



### 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 (beregningemetoder og sporgasmetoder er dækket af standarden, men kun kortfattet beskrevet i metodebladet)
Referencer	EN ISO 16911-1: <u>2013</u> (manuel referencemetode), <del>og</del> samt elementer fra EN ISO 16911-2: <u>2013</u> (automatiske målesystemer (AMS)) <u>samt CEN/TR 17078:2017</u>
År	2014
Revideret år	<u>2019-</u>

### Indholdsfortegnelse

1	Indledning.....	3
1.1	Anvendelsesområde .....	4
1.1.1	Måleområde .....	4
2	Metodebladenes status, indhold og form .....	4
2.1	Samspil mellem standarder, metodeliste og akkreditering .....	5
2.1.1	Standarder .....	5
2.1.2	Metodeliste.....	5
2.1.3	Metodeblade.....	5
2.1.4	Akkreditering .....	5
2.2	Generelt .....	6
3	Definitioner .....	6
4	Princip .....	10
4.1	Generelt .....	10
4.2	Måling af hastighed i et punkt i kanalen .....	11
4.2.1	Pitotrør .....	11
4.2.2	Differenstrykmålere.....	12
4.2.3	Vingehjulsanemometer .....	12
4.3	Måling af volumenstrøm.....	12
4.3.1	Volumenstrøm ud fra hastighedsmålinger i punkter .....	12
4.3.2	Volumenstrøm ved sporgasfortyndingsmetoden .....	13
4.3.3	Volumenstrøm ved sporgastransittid metoden .....	13
4.3.4	Volumenstrøm ud fra anlæggets termiske input .....	13
5	Valg af metode .....	14



## Måling af emissioner til luften

## Metodeblad nr.: MEL-25: 2019

6	Opmåling af tværsnitsareal .....	16
7	Gennemførelse af måling .....	18
7.1	Planlægning - undersøgelse af målested .....	18
7.2	Bestemmelse af antal og fordeling af målepunkter .....	18
7.2.1	Minimumskrav til antallet af målepunkter .....	19
7.2.2	Fordeling og placering af målepunkter .....	20
7.2.2.1	Cirkulære kanaler .....	20
7.2.2.2	Rektangulære kanaler .....	21
7.3	Kontroller inden måling .....	22
7.3.1	Generelt .....	22
7.3.2	Læktest (kun relevant for pitotrør) .....	23
7.3.3	Kontrol af s-pitotrør .....	24
7.3.4	Test af repetérbarhed i et enkelt punkt .....	24
7.3.5	Swirl eller cyklonisk flow .....	24
7.4	Kvalitetskontrol i felten .....	25
7.4.1	Kontrol af målestedets egnethed til traverseringsmålinger .....	26
7.5	Udførelse af hastighedsmålingen .....	27
7.6	Kvalitetskontrol efter målingen .....	27
7.7	Kvalitetskontrol på laboratoriet (årlige kontroller og kontroller ved fejl eller skade) .....	28
8	Beregninger .....	29
8.1	Generelt .....	29
8.2	Beregning af hastighed (pitotrørsmålinger) .....	30
8.3	Korrektion for vægeffekter .....	31
8.4	Beregning af volumenstrøm ud fra middelhastighed .....	32
8.5	Korrektion til referencetilstand .....	33
9	Usikkerhed .....	33
10	Rapportering .....	34
11	Modifikationer .....	34

## 1 Indledning

Historik for metodebladet:

<u>Udgave</u>	<u>Årstal (evt. måned)</u>	<u>Væsentlige ændringer siden sidste version</u>
<u>1. udgave</u>	<u>2014</u>	<u>Nyt metodeblad</u>
<u>Revision</u>	<u>2019</u>	<u>CEN/TR 17078: 2017 er indarbejdet. Herudover er der rettet og præciseret på baggrund af tilbagemeldinger fra brugerne.</u>

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<sub>x</sub>-afgift CO<sub>2</sub>-kvote handel mv.) baseret på målinger er det-der 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

I 2017 udkom der en teknisk rapport fra CEN:

- CEN/TR 17078: 2017
  - Vejledning i anvendelse af EN ISO 16911-1

Vejledningen uddyber og forklarer elementer i EN-16911-1 og definerer tre formål med mulighed for at lempe kravene til kvalitetssikringen ved nogle af formålene. De tre formål er følgende (betegnes herefter formål a), formål b) og formål c) i teksten):

- a) Præstationskontrolmålinger, målinger til indberetning af masseemissioner samt hastighedsmålinger til kontrol af isokinetik.
- b) Målinger til QAL2 kalibrering eller AST-kontrol af hastighed og volumenstrøm
- c) Alle andre måleformål under EU ETS direktivet (CO<sub>2</sub> kvoter etc.)

Indholdet i vejledningen er indarbejdet i revision 2019 af metodebladet.

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.

## 1.2.1 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.

### 1.2.1.1 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 målegrænse 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 differenstryk under 5 Pa. Hvis differenstrykket i enkeltpunkter er under 5 Pa kan målestedet ikke godkendes ved test af målestedets egnethed til traverseringsmålinger (se kapitel [7.4.18.4.1](#)).

## 2 Metodebladens status, indhold og form

Metodebladet er målrettet målefirmaer og andre med specialinteresse for målinger og giver information på dansk om, hvordan målingerne skal udføres og hvilke særlige forholdsregler og modifikationer, der kan forekomme efter danske forhold. Formålet er at sikre ensartede analyseresultater samt at oplyse om særlige forhold, hvor modifikationer eller andre forholdsregler kan være påkrævet.

## **2.1 Samspil mellem standarder, metodeliste og akkreditering**

I Referencelaboratoriets notat fra 2018 " Samspil mellem metodeliste, metodeblade, standarder og akkreditering", der kan findes på [www.ref-lab.dk](http://www.ref-lab.dk) redegøres der i detaljer for systemets opbygning. Det følgende er en sammenfatning af notatet:

### **2.1.1 Standarder**

Der foreligger CEN-standarder for næsten alle almindeligt forekommende måleparametre; for måleparametre som ikke har en CEN-standard findes der i de fleste tilfælde ISO-standarder eller nationale standarder.

### **2.1.2 Metodeliste**

Miljøstyrelsens metodehåndbog anfører hvilke standarder, der skal måles efter ved emissionsmålinger i Danmark. Metodelisten vedligeholdes og opdateres af Referencelaboratoriet og kan findes på [www.ref-lab.dk](http://www.ref-lab.dk).

### **2.1.3 Metodeblade**

Metodebladene indeholder en beskrivelse på dansk af, hvordan målingerne skal udføres. Metodebladene beskriver udvalgte emner fra standarden og er ikke en fuldstændig afskrift af standarden. Der kan endvidere være tilføjet noget i metodebladet, som standarden ikke dækker, men som er vurderet relevant for emissionsmålinger i Danmark.

Metodebladene revideres, når der udkommer en ny standard eller, når eksisterende standarder revideres. Endvidere kan der som følge af tilbagemeldinger fra emissionslaboratorier eller på baggrund af resultater fra præstationsprøvnings gennemføres en revision af et metodeblad. Det er Referencelaboratoriets følgegruppe, der prioriterer revision af metodebladene. Det kan således godt forekomme, at metodeblade ikke revideres umiddelbart efter, at standarden er revideret.

### **2.1.4 Akkreditering**

Luftvejledningen anfører, at egenkontrol ved eksterne laboratorier bør udføres som akkrediterede målinger. DANAK akkrediterer på luftemissionsområdet i henhold til standarder og metodeblade, idet standarden skal følges, og de modifikationer og tilføjelser, der fremgår af metodebladet, bør følges af danske laboratorier.

I flere bekendtgørelser, bl.a. standardvilkårsbekendtgørelsen, refereres til at målinger skal ske i henhold til metodeblade (ikke standarder) og med mulighed for at anvende *internationale standarder med mindst samme analysepræcision og usikkerhedsniveau*. Med denne sætning er det således tilladt at benytte den standard som metodebladet refererer til uden at følge de modifikationer/tolkninger, der er anført i metodebladet. Man kan også anvende andre internationale standarder med samme analysepræcision og usikkerhedsniveau.

Praksis i Danmark, når danske, akkrediterede laboratorier udfører emissionsmålinger, er at følge standarden med de modifikationer, der er nævnt i metodebladet.

Ved nye udgaver af standarder, hvor metodebladet ikke er revideret:

ISO 17025 anfører, at et akkrediteret laboratorium skal sikre, at den gældende udgave af en standard anvendes. Det betyder i praksis, at et laboratorium hurtigst muligt skal referere til den nyeste udgave af en standard uanset, om det tilknyttede metodeblad er revideret.

Det er op til det enkelte laboratorium at tage stilling til hvordan en evt. konflikt mellem den reviderede standard og det ikke reviderede metodeblad håndteres, men som udgangspunkt bør standarden have forrang for metodebladet.

Ved nye udgaver af metodebladet, hvor standarden endnu ikke er udgivet:

Reviderede standarder:

- Der refereres til den gamle standard med det ny metodeblads modifikationer, indtil standarden udkommer. Herefter refereres der til den nye standard med det nye metodeblads modifikationer.
- Hvis der foreligger en prEN eller en ISO/DIS kan der søges akkreditering til den, hvis nødvendigt.

Ny standard og nyt metodeblad (dvs. i modsætning til en revideret standard):

- Hvis laboratoriet er akkrediteret til parameteren med en alternativ reference, så fortsættes der med denne reference, indtil den nye standard udkommer. Hvis laboratoriet ikke er akkrediteret til parameteren, kan laboratoriet søge akkreditering til metodebladet og den teknisk færdige standard.

## **2.2 Generelt**

Referencelaboratoriet udvælger i samarbejde med Miljøstyrelsen metodeblade til granskning hvert år. Brugere af metodebladene er velkomne til at kontakte Referencelaboratoriet, hvis de bliver opmærksomme på behov for ændringer.

Alle modifikationer i forhold til standarden inklusiv deres mulige indvirkning på måleresultatet vil fremgå af kapitlet "Modifikationer" sidst i metodebladet. Samme sted vil der være reference til det sted i standarden, som er modificeret.

Fortolkninger af standardens tekst, supplementer til standarden eller vejledninger i brug af standarden bliver ikke nævnt under "Modifikationer", men vil i nødvendigt omfang blive anført i bokse:

### **Information / Supplementer / Eksempler / Vejledning 17078:**

I metodebladet benyttes generelt en boks som denne. Boksene er nummererede, så der kan henvises til dem. Emner fra vejledning 17078 er specielt for det metodeblad.

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

## **23 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 m<sup>3</sup>/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: massestrøm<sup>1</sup> eller masseemission

<sup>1</sup> 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.

**MEL-25****Bestemmelse af volumenstrøm i kanaler**

---

- 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.

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".
Målelinje	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 <u>og er defineret</u> ved trykket 101,325 kPa og temperaturen 273,15 K. Begrebet referencetilstand kan endvidere omfatte en referencetilstand, men det anvendes sjældent for volumenstrøm.
Swirl	Et mål for graden af roterende gas. Vinklen mellem kanalens akse og flowretningen.
Periode-målinger	Enkeltmålinger eller målekampagner. I Luftvejningen 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 differenstryk 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 (bl.a. Affaldsforbrændingsbekendtgørelsen (nr. 1451:2012) og Store fyr bekendtgørelsen (nr. 1453:2012)).
EN; prEN	EN: Europæisk Norm. Forbogsstaver 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 <del>det er ISO</del> <del>der</del> 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) <sup>2</sup> .
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> easurement.
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
<u>MEL-02</u>	<u>Miljøstyrelsens anbefalede metoder, metodeblad MEL-02: Bestemmelse af koncentrationen af partikulært materiale (støv) i strømmende gas (www.ref-lab.dk).</u>
<u>EN ISO/IEC 17025: 2017</u>	<u>Generelle krav til prøvetagnings- og kalibreringslaboratoriernes kompetence.</u>
<u>CEN/TR 17078: 2017</u>	<u>Stationary source emissions – Guidance on the application of EN ISO 16911-1</u>

**Tabel 2** Referencer

<sup>2</sup> 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.

### 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 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 partikelmålinger) (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 punkt**målinger** i kanaltværsnittet, **og middelværdien heraf** 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.

- 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 målelinjer. 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.

Det areal, som måleudstyret blokerer i kanalen, må maksimalt udgøre 5-% af tværsnitsarealet.

### Vejledning 17078 1:

I kanaler, hvor arealet er mindre end 1,5 m<sup>2</sup> må blokeringsarealet udgøre op til 10% af tværsnitsarealet. I tilfælde, hvor 10% ikke kan opnås, bør hastighedsmålingen udføres uafhængigt af den isokinetiske prøvetagning for på den måde at sikre, at måleudstyret fylder så lidt som muligt.

### **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 massefylde<sup>3</sup> for at beregne hastigheden.

<sup>3</sup> Den aktuelle massefylde er afhængig af gassens sammensætning, temperatur og tryk.

Vejledning 17078 2:

Slanger og rør, der benyttes til at forbinde pitotrør og manometer, bør være så korte og tykke som muligt.

Følgende typer af pitotrør kan anvendes og er beskrevet i standardens Annex A: type S, type L, type 2D<sup>4</sup> og type 3D.

**Info-boks 23**

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 Differenstrykmålere

I dette dokument benyttes betegnelsen manometre for alle typer differenstrykmålere.

Alle typer manometre, der kan leve op til metodebladets krav kan anvendes, eksempelvis:

- Mikromanometre
- Skrårørsmanometre
  - Da væskens densitet ændres med temperaturen bør der korrigeres for dette. Afsnit 7.2.2.3 i CEN/TR 17078 angiver en formel til korrektion.

### 4.2.24.2.3 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.

### 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

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

### 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 injektionsstedet.

Det er en forudsætning for metoden, at:

- sporgassen opblandes fuldstændig i gasstrømmen
- sporgassen ikke forefindes i gasstrømmen, opstrøms fra injektionsstedet.
  - hvis sporgassen forefindes kan baggrundskoncentrationen måles og fratrækkes inden beregning. Denne fremgangsmåde øger usikkerheden på bestemmelsen.

### 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 ét 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 brændsels sammensætning 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 varmegæsker og kraftvarmegæsker 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 bl.a. NO<sub>x</sub>-afgiftsbekendtgørelsen nævner som en mulighed<sup>5</sup>. 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 CO<sub>2</sub>- eller O<sub>2</sub>-måling kan den aktuelle volumenstrøm (inklusive luftoverskud) beregnes. Metoden beskrives ikke nærmere her.

<sup>5</sup> NO<sub>x</sub>-afgiftsbekendtgørelsen angiver at metoden må benyttes ved homogene brændsler med en kontrolleret og kalibreret brændselsflowmåler og en AMS iltmåler.

**Anbefaling 23**

I de tilfælde, hvor der er en kontrolleret og kalibreret brændselsflowmåler samt oplysninger om brændselssammensætning, 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"> <li>fx i forbindelse med isokinetisk prøvetagning af fx partikler</li> </ul>	Punktmåling med pitotrør eller vingehjulsanemometer
Bestemmelse af swirl	Pitotrør til at bestemme swirl: <ul style="list-style-type: none"> <li>S-type eller L-type<sup>6</sup></li> <li>3D- eller 2D-type</li> </ul> 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 <a href="#">Støkiometrisk beregning</a>
QAL2 eller AST parallelmålinger	Pitotrør- og vingehjulsanemometer-måling Sporgas-fortyndning Sporgas-transit tid
Forundersøgelse som beskrevet i EN 16911-2	Punktmåling med pitotrør eller <a href="#">vingehjulsanemometer</a> (inkludativ 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
- 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 [at](#) 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

<sup>6</sup> 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. [CEN/TR 17078 anbefaler at også L-pitotrør kan anvendes til bestemmelse af swirl.](#)

**MEL-25****Bestemmelse af volumenstrøm i kanaler**

---

- at EN 16911-1 nævner, at hastighedsvariationer kan overvåges i et referencepunkt (enten med en ekstra hastighedsmåler eller vha. anlæggets AMS).

**Info-boks 34**

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 målingen i 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 34**

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 eeét 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 éet minuts midlingstid i hvert punkt og eventuelt at udføre flere traverseringsmålinger. 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 45**

Når det ikke er muligt at måle tværsnitsarealet i to målelinjer, 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.

Usikkerheden på opmåling af tværsnitsarealet indgår i den samlede usikkerhed på volumenstrømsmålingen. Denne usikkerhed indgår i fx beregning af årsemissionen af CO<sub>2</sub> på et affaldsforbrændingsanlæg, som er underlagt strenge krav til usikkerheden:

	Tier 1	Tier 2	Tier 3	Tier 4
CO <sub>2</sub> emission sources	±10 %	±7,5 %	±5 %	±2,5 %
N <sub>2</sub> O emission sources	±10 %	±7,5 %	±5 %	N/A

Source: Commission Regulation (EU) No. 601/2012 of 21 June 2012 on the monitoring and reporting of greenhouse gas emissions pursuant to Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council.

Det anbefales, at opmålingen af tværsnitsareal under formål b) og formål c) udføres så omhyggeligt som muligt, samt at det beskrives i rapporten, hvordan arealet er opmålt. Hvis muligt anføres en vurderet usikkerhed på opmålingen af tværsnitsareal.

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.

Formel til beregning af længdeudvidelse:

$$dl = L_0 \cdot \alpha \cdot (t_1 - t_0), \text{ hvor}$$

$dl = \text{længdeændringen [m]}$

$L_0 = \text{oprindelig længde [m]}$

$\alpha = \text{linær ekspansionskoefficient [m/m°C]}$

$t_0 = \text{oprindelig temperatur [°C]}$

$t_1 = \text{kanaltemperatur [°C]}$

Parameter	Præstations kriterium	Metode
Tværsnitsareal	≤ 2 % af måleværdi	Vurdering af metoden. Husk temperaturindflydelse.

**Tabel 4** Præstationskriterium – opmåling af tværsnitsareal

**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.	≤2 % of range per 10 K	Performance evaluation of measurement device
Sensitivity to atmospheric pressure	≤2 % of range per 2 kPa	Performance evaluation of the measurement device
Effect of angle of sensor to flow	≤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.~~

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

## 7 Gennemførelse af måling

### 7.1 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
- Måleudstyret må ikke optage mere end **35** % af tværsnitsarealet
  - CEN/TR 17078: I kanaler, hvor arealet er mindre end 1,5 m<sup>2</sup> må blokeringsarealet udgøre op til 10% af tværsnitsarealet. I tilfælde, hvor 10% ikke kan opnås, bør hastighedsmålingen udføres uafhængigt af den isokinetiske prøvetagning for på den måde at sikre, at måleudstyret fylder så lidt som muligt.
- Volumenstrømmen bør ikke variere væsentligt under en måling, som ved 20 målepunkter tager minimum 20 minutter at gennemføre, kan tage op til én time at gennemføre. Se endvidere Info-boks 4. Info-boks 4

#### Info-boks 4 og Anbefaling 34

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 målingen i 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.

#### ~~og Anbefaling 4.~~

- Hvis periodiske svingninger større end 10 % af den gennemsnitlige hastighed forventes, skal målingerne planlægges således, at svingningerne udjævnes mest muligt.
- Forundersøgelse ved isokinetiske målinger (se også MEL-02 Bestemmelse af koncentrationen af partikulært materiale (støv) i strømmende gas):
  - Ved anvendelse af separat hastighedsmåleudstyr (dvs. adskilt fra den isokinetiske måling), kræves der stabilt flow i kanalen, da det er nødvendigt at måle hastighederne før selve den isokinetiske måling gennemføres.
  - Stabilt flow dokumenteres ved at installere en hastighedsmåler i et fast punkt i kanalen. Data fra denne benyttes til at bevise at der er stabilt flow (mindre end 10 % variation<sup>7</sup>)

### 7.2 Bestemmelse af antal og fordeling af målepunkter

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

<sup>7</sup> Standarden foreskriver ikke hvordan variationen beregnes, men følgende metode kan anvendes: Benyt minimumværdier og mål i minimum 10 minutter eller så mange minutter som der er traverseringspunkter (vælg største værdi. Testen udføres således:  $(v_{max} - v_{min}) \cdot 0,5 < v_{middel} \cdot 10\%$

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

### 7.2.1 Minimumskrav til antallet af målepunkter

Minimumskravet 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 <sup>2</sup>	Diameter M	Minimum antal målelinjer	Minimum antal målepunkter pr. tværsnitsareal <sup>c</sup>
< 0,1	< 0,35	2 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>
0,1 – 1,0	0,35 – 1,1	2	4
<del>≥ 1,1</del> – 2,0	≥ 1,1 – 1,6	2	8
> 2,0	> 1,6	2	4 pr. m <sup>2</sup> , dog mindst 12 <sup>b</sup>
<sup>a</sup> Ved partikelmålinger er det tilstrækkeligt med <del>ee</del> ét målepunkt i små kanaler. <sup>b</sup> Ved store kanaler er 20 målepunkter normalt tilstrækkeligt. <sup>c</sup> Ved cirkulært måletværsnit skal antallet af målepunkter være deleligt med 4. <u>Af samme årsag er minimum antal målepunkter ved små kanaler 4.</u> <u>Generelt Det anbefales generelt, og især ved skæve hastighedsprofiler, at vælge flere målepunkter end standardens krav til minimum antal målepunkter.</u>			

**Tabel 56** ————— Minimum antal målepunkter i en cirkulær kanal

Tværsnitsareal m <sup>2</sup>	Minimum antal sideopdelinger <sup>a</sup>	Minimum antal målepunkter pr. tværsnitsareal
< 0,1	1 <sup>b</sup>	1 <sup>b</sup>
0,1 – 1,0	2	4
1,1 – 2,0	3	9
> 2,0	≥ 3	4 pr. m <sup>2</sup> , dog mindst 12 <sup>c</sup>
<sup>a</sup> Alternative sideopdelinger kan være nødvendige fx. hvis den længste side er mere end dobbelt så lang som den korteste side <sup>b</sup> 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. <sup>c</sup> Ved store kanaler er 20 målepunkter normalt tilstrækkeligt. <u>Generelt Det anbefales generelt, og især ved skæve hastighedsprofiler, at vælge flere målepunkter end standardens krav til minimum antal målepunkter.</u>		

**Tabel 67** ————— Minimum antal målepunkter i en rektangulær kanal

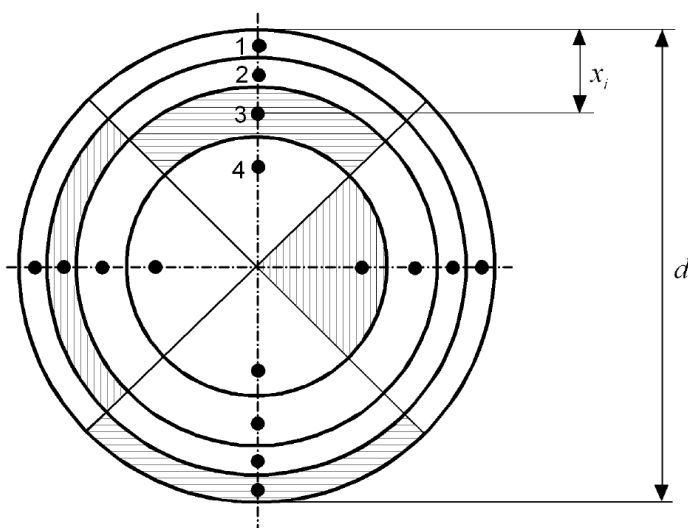
## 7.2.2 Fordeling og placering af målepunkter

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).

### 7.2.2.1 Cirkulære kanaler

Målepunkter til volumenstrømsmåling skal være baseret på lige store arealers princip<sub>z</sub> og at det er et krav<sub>z</sub> at den tangentielle metode<sup>8</sup> skal benyttes i cirkulære kanaler.



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

<sup>8</sup> Den tangentielle metode er den<sub>z</sub> hvor der ikke er et målepunkt i midten af kanalen<sub>z</sub> og i øvrigt er den almindeligt benyttede metode i DK til fordeling af målepunkter (Luftvejledning, MEL-22 mv.).

# MEL-25

## Bestemmelse af volumenstrøm i kanaler

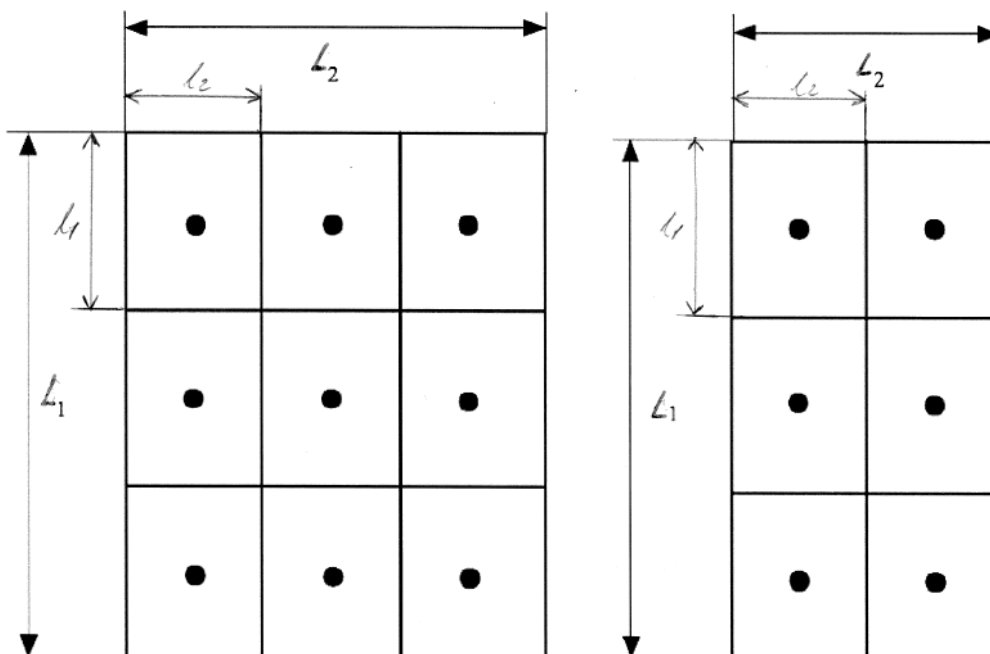
Målepunktets nr. langs én diameter	Antal målepunkter langs én skorstensdiameter						
	2	4	6	8	10	12	14
1	14,6	6,7	4,4	3,2	2,6	2,1	1,8
2	85,4	25,0	14,6	10,5	8,2	6,7	5,7
3		75,0	29,6	19,4	14,6	11,8	9,9
4		93,3	70,4	32,3	22,6	17,7	14,6
5			85,4	67,7	34,2	25,0	20,1
6			95,6	80,6	65,8	35,6	26,9
7				89,5	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

Tabel 78 Målepunkternes placering i et cirkulært måletværsnit. Afstande fra inderside af kanalvæg til de respektive målepunkter er udtrykt i procent af kanalens diameter d

### 7.2.2.2 Rektangulære kanaler

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



Figur 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 =  $0,8 \cdot 1,8 = 1,44$  m<sup>2</sup>, hvilket ifølge [Tabel 67](#) 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  $< 2$ .

## 7.3 Kontroller inden måling

### 7.3.1 Generelt

Når der anvendes et elektronisk manometer, skal kalibreringen kontrolleres med en væskebaseret trykmåler eller en kalibreret tryksensor med en usikkerhed bedre end eller lig med det elektroniske manometers. Afvigelsen 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 12 betydende cifre pr. Pascal ved formål a) og mindst 1 cifferdecimal (i Pascal) ved formål b) og c). I særlige tilfælde fx opnåelse af EU ETS Tier 4 (2,5%) kræves mindst 2 decimaler (i Pascal).

#### Vejledning 17078 3:

Formål a): Ovenstående kontrol kan undlades og erstattes af nulpunktskontrol, kontrol af respons ved udsættelse for flow samt kontrol af, at korrekte værdier gemmes eller udlæses, hvis konvertering fra differenstryk til hastighed beregnes internt i mikromanometeret.

Formål b) og c): Ovenstående kontrol skal udføres.

Alle formål: Ved anvendelse af skrårørsmanometer skal der udføres en visuel inspektion og om muligt en tæthedskontrol af manometeret.

Opløsning af mikromanometre: det generelle krav om en opløsning på 2 decimaler (i Pascal) er lempet afhængigt af formål. Indført i teksten ovenfor.

Differenstryk		Opløsning		Laveste usikkerhed der kan opnås baseret på opløsning
Pa	mm H <sub>2</sub> O	Pa	mm H <sub>2</sub> O	%
5	0,5	0,01	0,001	0,2
		0,1	0,01	2
		1	0,1	20
10	1,0	0,01	0,001	0,1
		0,1	0,01	1
		1	0,1	10
20	2,0	0,01	0,001	0,05
		0,1	0,01	0,5
		1	0,1	5

**Tabel 8** Oversigt over laveste opnåelige usikkerheder baseret på mikromanometres opløsning. Fra CEN/TS 17078.

Opmål tværsnitsareal osv. som angivet i kapitel 66. Bestem antallet og placering af målepunkter i henhold til kapitel 7.28.2.

## MEL-25

### Bestemmelse af volumenstrøm i kanaler

#### Info-boks 55

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.

Vejledning 17078 4: Tegningsmateriale kan benyttes, hvis direkte målinger ikke er mulige. Benyttes fx i kombination med måling af ydre diameter af kanalen.

#### Anbefaling 56

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.

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

Mange af de ovenstående punkter kan invalidere kalibreringen.

### 7.3.2 Lækttest (kun relevant for pitotrør)

Før hver måleserie skal der udføres en lækttest.

Eksempel på en velegnet lækttestprocedure:

Lækttesten kan fx udføres ved at påtrykke pitotrørets åbning (dynamisk side) et tryk på mindst det forventede differenstræk eller 50% af måleområdet på det anvendte manometer (højeste værdi vælges) statiske tryk i kanalen samtidig med, at sensor åbningerne blokeres. Trykket bør være konstant indenfor  $\pm 25$  Pa ( $2,5$  mm  $H_2O$ ) ikke falde mere end  $0,2$  Pa over en periode på 15 sekunder/ minutter. Testen gentages på den statiske side, blot ved anvendelse af undertryk.

Vejledning 17078 5:

## MEL-25

### Bestemmelse af volumenstrøm i kanaler

At anvende det statiske tryk til læktest som beskrevet i standarden er ikke tilstrækkeligt. Det er derfor ændret til det forventede differenstryk eller 50% af måleområdet, som beskrevet i teksten ovenfor. Et lille trykfald over en periode på 5 minutter er urealistisk pga. temperatursvingninger. Testen er derfor ændret til ovenstående test.

#### 7.3.3 Kontrol af s-pitotrør

Placer s-pitotrøret vinkelret på flowretningen i målepunktet og mål det statiske tryk i begge rør. Forskellen må maksimalt være mindre end 0,5% af range på måleudstyr som har en usikkerhed større end 10 Pa eller 10 Pa (1 mm H<sub>2</sub>O) på udstyr med bedre usikkerhed. Hvis forskellen er større end kriteriet kan det indikere at der er swirl eller blokering af pitotrøret eller lign. Årsagen skal undersøges. Vær opmærksom på evt. swirl, som kan vanskeliggøre testen.

Vejledning 17078 6:  
Ovenstående tekst er tilrettet og præciseret efter vejledningen.

#### 7.3.4 Test af repetérbarhed 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 standardspredningen på forskellene og sammenhold med kriteriet for repetérbarhed i Tabel 9.

Ved ét måleinstrument:

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

Vejledning 17078 7:  
Test af repetérbarhed udføres kun i felten ved formål b) og c). Ved formål a) anses repetérbarhedstesten i laboratoriet som tilstrækkelig.  
Anbefaling 6:  
Det anbefales, at denne test helt undlades og erstattes af repetérbarhedstesten i laboratoriet.

#### 7.3.5 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 målelinjeradius 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. CEN/TR 17078 anfører i annex A en metode til bestemmelse af swirl med S-pitotrør.

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 volumenstrømrretningen.



## MEL-25

### Bestemmelse af volumenstrøm i kanaler

gen. Aflæs volumenstrømrætningsens 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° i et punkt 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).

Med S-pitotrør kan ovenstående procedure gennemføres hurtigere: Pitotrøret vinkles 90° fra kanalens akse, og der gennemføres en traversering. Hvis der opnås en nul-aflæsning i et punkt, er der ingen swirl i dette punkt. Hvis der ikke opnås en nul-aflæsning i et punkt bestemmes swirlvinklen i dette punkt.

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

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

$v_{kor}$  = korrigeret hastighed

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

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

#### Info-boks 66

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. -CEN/TR 17078: 2017 anbefaler, at et alternativt målested opsøges og benyttes. Hvis dette ikke er muligt, anbefales det ved isokinetisk måling (fx partikelmåling i henhold til MEL-02), hvor swirl er observeret over 15°, at antallet af traverseringspunkter fordobles (op til maksimalt 20 punkter) og hvor punkterne over 15° ikke benyttes til isokinetisk måling og ikke indgår i volumenstrømmålingen. Denne fremgangsmåde skal dokumenteres og rapporteres såfremt den anvendes.

## 7.4 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)
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 <sup>a</sup>	≤1 % of value	Calibration certificate for manometer or pressure sensor
Uncertainty in stack gas density <sup>a</sup>	≤0,05 kg/m <sup>3</sup>	During field measurement

<sup>a</sup> Only applicable to differential pressure devices.

<u>Parameter</u>	<u>Kriterium</u>	<u>Metode til bestemmelse</u>	<u>Formål a), b) eller c)</u>
<u>Felt reproducerbarhed</u>	$\leq 5\%$ af hastighed	Bestemt før måling (kapitel 7.3.4 i dette metodeblad )	b) og c) kan udelades se Anbefaling 6:
<u>Swirl</u>	$< 15^\circ$	Under måling	Alle
<u>Kanalareal</u>	$\leq 2\%$ af værdi	Bestemt før måling	b) og c)
<u>Placering af hastigheds- måler i kanal</u>	$\leq 10\%$ af måleplan	Under måling	b) og c)
<u>Vinkel mellem sonde og måleplan (pitch)</u>	$\leq 10^\circ$ fra måleplan	Under måling	b) og c)
<u>Usikkerhed fra ha- stighedsmåleudstyrets kalibrering – pitotrør og manometer</u>	$< 2\%$ af range af mano- meter (inklusive pitotrør)	Kalibreringscertifikat	Alle
<u>Usikkerhed fra ha- stighedsmåleudstyrets kalibrering – kun mano- meter</u>	$\leq 1\%$ af værdi $\leq 0,5\%$ af range	Kalibreringscertifikat	b) og c) a)
<u>Usikkerhed af tempera- tur-måling (både sensor og indikator)</u>	$\leq 1\%$ af værdi (Kelvin) $\leq 1\%$ af range på indika- tor (Kelvin)	Kalibreringscertifikat	b) og c) a)
<u>Usikkerhed i gas densi- tet</u>	$\leq 0,05\text{ kg/m}^3$	Under måling	Alle

**Tabel 9** Præstationskriterier – feltmåling med pitotrør. Fra CEN/TR 17078. 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. Linjer der ikke vedrører kvalitetskontrol i felten er udeladt og i stedet medtaget i medtaget i afsnit 7.7.

Tilsvarende præstationskriterier for feltmåling med vingehjulsanemometer er angivet i standardens bilag B (EN 16911-1, annex B). Når andre metoder anvendes skal det demonstreres, at de kan leve op til præstationskriterierne angivet i bilag i EN 16911-1:

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

#### 7.4.1 Kontrol af målestedets egnethed til traverseringsmålinger

EN 15259 stiller krav om målestedets egnethed til traverseringsmålinger (isokinetisk og flowproportional prøvetagning) skal kontrolleres efter følgende regler<sup>9</sup>:

1. Volumenstrømsretningen (swirl) må ikke overstige  $15^\circ$  i forhold til kanalens akse i ethvert målepunkt.
2. Der må ikke være lokal negativ hastighed i et målepunkt.
3. Minimums-hastighed skal være større end hastighedsmålemetodens nedre grænse (for pitotrør  $> 5\text{ Pa}$ ).

<sup>9</sup> Fra diverse standarder EN 13284-1 og EN 15259.

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 eén gang pr. driftssituation pr. målekampagne. Når kravene er opfyldt, er målestedet egnet til isokinetisk eller flowproportional prøvetagning.

#### Info-boks ~~77~~

Vær opmærksom på, at ovenstående krav til målesteds 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 afvæd testen af målesteds egnethed.

## 7.5 Udførelse af hastighedsmålingen

Mål hastigheden i samtlige målepunkter i tværsnitsarealet.

- placer sonden i målepunktet
- pitotrør: mål det gennemsnitlige differenstryk over minimum et minut<sup>10</sup>
  - ud fra mindst 3 aflæsninger eller vha. midlingsfunktionen i et elektronisk manometer
  - Formål a): måletiden kan reduceres til 30 sekunder.
  - 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 (O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O og CO<sub>2</sub>) eller bestem densiteten på anden vis
- mål atmosfæretrykket eller benyt nærmeste meteorologi målestation<sup>11</sup>
- mål det statiske tryk mindst én gang pr. målelinje

## 7.6 Kvalitetskontrol efter målingen

#### Vejledning 17078 8:

Vejledningen anbefaler at der udføres en læktest efter måling som beskrevet i afsnit 7.3.2.

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

- mål differenstrykket i et målepunkt
- blæs hullerne i pitotrøret fri for evt. blokader

<sup>10</sup> Referencelaboratoriet har udført en undersøgelse af hastighedsdata fra en række forskellige anlægstyper og undersøgt muligheden for at reducere den krævede måletid på 1 minut i hvert punkt. Undersøgelsen viste, at de forskelle mellem måling i et minut og fx 30 sekunder var for store, til at de kan anvendes accepteres ved formål b) og c). Notatet er udgivet på [www.ref-lab.dk](http://www.ref-lab.dk) under rapporter (november 2019).

<sup>11</sup> 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.

- 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 pitotrør skal testen gennemføres for alle sensor åbninger

## **7.7 Kvalitetskontrol på laboratoriet (årlige kontroller og kontroller ved fejl eller skade)**

Standarden er uklar i visse af kvalitetskontrollerne og deres hyppighed. CEN/TR 17078 er mere specifik -og indfører en tabeloversigt over kalibreringer og kontroller og deres hyppighed – se Tabel 10.

Anbefaling 7: Anbefalingerne og præciseringerne vedr. løbende kvalitetskontrol af hastighedsmåleudstyr i CEN/TR 17078 bør følges.

Acceptkriterierne i standarden baseres på, at det samlede målesystem kontrolleres. Da de fleste målefirmaer opererer med et stort antal pitotrør og et stort antal manometre, som benyttes i forskellige kombinationer, tillades kontrol af delene hver for sig, når det ikke er praktisk muligt at kontrollere dem samlet.

Følgende metoder accepteres:

- Metode 1: Kontrollerne i Tabel 10 udføres og demonstreres på et samlet målesystem.
- Metode 2: Kontrollerne i Tabel 10 udføres og demonstreres på enkeltdele. Det er op til testlaboratoriet at finde en metode til at sikre, at kriteriet for et samlet system er opfyldt med testresultaterne for enkeltdelene. I praksis bør kombinationen af de dårligste dele kunne overholde det samlede kriterium<sup>12</sup>.

Bemærk at kontrol for repeterbarhed (standard deviation of repeatability) kun udføres på manometeret.

I Tabel 10 skelnes der mellem formål a), formål b) og formål c), idet kvalitetskriteriet differentieres efter formål. Dette er smart for mindre laboratorier, der aldrig udfører QAL2/AST parallelmålinger (formål b) og formål c)), men vil være vanskeligt at benytte for større laboratorier, der udfører blandinger af præstationskontrolmålinger og QAL2/AST parallelmålinger. Det anbefales derfor, at de skrappeste kriterier benyttes generelt for laboratorier, der udfører QAL2/AST parallelmålinger.

<sup>12</sup> En metode kunne være at laboratoriet fastsætter kriterier for enkeltdele baseret på fejllophobningsloven og det samlede kriterium. Herved sikres at alle kombinationer kan leve op til det samlede kriterium når alle enkeltdele opfylder det opstillede kriterium.

<u>Kontrol</u>	<u>komponent</u>	<u>Hyppighed</u>	<u>Formål a), b) eller c)</u>	<u>Kriterium</u>
<u>Repetérbarhed af måling i laboratorium</u>	<u>Manometer</u>	<u>Minimum en gang pr år</u>	a)	<u>&lt; 1 % af kalibreringsområde</u>
			b) og c)	<u>&lt; 1 % af kalibreringsområde for differenstryk ≤ 60 Pa</u> <u>&lt; 1 % af værdi for differenstryk &gt; 60 Pa</u>
<u>Linearitet</u>	<u>Pitotrør</u>	<u>Ved ny og hver gang de fejler i en visuel inspektion (se afsnit 7.3.1) CEN/TR 17078 anbefaler årlig kalibrering.</u>	a)	<u>&lt; 2 % af måleområde (inklusive manometer)</u>
			b) og c)	<u>&lt; 2 % af værdi (inklusive manometer)</u>
	<u>Manometer</u>		a)	<u>&lt; 2 % af måleområde (inklusive pitotrør)</u>
			b) og c)	<u>&lt; 2 % af værdi (inklusive pitotrør)</u>
<u>Usikkerhed fra hastighedsmåleudstyrets kalibrering</u>	<u>Pitotrør og manometer</u>	<u>Minimum en gang pr år</u>	Alle	<u>&lt; 2 % af range af manometer (inklusive pitotrør)</u>
	<u>Kun manometer</u>		b) og c)	<u>≤ 1 % af værdi</u>
			a)	<u>≤ 0,5 % af range</u>
<u>Lavest mulige måling</u>	<u>Pitotrør</u>	<u>Efter kalibrering</u>	Alle	<u>Laveste mulige måling er det laveste punkt hvor systemet er kalibreret. Anvendelse under dette punkt skal valideres før måling.</u>
	<u>Manometer</u>			
<u>Usikkerhed af temperatur måling</u>	<u>Sensor og indikator</u>	<u>I henhold til akkreditering</u>	b) og c)	<u>≤ 1 % af værdi (Kelvin)</u>
			a)	<u>≤ 1 % af range på indikator (Kelvin)</u>

**Tabel 10** Oversigt over kvalitetskontrol i laboratoriet inklusive hyppighed af kontroller. Fra CEN/TR 17078.

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

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

## 8 Beregninger

### 8.1 Generelt

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

**MEL-25****Bestemmelse af volumenstrøm i kanaler**

Resultater kan rapporteres i forskellige konditioner (enheder):

- skorstenskonditioner (drift): ved aktuel temperatur, tryk og vandindhold [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]
- referencetilstand: ved  $0^\circ\text{C}$  og  $101,3 \text{ kPa}$  [ $\text{m}^3(\text{n,t})/\text{h}$ ]
  - i sjældne tilfælde omregnes endvidere til en referenceiltprocent [ $\text{m}^3(\text{n,t,ref.O}_2)/\text{h}$ ]
- hvis formålet er en QAL2 eller AST skal resultatet udtrykkes i samme enhed som volumenstrømsmåleren måler i. Enheden [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] bør anvendes (EN 16911-2).
- hvis formålet er at beregne masseemissioner bør volumenstrømmen udtrykkes **ved samme konditioni-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

**8.2 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  $\text{m/s}$ .

Alle typer pitotrør giver en udlæsning af det dynamiske differenstræk  $p_x$  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  $i$  [ $\text{m/s}$ ]

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

$K$  er pitotrørsfaktoren fra kalibrering af pitotrøret. Bemærk at alle typer pitotrør skal kalibreres med henblik på at finde eller verificere pitotrørsfaktoren<sup>13</sup>.

$\rho$  er gassens densitet ved skorstenskonditioner (aktuel temperatur, tryk og vandindhold) [ $\text{kg/m}^3$ ]

**Info-boks 88**

Bemærk at målingen i et målepunkt tager mindst 1 min. Det er tilladt at midle alle aflæsninger af differenstræk 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.

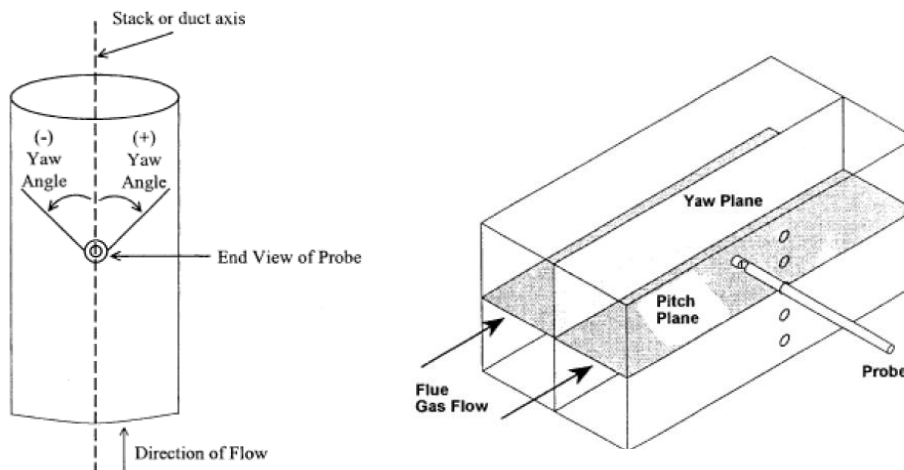
<sup>13</sup> Bemærk at  $K$  er udenfor kvadratrodsteget. Dvs. at  $K$  for s-pitotrør er ca. 0,84, svarende til kvadratrod af 0,7, som er faktoren hvis den placeres under kvadratrodsteget i formlen.

**Info-boks 99**

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 målelinjen betegnes også "yaw vinklen". Yaw vinklen bestemmes når et L-type eller S-type pitotrør drejes om sin egen akse. Når gassen har en vinkel i forhold til kanalens akse og i samme retning som målelinjen 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.

**8.3 Korrektion for vægeffekter**

Da hastighedsprofilen falder ganske skarpt ud mod kanalens inderside, bliver middelhastigheden en smule overestimeret ved måling af hastigheder i de normale traverseringspunkter. 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

- 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  $\phi$  hjørner.

#### Info boks 1010

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 vægeffekt faktoren (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 87

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 væg-effekt faktoren både for cirkulære og for rektangulære kanaler. Alternativt kan der anvendes CFD<sup>14</sup>-beregninger baseret på den aktuelle volumenstrømsmåling (hastigheder, densitet, temperatur, dimensioner etc.) til at beregne WAF i den aktuelle situation.

## 8.4 Beregning af volumenstrøm ud fra middelhastighed

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

hvor

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

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

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

<sup>14</sup> 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

#### 8.5 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])

$\varphi_{H_2O}$  = 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 ~~1111~~

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 20,95<sup>15</sup>.

## 9 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.

#### [Vejledning 17078 9](#)

[Vejledningen har i afsnit 8 et eksempel på usikkerhedsbudget for hastigheds- og volumenstrøms-målinger med pitotrør.](#)

#### Info-boks ~~1212~~

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

<sup>15</sup> Fra bogen Air Pollution – from a local to a global perspective, Jes Fenger % Jens Christian Tjell, Polyteknisk Forlag, 2009

---

## 10 Rapportering

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

- Kapitel [7.2.28.2.2](#): Alle afvigelser skal rapporteres (eksempelvis manglende målepunkter).
- Kapitel [7.3.18.3.1](#), ~~Anbefaling 56~~~~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 [7.4.18.4.1](#): Resultatet af testen "målestedets egnethed" bør altid rapporteres.
- Generelt: Det er vigtigt at bruge korrekte og præcise enheder ved rapportering.

## 11 Modifikationer

Måletiden i ét punkt for formål a) er reduceret fra 60 sekunder til 30 sekunder.

Der er ikke ~~yderligere andre~~ modifikationer end ~~dem~~, som er nævnt i diverse anbefalinger i metodebladet.