niet toelaatbaar.
- 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
    - ~~De gemiddelde differentieeldruk, die ten minste om de 10 minuten in het referentiepunt gemeten wordt, mag niet meer dan 10% afwijken van het rekenkundig gemiddelde van al de daar verrichte metingen~~ De gemiddelde snelheid per punt, die ten minste om de 10 minuten in het referentiepunt gemeten wordt, mag niet meer dan 10% afwijken van de gemiddelde snelheid van al de daar verrichte metingen.
      In de CEN/TR 17078 is eveneens een correctiefactor opgenomen om rekening te houden met snelheidsvariaties in de tijd indien niet aan dit criterium voldaan wordt.

Ministerieel besluit van 29 april 2025 --- Belgisch Staatsblad van 07 mei 2025

http://www.emis.vito.be

- De gemiddelde gastemperatuur, die ten minste om de 10 minuten in het referentiepunt gemeten wordt, mag niet meer dan 20°C afwijken van het rekenkundig gemiddelde van al de daar verrichte metingen

- De controles vóór de monsterneming beschreven onder punt 9.3 van de NBN EN ISO 16911-1 dienen niet uitgevoerd te worden, met uitzondering van de lektest van de Pitotbuizen (9.3.2). Deze lektest dient niet bij iedere meting uitgevoerd te worden maar het volstaat om alle Pitotbuizen tweemaal per jaar in het labo op lek te controleren (zie ook 9.2).

6 BEREKENINGEN

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

$$M = \Sigma (yj \cdot Mj) \qquad (5)$$

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 afgasdichtheid onder normaalomstandigheden (1013,25 hPa, 273,15 K) is dan:

$$\rho_N = M/22{,}4 \qquad (6)$$

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

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

Indien de temperatuur meer dan 5% verschilt in de meetpunten dient de dichtheid in elk meetpunt afzonderlijk te worden bepaald.

De gemiddelde snelheid van de n gemeten punten wordt bekomen als

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

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:

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

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

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

waarbij P_k= absolute druk in de schoorsteen 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 afgas

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

waarbij $\%H_2O$: watergehalte van de gasstroom in volumepercent

7 KALIBRATIE VAN PITOTBUIZEN

Alle Pitotbuizen moeten steeds voor ingebruikname gekalibreerd worden. Alle Pitotbuizen die in het veld gebruikt worden, moeten regelmatig gekalibreerd worden waarbij de frequentie afhangt van de gebruiksfrequentie (1 tot 5-jaarlijks). Naast kalibratie van Pitotbuizen conform NBN EN ISO 16911-1 (bv in een windtunnel ten opzichte van een laser Doppler anemometer als referentie-instrument) is kalibratie ten opzichte van een referentie Pitotbuis in een windtunnel conform ISO 10780 eveneens toegelaten. Deze laatste methode wordt verder beschreven. De kalibratie dient bij verschillende snelheden binnen het toepassingsgebied te gebeuren en moet metrologisch traceerbaar zijn.

Het gebruik van Pitot kalibratiefactoren die enkel op het ontwerp van de Pitotbuis gebaseerd zijn is niet toegelaten.

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 snelheidsvariatie van de gasstroom zal niet meer dan 1% bedragen bij een gassnelheid tussen 11 en 18 m/s 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.

Ministerieel besluit van 29 april 2025 --- Belgisch Staatsblad van 07 mei 2025
http://www.emis.vito.be
emis

Ministerieel besluit van 29 april 2025 --- Belgisch Staatsblad van 07 mei 2025

Kalibratieprocedure voor kalibratie ten opzichte van een referentie Pitotbuis (ISO 10780)
Als referentie wordt een standaard Pitotbuis met gekende kalibratiefactor gebruikt. De kalibratie gebeurt voor minstens 2 verschillende snelheden gespreid over het meetbereik (maar 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. Referentie-Pitotbuis 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. Referentie Pitotbuis 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.

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

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.

http://www.emis.vito.be

Ministerieel besluit van 29 april 2025 --- Belgisch Staatsblad van 07 mei 2025

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

- Alle pitotbuizen dienen steeds voor ingebruikname gekalibreerd. Indien geen mechanische schade opgetreden is, dan is een herhaalde kalibratie niet noodzakelijk.

- Alle types die in het veld worden gebruikt dienen te worden gekalibreerd om de 1 tot 5 jaar, afhankelijk van de gebruiksfrequentie

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 drukuitlezing 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.

De norm NBN ISO 16911-1 geeft aan dat indien uit voorgaande metingen of vanuit de geometrie van het afgaskanaal of de condities in de schoorsteen blijkt dat draaistromen (“swirl) in het afgas aanwezig zijn of kunnen aanwezig zijn, de niet axiale stroming in ieder meetpunt bepaald moet worden. Indien één van de tangentiële stromingshoeken groter is dan 15° ten opzichte van de axiale richting, dan zullen de draaistromen een significante impact op de metingen hebben. In dergelijk gevallen moet de snelheid in ieder punt gemeten worden met toestellen die zowel de snelheid als de stromingshoek in ieder punt kunnen geven (3D-, 2D- en S-pitotbuizen). Indien de Swirl > is dan 15°, dan is de snelheid, gecorrigeerd voor de stromingsrichting, v_C, gelijk aan:

$$v_C = \cos \theta_{meting} \cdot v_{meting}$$

met
$\cos \theta_{meting}$: cosinus van de gemeten hoek
v_{meting}: gemeten snelheid onder hoek θ_{meting}

http://www.emis.vito.be

Ministerieel besluit van 29 april 2025 --- Belgisch Staatsblad van 07 mei 2025

http://www.emis.vito.be

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. Op een afstand van meer dan 3% van de lengte van de bemonsteringslijn of meer dan 5 cm van de binnenste kanaalwand (grootste waarde van de twee) meten en de meetopening afdichten zonder uitstekende delen in de schoorsteen.
- 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 uit te voeren

9.2 AANDACHTSPUNTEN BIJ DE DEBIETSBEPALING

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

- Tweemaal per jaar moet een lektest van de pitotbuis in het laboratorium uitgevoerd worden:
  - Sluit de openingen van de Pitotbuis af en 1 opening van de manometer
  - Breng de pitotbuis op een druk van ten minste de absolute druk (patm + pstat) in het afgaskanaal – dit kan bv mbv een kraantje gebeuren en sluit het kraantje onmiddellijk
  - De druk mag maximum 5% dalen over een periode van 1 minuut
- Een <u>plausibiliteitscontrole</u> van het gemeten afgasdebiet 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 afgasstroom 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.

Ministerieel besluit van 29 april 2025 --- Belgisch Staatsblad van 07 mei 2025

- De nauwkeurigheid van de meting van de kanaalafmetingen heeft een grote invloed op de nauwkeurigheid van het berekende debiet (de oppervlakte is evenredig met het kwadraat of product van de lineaire afmetingen). De maximum toegelaten afwijking op de diameter van de schoorsteen 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 lektest 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. Het niet kleiner zijn van de hoek tov de kanaalas dan 15° is een afwijking van de NBN EN 15259, maar voor debiet wordt een meting waarbij gecorrigeerd moet worden wel als een conforme meting voor bepaling van het massadebiet beschouwd

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. Een correctie hiervoor is onder §8 beschreven.

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 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

http://www.emis.vito.be

Ministerieel besluit van 29 april 2025 --- Belgisch Staatsblad van 07 mei 2025

- ρ, zelf bepaald uit gassamenstelling, watergehalte, temperatuur en druk
- schoorsteenafmetingen of diameter D
- temperatuur en druk in de schoorsteen

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 foutenpropagatieregel voor de gecombineerde meetonzekerheid volgens de GUM:

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

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

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

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

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

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:

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

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.

http://www.emis.vito.be

Ministerieel besluit van 29 april 2025 --- Belgisch Staatsblad van 07 mei 2025

http://www.emis.vito.be

11 REFERENTIES

NBN EN ISO 16911-1: 2013
Emissies van stationaire bronnen - Handmatige en geautomatiseerde bepaling van de stroomsnelheid en het debiet in afgaskanalen - Deel 1: Handmatige referentiemethode

NBN EN 15259: 2007
Luchtkwaliteit - Meting van emissies van stationaire bronnen - Eisen voor meetvlakken en meetlocaties en voor doelstelling, meetplan en rapportage van de meting

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
Sample & velocity Traverses for stationary sources

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

ISO 3966: 2008
Measurement of fluid flow in closed conduits – Velocity area method using pitot static tubes

EN 13284-1: 2017
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

CEN/TR 17078: 2017
Stationary source emissions - Guidance on the application of EN ISO 16911-1