

**Bestemmelse af volumenstrøm i kanaler**

Parameter	Volumenstrøm
Anvendelsesområde	Bestemmelse af volumenstrøm i kanaler med henblik på måling, referencemåling (QAL2 og AST) samt beregning af massestrøm med henblik på afgiftsbetaling, grønne regnskaber mv.
Metode	Manuel måling med pitotrør eller vingehjulsanemometer (beregningmetoder og sporgasmetoder er dækket af standarden, men kun kortfattet beskrevet i metodebladet)
Referencer	EN ISO 16911-1 (manuel referencemetode) samt elementer fra EN ISO 16911-2 (automatiske målesystemer (AMS))
År	2014
Revideret år	-

Indholdsfortegnelse

1	Indledning	3
1.1	Læsevejledning	3
1.2	Anvendelsesområde	4
1.2.1	Måleområde	4
2	Definitioner	4
3	Brugervejledning til miljømyndigheder	6
4	Princip	7
4.1	Generelt	7
4.2	Måling af hastighed i et punkt i kanalen	8
4.2.1	Pitotrør	8
4.2.2	Vingehjulsanemometer	8
4.3	Måling af volumenstrøm	8
4.3.1	Volumenstrøm ud fra hastighedsmålinger i punkter	9
4.3.2	Volumenstrøm ved sporgasfortyndingsmetoden	9
4.3.3	Volumenstrøm ved sporgas transit tid metoden	9
4.3.4	Volumenstrøm ud fra anlæggets termiske input	9
5	Valg af metode	10
6	Opmåling af tværsnitsareal	11
7	Præstationskriterier og krav	12
8	Gennemførelse af måling	12
8.1	Planlægning - undersøgelse af målested	12



Måling af emissioner til luften

Metodeblad nr.: MEL-25

8.2	Bestemmelse af antal og fordeling af målepunkter	13
8.2.1	Minimumkrav til antallet af målepunkter	13
8.2.2	Fordeling og placering af målepunkter	14
8.2.2.1	Cirkulære kanaler	14
8.2.2.2	Rektangulære kanaler	15
8.3	Kontroller inden måling	16
8.3.1	Generelt	16
8.3.2	Læktest (kun relevant for pitotrør)	17
8.3.3	Kontrol af s-pitotrør	17
8.3.4	Test af repeterbarhed i et enkelt punkt	17
8.3.5	Swirl eller cyklonisk flow	17
8.4	Kvalitetskontrol i felten	18
8.4.1	Kontrol af målestedets egnethed til traverseringsmålinger	19
8.5	Udførelse af hastighedsmålingen	19
8.6	Kvalitetskontrol efter målingen	19
9	Beregninger	20
9.1	Generelt	20
9.2	Beregning af hastighed (pitotrørsmålinger)	20
9.3	Korrektion for vægeffekter	21
9.4	Beregning af volumenstrøm ud fra middelhastighed	22
9.5	Korrektion til referencetilstand	23
10	Usikkerhed	23
11	Rapportering	23
12	Modifikationer	24

1 Indledning

Volumenstrømsmålinger har traditionelt været udført i forbindelse med miljømålinger og især ved isokinetiske målinger (måling af partikler, aerosoler etc.). Traditionelt har volumenstrømsmåling altid været en vigtig parameter, men efter indførelsen af afgiftsbetalinger (bla. NO_x-afgift CO₂-kvote handel mv.) baseret på målinger er det kommet øget fokus på selve volumenstrøms målingen og især på kalibreringen af automatiske målesystemer (AMS), da det har stor økonomisk betydning for virksomhederne at volumenstrømsmålingen er præcis.

Netop pga. af afgifter og kvoteordninger har CEN iværksat arbejdet med en ny standard i to dele, som begge udkom i 2013:

- EN ISO 16911-1:2013
 - Manuel og automatisk bestemmelse af hastighed og volumenstrøm (flow) i kanaler - Del 1 Manuel referencemetode
- EN ISO 16911-2: 2013
 - Manuel og automatisk bestemmelse af hastighed og volumenstrøm (flow) i kanaler - Del 2 Automatiske målesystemer (AMS)

Standarden erstatter de relativt gamle standarder:

- ISO 10780:1994 Manuelle volumenstrømsmålinger
- ISO 14164:1999 Volumenstrøms AMS

Nærværende metodeblad omhandler del 1, men i visse tilfælde vil der være reference til del 2. Del 2 er i øvrigt behandlet i MEL-16 Kvalitetssikring af AMS.

1.1 Læsevejledning

Tekst som ikke er placeret i en boks er standardiseringstekst med tilhørende forklaringer eller præciseringer.

Information / Anbefalinger / Eksempler:

I metodebladet benyttes generelt en boks som denne ved anbefalinger, information, eksempler. Boksene er nummererede, så der kan henvises til dem.

Vedr. anbefalinger:

Standarderne kan i visse tilfælde indeholde anbefalinger, enten i standardens tekst eller i en note. Disse anbefalinger vil altid være placeret i selve teksten i dette metodeblad med følgende ordlyd: "Standarden anbefaler..." eller "EN xx.xxx anbefaler..."

Anbefalinger som er nummereret og anbragt i en boks er danske anbefalinger og kan kun genfindes i dette metodeblad. Disse anbefalinger kan fx være præciseringer, hjælp til at foretage et valg inden for standardens rammer eller en beskrivelse af en fremgangsmåde, som ikke er omfattet af standarden. Det er et generelt ønske fra Miljøstyrelsen at metodebladene så vidt muligt er i overensstemmelse med standarderne.

1.2 Anvendelsesområde

Metoden anvendes til periode målinger af volumenstrøm og hastighed samt som reference metode (SRM) ved kvalitetssikring af AMS (forundersøgelse af målested, QAL2 og AST) i henhold til EN ISO 16911-2 og EN 14181.

1.2.1 Måleområde

Afhænger af den valgte metode.

Info-boks 1

Standarden angiver ikke måleområde for de forskellige metoder, men indeholder dog lidt information om niveauerne:

Øvre målegrænse afhænger for vingehjulsanemometre af fabrikantens oplysninger. De andre metoder har i princippet ikke en øvre målegrænse.

Nedre måle grænse eller detektionsgrænse er for pitotrør ca. 5 Pa, og for vingehjulsanemometre ca. 1 m/s (men kan dog godt afhænge af fabrikat).

I afsnit 6.2 angives det at vingehjulsanemometre giver mindre usikkerhed ved målinger under 5 m/s eller 5 Pa, hvilket kan antyde at pitotrør kan anvendes under 5 Pa, men med højere usikkerhed.

For sporgasmetoderne er der i princippet ikke en nedre grænse, men på den anden side skal der være ordentlig opblanding etc. I praksis vil man ikke bruge disse metoder til lave hastigheder.

Anbefaling 1

Det anbefales at type L og type S pitotrør ikke anvendes ved differensterk under 5 Pa. Hvis differensterket i enkeltpunkter er under 5 Pa kan målestedet ikke godkendes ved test af målestedets egnethed til traverseringsmålinger (se kapitel 8.4.1).

2 Definitioner

Ordet flow benyttes ofte i daglig tale om volumenstrøm, selvom flow er et engelsk ord, der dækker bredere:

- volumetric flow
 - på dansk: volumenstrøm
 - den luft- eller røggasmængde der bevæger sig i en kanal pr tidsenhed (fx m³/h, L/s).
- flow velocity
 - på dansk: hastighed eller gashastighed
 - den hastighed gassen bevæger sig med i en kanal eller i et punkt i en kanal (fx m/s)
- mass flow
 - på dansk: massestrøm¹ eller masseemission
 - den stofmængde der bevæger sig i en kanal pr. tidsenhed (fx t/h, kg/h, g/s)

I nærværende metodeblad benyttes ordene volumenstrøm, hastighed og masseemission, der vurderes at være de mest præcise og dækkende ord på dansk.

I MEL-16 anvendes af praktiske årsager betegnelsen flow AMS, som rettelig burde være volumenstrøm AMS.

¹ I Luftvejledningen benyttes ordet massestrøm og massestrømsgrænse om massestrømmen FØR rensning. I forbindelse med afgiftsbetaling mv. benyttes ordet massestrøm eller masseemission om den mængde der emitteres fx over et år.

Pitotrør	Aggregat til at måle hastighed i et punkt, vha. differenstryk måling. Følgende typer af pitotrør kan benyttes og er beskrevet i standardens Annex A: type S, type L, type 2D og type 3D. Type L og S er velkendte. Type 2D og type 3D er henholdsvis udformet som en skive med 3 sensoråbninger (2D) og en kugle med 5 sensoråbninger (3D).
Vingehjulsanemometer	Aggregat til at måle hastighed vha. et vingehjul.
Sporgas	En gas, der normalt ikke forekommer i det pågældende anlæg doseres ind i kanalen med det formål at måle den efter opblanding.
Sporgasfortynding	Metode til at beregne volumenstrømmen baseret på sporgasdosering og måling af den fortyndede sporgas.
Sporgas transit tid	Metode til at beregne volumenstrømmen baseret på den tid det tager en sporgaspuls at bevæge sig fra et måleplan til et andet. Også kaldet "time of flight".
Målelinie	En linie på tværs af kanalen, hvori der udføres målinger.
Måleplan	Det kanaltværsnit målingerne udføres i.
Målepunkt	Et punkt i kanalen hvor der udføres en (punkt)måling. Også kaldet et traverseringspunkt.
Referencepunkt	"Fixed point". Et målepunkt, hvor hastigheden kan overvåges under hastighedsmålingen med henblik på at korrigere for variationer i volumenstrøm i måleperioden.
Referencetilstand	Også kaldet standard tilstand eller normal tilstand. Ved trykket 101,325 kPa og temperaturen 273,15 K. Begrebet referencetilstand kan endvidere omfatte en referencde iltprocent, men det anvendes sjældent for volumenstrøm.
Swirl	Et mål for graden af roterende gas. Vinklen mellem kanalens akse og flowretningen.
Periode målinger	Enkeltmålinger eller målekampanjer. I Luftvejeningen benyttes begrebet præstationskontrol.
Præstations kriterier	"Performance criteria". Specifikke krav til et måleinstrument, typisk angivet i en standard.
Sensor åbning	"Pressure tab". De åbninger i pitotrørets spids, der benyttes til at måle tryk forskelle. Eksempel vis spidsen af et L-pitotrør (dynamisk tryk) og hullerne i siden af L-pitotrøret (statisk tryk).
AMS	Automatisk Målende System. Målesystem, som ejes og drives af anlægget og som benyttes til miljørapportering og for volumenstrøm AMS til beregning af masseemissioner.
Hastigheds tryk, dynamisk tryk eller dynamisk differenstryk	"Total or Stagnation pressure". Pitotrør. Det diffenstryk der skyldes gassens hastighed og som omsættes til hastighed vha. pitotrørsformlen.
IE-direktivet	Industri Emissions Direktiv. Implementeret i Danmark d. 7. januar 2013 med en række bekendtgørelser (bla. Affaldsforbrændingsbekendtgørelsen (nr. 1451:2012) og Store fyr bekendtgørelsen (nr. 1453:2012)).
EN; prEN	EN: Europæisk Norm. Forbogstaver til alle CEN-standarder. prEN betegner at standarden er under revision eller udarbejdelse.
ISO; ISO DIS	ISO: International Standardisation Organisation. Globalt standardiseringsorgan. ISO DIS betegner at standarden er under revision eller udarbejdelse.

EN ISO / ISO EN	Standarden er både en ISO og en EN standard. EN ISO betyder at EN har udarbejdet standarden, hvorimod ISO EN betyder at det er ISO der har udarbejdet standarden.
DS/EN eller DS/ISO	Betyder at standarden er implementeret som dansk standard. I praksis vil det sige at den har fået en dansk forside og en dansk titel. Betegnelsen "DS/" benyttes ikke i dette metodeblad af praktiske årsager.
Parallelmålinger / SRM	Målinger der udføres parallelt med AMS. Parallelmålinger udføres af et akkrediteret målefirma efter standardiserede reference metoder (SRM) ² .
Referencetilstand / Normaliseret værdi	Den tilstand som grænseværdien er angivet ved: koncentrationen omregnet til tør gas, referenceiltkoncentration, 273,15 K (0°C) og 101,3 kPa. Også kaldet grænseværdi-konditioner. Normalisering = omregning til referencetilstand.
GUM	<u>G</u> uide to the expression of <u>U</u> ncertainty in <u>M</u> asurement.
Masseemission	Emissionsopgørelser i masse pr. tidsenhed (fx tons/år). Beregnes ved at gange koncentration og volumenstrøm med hinanden. Benyttes til grønne regnskaber, afgiftsberegning og spredningsberegninger (OML) mv.

Tabel 1 Ord, begreber og forkortelser, der benyttes ofte i metodebladet

EN ISO 16911-1	Stationary source emissions – Manual and automatic determination of velocity and volume flow rate in ducts – Part 1: manual reference method. 2013.
EN ISO 16911-2	Stationary source emissions – Manual and automatic determination of velocity and volume flow rate in ducts – Part 2: Automated measuring systems. 2013.
Luftvejledningen	Miljøstyrelsens vejledning nr. 2, 2001 Luftvejledningen, Begrænsning af luftforurening fra virksomheder.
GUM	DS/ISO/CEN Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). 2000.
MEL-16	Miljøstyrelsens anbefalede metoder, metodeblad MEL-16: Kvalitetssikring af AMS (www.ref-lab.dk).
EN 15259	EN 15259:2007. Air quality – Measurement of stationary source emissions – Requirement for measurement sections and sites and for the measurement objective, plan and report.
MEL-22	Miljøstyrelsens anbefalede metoder, metodeblad MEL-22: Kvalitet i emissionsmålinger (www.ref-lab.dk).
EN 13284-1	EN 13284-1 Stationary source emissions - Determination of low range mass concentration of dust - Part 1: manual gravimetric method

Tabel 2 Referencer

3 Brugervejledning til miljømyndigheder

Metodebladet er målrettet til målefirmaer og andre med specialinteresse for målinger, og giver information på dansk om, hvordan målingerne skal udføres og hvilke særlige forholdsregler og

² SRM skal være en europæisk standard (EN) hvis den er tilgængelig. Alternativt internationale standarder eller nationale standarder af en ligeværdig kvalitet. Hvis der anvendes alternativer til eksisterende EN-metoder skal metodevalget være fagligt begrundet.

MEL-25

Bestemmelse af volumenstrøm i kanaler

modifikationer, der kan forekomme efter danske forhold. Formålet er at sikre ensartede måleresultater samt at oplyse om særlige forhold, hvor modifikationer eller andre forholdsregler er påkrævet.

I situationer, hvor målefirmaer eller virksomheder henvender sig til myndigheden med spørgsmål, der vedrører måleteknik, kan miljømyndigheden med fordel referere til metodebladet.

Når vilkår indeholder et krav om målemetode samt krav om akkrediteret måling, bør der være tillid til, at målingen gennemføres efter forskrifterne i metodeblad, standard m.v.

Der kan dog være situationer, hvor miljømyndigheden ønsker at vurdere kvaliteten af målingen. For miljømyndighederne har metodebladene f.eks. interesse ved:

- Mistanke om, at målingerne ikke er udført med tilfredsstillende kvalitet,
- Tvivl om tolkningen af resultater
- Vurdering af om målemetoden rent faktisk er egnet til formålet

Til disse formål kan metodebladet læses af miljømyndigheden specielt med fokus på følgende emner:

- Målestedets indretning
- Dokumentation for produktionsforhold under målingen
- Anvendt prøvetagningssystem (materiale og temperatur) (ikke relevant for dette metodeblad)
- Feltblind (ikke relevant for dette metodeblad)
- Varme gasser med højt vandindhold (er der taget højde for risiko for kondensation) (ikke relevant for dette metodeblad)
- Interferens (ikke relevant for dette metodeblad)
- Isokinetisk udsugning (skal ligge mellem 95 % og 115 % af korrekt isokinetisk flow) ved alle partikel-målinger) (ikke relevant for dette metodeblad)
- Antallet af traverspunkter
- Laboratorieblind (ikke relevant for dette metodeblad)

Der henvises endvidere til metodebladet MEL-22 Kvalitet i emissionsmålinger.

4 Princip

4.1 Generelt

Volumenstrømmen bestemmes ved en af følgende metoder:

- pitotrør og vingehjulsanemometer måling
 - Hastigheden bestemmes i et antal punktmålinger i kanaltværsnittet som ganges med tværsnitsarealet for at opnå volumenstrømmen.
- sporgas fortynding
 - Ved at dosere en kendt mængde sporgas opstrøms fra fx en blæser som sikrer fuldstændig opblanding af sporgassen med den strømmende gas, og måle koncentrationen af den fortyndede sporgas kan volumenstrømmen beregnes.
- sporgas transit tid
 - En sporgas puls doseres opstrøms fra fx en blæser som sikrer fuldstændig opblanding af sporgassen med den strømmende gas. Ved at måle den tid det tager pulsen at bevæge sig fra et sted i kanalen til et andet kan den gennemsnitlige hastighed i kanalen bestemmes. Hastigheden ganges med tværsnitsarealet for at beregne volumenstrømmen.

MEL-25

Bestemmelse af volumenstrøm i kanaler

- beregning ud fra termisk energi input
 - Volumenstrømmen kan beregnes ved at gange energiforbruget med en brændstoffaktor. Energiforbruget kan måles direkte ud fra brændselsstrøm og specifik energi eller indirekte ud fra anlæggets energiproduktion og den termiske effektivitet.

Tværsnitsarealet indgår i de ovennævnte metoder, hvor hastigheden bestemmes.

Tværsnitsarealet skal bestemmes ved en fysisk opmåling vha. laser, en stang, eller lign. over mindst to målelinier. Eksterne mål kan benyttes når kanalvæggen er veldefineret og uden isolering mv. Det er ikke tilladt at benytte tegninger eller anden dokumentation for kanal tværsnittet.

4.2 Måling af hastighed i et punkt i kanalen

Der kan anvendes pitotrør eller vingehjulsanemometer.

Info-boks 2

EN 16911-1 har ikke et krav om en måleudstyrets maksimale andel af tværsnitsarealet, som ISO 10780 gjorde. Det manglende krav kan betyde betydelige fejlmålinger i små kanaler, hvor udstyrets blokerer en del af arealet og dermed øger hastigheden.

Anbefaling 2

Det areal, som måleudstyret blokerer i kanalen, må maksimalt udgøre 3 % af tværsnitsarealet (fra ISO 10780).

4.2.1 Pitotrør

Pitotrøret benyttes til at måle det dynamiske differenstryk (forskellen mellem de to åbninger i pitotrøret (fx åbningen i spidsen af et L-pitotrør og åbningen i siden af et L-pitotrør), og ud fra det dynamiske differenstryk beregne hastigheden i punktet. Det dynamiske differenstryk måles med et manometer.

Ved pitotrørsmåling er det nødvendigt at kende gassens aktuelle massefylde³ for at beregne hastigheden.

Følgende typer af pitotrør kan anvendes og er beskrevet i standardens Annex A: type S, type L, type 2D⁴ og type 3D.

Info-boks 3

2D pitotrør er ikke defineret entydigt i EN 16911-1, men er i princippet et 3D uden mulighed for at måle trykket i position p4 og p5 (Se figur A.4 i EN 16911-1). 2D pitotrør vil endvidere normalt være formet som en skive i stedet for en kugle som 3D pitotrør.

4.2.2 Vingehjulsanemometer

Vingehjulsanemometeret benyttes til at måle hastigheden ved at gassen bevæger sig forbi et vingehjul. Vingehjulet drives rundt af gassen og rotationshastigheden er et mål for hastigheden af den strømmende gas. Vingehjulsanemometeret bestemmer dermed hastigheden direkte i fx m/s.

Vingehjulsanemometeret kan IKKE benyttes til måling af swirl.

4.3 Måling af volumenstrøm

Volumenstrømmen kan bestemmes ud fra hastighed og tværsnitsareal eller ved direkte metoder.

³ Den aktuelle massefylde er afhængig af gassens sammensætning, temperatur og tryk.

⁴ Hvis type 2D anvendes, stiller standarden krav til at kvalitetssikringsprocedurerne i US EPA Method 2G følges.

4.3.1 Volumenstrøm ud fra hastighedsmålinger i punkter

Volumenstrømmen beregnes ud fra den gennemsnitlige hastighed af samtlige punkthastigheder i kanaltværsnittet:

$$q_V = \bar{v}_p \cdot A, \text{ hvor}$$

$$q_V \text{ er volumenstrømmen i } \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

\bar{v}_p er gennemsnitshastigheden af samtlige målepunkter i kanaltværsnittet

A er tværsnitsarealet

4.3.2 Volumenstrøm ved sporgasfortyndingsmetoden

Ved konstant at injicere en kendt mængde sporgas i kanalen med den strømmende gas kan volumenstrømmen måles/beregnes ved at måle koncentrationen af den fortyndede sporgas nedstrøms for injiceringsstedet.

Det er en forudsætning for metoden, at:

- sporgassen opblandes fuldstændig i gasstrømmen
- sporgassen ikke forefindes i gasstrømmen, opstrøms fra injiceringsstedet.
 - hvis sporgassen forefindes kan baggrundskoncentrationen måles og fratrækkes inden beregning

4.3.3 Volumenstrøm ved sporgas transit tid metoden

Ved at injicere en mindre mængde sporgas hurtigt i kanalen med den strømmende gas, således at der produceres en kort puls af sporgas, kan middelhastigheden af gassen bestemmes ved måling af den tid som pulsen er om at bevæge sig fra et punkt til et andet. Volumenstrømmen beregnes ved at dele kanalvolumen mellem de to målesteder med transit tiden.

Det er en forudsætning for metoden, at:

- sporgassen opblandes i gasstrømmen, så den kan måles i de valgte målepunkter
 - fuldstændig opblanding er ikke nødvendig
- der er en passende lang lige kanalstrækning, med uændret tværsnitsareal og uden bøjninger mv., mellem de to målesteder

4.3.4 Volumenstrøm ud fra anlæggets termiske input

Ved forbrænding af de fleste brændsler er det muligt at beregne volumenstrømmen ved en referenceiltkoncentration, ud fra brændselsammensætning og det termiske energi input. Ved at måle iltkoncentrationen i skorstenen kan den aktuelle volumenstrøm (inklusive luftoverskud) beregnes.

EN 12952-15 beskriver de mulige metoder til beregning af volumenstrømmen, som omfatter både direkte og indirekte metoder:

- den direkte metode tager udgangspunkt i brændslets specifikke energi indhold samt brændselsflowet
- den indirekte metode tager udgangspunkt i anlæggets energi output samt dets termiske effektivitet
 - Især for varmeværker og kraftvarmeværker med en høj effektivitet er den indirekte metode ganske præcis

Metoden er mest velegnet til at bestemme den tørre volumenstrøm, men kan også benyttes til at bestemme den våde volumenstrøm, dog med større usikkerhed.

Standarden beskriver ikke den rene støkiometriske beregning, som bla. NO_x-afgiftsbekendtgørelsen nævner som en mulighed⁵. Den støkiometriske metode er mere præcis end energi input metoden, som anvender erfaringskonstanter. Især på anlæg der forbrænder gas eller olie med kendt sammensætning bør den støkiometriske metode tillades som et alternativ til den manuelle måling, da den ofte er mere præcis. Den støkiometriske metode beregner volumenstrømmen ved en referenceiltkoncentration, men kombineret med en iltmåling kan den aktuelle volumenstrøm (inklusive luftoverskud beregnes). Metoden beskrives ikke nærmere her.

Anbefaling 3

I de tilfælde, hvor der er en kontrolleret og kalibreret brændselsflowmåler samt oplysninger om brændsels sammensætning, kan den støkiometriske metode også anvendes.

5 Valg af metode

Metoden til at bestemme hastighed eller flow vælges ud fra formålet med opgaven.

Formål med målingen	Egnet metode
Hastighedsmåling i et punkt <ul style="list-style-type: none"> fx i forbindelse med isokinetisk prøvetagning af fx partikler 	Punktmåling med pitotrør eller vingehjulsanemometer
Bestemmelse af swirl	Pitotrør til at bestemme swirl: <ul style="list-style-type: none"> S-type eller L-type⁶ 3D- eller 2D-type Vingehjulsanemometer er ikke egnet til at bestemme swirl
Periodemålinger af gennemsnitlig hastighed i kanalen	Pitotrør og vingehjulsanemometer måling Sporgas fortyndning Sporgas transit tid Beregning ud fra termisk energi input
QAL2 eller AST parallelmålinger	Pitotrør og vingehjulsanemometer måling Sporgas fortyndning Sporgas transit tid
Forundersøgelse som beskrevet i EN 16911-2	Punktmåling med pitotrør eller anemometer (inklusive en overvågning af hastigheden i et referencepunkt) CFD beregninger til bestemmelse af flowprofil mv. (CFD beregninger er ikke omfattet EN 16911-1)
Opmåling af kanalareal	Laser måler Målepind Ekstern måling af rør dimension

Tabel 3 Oversigt over egnede metoder til forskellige formål

Bemærk endvidere følgende:

- at anvendelsen af radioaktive isotoper kan begrænses af nationale regler på området
- at sporgasmetoden kræver fuldstændig opblanding af sporgassen
- at beregningsmetoden IKKE må anvendes til QAL2 og AST parallelmålinger

⁵ NO_x-afgiftsbekendtgørelsen angiver at metoden må benyttes ved homogene brændsler med en kontrolleret og kalibreret brændselsflowmåler og en AMS iltmåler.

⁶ L-type nævnes ikke specifikt til måling af swirl i EN-16911-1, men der henvises til ISO 10780 for metoder til bestemmelse af swirl, hvori måling af swirl med L-pitotrøret er nævnt. EN 13284-1 (manuelle partikelmålinger) angiver endvidere i bilag B en metode til måling af swirl med L-pitotrør.

- at beregningsmetoden kræver at når input parametre måles, så skal målesystemet være under passende kontrol og kvalitet og skal være kalibreret. Når vandindholdet i brændslet varierer, skal der tages en prøve pr. måleperiode.
- at der kan omregnes mellem volumenstrøm og gennemsnitlig hastighed når arealet kendes
- at arealet SKAL opmåles og tegningsmateriale eller oplyste mål IKKE må benyttes
- at anvendte pitotrør skal opfylde præstations kriterierne i EN 16911-1
- at anvendte vingehjulsanemometre skal opfylde præstations kriterierne i EN 16911-1
- at EN 16911-1 nævner at hastigheds variationer kan overvåges i et reference punkt (enten med en ekstra hastighedsmåler eller vha. anlæggets AMS).

Info-boks 4

Det er meget uklart i EN 16911-1 hvornår det er relevant at overvåge hastigheden i et referencepunkt og hvordan man korrigerer. EN 16911-2 definerer specifikt at referencepunktmålinger skal gennemføres ved forundersøgelsen. Samtidig nævnes det at hvert enkelt punkt korrigeres i forhold til referencepunktmålingen (inden beregning af flowprofil, crestfaktor og skewness). Ved en almindelig volumenstrømsmåling er det kun den gennemsnitlige hastighed og volumenstrøm der skal benyttes og det giver derfor mening at sikre sig at hastigheden varierer så lidt som muligt under målingen, men det giver IKKE mening at korrigere i forhold til et referencepunkt.

Anbefaling 4

Overvågning af hastigheden i et referencepunkt er kun relevant når målingen skal bruges til forundersøgelsen beskrevet i EN 16911-2.

Hvis der under en almindelig hastighedsmåling (isokinetik, periodemåling, QAL2 eller AST mv.) observeres kortvarige ændringer i hastigheden (pulser) kan varigheden af målingen i eet målepunkt øges fra 1 minut til at omfatte fx 3 pulser. Hvis pulserne er af længere varighed vil en flowmåling tage uforholdsmæssig lang tid, hvorfor det anbefales at udføre målingen med et minuts midlingstid i hvert punkt og eventuelt at udføre flere traverserings målinger. Generelt bør volumenstrømmen være konstant i måleperioden.

6 Opmåling af tværsnitsareal

Tværsnitsarealet skal bestemmes ved en fysisk opmåling vha. laser, en stang, eller lign. over mindst to målelinier som skal være vinkelret på hinanden. Eksterne mål kan benyttes når kanalvæggen er veldefineret og uden isolering mv. Det er ikke tilladt at benytte tegninger eller anden dokumentation for kanal tværsnittet.

Måleportenes dybde og kanalvæggens tykkelse skal måles op ved hver måleport. Vær især opmærksom på at måleportens gennemføringsrør ikke altid flugter med kanalens inderside.

Anbefaling 5

Når det ikke er muligt at måle tværsnitsarealet i to målelinier, fx ved rektangulære kanaler hvor alle måleporte er placeret på den ene kanalside, skal arealet vurderes bedst muligt ud fra tilgængelige oplysninger som fx ydre mål, tegninger eller lign. Det skal fremgå af rapporten at tværsnitsarealet ikke er målt korrekt op.

Når der anvendes en målepind i høje temperaturer skal der tages højde for at målepinden udvider sig.

Eksempel 1

En målepind i stål vil udvide sig ca. 0,016 mm pr. meter pr. grad K. Dvs., at der ved en temperaturforskel mellem kanalen og omgivelserne på 100° kan ske en fejl i opmålingen af diameteren på 1,6 mm pr. meter eller 0,16 %. Dette bliver omsat til en fejl på ca. 0,32 % på et cirkulært areal og dermed også på flowet. Fejlen fordobles ved fordobling af temperaturforskellen.

MEL-25

Bestemmelse af volumenstrøm i kanaler

Parameter	Præstations kriterium	Metode
Tværsnitsareal	$\leq 2 \%$ af måleværdi	Vurdering af metoden. Husk temperaturindflydelse.

Tabel 4 Præstationskriterium – opmåling af tværsnitsareal

7 Præstationskriterier og krav

Tabel 5 angiver præstationskriterier for hastighedsmålinger i et punkt (pitotrør og vingehjulsanemometer). Testes og dokumenteres i laboratoriet.

Parameter	Criterion	Method of determination
Standard deviation of repeatability of measurement in the laboratory	$<1 \%$ of value	Performance evaluation in wind tunnel at values spanning measured level
Lack-of-fit (linearity)	$<2 \%$ of value	Maximum deviation from linear fit at five velocity levels in wind tunnel
Uncertainty due to calibration	$<2 \%$ of full scale	From calibration certificate for measurement equipment
Lowest measureable flow (limit of quantification)	No criterion, but should be determined	This parameter shall be determined, but is not a performance requirement. The sensor shall not be used to measure flows below its limit of quantification
Sensitivity to ambient temperature Note: Only external components are affected by ambient conditions.	$\leq 2 \%$ of range per 10 K	Performance evaluation of measurement device
Sensitivity to atmospheric pressure	$\leq 2 \%$ of range per 2 kPa	Performance evaluation of the measurement device
Effect of angle of sensor to flow	$\leq 3 \%$ at 15°	Performance evaluation of measurement device

Tabel 5 Præstationskriterier – hastighedsmåling i et punkt. Ikke oversat til dansk med henblik på at undgå forvirring af begreber

Når andre metoder anvendes skal det demonstreres at de kan leve op til præstationskriterierne angivet i bilag i EN 16911-1:

- Sporgas fortynding: Bilag C
- Sporgas transit tid: Bilag D
- Beregning ud fra termisk energi input: Bilag E

8 Gennemførelse af måling

8.1 Planlægning - undersøgelse af målested

Der henvises generelt til EN 15259, CEN/TS 15675 og MEL-22 vedr. planlægning af målinger inklusiv udarbejdelse af måleplan.

For hastigheds-, og volumenstrømsmåling gælder specielt følgende:

- Det skal være muligt at nå samtlige målepunkter i kanalen

MEL-25

Bestemmelse af volumenstrøm i kanaler

- Måleudstyret må ikke optage mere end 3 % af tværsnitsarealet
- Volumenstrømmen bør ikke variere væsentligt under en måling, som ved 20 målepunkter kan tage op til én time at gennemføre. Se endvidere Info-boks 4 og Anbefaling 4.
- Hvis periodiske svingninger større end 10 % af den gennemsnitlige hastighed forventes, skal målingerne planlægges således at svingningerne udjævnes mest muligt.

8.2 Bestemmelse af antal og fordeling af målepunkter

Dette kapitel er kun relevant for måling med pitotrør og vingehjulsanemometer.

Antal og placering af målepunkter skal følge kravene i EN 15259 og er endvidere beskrevet i bilag 1 i MEL-22 Kvalitet af emissionsmålinger.

8.2.1 Minimumkrav til antallet af målepunkter

Minimumkravet til antallet af målepunkter i et måletværsnit baseres på tværsnittets areal således, at jo større arealet er, jo flere målepunkter kræves. Når strømningsforhold eller lignende ikke er optimale, bør der vælges et højere antal målepunkter for at mindske usikkerheden på målingen. Antal målepunkter til koncentrationsmåling og til volumenstrømsmåling er generelt ens, dog kan der være forskelle ved små kanaler.

Tværsnitsareal m ²	Diameter m	Minimum antal målelinier	Minimum antal målepunkter pr. tværsnitsareal ^c
< 0,1	< 0,35	2 ^a	4 ^a
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	4 pr. m ² , dog mindst 12 ^b
^a	Ved partikelmålinger er det tilstrækkeligt med eet målepunkt i små kanaler.		
^b	Ved store kanaler er 20 målepunkter normalt tilstrækkeligt.		
^c	Ved cirkulært måletværsnit skal antallet af målepunkter være deleligt med 4.		

Tabel 6 Minimum antal målepunkter i en cirkulær kanal

Tværsnitsareal m ²	Minimum antal sideopdelinger ^a	Minimum antal målepunkter pr. tværsnitsareal
< 0,1	1 ^b	1 ^b
0,1 – 1,0	2	4
1,1 – 2,0	3	9
> 2,0	≥ 3	4 pr. m ² , dog mindst 12 ^c
^a	Alternative sideopdelinger kan være nødvendige fx. hvis den længste side er mere end dobbelt så lang som den korteste side	
^b	Når der kun anvendes ét målepunkt, kan usikkerheden være større end generelt angivet i standarden. Ved volumenstrømsmålinger bør der vælges mindst 4 punkter fordelt over to sideopdelinger.	
^c	Ved store kanaler er 20 målepunkter normalt tilstrækkeligt.	

Tabel 7 Minimum antal målepunkter i en rektangulær kanal

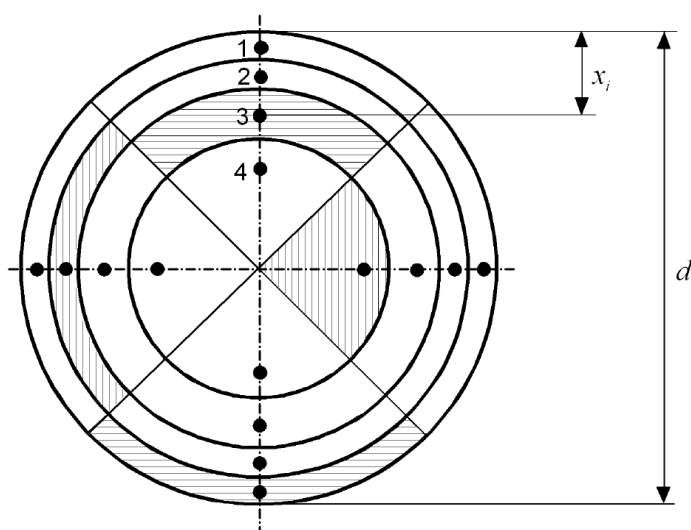
8.2.2 Fordeling og placering af målepunkter

Målepunkter må ikke placeres tættere på kanalvæggens inderside end 3 % af kanaldiameteren eller 5 cm (største værdi vælges). Det er ikke tilladt at kassere yderste punkt; punktet flyttes i stedet, så det opfylder afstandskravet. Det totale antal punkter må ikke ændres, hvilket kan betyde at der i beregningen indgår flere målinger fra samme målepunkt. Når der kun måles i ét punkt, bør dette placeres i kanalens midte.

Alle afvigelser skal rapporteres (eksempelvis manglende målepunkter).

8.2.2.1 Cirkulære kanaler

Målepunkter til volumenstrømsmåling skal være baseret på lige store arealers princip og at det er et krav at den tangentielle metode⁷ skal benyttes i cirkulære kanaler.



Figur 1 Illustration af den tangentielle metode til placering af målepunkter. Fra EN 13284-1.

⁷ Den tangentielle metode er den hvor der ikke er et målepunkt i midten af kanalen og i øvrigt er den almindeligt benyttede metode i DK til fordeling af målepunkter (Luftvejledning, MEL-22 mv.).

Målepunktets nr. langs én diameter	Antal målepunkter langs én skorstendiameter						
	2	4	6	8	10	12	14
1	14,6	6,7	4,4	3,2	2,6	2,1	1,8
2	85,4	25,0	14,6	10,5	8,2	6,7	5,7
3		75,0	29,6	19,4	14,6	11,8	9,9
4		93,3	70,4	32,3	22,6	17,7	14,6
5			85,4	67,7	34,2	25,0	20,1
6			95,6	80,6	65,8	35,6	26,9
7				89,5	77,4	64,4	36,6
8				96,8	85,4	75,0	63,4
9					91,8	82,3	73,1
10					97,4	88,2	79,9
11						93,3	85,4
12						97,9	90,1
13							94,3
14							98,2

Table 8 Målepunkternes placering i et cirkulært måletværsnit. Afstande fra inderside af kanalvæg til de respektive målepunkter er udtrykt i procent af kanalens diameter d

8.2.2.2 Rektangulære kanaler

Tværsnitsarealet inddeles i lige store arealer ved linier parallelt med siderne i kanalen, og et målepunkt placeres i midten af hvert delareal (se Figur 2).

Hver side af kanalen inddeles i samme antal dele, hvilket giver hvert delareal samme form som tværsnitsarealet. Antal af delarealer bliver således kvadratet af 1, 2, 3 osv.

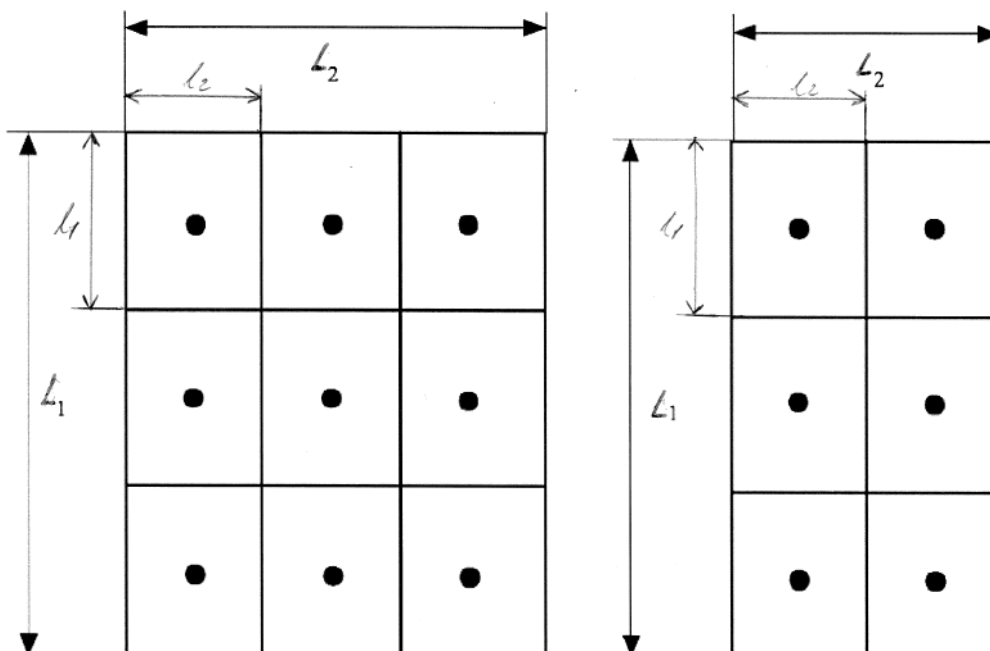


Figure 2 Illustration af fordelingen af målepunkter i en rektangulær kanal

MEL-25

Bestemmelse af volumenstrøm i kanaler

Hvis den ene side (L_1) er mere end dobbelt så lang som den anden (L_2), bør den længste side (L_1) opdeles i et større antal dele, således at forholdet mellem sidelængderne på delarealerne bliver mindre end to ($l_1/l_2 \leq 2$, hvor l_1 er den side med flest opdelinger).

Eksempel 2

En rektangulær kanal med $L_1 = 1,8$ m og $L_2 = 0,8$ m. Areal = $0,8 \cdot 1,8 = 1,44$ m², hvilket ifølge Tabel 7 giver minimum 3 sideinddelinger og minimum 9 målepunkter. Da L_1 er mere end dobbelt så lang som L_2 bør antallet af sideinddelinger i L_1 være større end i L_2 . Der vælges 4 sideinddelinger i L_1 og 3 sideinddelinger i L_2 . Det giver $l_1 = 0,45$ og $l_2 = 0,27$ og dermed $l_1/l_2 = 1,7$, som er < 2 .

8.3 Kontroller inden måling

8.3.1 Generelt

Når der anvendes et elektronisk manometer skal kalibreringen kontrolleres med en væskebaseret trykmåler eller en kalibreret tryksensor med en usikkerhed bedre end det elektroniske manometer. Afgivelsen skal ligge inden for det elektroniske manometers usikkerhed. Hvis det ikke er tilfældet skal fejlen undersøges og udbedres inden målingen kan gennemføres. Elektroniske manometre skal have en opløsning på mindst 2 betydende cifre pr. Pascal.

Opmål tværsnitsareal osv. som angivet i kapitel 6. Bestem antallet og placering af målepunkter i henhold til kapitel 8.2.

Info-boks 5

EN 16911-1 skriver et sted at tværsnitsareal mv. SKAL opmåles ved en fysisk måling og et andet sted at man kan benytte tegningsmateriale etc. hvis informationerne er gjort plausible. Den sidste bemærkning er muligvis rettet mod valg af antal og placering af målepunkter etc., da den står i sammenhæng med dette.

Anbefaling 6

Der skal altid udføres en fysisk måling af tværsnitsareal etc. med mindre at en præcis opmåling ikke er mulig. Når arealet ikke er opmålt fysisk skal det fremgå af rapporten at arealet IKKE er opmålt selvom EN 16911-1 forlanger det.

Beregn sondens placering i hvert enkelt målepunkt og afmærk sonden. Husk at tage hensyn til måleportens dybde og vægtykkelse ved afmærkningen.

Ved forundersøgelse i henhold til 16911-2: Identificer et egnet målepunkt til at overvåge variationer i hastigheden eller volumenstrømmen (referencepunktsmåling). Måling af variationer i volumenstrømmen kan udføres med et ekstra instrument eller vha. data fra AMS.

MEL-25

Bestemmelse af volumenstrøm i kanaler

Før og efter hver måling skal følgende kontrolleres:

- pitotrør:
 - skader eller deformiteter på pitotrørets spids eller rør
 - blokering af sensor åbninger
 - interne utætheder
 - renlighed
 - bøjning af røret eller støtterøret (skal være lige)
- vingehjulsanemometre:
 - skader på vingehjulet eller vingehjulshuset
 - aflejringer på vingebåde
 - renlighed
 - vingehjulet skal dreje med fuldstændig jævn hastighed ved forsigtig pusten på vingehjulet

Alle ovenstående punkter kan invalidere kalibreringen.

8.3.2 Læktest (kun relevant for pitotrør)

Før hver måleserie skal der udføres en læktest.

Læktesten kan fx udføres ved at påtrykke pitotrøret et tryk på mindst det statiske tryk i kanalen samtidig med at sensor åbningerne blokeres. Trykket bør ikke falde mere end 0,2 Pa over en periode på 5 minutter.

8.3.3 Kontrol af s-pitotrør

Placer s-pitotrøret vinkelret på flowretningen i målepunktet og mål det statiske tryk i begge rør. Forskellen må maksimalt være 10 Pa. Vær opmærksom på evt. swirl, som kan vanskeliggøre testen.

8.3.4 Test af repeterbarhed i et enkelt punkt

Ved to måleinstrumenter:

Udfør mindst 5 parallelle hastighedsmålinger i samme punkt eller i to punkter tæt på hinanden i det areal der repræsenteres ved et målepunkt. Beregn standard spredningen på forskellene og sammenhold med kriteriet for repeterbarhed i Tabel 9.

Ved eet måleinstrument:

Udfør mindst 5 hastighedsmålinger af mindst 1 minuts varighed umiddelbart efter hinanden. Beregn standard spredningen på målingerne og sammenhold med kriteriet for repeterbarhed i Tabel 9. Bemærk at denne metode medtager flowvariationen, men da eet måleinstrument kun bør anvendes når flowet er stabilt og uden betydelig variation vil en overskridelse af repeterbarhedskravet i Tabel 9 enten betyde at målingen ikke er repeterbar eller at flowvariationen er for stor.

8.3.5 Swirl eller cyklonisk flow

Kontroller om der er swirl over 15° i kanalen. I praksis kan det i "før måling kontrol" udføres i mindst én radius for cirkulære kanaler og i mindst én mållinje for rektangulære kanaler.

EN 16911-1 henviser til ISO 10780 (den gamle volumenstrømsstandard) for metoder til bestemmelse af swirl. I en note er endvidere angivet at US EPA method 2 beskriver en metode til bestemmelse af swirl.

MEL-25

Bestemmelse af volumenstrøm i kanaler

Følgende metode kan anvendes til måling af swirl med pitotrør: Drej pitotrøret rundt indtil manometeret viser negativt statisk tryk (L-pitotrør) eller nul (S-pitotrør). Pitotrøret er nu vinklet 90° fra volumenstrømretningen. Aflæs volumenstrømretningens vinkel i forhold til kanalens akse og noter værdien. Proceduren gentages i alle punkter i tværsnittet. Hvis det ikke er muligt at aflæse vinklen med denne metode eller alternative metoder antages det, at vinklen er større end 15°.

Hvis der er swirl over 15° skal swirl måles i hvert eneste målepunkt og der skal anvendes et måleudstyr der er i stand til at måle i swirl-vinklen (3D, 2D, L-type pitotrør og S-type pitotrør).

Hvis swirl i et enkelt punkt er større end 15° kan hastigheden måles i swirl-retningen og korrigeres efter swirl-vinklen:

$$v_{kor} = \cos \theta_{swirl \text{ vinkel}} * v_{m\ddot{a}lt}, \text{ hvor}$$

$$v_{kor} = \text{korrigeret hastighed}$$

$$\cos \theta_{swirl \text{ vinkel}} = \text{cosinus til swirl-vinklen}$$

$$v_{m\ddot{a}lt} = \text{den m\ddot{a}lte hastighed (OBS ved vinkling af pitotrøret til swirl-vinkel)}$$

Info-boks 6

Denne metode må kun benyttes pr. punktmåling. Det er ikke tilladt at anvende den ved middelhastigheder.

Ved swirl over 15° må målestedet ikke benyttes til partikelmålinger selvom der korrigeres for swirlvinklen.

8.4 Kvalitetskontrol i felten

Med henblik på at reducere måleusikkerheden mest muligt stilles der følgende præstationskriterier for måling i felten med pitotrør.

Parameter	Criterion	Method of determination
Field repeatability	≤5 % of velocity	Determined before measurements (9.3.4) (kapitel 8.3.4 i dette metodeblad)
Angle of flow sensor to gas flow	<15°	During measurement
Stack internal area	2 % of value	Determined before measurements
Positional accuracy of flow sensor in stack	≤10 % of distance between adjacent measurement points	During field measurement
Angle of the probe to measurement plane (pitch of probe)	≤10° from measurement plane	During field measurement
Uncertainty in flow measurement device calibration	≤1 % of value	Calibration certificate
Uncertainty in differential pressure-reading device calibration ^a	≤1 % of value	Calibration certificate for manometer or pressure sensor
Uncertainty in stack gas density ^a	≤0,05 kg/m ³	During field measurement

^a Only applicable to differential pressure devices.

Tabel 9 Præstationskriterier – feltmåling med pitotrør. Ikke oversat til dansk med henblik på at undgå forvirring af begreber. Bemærk, at henvisningen til 9.3.4 svarer til kapitel 8.3.4 i dette metodeblad.

Tilsvarende præstationskriterier for feltmåling med vingehjulsanemometer er angivet i standardens bilag B (EN 16911-1, annex B).

MEL-25

Bestemmelse af volumenstrøm i kanaler

8.4.1 Kontrol af målestedets egnethed til traverseringsmålinger

EN 15259 stiller krav om målestedets egnethed til traverseringsmålinger (isokinetisk og flowproportional prøvetagning) skal kontrolleres efter følgende regler⁸:

1. Volumenstrømsretningen (swirl) må ikke overstige 15° i forhold til kanalens akse i ethvert målepunkt.
2. Der må ikke være lokal negativ hastighed i et målepunkt.
3. Minimum hastighed skal være større end hastighedsmålemetodens nedre grænse (for pitotrør > 5 Pa).
4. Forholdet mellem den største og mindste målte hastighed i tværsnittet skal være mindre end 3:1.

Ovenstående kontrol bør være en naturlig del af en volumenstrømsmåling og bør altid rapporteres. Testen skal kun udføres en gang pr. driftssituation pr. målekampagne. Når kravene er opfyldt er målestedet egnet til isokinetisk eller flowproportional prøvetagning.

Info-boks 7

Vær opmærksom på, at ovenstående krav til målestedes egnethed ofte (men ikke i alle situationer og sjældent ved kraftig swirl) vil være opfyldt ved lige kanalstrækninger på mindst fem gange den hydrauliske diameter opstrøms målestedet og mindst to gange nedstrøms målestedet. Det anbefales derfor ved design af målesteder, som minimum at følge ovenstående afstandsregler. Ved risiko for swirl kan der ind sættes et kryds eller lign. i kanalen opstrøms for målestedet. Målinger i kanalåbninger anbefales ikke, men kan i princippet godt godkendes af testen af målestedets egnethed.

8.5 Udførelse af hastighedsmålingen

Mål hastigheden i samtlige målepunkter i tværsnitsarealet.

- placer sonden i målepunktet
- pitotrør: mål det gennemsnitlige differensterk over minimum et minut
 - ud fra mindst 3 aflæsninger eller vha. midlingsfunktionen i et elektronisk manometer
 - ved anvendelsen af 3D pitotrør kan måletiden være væsentlig større end et minut
- vingehjulsanemometer: Mål den gennemsnitlige hastighed over minimum et minut
 - ud fra mindst 3 aflæsninger eller vha. en midlingsfunktion i anemometeret
- hvis der anvendes to instrumenter skal de aflæses parallelt
- mål temperaturen i hvert målepunkt, hvor relevant
- mål gasens densitet (O₂, H₂O og CO₂) eller bestem densiteten på anden vis
- mål atmosfæretrykket eller benyt nærmeste meteorologi målestation⁹
- mål det statiske tryk mindst én gang pr. målelinie

8.6 Kvalitetskontrol efter målingen

En kontrol for eventuelle blokader er nødvendig for alle pitotrør undtagen for s-pitotrør. Kontrollen bør udføres efter hver volumenstrømsmåling, da alle målinger siden sidste kontrol skal kasseres hvis kontrollen ikke er OK.

⁸ Fra diverse standarder EN 13284-1 og EN 15259.

⁹ Bemærk, at i Danmark, kan data fra DMI normalt benyttes, men at højdeforskelle, afstande etc. har indflydelse på atmosfæretrykket. Trykket falder ca. 14 mbar pr. 100 meter. Når der anvendes meteorologi data skal de være sammenfaldende i tid.

MEL-25

Bestemmelse af volumenstrøm i kanaler

- mål differenstrykket i et målepunkt
- blæs hullerne i pitotrøret fri for evt. blokader
- gentag målingen i samme målepunkt
- hvis forskellen i udlæsningen er < 5 % er målingen OK
- en samtidig måling i et referencepunkt må benyttes til korrektion af blokadetestudlæsningerne, såfremt forskellen mellem de to målinger i referencepunktet er større end 2 %
- for 3D pitotør skal testen gennemføres for alle sensor åbninger

9 Beregninger

9.1 Generelt

I det følgende antages det, at gassammensætningen er konstant over tværsnitsarealet (homogenitet).

Resultater kan rapporteres i forskellige konditioner (enheder):

- skorstenskonditioner (drift): ved aktuel temperatur, tryk og vandindhold [m^3/h]
- referencetilstand: ved 0°C og $101,3 \text{ kPa}$ [$\text{m}^3(\text{n},\text{t})/\text{h}$]
 - i sjældne tilfælde omregnes endvidere til en referenceiltprocent [$\text{m}^3(\text{n},\text{t},\text{ref.O}_2)/\text{h}$]
- hvis formålet er en QAL2 eller AST skal resultatet udtrykkes i samme enhed som volumenstrømsmåleren måler i. Enheden [m/s] bør anvendes (EN 16911-2).
- hvis formålet er at beregne masseemissioner bør volumenstrømmen udtrykkes i samme enhed som koncentrationsmålingerne (som så vidt muligt bør måles vådt)
 - ved at måle koncentrationerne vådt undgås det, at introducere en fejl/usikkerhed fra vandbestemmelsen, som dermed kan udelades eller kun har lille indflydelse (fra densiteten).
- alternative enheder kan anvendes ved andre formål med målingen

9.2 Beregning af hastighed (pitotrørsmålinger)

Hastigheden i hvert enkelt målepunkt: v_i beregnes i henhold til annex A (differentrykmåling) eller annex B (vingehjulsanemometer) i EN 16911-1.

Vingehjulsanemometeret giver hastigheden v_i direkte i m/s .

Alle typer pitotrør giver en udlæsning af det dynamiske differenstryk p_x i Pa.

Hastigheden i et målepunkt udregnes efter følgende formel (pitotrørsformlen):

$$v_i = K \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_i}{\rho}}$$

hvor

v_i er hastigheden i målepunkt i [m/s]

$\overline{\Delta p_i}$ er middelværdien af det målte dynamiske tryk i målepunkt i [Pa]

K er pitotrørsfaktoren fra kalibrering af pitotrøret. Bemærk at alle typer pitotrør skal kalibreres med henblik på at finde eller verificere pitotrørsfaktoren.

ρ er gassens densitet ved skorstenskonditioner (aktuel temperatur, tryk og vandindhold) [kg/m^3]

Info-boks 8

Bemærk at målingen i et målepunkt tager mindst 1 min. Det er tilladt at midle alle aflæsninger af differenstryk i denne periode, enten ved simpel midling af mindst tre aflæsninger eller ved at anvende en midlingsfunktion indbygget i et elektronisk manometer. Ved beregning af kanalens middelhastighed skal hastigheden i hvert punkt beregnes FØR midling.

MEL-25

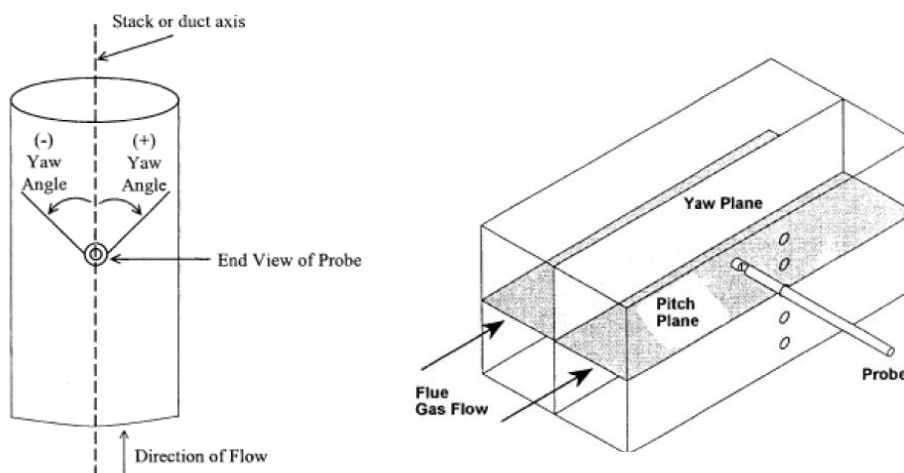
Bestemmelse af volumenstrøm i kanaler

Info-boks 9

Når der er betydelig swirl anbefales det at anvende type 3D pitotrør, da denne type pitotrør kan give en bedre usikkerhed ved swirl.

Swirl eller cyklonisk volumenstrøm er den mest normale forstyrrelse i en cirkulær kanal. Vinklen af swirl i forhold til kanalens akse og vinkelret på målelinien betegnes også "yaw vinklen". Når gassen har en vinkel i forhold til kanalens akse og i samme retning som målelinien kaldes det "pitch vinklen". Det er kun yaw vinklen eller swirl der kan måles med 2D, L-type og S-type pitotrør.

3D pitotrør kan måle både pitch og yaw vinkler. Beregningsformler til beregning af hastighed, yaw, pitch og gasvolumenstrøm er angivet (med amerikanske enheder) i formel A.3 til A.10 i Annex A i EN-16911-1.



Figur 3 Illustrationer fra USEPA method 2G. Viser yaw vinklen eller swirl vinklen i den venstre figur og illustrerer forskellen på yaw og pitch i den højre figur.

Middelhastigheden i kanaltværsnittet beregnes ved alm. aritmetrisk midling af hastigheder, men kun hvis alle målepunkterne repræsenterer lige store arealer. Bemærk, at det ikke er korrekt at midle de målte differenstryk og derefter beregne middel hastigheden.

9.3 Korrektion for vægeffekter

Da hastighedsprofilen falder ganske skarpt ud mod kanalens inderside, bliver middelhastigheden en smule overestimeret ved måling af hastigheder i punkter. Standarden tillader derfor korrektion for vægeffekter ved at gange middelhastigheden med en vægeffekt faktor (wall effect factor (WAF)):

$$\bar{v}_c = \bar{v} \cdot WAF$$

hvor

\bar{v}_c = den korrigerede middelhastighed

\bar{v} = middelhastigheden

WAF = væg effekt faktor

Følgende væg effekt faktorer kan benyttes:

- cirkulære kanaler
 - med glat inderside: default WAF = 0,995
 - med ru (mursten eller mørtel) inderside: default WAF = 0,99

MEL-25

Bestemmelse af volumenstrøm i kanaler

- ES EPA metode 2H angiver en metode til at beregne WAF ud fra nær-vægs målinger af hastighed i kanaler større end 1,0 m i diameter. WAF må ikke være mindre end 0,97 hvis denne metode anvendes
- rektangulære kanaler
 - US EPA CTM-041 angiver en tilsvarende metode til beregning af væg effekt faktoren i rektangulære kanaler, hvor væg effekterne kan være større pga. målepunkternes afstand fra kanal væggen samt at effekterne er større i hjørner.

Info boks 10

Anvendelsen af vægeffektfaktorer (WAF) for cirkulære kanaler er relativt simpelt og bør anvendes, da volumenstrømmen ellers bliver overestimeret. Det fremgår dog ikke af EN-16911-1 om beton defineres som en ru eller glat underside, selvom det er nærliggende at tolke beton som en ru inderside.

For rektangulære kanaler angives ikke default faktorer og det er således nødvendigt at måle og beregne vægeffekterne såfremt de ønskes anvendt. Vægeffekterne er kraftigere for rektangulære kanaler end for cirkulære kanaler og dermed vil vægeffektfaktoren (WAF) for en rektangulær kanal altid være mindre end den tilsvarende WAF for en cirkulær kanal i samme materiale. Når vægeffekterne i rektangulære kanaler ikke er målt giver det mening at anvende default værdierne fra cirkulære kanaler, da anvendelsen er mere korrekt end helt at undlade at benytte WAF.

Anbefaling 7

Det anbefales at kun beton, mursten og mørtel indersider tolkes som ru (WAF = 0,99) og alle andre typer indersider betragtes som værende glatte (WAF = 0,995). Det anbefales endvidere at anvende default væg-effektfaktorer for cirkulære kanaler til rektangulære kanaler, såfremt vægeffektfaktoren ikke er målt og beregnet i det aktuelle tilfælde.

Såfremt der ønskes meget høj præcision i volumenstrømsmålingen anbefales det at måle og beregne vægeffektfaktoren både for cirkulære og for rektangulære kanaler. Alternativt kan der anvendes CFD¹⁰-beregninger baseret på den aktuelle volumenstrømsmåling (hastigheder, densitet, temperatur, dimensioner etc.) til at beregne WAF i den aktuelle situation.

9.4 Beregning af volumenstrøm ud fra middelhastighed

$$q_{V,w} = \bar{v} \cdot A_I$$

hvor

$$q_{V,w} = \text{volumenstrøm ved kanal konditioner (aktuel temp., tryk og fugtighed)} [m^3/s]$$

$$\bar{v} = \text{middelhastigheden} [m/s]$$

$$A_I = \text{kanalens indre areal} [m^2]$$

¹⁰ CFD: Computational fluid dynamic. En avanceret computer baseret metode til at løse og analysere problemer, der involverer flow.

MEL-25

Bestemmelse af volumenstrøm i kanaler

9.5 Korrektion til referencetilstand

Korrektion til referencetilstand udføres efter følgende formel:

$$q_{V,od} = q_{V,w} \cdot \frac{p_c}{101,325} \cdot \frac{273,15}{T_c} \cdot \frac{100 - \varphi_{H_2O}}{100}$$

hvor

$q_{V,od}$ = volumenstrøm ved referencetilstand (0°C, 101,325 kPa og tør gas) [$m^3_{(n,t)}/s$]

$q_{V,w}$ = volumenstrøm ved aktuel temperatur, tryk og vandindhold [m^3/s]

p_c = det absolutte tryk i kanalen [kPa]

T_c = gastemperaturen [K] (= 273,15 + t_c , hvor t_c er gastemperaturen i [°C])

φ_{H_2O} = vandindholdet i gassen [vol %]

I sjældne tilfælde kan det være relevant at beregne volumenstrømmen ved referencetilstand inklusiv en reference iltkoncentration:

$$q_{V,od,O_2ref} = q_{V,od,O_2} \cdot \frac{21 - \varphi_{O_2,d}}{21 - \varphi_{O_2,ref}}$$

hvor

q_{V,od,O_2ref} = volumenstrøm ved referencetilstand (0°C, 101,325 kPa, tør gas og ref. ilt) [$m^3_{(n,t,refO_2)}/s$]

q_{V,od,O_2} = volumenstrøm ved referencetilstand (0°C, 101,325 kPa, tør gas og akt. ilt) [$m^3_{(n,t)}/s$]

$\varphi_{O_2,d}$ = tør iltkoncentration i gas [vol %, tør]

$\varphi_{O_2,ref}$ = reference ilt koncentration [vol %]

Info boks 11

Som det fremgår af ovenstående formler er der ikke konsekvens i anvendelsen af betydende cifre for konstanterne. Formlerne er gengivet som angivet i standarden, men akkrediterede målefirmaer bør naturligvis anvende de korrekte konstanter med et passende antal betydende cifre. Konstanten 21 i ovenstående formel er ilt koncentrationen i atmosfæren og bør rettelig være 20,95¹¹.

10 Usikkerhed

Standarden foreskriver at usikkerheden skal bestemmes i henhold til principperne i ISO/IEC Guide 98-3 (Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)) og EN ISO 20988 (Luftkvalitet – Vejledning i vurdering af måleusikkerhed).

I standardens kapitel 11 angives endvidere en "vejledning" i punktform og i bilag er der regneeksempler på udregningen af usikkerhed for de fleste af standardens metoder.

Info-boks 12

Flere af punkterne i kapitel 11 er særdeles uklare; især de to sidste vedr. vægeffektfaktorers og swirls påvirkning af usikkerheden.

11 Rapportering

I nærværende metodeblad er der specifikt nævnt en række rapporteringskrav, som gentages her:

- Kapitel 8.2.2: Alle afvigelser skal rapporteres (eksempelvis manglende målepunkter).

¹¹ Fra bogen Air Pollution – from a local to a global perspective, Jes Fenger % Jens Christian Tjell, Polyteknisk Forlag, 2009

MEL-25

Bestemmelse af volumenstrøm i kanaler

- Kapitel 8.3.1, Anbefaling 6: Når arealet ikke er opmålt fysisk skal det fremgå af rapporten at arealet IKKE er opmålt selvom EN 16911-1 forlanger det.
- Kapitel 8.4.1: Resultatet af testen "målestedets egnethed" bør altid rapporteres.
- Generelt: Det er vigtigt at bruge korrekte og præcise enheder ved rapportering.

12 Modifikationer

Der er ikke andre modifikationer end de som er nævnt i diverse anbefalinger i metodebladet.