



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Aalborg Universitet

Passiv sporgasmetode til ventilationsundersøgelser

Beskrivelse og analyse af PFT-metoden

Bergsøe, N.C.

Publication date:
1992

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Bergsøe, N. C. (1992). *Passiv sporgasmetode til ventilationsundersøgelser: Beskrivelse og analyse af PFT-metoden*. SBI forlag. SBI-rapport Nr. 227

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

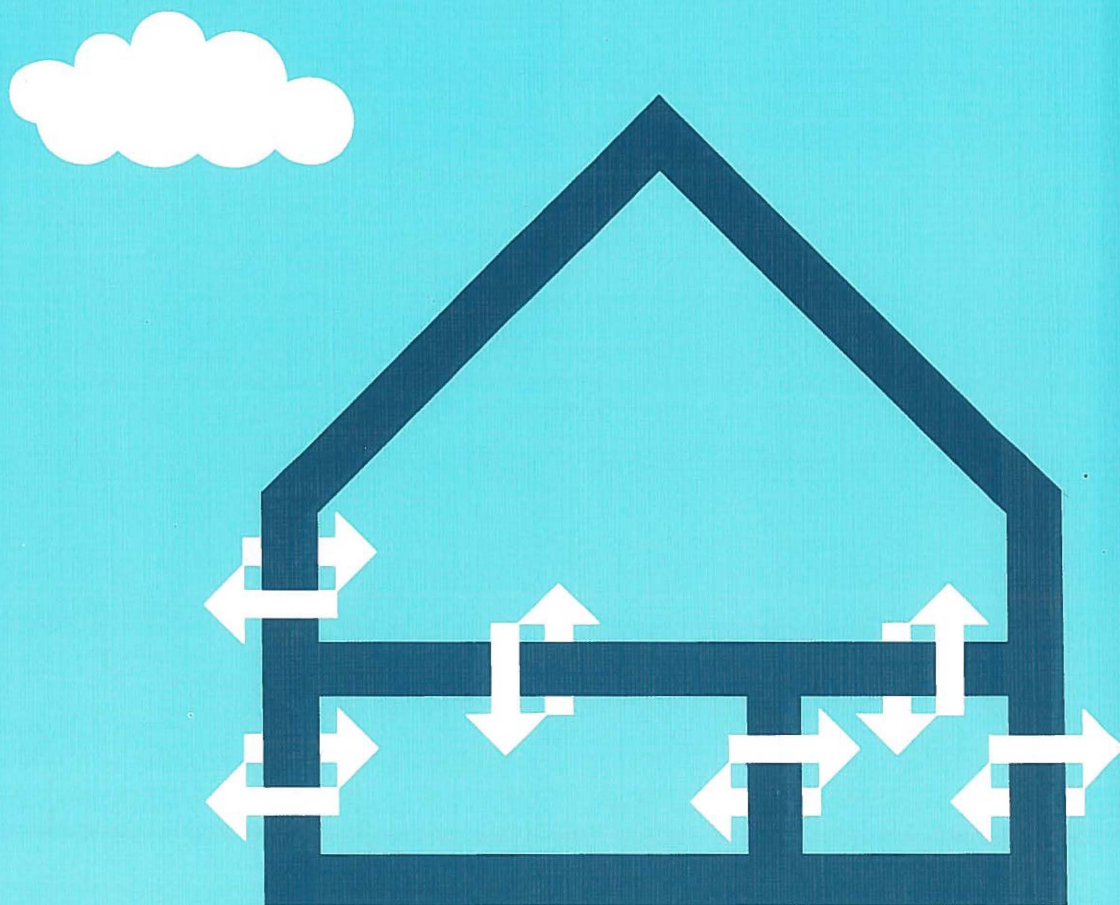
If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Passiv sporgasmetode til ventilationsundersøgelser



Beskrivelse og analyse af PFT-metoden

SBI-RAPPORT 227 · STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT 1992



Passiv sporgasmetode til ventilationsundersøgelser

Beskrivelse og analyse af PFT-metoden

NIELS C. BERGSØE



SBI-rapporter er beretninger om afsluttede forskningsprojekter.

SBI-publikationer udgives i følgende serier: Anvisninger, Rapporter, Meddelelser, Byplanlægning og Beton. Publikationerne fås gennem boghandelen eller ved at tegne et SBI-abonnement. Instituttets årsberetning og publikationskatalog er gratis og kan rekvireres fra SBI.

SBI-abonnement er en rabatordning med mange fordele for dem, der vil sikre sig løbende orientering om væsentlige udgivelser inden for byggeforskningsområdet. Ring til SBI og hør nærmere.

ISBN 87-563-0822-1.

ISSN 0573-9985.

Pris: Kr. 185,00 inkl. 25 pct. moms

Oplag: 500.

Tegninger: Niels C. Bergsøe.

Omslag: Henning Holmsted.

Tryk: Bjørvig Offset, Hvidovre.

Statens Byggeforskningsinstitut,

Postboks 119, 2970 Hørsholm.

Telefon 42 86 55 33.

Eftertryk i uddrag tilladt, men kun med kildeangivelsen:

*SBI-rapport 227: Passiv sporgasmetode til ventilationsundersøgelser.
Beskrivelse og analyse af PFT-metoden. 1992.*

Indhold

Forord	4
Sammenfatning	5
PFT-metoden	8
Formelgrundlag	8
2-zone model	9
Udstyr	10
Sporgaskilder	10
Opsamlingsrør	12
Stationært analyseudstyr	12
Kalibrering	14
Principper for metodens anvendelse i praksis	16
Usikkerhed og fejlanalyse	20
Usikkerheder ved feltmålinger	21
Fejlanalyse	22
Optimal condition number	24
Laboratorieundersøgelser	26
Generelle målebetingelser	26
Undersøgelse 1: Måling af sporgaskoncentration ved konstant lufttilførsel	28
Formål og fremgangsmåde	28
Resultater	29
Undersøgelse 2: Måling af sporgaskoncentration ved varierende lufttilførsel	31
Formål og fremgangsmåde	31
Resultater	31
Undersøgelse 3: Måling af vertikal koncentrationsfordeling i afhængighed af tilført luftmængde	33
Formål og fremgangsmåde	33
Resultater	34
Undersøgelse 4: Måling af vertikal koncentrationsfordeling i afhængighed af placering af sporgaskilde	36
Formål og fremgangsmåde	36
Resultater	37
Diskussion	39
Sammenfatning	42
Summary	43
Litteratur	46
Appendiks 1: Måleskema til PFT-målinger	47
Appendiks 2: Resultatskema, eksempel	48
Appendiks 3: Generelt ligningssystem på matrixform	49
Appendiks 4: Optimal condition number	52

Forord

Tilførsel af ventilationsluft til et rum eller en bygning har interesse i såvel energimæssig som indeklimamæssig sammenhæng, og sporgasteknikken har længe været kendt som en praktisk metode til måling af ventilationsluftens størrelse. Forskning rettet mod udvidelse af teorien om sammenhængen mellem sporgaskoncentration og ventilationseffektivitet har sammen med udviklingen inden for både byggeteknik og ventilationsteknik medført, at der er opstået nye krav til de informationer, en sporgasmåling kan give. Det gælder dels information om luftens fordeling i et rum, dels information om luftens fordeling og strømning imellem flere rum. I de senere år er der derfor eksperimenteret med modificeret anvendelse af kendte sporgasteknikker, ligesom der er eksperimenteret med udvikling af nyt sporgasmåleudstyr.

Denne rapport handler om en relativt nyudviklet multi-sporgasteknik baseret på såkaldt passiv opsamlingsteknik. Metoden betegnes PFT-metoden, hvor PFT står for Perfluorocarbon Tracer.

I rapporten redegøres for metodens beregningsgrundlag, og måleudstyret og dets anvendelse beskrives. I samarbejde med Aalborg Universitetscenter, AUC, Institut for Bygningsteknik, er der gennemført en serie målinger i AUC's laboratorium. Ved målingerne på AUC blev såvel PFT-metoden som traditionel sporgasteknik anvendt. Rapporten beskriver målingerne og viser de opnåede resultater. En tak rettes til Per Heiselberg, AUC, som har stået for gennemførelsen af målingerne i AUC's fuldskalarum.

I tilknytning til rapporten er der udarbejdet en bilagsrapport, som beskriver en række undersøgelser og afprøvninger af PFT-metodens udstyr foretaget i SBI's laboratorium. Formålet med undersøgelserne har været at verificere funktionen af såvel feltmåleudstyr som laboratorieudstyr samt at fastlægge procedurer for rutinemæssig kontrol af analyseudstyrets funktion. Interesserede kan rekvirere bilagsrapporten ved henvendelse til Afdelingen for Energi og Indeklima, SBI.

Rapporten henvender sig til ventilations- og indeklimateknikere, som inden for det byggetekniske og sundhedsfaglige område er beskæftiget med undersøgelser af bygningers ventilationsforhold blandt andet ved hjælp af sporgasteknik. Bilagsrapporten, som specielt vedrører undersøgelser og afprøvninger af SBI's udstyr til PFT-metoden, henvender sig primært til forskere og andre med speciel interesse for udstyret og funktionen af dette.

Projektet er gennemført med støtte fra Energiministeriets energiforskningsprogram under journalnummer 1213/88-19.

STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT
Afdelingen for Energi og Indeklima, oktober 1992
Erik Christophersen

Sammenfatning

Rapporten handler om *PFT*-metoden, som er en *multi-sporgasmetode* efter *konstant-dosering princippet* baseret på såkaldt *passiv opsamlings-teknik*.

- PFT står for *Perfluorocarbon Tracer*. De anvendte sporgasser er Perfluorcarbon'er, som er organiske forbindelser af perfluoralkyl-cycloalkan-familien.
- Metoden kaldes en multi-sporgasmetode, fordi det er muligt at anvende op til tre forskellige sporgastyper simultant.
- Konstant-dosering princippet indebærer, at doseringen af sporgas sker kontinuert og med en kendt mængde pr. tidsenhed.
- Passiv opsamlingssteknik er betegnelsen for en teknik, hvor det anvendte måleudstyr, i reglen feltmåleudstyr, fungerer uden brug af fx pumper eller ekstern energiforsyning.

Brookhaven National
Laboratory

I begyndelsen af 1980'erne offentliggjorde det amerikanske forskningscenter Brookhaven National Laboratory, BNL, forskningsresultater vedrørende udvikling af en sporgasmetode baseret på anvendelse af passive sporgaskilder og passive opsamlingsrør. Samtidig havde BNL udviklet en række forskellige specialkomponenter i et gaschromatografisk analyseudstyr samt en særlig analyseprocedure. I 1986 etablerede BNL og SBI et samarbejde, som blandt andet havde til formål, gennem en afprøvning af feltmåleudstyret, at give et erfaringsgrundlag for en vurdering af teknikken og udstyret med henblik på anvendelse i forbindelse med bredt anlagte ventilationsundersøgelser i felten.

Samarbejdet med BNL og den praktiske afprøvning viste, at feltmåleudstyret er enkelt og ukompliceret at anvende i praksis, og at metoden er velegnet til bestemmelse af totale specifikke lufttilførsler i bygninger i brug. I metoden indgår desuden mulighed for simultan anvendelse af flere forskellige sporgastyper. Det er således muligt at bestemme ikke blot bygningens totale specifikke lufttilførsel, men også den specifikke lufttilførsel til de enkelte rum og luftudvekslingen mellem rummene. Dette anvendelsesområde af metoden blev imidlertid ikke i tilstrækkelig grad efterprøvet i praksis i forbindelse med samarbejdet med BNL.

SBI har anskaffet det
nødvendige udstyr

I 1988 anskaffede SBI det nødvendige laboratorie- og feltmåleudstyr. Formålet med anskaffelsen var dels at tage metoden i anvendelse i forbindelse med feltundersøgelser i et stort antal boliger, dels at foretage detaljerede undersøgelser af metodens fordele, ulemper og begrænsninger herunder vurdering af såvel metodens egnethed til flerzone målinger som nye anvendelsesområder.

Det stationære laboratorieudstyr, som SBI har anskaffet, er konstrueret og samlet i et samarbejde mellem Princeton University, Princeton, New Jersey, og John Booker & Co., Austin, Texas. Firmaet John Booker & Co. er specialist i opbygning af gaschromatografisk specialudstyr. Udstyret er bygget på basis af BNL's arbejde. Feltmåle-

	<p>udstyret, dvs. sporgaskilderne og opsamlingsrørene, fabrikeres på BNL, hvorfra SBI har erhvervet det.</p>
Flerzone model	<p>Denne rapport præsenterer indledningsvis den fler-zone model, som ligger til grund for PFT-metodens beregning af volumenstrømme. Modellen præsenteres ved en 2-zone situation som eksempel, og der vises ligningssystemet til beregning af volumenstrømmene, såvel mellem zonerne som mellem den enkelte zone og ude, dvs. zonen infiltration og exfiltration.</p>
Passive sporgaskilder	<p>PFT-metodens udstyr omfatter feltmåleudstyr og stationært laboratorieudstyr. I felten anvendes passive sporgaskilder og passive opsamlingsrør, og i laboratoriet anvendes en gaschromatograf til analyse af de passive opsamlingsrør.</p>
Passive opsamlingsrør	<p>Sporgaskilderne er små metalhylstre, som er lukket med en siliconprop, hvorigennem sporgassen diffunderer. Ved konstant temperatur afgiver sporgaskilden en konstant mængde sporgas. Kildens emissionsrate afhænger af temperaturen, og i rapporten redegøres for temperaturafhængigheden.</p>
Gaschromatograf	<p>Opsamlingsrørene består af et lille glasrør, som indeholder en adsorbent beslægtet med aktivt kul. Opsamlingen af sporgas i rumluften sker ved adsorption.</p> <p>I laboratoriet analyseres adsorptionsrørene ved hjælp af termisk desorption og gaschromatografi. Analyseudstyret er bygget specielt til analyse af perfluorcarbon, og i rapporten beskrives i korte træk analyseproceduren og funktionen af nogle af komponenterne i analyseudstyret. Endvidere beskrives hovedtrækkene i kalibreringsproceduren af gaschromatografen.</p>
Usikkerhed	<p>PFT-metoden er velegnet til udførelse af målinger i felten, og det gælder såvel enkeltstående målinger som bredt tilrettelagte feltundersøgelser. I rapporten anføres principperne for den praktiske anvendelse af metoden.</p>
Undersøgelser af metodens udstyr	<p>En vigtig del af enhver måleteknik er vurdering af instrumentusikkerheder og måleusikkerheder. I rapporten behandles disse usikkerheder, og der redegøres for betydningen af det såkaldte <i>optimal condition number</i>. <i>Optimal condition number</i> er en matematisk størrelse, som er velegnet til vurdering af stabiliteten af ligningssystemet til beregning af volumenstrømme, og dermed af usikkerheden på de beregnede volumenstrømme.</p>
Bilagsrapport	<p>Der er foretaget en række undersøgelser og afprøvninger af PFT-metodens udstyr i laboratoriet ved SBI. Formålet med undersøgelserne har været at kontrollere feltmåleudstyret og fastlægge procedurer for rutinemæssig kontrol af analyseudstyret. Det gaschromatografiske analyseudstyr er komplekst i sin opbygning, men som et resultat af undersøgelserne og afprøvningerne er der opnået et optimalt fungerende udstyr, samt en bedre viden om de muligheder og begrænsninger analyseudstyret giver. Undersøgelserne og afprøvningerne er beskrevet i en separat bilagsrapport, som kan rekvireres ved henvendelse til Afdelingen for Energi og Indeklima, SBI.</p>
Undersøgelser af metodens egenskaber	<p>Til nærmere efterforskning af PFT-metodens egenskaber i forbindelse med målinger i felten med simultan anvendelse af flere sporgasser er der gennemført en serie undersøgelser i samarbejde med Aalborg Universitetscenter, AUC, Institutet for Bygningsteknik.</p>

Undersøgelserne er gennemført i et fuldskalarum i laboratoriet ved AUC, og der er samtidig foretaget målinger med traditionel sporgas-teknik.

I rapporten redegøres for fremgangsmåden ved undersøgelserne, og resultaterne diskuteres.

Placering af kilder og opsamlingsrør er afgørende

Generelt viser målingerne, at placeringen af sporgaskilder og opsamlingsrør i et rum eller en bygning kan have afgørende betydning for måleresultatet. Resultaterne af målingerne i AUC's laboratorium bør sammenholdes med de vejledninger, som gives i afsnittet som beskriver principper for metodens anvendelse i praksis. Derved reduceres risikoen for at udstyret placeres uhensigtsmæssigt. Det må dog fortsat anbefales, at udstyret i felten opsættes af personer, som er fortrolig med PFT-metoden.

Beskrivelsen af metodens udstyr og funktionen af dette viser, sammen med resultaterne af laboratorieundersøgelserne, at det er vanskeligt at udarbejde en enkel vejledning i brugen af PFT-metoden i felten.

Måleskema
Resultatskema

Der er i forbindelse med projektet udarbejdet et skema, som udfyldes i forbindelse med en måling. Skemaet sikrer, at alle relevante parametre tages i betragtning og/eller registreres. Ligeledes er der i forbindelse med projektet udarbejdet et resultatskema, som giver alle oplysninger om såvel måleomstændigheder som måleresultater. Af resultatskemaet fremgår *optimal condition number*, hvormed det er muligt at foretage en vurdering af usikkerheden på målingen.

Måleskemaet samt et eksempel på et resultatskema er vist i henholdsvis appendiks 1 og 2.

PFT-metoden

PFT-metoden er en multi-sporgasmetode efter konstant-dosering princippet. PFT står for *Perfluorcarbon Tracer*, og de anvendte sporgasser er Perfluorcarbon'er, som er organiske forbindelser af perfluoralkylcycloalkan-familien. Tre forskellige sporgastyper, alle perfluorcarbon'er, kan anvendes simultant. Dette giver mulighed for at opdele en bygning i op til tre zoner og således bestemme ikke blot den totale specifikke udelufttilførsel til bygningen, men også fordelingen på de enkelte zoner og den interne luftudveksling mellem zonerne. Konstant-dosering princippet indebærer, at doseringen af sporgas sker kontinuert og med en konstant mængde pr. tidsenhed. PFT-metoden er baseret på såkaldt passiv opsamlingssteknik, hvor det passive består i, at feltmåleudstyret fungerer uden brug af fx pumper eller ekstern energiforsyning.

Formelgrundlag

I det følgende gives en kort redegørelse for den multi-zone model, som anvendes i PFT-metoden. En mere detaljeret gennemgang af den grundlæggende teori bag sporgasmålinger og udførlige beskrivelser af forskellige doseringsprincipper kan findes i fx lærebøger.

Stofbalanceligningen

Det beregningsmæssige grundlag for ventilationstekniske målinger ved hjælp af sporgasteknik er stofbalanceligningen. I dens simpleste form, gældende for konstant sporgaskoncentration, haves

$$n = \frac{m}{(c \cdot V)} \quad (1)$$

hvor

n = specifik lufttilførsel i l/s pr. m^3 rumvolumen

m = tilført sporgasmængde i l/s

c = sporgaskoncentration i l sporgas pr. l rumluft

V = rumvolumen i m^3

Ligningssystem

Ved simultan anvendelse af flere forskellige sporgastyper, kan en bygning opdeles i et tilsvarende antal zoner, som forsynes med hver sin sporgastype. Foretages en registrering i hver enkelt zone af rumluftens indhold af hver enkelt sporgastype, kan der for hver zone opstilles et antal ligninger, som udtrykker en sporstofbalance. Antallet af ligninger vil svare til antallet af anvendte sporgastyper. Ved luftbalancebetragtninger kan der opstilles et antal ligninger, som udtrykker udelufttilførslen til hver enkelt zone, infiltrationen. Antallet af ligninger vil svare til antallet af zoner.

2-zone model

For overskuelighedens skyld vises her ligningssystemet gældende for en 2-zone situation. Paralleller kan drages til en 3-zone situation.

Formel (1) kan omformes til:

$$(n \cdot V) \cdot c = m$$

Indføres symbolet q for volumenstrømmen ($n \cdot V$) fås:

$$q \cdot c = m \tag{2}$$

Antages det, at der i zone 1 er udsendt en sporgas af type 1 og i zone 2 en sporgas af type 2, vil ligningssystemet for et 2-zone tilfælde se således ud:

Zone 1, sporstofbalance

$$\begin{aligned} q_{2-1} \cdot c_{12} - q_{1-2} \cdot c_{11} - q_{1-0} \cdot c_{11} &= -m_1 \\ q_{2-1} \cdot c_{22} - q_{1-2} \cdot c_{21} - q_{1-0} \cdot c_{21} &= 0 \end{aligned}$$

Zone 2, sporstofbalance

$$\begin{aligned} q_{1-2} \cdot c_{11} - q_{2-1} \cdot c_{12} - q_{2-0} \cdot c_{12} &= 0 \\ q_{1-2} \cdot c_{21} - q_{2-1} \cdot c_{22} - q_{2-0} \cdot c_{22} &= -m_2 \end{aligned}$$

Luftbalance

$$\begin{aligned} q_{0-1} &= q_{1-0} + q_{1-2} - q_{2-1} \\ q_{0-2} &= q_{2-0} + q_{2-1} - q_{1-2} \end{aligned}$$

hvor

- c_{11} = konc. af sporgastype 1 i zone 1 i l sporgas pr. l rumluft
- c_{12} = konc. af sporgastype 1 i zone 2 i l sporgas pr. l rumluft
- c_{21} = konc. af sporgastype 2 i zone 1 i l sporgas pr. l rumluft
- c_{22} = konc. af sporgastype 2 i zone 2 i l sporgas pr. l rumluft
- m_1 = tilført sporgasmængde i zone 1 i l/s
- m_2 = tilført sporgasmængde i zone 2 i l/s
- q_{1-2} = luftoverføring fra zone 1 til zone 2 i l/s
- q_{2-1} = luftoverføring fra zone 2 til zone 1 i l/s
- q_{1-0} = luftoverføring fra zone 1 til ude, dvs. exfiltration i l/s
- q_{2-0} = luftoverføring fra zone 2 til ude, dvs. exfiltration i l/s
- q_{0-1} = luftoverføring fra ude til zone 1, dvs. infiltration i l/s
- q_{0-2} = luftoverføring fra ude til zone 2, dvs. infiltration i l/s

I ligningssystemet er c_{11} , c_{12} , c_{21} og c_{22} målte størrelser og m_1 og m_2 er kendte. Løsningen til de ukendte størrelser er:

$$q_{1-2} = \frac{m_2 \cdot c_{12}}{(c_{11} \cdot c_{22}) - (c_{12} \cdot c_{21})}$$

$$q_{2-1} = \frac{m_1 \cdot c_{21}}{(c_{11} \cdot c_{22}) - (c_{12} \cdot c_{21})}$$

$$q_{1-0} = q_{2-1} \cdot \frac{c_{22}}{c_{21}} - q_{1-2}$$

$$q_{2-0} = q_{1-2} \cdot \frac{c_{11}}{c_{12}} - q_{2-1}$$

$$q_{0-1} = q_{1-0} + q_{1-2} - q_{2-1}$$

$$q_{0-2} = q_{2-0} + q_{2-1} - q_{1-2}$$

Generelt
ligningssystem

Ligningssystemet for et 3-zone tilfælde vil indeholde 3 sporstofbalanceligninger for hver sporgastype, i alt 9 ligninger, og 1 luftbalance-ligning for hver zone, i alt 3 ligninger. Generelt fås, ved anvendelse af X sporgastyper, X^2 sporstofbalanceligninger og X luftbalanceligninger.

Udstyr

Udstyret, som indgår i PFT-metoden, kan opdeles i feltmåleudstyr og stationært laboratorieudstyr. Feltmåleudstyret består af passive sporgaskilder og passive opsamlingsrør. Det stationære laboratorieudstyr består i hovedtrækkene af en termisk desorptionsenhed og en gaschromatograf med electron capture detector, ECD.

Sporgaskilder

En sporgaskilde består af et lille metalhylster ($l=32$ mm, $d=6,6$ mm), som er lukket med en siliconeprop. Ved fremstillingen er hylstret påfyldt 0,4 ml sporstof i væskeform, og efter en konditioneringsperiode på 10-12 dage afgiver kilden sporgas med en konstant hastighed ved konstant temperatur.

Perfluorcarbon

De anvendte sporstoffer er perfluorcarbon'er, som er organiske forbindelser af perfluoralkylcycloalkan-familien. Stofferne er valgt, fordi de giver en kraftig respons i en ECD, baggrundskoncentrationen i atmosfæren er lav, de er uskadelige for såvel den menneskelige sundhed som miljøet og de er kemisk stabile. I analysemæssig henseende er det sidste vigtigt, idet analyseproceduren indebærer kemiske processer, som har til formål at nedbryde og bortskaffe komponenter, som ECD'en er særlig følsom overfor, fx klorfluorcarbon'er, freon. I tabel 1 er vist en oversigt over de sporgasser, som SBI anvender.

Tabel 1. PFT-sporgastyper som anvendes af SBI.

PFT-sporgastype	Molekyl- vægt	Masse- fylde, kg/l	Emission i dampform, ¹ nl/h	Levetid ² år
PMCP, perfluormethylcyclopentan	300	1,70	2256	2,8
PMCH, perfluormethylcyclohexan	350	1,79	1488	3,9
PDCH, perfluordimethylcyclohexan	400	1,85	786	6,6

1. Emissionen er angivet ved 25 °C

2. Levetiden er angivet på basis af et initialindhold på 0,4 ml.

Emissionsraten

Emissionsraten fra en sporgaskilde er bestemt af damptryksforskellen over siliconeproppen og af permeabiliteten af proppen. Endvidere er sporgasserne meget flygtige og emissionsraten derfor temperaturafhængig. Sporgaskilderne, som fremstilles af Brookhaven National Laboratory, BNL, kalibreres ved 25 °C, og eksperimentelt har BNL bestemt følgende formel til beregning af emissionen ved forskellige temperaturer.

$$S_t = S_{25} \cdot e^{-4000 \cdot \left[\left(\frac{1}{T} \right) - \left(\frac{1}{298} \right) \right]} \quad (3)$$

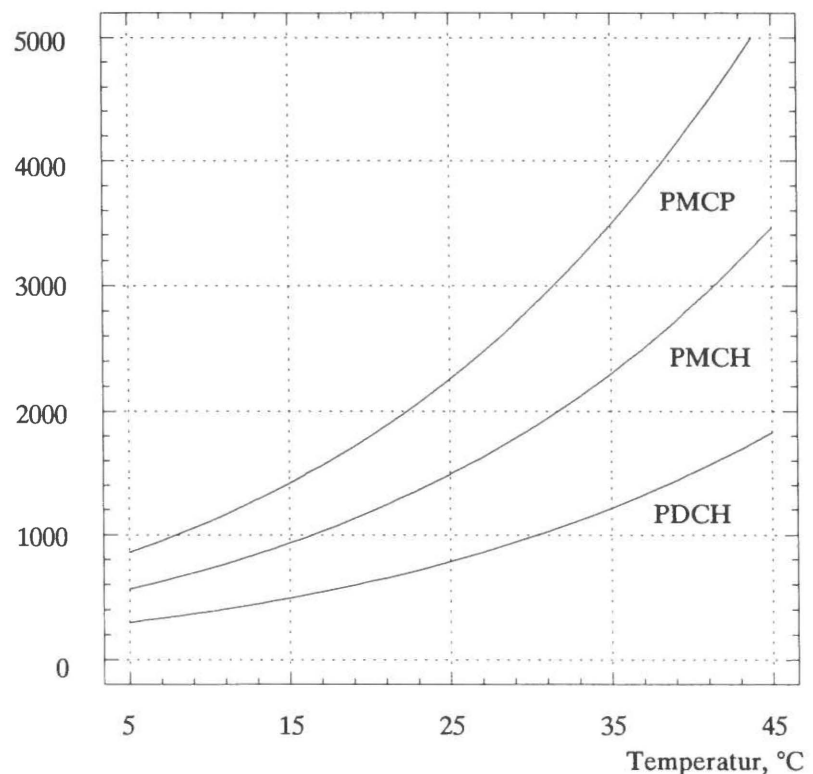
hvor

S_t og S_{25} = emissionsrate ved henholdsvis t °C og 25 °C

T = 273 + t

Formlen er illustreret i figur 1, som for hver af de tre sporgastyper viser kurver af emissionsraten som funktion af temperaturen, i intervallet 5-45 °C.

Sporgas-
emission,
nl/h



Figur 1. Sporgaskildernes emissionsrate som funktion af temperaturen. Kurverne er fremstillet på grundlag af formel (3).

Opsamlingsrør

Et opsamlingsrør består af et lille glasrør ($l=64$ mm, $d=6,4$ mm), som indeholder et adsorptionsmateriale. Adsorptionsmaterialet er Amber-sorb type 347, som er en adsorbent beslægtet med aktivt kul.

Opsamlingsrate

Opsamlingsrøret er lukket i begge ender med specialfremstillede gummipropper, når det ikke er i brug i forbindelse med en måling. Opsamlingen begynder, når den ene prop fjernes. Opsamlingsraten er proportional med glasrørets indvendige tværsnitsareal og omvendt proportional med afstanden fra rørets munding til overfladen af adsorptionsmaterialet. Ud fra rørets dimensioner og ud fra en empirisk bestemt diffusionskoefficient for perfluorcarbon i luft er det muligt at bestemme opsamlingsraten.

Tabel 2. Opsamlingsrate for PFT-metodens passive opsamlingsrør.

PFT-sporgastype	Opsamlingsrate $l/s \cdot 10^{-6}$
PMCP, perfluormethylcyclopentan	2,48
PMCH, perfluormethylcyclohexan	2,33
PDCH, perfluordimethylcyclohexan	2,18

Propper

Når opsamlingsrøret ikke er i brug, dvs. når røret er lukket med propper i begge ender, bør opsamlingsraten være lille, i forhold til hvad opsamlingsraten er med én prop fjernet. Dette, for at reducere risikoen for at opsamlingsrøret kan blive utilsigtet kontamineret med sporgas fx under opbevaring eller under transport. De specialfremstillede propper reducerer opsamlingsraten til mindre end 0,0004 pct. af opsamlingsraten med én prop fjernet. På trods af at propperne lukker røret omtrent tæt, er det ubetinget påkrævet, at sporgaskilder og opsamlingsrør opbevares og transporteres adskilt. Selv en svag kontaminering af et opsamlingsrør kan influere på resultatet af en måling, idet de sporgaskoncentrationer, som måles i rum i bygninger ved feltmålinger, ofte er i størrelsesordenen nogle få ppt, parts per trillion, dvs. $\cdot 10^{-12}$.

Termisk desorption
Gaschromatografi

Opsamlingsrørene analyseres i laboratoriet ved hjælp af termisk desorption og gaschromatografi. Under den termiske desorption frigøres såvel den adsorbere perfluorcarbon som andre adsorbere stoffer fra adsorptionsmaterialet. Opsamlingsrøret er herefter rent, og kan bruges igen.

Stationært analyseudstyr

Det stationære analyseudstyr består i hovedtrækkene af en termisk desorptionsenhed og en gaschromatograf med et to-kolonne system og en electron capture detector, ECD. I det følgende gives en kortfattet beskrivelse af analyseproceduren. Det ligger uden for denne rapports rammer at beskrive udstyret og funktionen af de enkelte komponenter i detaljer.

Fire faser i analysen

Analysen af et opsamlingsrør kan opdeles i fire faser. Den første fase er at desorbere, dvs. frigøre, samtlige adsorberede stoffer fra adsorptionsmaterialet i røret. Anden fase er at separere perfluorcarbon fra andre stoffer, som i denne forbindelse er uønskede, samt at bortskaffe disse andre stoffer. Tredje fase er at separere den frigjorte perfluorcarbon i de tre perfluorcarbontyper og fjerde fase i analysen er at kvantificere mængden af hver enkelt perfluorcarbontype.

Fase 1

I første fase anbringes opsamlingsrøret i et stativ, hvor det gennemstrømmes af en ren, neutral gas betegnet bæregas. Bæregassen består af 5 pct. H_2 i N_2 . Formålet, med at lade røret gennemstrømme af bæregas, er at fortrænge ilt i røret. Ilt vil reagere med perfluorcarbon under den efterfølgende opvarmning. Røret opvarmes i løbet af 30 sekunder til ca. $450\text{ }^\circ\text{C}$. Temperaturen opretholdes i yderligere 15 sekunder. Ved opvarmningen frigøres alle de stoffer, som har fæstnet sig på adsorptionsmaterialet, herunder perfluorcarbon.

Fase 2

I anden fase transporteres blandingen med bæregassen til en katalysator, hvor en del af de uønskede stoffer nedbrydes, og videre til en for-kolonne, hvor separationen af perfluorcarbon og øvrige stoffer sker. Gasstrømmen ledes nu gennem en såkaldt trap, en fælde, og ved hjælp af nøje tilrettelagt styring af ventiler foretages dels en afspærring af perfluorcarbon i fælden, dels en bortventilering af de i for-kolonnen separerede uønskede komponenter. Fælden opvarmes i løbet af 4 sekunder fra rumtemperatur til $300\text{ }^\circ\text{C}$, og temperaturen opretholdes i 30 sekunder.

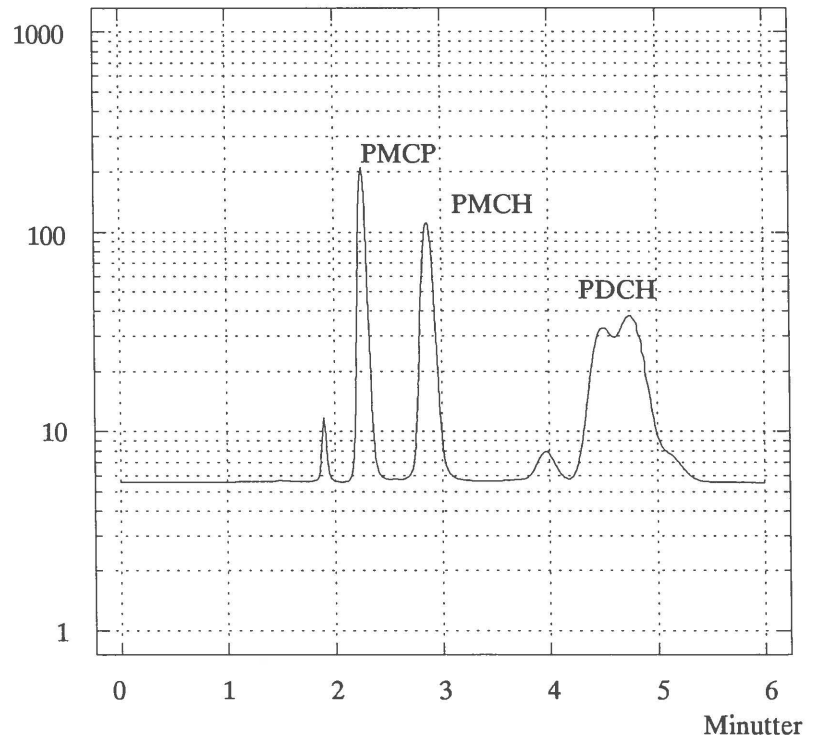
Fase 3

Derefter åbner fælden, og i tredje fase ledes gasstrømmen via endnu en katalysator til hovedkolonnen, hvor separationen af de tre perfluorcarbontyper sker. Endelig ledes de tre perfluorcarbontyper i rækkefølge til detektoren, som foretager den kvantitative analyse.

Fase 4

Analysetiden for ét rør er 6 minutter, se figur 2.

ECD-signal,
kHz



Figur 2. Eksempel på et chromatogram af en analyse af et opsamlingsrør.

Chromatogram

Den første top på chromatogrammet i figur 2 repræsenterer en komponent, som ikke separeres og bortskaffes under analysen. Tilstedeværelsen af komponenten influerer ikke på analysen af de tre perfluorcarbontyper, og komponenten er derfor uidentificeret. Den anden og den tredje top repræsenterer henholdsvis sporgastyperne PMCP og PMCH. De sidste fire toppe repræsenterer fire isomerer af sporgastypen PDCH. I praksis anvendes de to midterste og højeste toppe som repræsentant for PDCH.

Tophøjden er mål for stofmængden

Højden af en top anvendes som et mål for mængden af den pågældende sporgastype. Ved traditionel gaschromatografi er det arealet under toppen, som er målet for mængden af stoffet. Dette analyseudstyr anvendes imidlertid udelukkende til analyse af perfluorcarbon, og da det kalibreres efter højden af toppene, er top-højden i dette tilfælde et fuldgyldigt mål for mængden af sporgas i røret. Årsagen til at det er højden af toppene, som anvendes som mål for mængden af sporgas, er, at det beregningsmæssigt er væsentlig hurtigere at bestemme en top-højde fremfor et areal under en kurve.

Personlig computer

Analyseudstyrets funktion, dvs. skift af ventiler og styring af tidspunkter for opvarmning og afkøling, kontrolleres fra en personlig computer. Computeren kan desuden styre en automatisk analyse af op til 23 opsamlingsrør, idet stativet, som foretager den termiske desorption, kan rumme op til 23 opsamlingsrør. Under analysen af et opsamlingsrør modtager computeren kontinuert signalet fra detektoren. Analyseresultatet lagres i computeren til senere bearbejdning.

Kalibrering

Kalibreringskurve

Under analysen af et opsamlingsrør modtager computeren kontinuert information om kurvens, chromatogrammets, forløb. Når analysen er tilendebragt, efter 6 minutter, foretager computeren en beregning af mængden af hver enkelt sporgastype i det netop analyserede rør. For hver sporgastype sker beregningen på grundlag af en kalibreringskurve i form af en ligning. Ligningen udtrykker sammenhængen mellem højden af en top og mængden af den pågældende sporgastype.

Ligningerne for kalibreringskurverne dannes ved at 10-15 rene opsamlingsrør fyldes med sporgas i forskellige, men kendte mængder og derefter analyseres. Derved fås, for hver sporgastype, 10-15 punkter på en kurve. Kurvens forløb beskrives ved et polynomium, typisk et 3. grads polynomium.

Rørene fyldes fra en trykflaske, som indeholder alle tre sporgastyper i kendte koncentrationer. Mængden af sporgas, som fyldes i rørene beregnes af:

$$L = f \cdot q \cdot c \quad (4)$$

hvor

L = sporgasmængde som er fyldt i røret i pl (picoliter = $1 \cdot 10^{-12}$ l)

f = fyldningstiden i min

q = kalibreringsgassens flow i l/min

c = koncentrationen af den pågældende sporgastype i pl/l

Kalibreringsområde

Fyldningstiden for rørene til en kalibrering er fra mindre end 10 sekunder, for det rør som fyldes i kortest tid, til ca. 1,5 timer for det rør, som fyldes i længst tid. Rørene fyldes derved med sporgas i intervallet ca. 0,5-300 pl, som betegnes kalibreringsområdet.

Den samlede fyldningstid for et antal rør til en typisk kalibrering er ca. 3 timer. Derefter analyseres rørene, hvilket varer ca. 1,5 timer, og endelig beregnes polynomierne, som beskriver kalibreringskurverne. Samlet tager det ca. 5 timer at foretage en typisk kalibrering.

Fire kalibreringskurver

Figur 3 viser et eksempel på et sæt kalibreringskurver. Kurverne, som på figuren er betegnet PDCH:B og PDCH:C, repræsenterer de to isomerer af sporgastypen PDCH, som på figur 2 forekommer som de to midterste og højeste kurver for PDCH-isomererne. Mængden af PDCH sporgas i et rør udtrykkes ved middelværdien af den beregnede mængde af henholdsvis PDCH:B og PDCH:C. 3. grads polynomierne, som beskriver kurverne på figur 3 er givet ved:

$$L_{PMCP} = 1,853 \cdot 10^{-2} + (0,123 \cdot h) + (8,651 \cdot 10^{-4} \cdot h^2) + (-6,725 \cdot 10^{-7} \cdot h^3)$$

$$L_{PMCH} = 4,010 \cdot 10^{-2} + (0,223 \cdot h) + (1,919 \cdot 10^{-3} \cdot h^2) + (-2,306 \cdot 10^{-6} \cdot h^3)$$

$$L_{PDCH:B} = -3,167 \cdot 10^{-2} + (1,304 \cdot h) + (2,478 \cdot 10^{-3} \cdot h^2) + (2,049 \cdot 10^{-5} \cdot h^3)$$

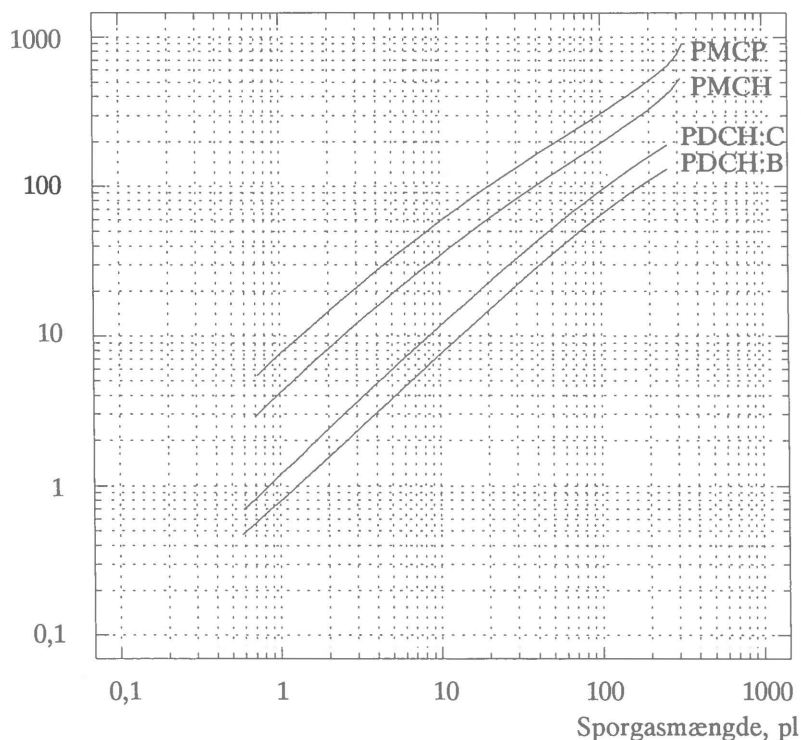
$$L_{PDCH:C} = 1,728 \cdot 10^{-2} + (0,823 \cdot h) + (2,351 \cdot 10^{-3} \cdot h^2) + (2,568 \cdot 10^{-6} \cdot h^3)$$

hvor

L = sporgasmængden i røret af den pågældende sporgastype i pl

h = tophøjden i kHz

Tophøjde,
kHz



Figur 3. Eksempel på kalibreringskurver for sporgastypene PMCP, PMCH, PDCH:B og PDCH:C.

Referencerør

Under analysen af en serie opsamlingsrør fra feltmålinger foretages desuden analyse af 2-3 såkaldte referencerør. Referencerør er opsamlingsrør, som er fyldt med en kendt mængde sporgas, på samme måde som når der foretages en kalibrering. Når analyse af en serie opsamlingsrør sættes i gang, informeres computeren om, hvilke af rørene der er referencerør, og hvilke mængder sporgas de er fyldt med, i form af fyldningstiden, kalibreringsgassens flow og kalibreringsgassens koncentration, se formel (4).

Rack-factor

Når et referencerør analyseres, foretager computeren en sammenligning af den sporgasmængde, som er fundet ved analyse med den sporgasmængde, som røret er fyldt med. Forholdet imellem disse to størrelser er et udtryk for analyseudstyrets øjeblikkelige kalibreringstilstand i forhold til de seneste kalibreringskurver. Forholdet udtrykkes ved en faktor, en såkaldt rack-factor. Der beregnes en rack-factor for hver af sporgastyperne PMCP, PMCH og PDCH. Ved analyse af opsamlingsrør fra feltmålinger, korrigeres analyseresultatet i overensstemmelse med de beregnede rack-factorer.

Typisk anvendes 2-3 referencerør i en serie opsamlingsrør fra feltmålinger. Referencerørene fyldes med sporgasmængder, som enten ligger i samme størrelsesorden som de sporgasmængder, det forventes at rørene fra feltmålingerne indeholder, eller med sporgasmængder, som svarer omtrent til minimum og maksimum i det aktuelle kalibreringsområde.

Udstyret kalibreres ca. en gang om ugen eller når forholdet mellem den analyserede sporgasmængde og den forventede sporgasmængde indikerer, at en ny kalibrering er påkrævet.

Principper for metodens anvendelse i praksis

Feltnålinger Langtidsmålinger Bygningen i brug Flere zoner

Den typiske anvendelse af PFT-metoden er til målinger i felten af bygningers specifikke lufttilførsel. Almindeligvis gennemføres målingerne som langtidsmålinger, fx over 1-2 uger, mens bygningen er i brug. Ofte søges bygningen opdelt i zoner, som forsynes med hver sin sporgastype. Resultatet af en måling er således en bestemmelse af bygningens gennemsnitlige totale specifikke lufttilførsel i måleperioden, samt en bestemmelse af luftudvekslingen mellem zonerne.

Ved en anvendelse af metoden som beskrevet, forudsættes det, at sporgaskilderne er anbragt i bygningen på en sådan måde, at der etableres en konstant sporgaskoncentration på ethvert sted i rummet. Opdeles bygningen i zoner, forsynes hver zone med sin sporgastype, og inden for hver zone må det sikres at der etableres en konstant sporgaskoncentration.

Zoneopdeling

Ofte foretages zoneopdelingen ud fra et behov for at kunne bestemme lufttilførslen til hver af zonerne. I boliger kan to zoner fx være én zone med opholdsrummene og én zone med soverummene. I kontorbyggeri kan to zoner fx bestå af henholdsvis en række kontorer og gangarealet uden for kontorerne. I andre tilfælde kan zoneopdelingen foretages for at bestemmelsen af bygningens totale specifikke lufttilførsel kan ske med større sikkerhed, end hvis kun én sporgastype havde været anvendt. Eksempelvis vil den totale specifikke lufttilførsel til et enfamiliehus kunne bestemmes med større sikkerhed, hvis en eventuel kælder betragtes som en separat zone og den øvrige bolig

Placering af sporgaskilder

som en anden zone. Ved anvendelse af tre sporgastyper kan den øvrige bolig så igen opdeles i to zoner om nødvendigt.

Sporgaskilder anbringes de rum, som tilføres udeluft. Almindeligvis anbringes således ikke kilder i lukkede rum, som alene har aftræk. I naturligt ventilerede bygninger, fx boliger, hvor udelufttilførslen kan ske diffust gennem et ukendt antal åbninger i klimaskærmen, anbringes kilderne typisk nær ydervæggene. Da kildernes emissionsrate som før nævnt er temperaturafhængig og da den samlede emission i måleperioden ofte bestemmes ud fra den gennemsnitlige rumtemperatur i måleperioden, må kilderne dog ikke anbringes på overflader, som har en temperatur, der er forskellig fra rumluftens. Sporgaskilderne må således ikke anbringes på solbeskinnede flader, på lamper eller radiatorer, direkte på ydervæggen eller ved luftindtag, fx udeluftventiler, hvor den kolde luft kan påvirke kildens emission.

Antal sporgaskilder

Én sporgaskilde er i stand til at etablere en passende sporgaskoncentration i et luftvolumen på 100-150 m³ svarende til et gulvareal på ca. 50 m². Dette forudsætter at der hersker typiske rumtemperaturer, dvs. omkring 20 °C, og typiske ventilationsforhold, dvs. luftomsætninger op til 2-3 gange pr. time.

Består en zone af flere rum, skal der normalt være mindst én sporgaskilde i hvert rum. Som udgangspunkt bestemmes antallet af kilder, som skal anbringes i hvert rum i en zone, ud fra den tilførte udeluftmængde til rummet, idet målet er at etablere et konstant sporgaskoncentrationsniveau i hele zonen. I praksis vil grundlaget for det bedste skøn a priori for udelufttilførslen til de enkelte rum typisk være de enkelte rums volumener. Derfor bestemmes det nødvendige antal sporgaskilder ofte ved, at der anbringes én kilde i det mindste rum i zonen, som derefter er dimensionsgivende for antallet af kilder i de øvrige rum i zonen.

En eventuel zoneopdeling må foretages således, at der i luftteknisk forstand er to adskilte zoner. Eksempelvis vil det ikke være muligt at betragte hver sin halvdel af ét rum som to forskellige zoner. Der vil sandsynligvis forekomme luftudveksling mellem rummets to halvdele i en sådan grad, at de to sporgastyper, som er doseret i hver sin halvdel, vil være fuldstændig opblandet i hele rummet. Foretages en fejlagtig zoneopdeling som den netop beskrevne, vil det derimod være muligt at beregne rummets totale lufttilførsel på grundlag af to forskellige sporgastyper. Beregningerne bør naturligvis vise samme resultat.

Kilderne monteres med tape på et møbel eller en genstand, som ikke flyttes i måleperioden. Kildens orientering, dvs. om siliconepropopen vender opad, nedad eller er vandret er uden betydning.

Placering af opsamlingsrør

Opsamlingsrørene har til opgave at registrere den gennemsnitlige sporgaskoncentration i måleperioden i den luft, som forlader rummet eller zonen. Rørene må derfor anbringes på et sted i rummet eller i zonen, hvor de opsamler luft, som er repræsentativ for exfiltrationsluften. I bygninger med et kendt og lille antal udsugningspunkter anbringes opsamlingsrør nær udsugningspunkterne, dog ikke direkte i kanalerne. I bygninger med et ukendt antal udsugningspunkter anbringes opsamlingsrør i midten af rummet eller zonen. Nøjagtigheden af en PFT-måling afhænger af nøjagtigheden hvormed den gennemsnitlige koncentration i exfiltrationsluften er bestemt. Reglen er derfor, at der altid skal være anbragt mindst ét opsamlingsrør i hvert rum, og

Antallet af opsamlingsrør

mindst to opsamlingsrør i en *zone*. Anbringes flere rør i samme rum eller i samme zone vil den gennemsnitlige sporgaskoncentration blive beregnet som gennemsnittet af resultatet af analysen af hvert opsamlingsrør. Ved anvendelse af flere opsamlingsrør i samme rum eller i samme zone, fås samtidig muligheden for at vurdere sporgassens spredning i luften.

Opsamlingsrørene er nummererede

Opsamlingsrøret har indgraveret et nummer i den ene ende, og som tidligere nævnt er det lukket i begge ender med specialfremstillede gummipropper, når det ikke er i brug. Opsamlingen begynder, når den ene prop fjernes. Opsamlingsraten er proportional med glasrørets indvendige tværsnitsareal og omvendt proportional med afstanden fra rørets munding til overfladen af adsorptionsmaterialet. I den ende af røret hvor nummeret er indgraveret, er afstanden fra rørmunding til adsorptionsmateriale kendt. Derfor er det fra denne ende af røret, den ene prop fjernes.

Opsamlingsrørene monteres på samme måde som sporgaskilderne med tape på et møbel eller en genstand, som ikke vil blive flyttet i måleperioden. Opsamlingsrøret må ikke placeres direkte på en overflade; rørets åbne ende skal være fri, så luften kan stryge forbi munden. Rørets orientering har ingen betydning, og rørets opsamlingsrate er i praksis ikke temperaturafhængig.

Efter målingen sættes propper på opsamlingsrørene igen, og de returneres til analyse.

Koncentrationsniveau i rumluften

Sporgaskoncentrationen, som vil optræde i rumluften i bygningen under en måling, vil normalt ligge i størrelsesordenen 10-100 pl/l, svarende til ppt-området, parts per trillion, dvs. 10^{-12} . Analyseudstyret er dog i stand til at registrere sporgasmængder i opsamlingsrørene, som er mindre end 1 pl. Det er derfor overordentlig vigtigt, at opsamlingsrørene holdes adskilt fra sporgaskilderne før og efter en måling. Sendes sporgaskilder og opsamlingsrør med postvæsenet, skal det ske på to forskellige dage, for at undgå at kuverterne mødes på postkontoret eller i postmodtagelsen hos modtageren. I de tilfælde hvor SBI har gennemført målinger i samarbejde med andre, er de eksponerede opsamlingsrør fremsendt til SBI, mens sporgaskilderne er sendt til privatadressen hos en af SBI's medarbejdere. Det vil normalt være usikkert at forlade sig på opbevaring og transport af udstyret i lufttætte beholdere.

Håndtering af udstyret

I forbindelse med en måling skal sporgaskildernes temperatur i måleperioden kendes. Det vil normalt være tilstrækkeligt at kende den gennemsnitlige temperatur, og det vil ved hensigtsmæssig placering af kilderne ofte være lufttemperaturen, som bør registreres. Desuden forudsætter en beregning af bygningens eller zonerens luftomsætning, på grundlag af de målte volumenstrømme, at rum- og zonevolumener registreres.

PFT måleskema

SBI har udarbejdet et måleskema, som bør udfyldes i forbindelse med PFT-målinger. Måleskemaet er vist i appendiks 1.

På skemaet er det muligt at notere stikord til sporgaskildernes og opsamlingsrørenes placeringer. Disse stikord kan være hensigtsmæssige at have, når resultatet af målingen skal bedømmes, specielt hvis zoneopdelingen har været uheldig og må korrigeres.

Måleperiodens varighed	<p>Som nævnt gennemføres feltmålinger med PFT-metoden almindeligvis over en periode på 1-2 uger. I så fald kan sporgaskilder og opsamlingsrør anbringes samtidig i bygningen. Den tid der går, indtil der er opnået tilnærmelsesvis ligevægtskoncentration, vil være kort sammenlignet med den samlede måleperiode. Gennemføres målinger som varer kortere tid end 1-2 døgn, bør kilderne anbringes i bygningen, fx dagen før målingerne starter.</p>
Korttidsmålinger	<p>Det er muligt at gennemføre målinger af både kortere og længere varighed end de nævnte 1-2 uger.</p> <p>Varigheden af korttidsmålinger begrænses i nogen grad af, at det i praksis tager en vis tid, inden opsamlingsrørene har opsamlet sporgas i tilstrækkelig mængde, til at de kan analyseres med sikkerhed. Samtidig er korttidsmålinger særligt følsomme over for ustabile forhold i måleperioden. SBI har med gode resultater gennemført målinger med PFT-metoden i kontorbyggeri, hvor måleperioden har været 8 timer, svarende til en arbejdsdag. Kortere måleperioder end 3-4 timer kan ikke anbefales.</p>
Langtidsmålinger	<p>Varigheden af langtidsmålinger begrænses i praksis kun af det formålsløse i at foretage gennemsnitsmålinger over fx et halvt eller et helt år. Opsamlingsrørenes kapacitet i forbindelse med en passende sporgaskoncentration i rumluften sætter ikke grænsen for varigheden af en måling.</p>
Resultatskema	<p>På grundlag af analysen udarbejdes et resultatskema. Af resultatskemaet fremgår indledningsvis i hvilken bygning der er målt, dato og tidspunkt for målingens start og slut samt dato for den gaschromatografiske analyse. Derefter vises resultatet af beregningen af bygningens gennemsnitlige totale lufttilførsel dels udtrykt som en volumenstrøm i m³/h dels udtrykt i luftomsætninger pr. time. Endvidere viser resultatskemaet for hver zone den beregnede infiltration og exfiltration samt luftudvekslingen mellem zonerne. Endelig indeholder resultatskemaet de grundlæggende analyseresultater fra den gaschromatografiske analyse samt informationer om anvendte sporgastyper og deres antal, gennemsnitlige zonetemperaturer mv., som er basis for de beregnede volumenstrømme samt zonevoluminer, som anvendes ved beregning af bygningens gennemsnitlige luftomsætning. Et eksempel på et resultatskema er vist i appendiks 2.</p>

Usikkerhed og fejlanalyse

PFT-metoden bygger blandt andet på følgende grundlæggende forudsætninger om udstyret og dets funktion:

Forudsætninger om udstyret og dets funktion

- de passive sporgaskilder afgiver en kendt og målbar sporgas
- kilderne afgiver sporgassen med en kendt rate
- emissionsraten er konstant
- de passive opsamlingsrør opsamler sporgas ved adsorption
- rørenes opsamlingsrate er kendt
- rørenes opsamlingsrate er uafhængig af sporgaskoncentrationen i rumluften
- rørenes opsamlingsrate er konstant gennem hele måleperioden
- opsamlingsrørenes indhold af sporgas kan bestemmes fx ved termisk desorption og gaschromatografisk analyse af rørene

I forbindelse med den praktiske gennemførelse af en måling med PFT-metoden og den efterfølgende beregning af den gennemsnitlige specifikke lufttilførsel forudsættes blandt andet følgende vedrørende måleomstændighederne:

Forudsætninger vedrørende måleomstændighederne

- sporgaskilderne anbringes i rummet eller i bygningen på en sådan måde, at den udsendte sporgas bliver opblandet med rumluften
- sporgaskoncentrationen er konstant på ethvert sted i rummet eller i bygningen gennem hele måleperioden
- opsamlingsrørene anbringes i rummet eller bygningen på en sådan måde, at den luft de opsamler er repræsentativ for luften i rummet eller i bygningen
- ved analysen af opsamlingsrørene bestemmes rumluftens gennemsnitlige sporgaskoncentration i måleperioden

Usikkerheden på en måling med PFT-metoden hidrører i første række fra, at de sidst nævnte forudsætninger vedrørende den praktiske gennemførelse af målingen og måleomstændighederne kun tilnærmelsesvis er opfyldt eller kun er opfyldt i en del af måleperioden. Usikkerhed på funktionen af sporgaskilder og opsamlingsrør samt usikkerhed på den gaschromatografiske analyse har kun ringe indflydelse på den samlede usikkerhed.

Det er dog nødvendigt at kunne foretage en vurdering af usikkerheden på en PFT-måling. I det følgende diskuteres kilder til usikkerhed, som hidrører fra omstændighederne ved målingen i felten, der vises en metode til beregning af usikkerheden på de beregnede volumenstrømme og der redegøres for betydningen af det såkaldte *optimal condition number*.

Usikkerheder ved feltmålinger

Sporgasemission	<p>De passive sporgaskilder afgiver perflourcarbon, som er en kendt og målbar sporgas.</p> <p>Ved konstant temperatur er sporgaskildernes emissionsrate kendt og konstant og endvidere er temperaturens indflydelse på sporgaskildernes emissionsrate veldefineret, se formel (3) og figur 1. Usikkerheden på bestemmelsen af den samlede afgivne sporgasmængde i en måleperiode er derfor knyttet til usikkerheden på bestemmelsen af den gennemsnitlige temperatur i rummet eller i zonen i måleperioden.</p>
Temperatur	<p>I afsnittet om principper for metodens anvendelse i praksis, er det anført, at kilderne bør placeres i et rum således, at det kan forventes, at kildernes temperatur svarer til rumluftens temperatur. Antages det, at den gennemsnitlige lufttemperatur i et rum eller en zone kan estimeres inden for ± 2 °C, medfører dette, at der må forventes en usikkerhed på bestemmelsen af den afgivne sporgasmængde i måleperioden i størrelsesordenen ± 8 pct. Ved beregninger af den specifikke lufttilførsel til et rum eller en bygning på grundlag af en måling med PFT-metoden, anvender SBI usikkerheden ± 10 pct. på den afgivne sporgasmængde. Heri indgår usikkerheden på kildernes kalibrerede sporgasemission ved 25 °C.</p>
Gennemsnitlig sporgaskoncentration	<p>Endvidere forudsætter den passive sporgasteknik, at opsamlingsrørene anbringes således, at den målte sporgaskoncentration er repræsentativ. I bilagsrapporten, som er udarbejdet i tilknytning til denne rapport, er det vist, at anbringes to opsamlingsrør ved siden af hinanden i et rum, vil de adsorbere lige store sporgasmængder. I analysen vil deres indhold afvige mindre end ca. 2 pct. Anbringes to opsamlingsrør i to forskellige positioner i rummet, vil der typisk være større forskel på de adsorbere sporgasmængder, afhængig af rummets udformning, brug og ventilationsforhold. I forbindelse med beregning af den specifikke lufttilførsel til et rum eller en bygning på grundlag af en PFT-måling, må usikkerheden på bestemmelsen af den gennemsnitlige sporgaskoncentration i måleperioden estimeres. Med udgangspunkt i de analyserede sporgasmængder i de anvendte opsamlingsrør vil standardafvigelsen på det gennemsnitlige sporgasindhold i opsamlingsrørene, i det tilfælde hvor der har været anvendt to eller flere opsamlingsrør i samme zone, blive anvendt som estimat for usikkerheden på den gennemsnitlige sporgaskoncentration i måleperioden. Som nævnt i afsnittet om principperne for metodens anvendelse i praksis, bør der altid være anvendt mindst to opsamlingsrør i en zone, men hvis det ene opsamlingsrør fx er knækket, således at der i analysefasen kun indgår ét opsamlingsrør fra zonen, estimeres usikkerheden til ± 10 pct.</p>
Baggrundskoncentration	<p>Metoden forudsætter desuden at sporgaskoncentrationen i udeluften er negligabel, og at luft som exfiltrerer fra bygningen ikke infiltrerer igen medbringende sporgas. Ved en måling under typiske temperatur og ventilationsforhold vil sporgaskilderne etablere en sporgaskoncentration i rumluften i størrelsesordenen 1-100 ppt, parts per trillion, dvs. $\cdot 10^{-12}$, altså ca. én million gange lavere end ved traditionelle sporgasmålinger, hvor fx N_2O, lattergas eller SF_6, svovlhexafluorid anvendes som sporgas. Selv ved dette lave koncentrationsniveau vil koncentrationen af perfluorocarbon i rumluften under en måling være ca. 1000 gange højere end koncentrationen i udeluften, som er i stør-</p>

relsesordenen 2-20 ppq, parts per quadrillion, dvs. $\cdot 10^{-15}$. Forudsætningen om at exfiltreret luft ikke på et senere tidspunkt infiltrerer igen vil normalt være opfyldt.

Variierende
udelufttilførsel

Det beregningsmæssige grundlag for ventilationstekniske målinger ved hjælp af sporgasteknik er som nævnt formel (1). Hvis den specifikke lufttilførsel til en bygning varierer i måleperioden, vil også sporgaskoncentrationen variere. I formel (1) vil koncentrationen c således ikke indgå som en konstant koncentration, men som et gennemsnit af enkeltkoncentrationer. Med PFT-metodens opsamlingsrør registreres ikke enkeltkoncentrationer, hvoraf et gennemsnit kunne dannes, men derimod den gennemsnitlige sporgaskoncentration i måleperioden. Det reciprokke af gennemsnitskoncentrationen er altid mindre end gennemsnittet af reciprokke enkeltkoncentrationer. Dette betyder, at PFT-metoden er behæftet med en systematisk fejl, således at metoden vil undervurdere den specifikke lufttilførsel.

Systematisk fejl

Størrelsen af undervurderingen afhænger dels af størrelsesordenen af variationerne i den specifikke lufttilførsel dels af varigheden og hyppigheden af variationerne. Ved målinger i boliger er den typiske årsag til variationer i den specifikke lufttilførsel beboernes brug af døre og vinduer, fx ved udluftning. Ved kortvarige, hyppige udluftninger vil der kun forekomme små udsving i sporgaskoncentrationen, som vil svinge omkring ligevægtskoncentrationen svarende til den gennemsnitlige specifikke lufttilførsel. Ved kraftige udluftninger, fx ved et stort antal åbne døre og vinduer, eller ved længerevarende udluftninger vil udsvingene i sporgaskoncentrationen være større, og den systematiske fejl vil blive forøget.

Teoretiske beregninger kan vise, at fejlen kan blive stor. I praksis vil fejlen dog være på et acceptabelt niveau [5], og usikkerheden på en måling med PFT-metoden vil i første række være domineret af placeringen af sporgaskilder og opsamlingsrør.

Fejlanalyse

Det er muligt at estimere usikkerheden på funktionen af såvel feltmåleudstyret som analyseudstyret. Da usikkerheden på en måling imidlertid i højere grad afhænger af placeringen af sporgaskilder og opsamlingsrør i bygningen samt de herskende temperatur- og ventilationsforhold i måleperioden, er estimerede usikkerheder på instrumenterne sjældent tilstrækkeligt til at foretage en vurdering af de endelige resultater af målingen.

Vurderingen af resultatet af en måling må ske på grundlag af en vurdering af usikkerheden på bestemmelsen af de beregnede volumenstrømme.

I afsnittet om metodens formelgrundlag er som eksempel vist ligningssystemet for en 2-zone situation. Ligningssystemet for sporstofbalanceligningerne kan kombineres med luftbalanceligningerne og opstilles på matrixform. I det generelle tilfælde fås:

$$C \cdot Q = M \tag{5}$$

For fuldstændighedens skyld gentages her notationen:

- c_{ij} = konc. af sporgastype i i zone j i l sporgas pr. l rumluft
- $q_{i:j}$ = luftoverføring fra zone i til zone j i l/s
- q_{i-i} = den totale tilførte luftmængde til zone i i l/s
- q_{0-0} = total infiltration til bygningen i l/s
- m_i = tilført sporgasmængde i zone i i l/s

I appendiks 3 er vist i uforkortet form såvel matricerne, som beskriver ligningssystemet for sporstofbalanceligningerne, som matricerne, som beskriver de kombinerede sporstofbalanceligninger og luftbalanceligninger.

Ligning for beregning af usikkerheden

Det er i [4] vist, at der kan opstilles et ligningssystem på matrixform, som udtrykker usikkerheden på de beregnede volumenstrømme. Ligningssystemet har formen:

$$\Delta Q = \left[(C^{-1})^2 (\Delta M^2 + \Delta C^2 Q^2) \right]^{1/2} \quad (6)$$

hvor

ΔQ = matrix indeholdende usikkerheden på de beregnede volumenstrømme i l/s.

Eksempelvis vil elementet $\Delta q_{1:2}$ angive usikkerheden på bestemmelsen af luftoverføringen fra zone 1 til zone 2.

ΔM = matrix indeholdende usikkerheden på den estimerede tilførte sporgasmængde i l/s.

Eksempelvis vil elementet Δm_1 angive usikkerheden på den estimerede sporgasemission i zone 1.

ΔC = matrix indeholdende usikkerheden på bestemmelsen af den gennemsnitlige sporgaskoncentration i l sporgas pr. l rumluft.

Eksempelvis vil elementet Δc_{12} angive usikkerheden på bestemmelsen af den gennemsnitlige sporgaskoncentration af sporgastype 1 i zone 2.

C^{-1} = den reciprokke matrix til koncentrationsmatricen C .

Notationen i ligningen

I ligningssystemet symboliserer notationen kvadratet på en matrix, at hvert element i matricen kvadreres. Ligeledes symboliserer notationen kvadratroden af en matrix, at kvadratroden tages af hvert element i matricen.

Matricen ΔM indeholder usikkerheden på den estimerede tilførte sporgasmængde. Som før nævnt er usikkerheden på bestemmelsen af den gennemsnitlige temperatur i måleperioden den væsentligste årsag til usikkerhed på den tilførte sporgasmængde. Usikkerheden sættes til 10 pct.

Matricen ΔC indeholder usikkerheden på bestemmelsen af den gennemsnitlige sporgaskoncentration i måleperioden. Har der, som anbefalet i afsnittet om principperne for metodens anvendelse i praksis, været anvendt flere opsamlingsrør i zonen, sættes usikkerheden lig med standardafvigelsen på de opsamlede sporgasmængder. Hvis der i analysefasen kun eksisterer ét rør fra zonen, sættes usikkerheden til 10 pct.

Ved hjælp af et regneprogram til matrixberegninger til en personlig computer er det enkelt at beregne matricen Q fra formel (5), dvs. volumenstrømmene, og derpå matricen ΔQ af formel (6), dvs. usikkerheden på bestemmelsen af volumenstrømmene.

Optimal condition number

Usikkerheden på bestemmelsen af volumenstrømmene er afhængig af de estimerede usikkerheder på såvel den tilførte sporgasmængde som den gennemsnitlige sporgaskoncentration i måleperioden, dvs. henholdsvis ΔM og ΔC matricerne. Men foruden at kunne bestemme usikkerheden på de beregnede volumenstrømme, er det nødvendigt at kunne vurdere, i hvor høj grad metodens forudsætninger har været opfyldt under en måling. Dette er først og fremmest af betydning i forbindelse med vurdering af resultaterne af en måling med flere zoner.

Determinanten af C

I appendiks 4 er det beskrevet, dels hvorledes determinanten af koncentrationsmatricen C kan give en indikation af stabiliteten af ligningssystemet (5), dels hvorledes indikationen ikke vil være entydig. For at opnå et entydigt udtryk for stabiliteten af ligningssystemet (5) og dermed af usikkerheden på bestemmelsen af volumenstrømmene, indføres det såkaldte *optimal condition number*, $K(C)$ for koncentrationsmatricen. Definitionen på *optimal condition number* for koncentrationsmatricen er ligeledes vist i appendiks 4.

Optimal condition number

Størrelsen af $K(C)$ vil afspejle stabiliteten af ligningssystemet (5) over for ændringer i matricerne C eller M . En høj værdi af $K(C)$ er ensbetydende med, at metodens forudsætninger ikke har været opfyldt. Jo højere værdien af $K(C)$ er, i jo mindre grad har forudsætningerne været opfyldt.

Minimumværdien for $K(C)/X$ er 1, hvor X er antallet af zoner, og maksimumværdien af $K(C)/X$ er ∞ . $K(C)/X = 1$ vil opnås i det ideelle tilfælde, dvs. ved 1-zone målinger hvor kun én sporgastype anvendes og ved flerzone målinger, hvor hver enkelt sporgastype kun forekommer i den zone, hvor den er udsendt. Når der ikke er forbindelse mellem de enkelte zoner, vil koncentrationsmatricen fremstå som en matrix, hvor alle elementer er 0, undtaget diagonalen som vil indeholde positive værdier. Som retningsgiver for en acceptabel måling kan anføres, at værdien af $K(C)/X$ bør være i størrelsesordenen \sqrt{X} .

I SBI's anvendelse af PFT-metoden indgår mulighed for anvendelse af op til tre forskellige sporgastyper, og dermed mulighed for opdeling af en bygning i op til tre zoner. I praksis bør $K(C)$ således ikke overstige ca. 5 ved en 3-zone måling. Ved en 2-zone måling bør $K(C)$ ikke overstige ca. 3.

På SBI's resultatskema, som er vist i appendiks 2, er $K(C)$ anført i skemaets nederste højre hjørne.

Viser resultatet af fx en 3-zone måling et højt *optimal condition number*, og dermed stor usikkerhed på de beregnede volumenstrømme, kan målingen i nogle tilfælde "reddes". Årsagen til en ustabil koncentrationsmatrix kan være, at to zoner som forudsattes at være adskilt, i praksis har så god ventilationsmæssig forbindelse med hinanden, at de bør betragtes som én zone. Ved at slå de to zoner sammen til én, dvs. ved at transformere 3-zone målingen til en 2-zone måling, kan usikkerheden på bestemmelsen af volumenstrømmene ofte reduceres. Dermed mistes naturligvis muligheden for at vurdere luftudvekslingen mellem de to sammenlagte zoner.

En anden årsag til et højt *optimal condition number* er en egentlig fejlplacering af sporgaskilder og opsamlingsrør. I så fald må målingen normalt kasseres.

I uheldige, men sjældne, tilfælde er det muligt at opnå et acceptabelt *optimal condition number*, på trods af at sporgaskilder og opsamlingsrør har været anbragt uhensigtsmæssigt. Fx kan sporgaskilderne anbringes, så sporgassen ikke i tilstrækkelig grad bliver opblandet med rumluften, og opsamlingsrørene kan anbringes på steder i zonen, hvor det ikke er en typisk gennemsnitskoncentration, som registreres. Denne fejkilde kan være svær at afsløre, hvis der ikke haves en forhåndsviden om de omtrentlige ventilationsforhold i bygningen. Dette er grunden til, at det anbefales at udstyret anbringes af personer, som er fortrolig med PFT-metoden.

Laboratorieundersøgelser

PFT-metodens fordele

PFT-metodens egnethed til måling af specifikke lufttilførsler i boliger er demonstreret blandt andet af SBI [6]. De af metodens fordele som først og fremmest har gjort, at metoden har været taget i anvendelse, er feltmåleudstyrets små fysiske dimensioner, den enkle håndtering af udstyret i felten samt muligheden for at gennemføre langtidsmålinger mens boligerne er i brug. Desuden er det med PFT-metoden muligt at gennemføre målinger i mange boliger i én og samme periode. SBI har således anvendt metoden i forbindelse med bredt tilrettelagte feltundersøgelser, hvor det har været målet, gennem et stort antal målinger, at bestemme niveauet af den gennemsnitlige specifikke lufttilførsel i forskellige typer af boliger.

Aalborg Universitetscenter, AUC

I det følgende redegøres for en serie undersøgelser udført i laboratoriet. Formålet med undersøgelserne har været at undersøge sporgaskildernes og opsamlingsrørens funktion under specielle, men kontrollerede forhold, med henblik på vurdering af nye anvendelsesområder. Undersøgelserne er udført i samarbejde med Aalborg Universitetscenter, AUC, Institutet for Bygningsteknik. Ved undersøgelserne, som er gennemført i et fuldskalarum ved AUC, er der simultant anvendt traditionel sporgasteknik.

Generelle målebetingelser

Fuldskalarum

Fuldskalarummet ved AUC er placeret i en laboratoriehal under konstante temperaturforhold. Rummet er opbygget af et træskelet med vægge, gulv og loft af 19 mm Douglasplader. Rummets dimensioner er $(l \times b \times h) = (4,2 \text{ m} \times 3,6 \text{ m} \times 2,4 \text{ m})$, hvilket giver et gulvareal på ca. 15 m^2 og et rumvolumen på ca. 36 m^3 .

Indblæsning og udsugning

Indblæsnings- og udsugningsarmaturerne er begge placeret midt på den ene endevæg. Indblæsningen sker gennem et armatur af fabrikat HESCO anbragt 0,2 m fra loftet. Armaturet, som har dimensionerne $(b \times h) = (0,71 \text{ m} \times 0,17 \text{ m})$, består af 84 små kugleformede indblæsningsdyser anbragt i 4 rækker hver med 21 dyser. Indblæsningsdyserne er rettet opad mod loftet i en vinkel på 40 grader. Under indblæsningsarmaturet, 0,6 m fra loftet, er udsugningsarmaturet anbragt. Dimensionerne af armaturet er $(b \times h) = (0,3 \text{ m} \times 0,2 \text{ m})$.

Under forsøgene er der anvendt ventilationsluft fra laboratoriehallen. Alle undersøgelser er udført under stationære isotermiske forhold. Der er sket en løbende kontrol af den indblæste volumenstrøm samt af temperaturerne i indblæsningen, udsugningen og på overfladerne i fuldskalarummet.

Temperaturmålinger

Temperaturmålinger er foretaget med termoelementer type K. Termoelementernes registreringer er, via KAYE ispunktreferenc forbundet med en FLUKE 2240B datalogger, opsamlet på en personlig computer. Temperaturerne er i hver måleperiode målt hvert femte minut.

Traditionel sporgasteknik

Den indblæste ventilationsluftmængde er bestemt ved måling af trykfaldet over en måleblænder med et DEBRO mikroanemometer. Måleblænderen er kalibreret i en jetvindtunnel, og ved hjælp af kalibreringskurven omsættes det målte trykfald til en luftmængde.

Sporgasmålinger er gennemført dels ved anvendelse af traditionel sporgasteknik dels ved anvendelse af PFT-metoden.

Ved målinger med den traditionelle sporgasteknik er sporgassen tilført gennem en bordtennisbold med seks huller ($d=1$ mm) jævnt fordelt over overfladen. Kuldioxid, CO_2 , er anvendt som sporgas. For at opnå en sporgasdensitet, som er lig med rumluftens densitet, er kuldioxid blandet med helium. Den tilførte sporgasmængde er fundet ved summation af målinger af volumenflowet af hver af komponenterne. Til måling af volumenflowet er benyttet to kalibrerede flowmetre. Sporgaskoncentrationen er, ved den traditionelle sporgasteknik, målt ved hjælp af en BINOS 100 gasanalysator, der er forbundet med en omskifterenhed, som gør det muligt at måle koncentrationen i op til tolv punkter.

Ved målinger med PFT-metoden er sporgasdoser og sporgasopsamling sket ved hjælp af metodens sporgaskilder og opsamlingsrør. Udstyret er anbragt i fuldskalarummet af AUC. Efter målingen har AUC returneret udstyret til SBI, som har foretaget gaschromatografisk analyse af opsamlingsrørene.

I forbindelse med beskrivelsen af de enkelte målinger er der redegjort for detaljer vedrørende sporgasdoser og måling af sporgaskoncentrationer.

Undersøgelse 1: Måling af sporgaskoncentration ved konstant lufttilførsel

Formål

Formålet med undersøgelsen har været at verificere PFT-metodens bestemmelse af et rums gennemsnitlige sporgaskoncentration under stationære forhold.

Fremgangsmåde

Placering af sporgaskilder

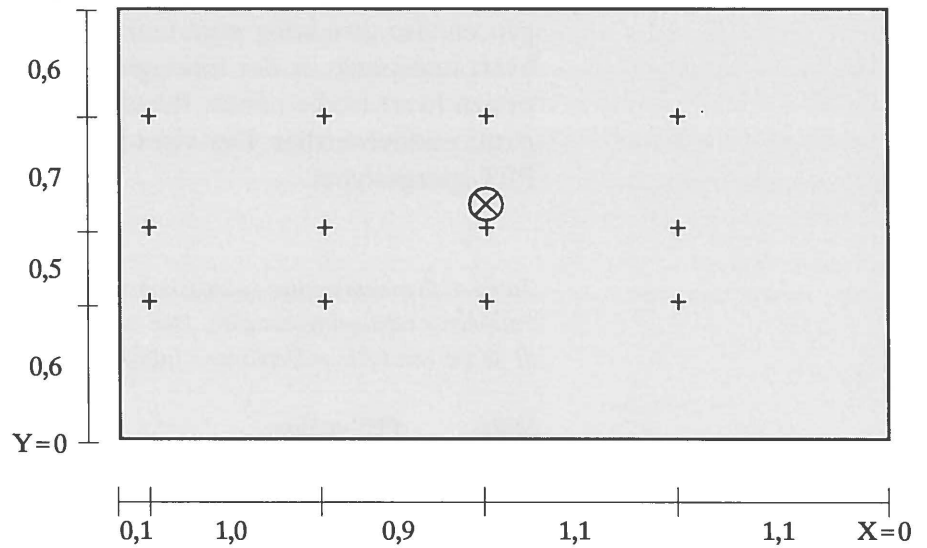
Tre forskellige PFT-sporgaskildetyper og en CO₂-kilde blev placeret i rummets midte, 1,2 m over gulvet. Emissionen fra PFT-kilderne blev beregnet i henhold til formel (3). CO₂-sporgastilførslen var 0,025 l/s.

Målepunkter

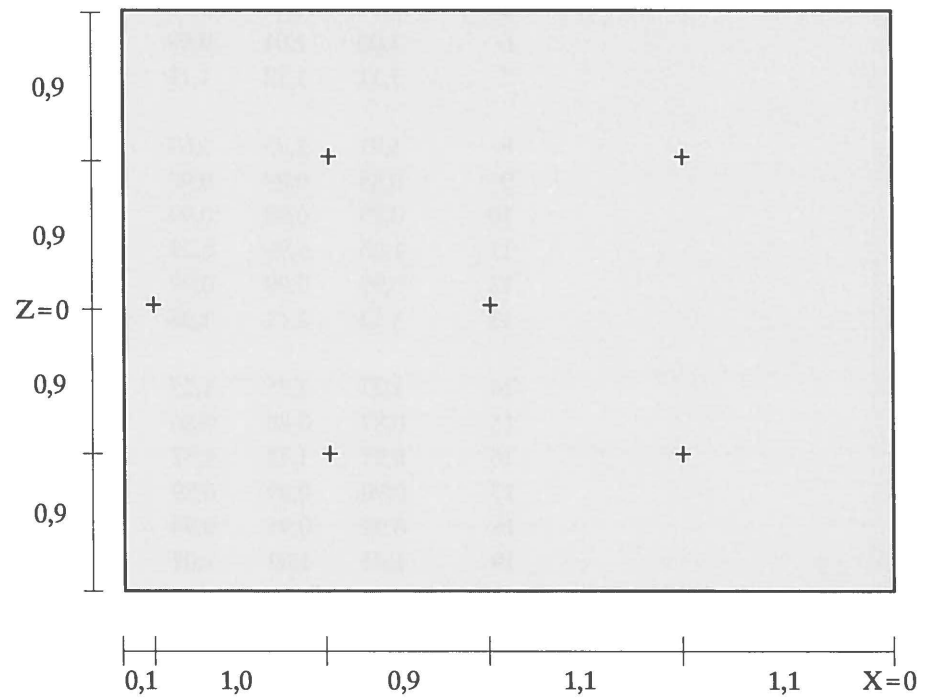
Til måling af koncentrationen af PFT-sporgas i rummet anvendtes 20 passive opsamlingsrør. 18 rør blev anbragt i tre vandrette planer i rummet med 6 rør i hvert plan. Planerne var 0,6 m, 1,1 m og 1,8 m over gulvet. I hvert vandret plan blev ét opsamlingsrør anbragt midt i rummet og ét rør tæt ved endevæggen modsat indblæsningen. De resterende fire rør i hvert plan blev jævnt fordelt i rummet. Desuden blev der anbragt to opsamlingsrør i udsugningskanalen umiddelbart efter udsugningsarmaturet. Tabel 3, figur 4 og figur 5 viser målepunkternes placering i fuldskalarummet.

Tabel 3. Placering af målepunkter i fuldskalarum. Vedrørende koordinaterne X, Y og Z se figur 4 og figur 5 på næste side.

Målepunkt	PFT-måling			CO ₂ -måling		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	-	-	-	Indblæsning		
2	2,2	0,6	0,0	2,2	0,6	0,0
3	4,1	0,6	0,0	-	-	-
4	3,1	0,6	-0,9	-	-	-
5	1,1	0,6	-0,9	-	-	-
6	1,1	0,6	0,9	1,1	0,6	0,9
7	3,1	0,6	0,9	-	-	-
8	2,2	1,1	0,0	2,2	1,1	0,0
9	4,1	1,1	0,0	4,1	1,1	0,0
10	3,1	1,1	-0,9	3,1	1,1	-0,9
11	1,1	1,1	-0,9	1,1	1,1	-0,9
12	1,1	1,1	0,9	1,1	1,1	0,9
13	3,1	1,1	0,9	3,1	1,1	0,9
14	2,2	1,8	0,0	2,2	1,8	0,0
15	4,1	1,8	0,0	4,1	1,8	0,0
16	3,1	1,8	-0,9	-	-	-
17	1,1	1,8	-0,9	-	-	-
18	1,1	1,8	0,9	-	-	-
19	3,1	1,8	0,9	-	-	-
20	Udsugning			Udsugning		



Figur 4. Lodret snit i fuldskalarum. Placering af målepunkter og sporgaskilder.



Figur 5. Vandret snit i fuldskalarum. Placering af målepunkter.

Fuldskalarummet blev tilført en konstant luftmængde på $109 \text{ m}^3/\text{h}$ i en periode på 97 h 45 min.

Resultater

Resultaterne af målingerne er vist i tabel 4. For hvert målepunkt er vist middelværdien af den målte sporgaskoncentration normaliseret i forhold til middelværdien af den målte sporgaskoncentration i udsugningskanalen. Tallene angiver således forholdet mellem middelkoncentrationen i målepunktet og middelkoncentrationen i udsugningskanalen.

Resultaterne af CO₂-målingerne er angivet ved middelværdien, den procentvise spredning samt maksimum og minimum værdierne. I hvert målepunkt er der foretaget en registrering af sporgaskoncentrationen hvert tredje minut. Resultaterne af PFT-målingerne er i sagens natur middelværdier. Der vises resultater for hver af de tre anvendte PFT-sporgastyper.

Tabel 4. Gennemsnitlige sporgaskoncentrationer, normaliseret efter middeldkoncentrationen i udsugningskanalen. Den vandrette gruppeinddeling af tallene refererer til de tre vandrette måleplaner i fuldskalarummet.

Målepunkt	PFT-måling			CO ₂ -måling			
	PMCP	PMCH	PDCH	middel	spredning	maksimum	minimum
1	-	-	-	Indblæsning			
2	1,07	1,06	1,05	1,44	33 %	3,53	0,90
3	0,93	0,93	0,92	-	-	-	-
4	1,04	1,04	1,03	-	-	-	-
5	1,57	7,17	5,93	-	-	-	-
6	1,00	1,01	0,99	1,13	9 %	1,58	0,91
7	1,11	1,12	1,12	-	-	-	-
8	1,91	1,75	1,63	1,66	34 %	3,97	0,95
9	0,88	0,89	0,90	0,87	3 %	0,97	0,76
10	0,99	0,98	0,99	1,11	9 %	1,57	0,85
11	1,65	6,99	6,29	0,99	5 %	1,33	0,87
12	0,99	0,99	0,99	1,10	6 %	1,42	0,91
13	1,12	1,11	1,08	1,20	13 %	1,92	0,89
14	1,27	1,25	1,25	1,03	12 %	1,90	0,86
15	0,87	0,86	0,86	0,83	4 %	0,92	0,74
16	0,97	1,42	1,57	-	-	-	-
17	0,90	0,89	0,89	-	-	-	-
18	0,98	0,95	0,94	-	-	-	-
19	1,03	1,03	1,02	-	-	-	-
20	1,00	1,00	1,00	1,00	4 %	1,18	0,88

Temperaturmålinger

Indblæsningsluftens og udsugningsluftens temperatur samt temperaturen af overflader i fuldskalarummet blev målt hvert femte minut gennem hele måleperioden. I rummet blev overfladetemperaturen målt på alle seks indvendige flader. På hver væg blev temperaturen målt i tre punkter lodret over hinanden midt på væggen. Afstandene over gulvet var 0,6 m, 1,2 m og 1,8 m. Derudover blev gulvets og lofts temperatur målt i et punkt midt på fladen.

Differensen mellem indblæsningsluftens og udsugningsluftens temperatur varierede mellem -0,4 °C og +0,7 °C. Den gennemsnitlige temperaturdifferens er beregnet til 0,3 °C.

Målingerne af overfladetemperaturerne viste en temperaturgradient i fuldskalarummet på 0,25 °C/m.

Undersøgelse 2: Måling af sporgaskoncentration ved varierende lufttilførsel

Formål

Formålet med undersøgelsen har været at verificere PFT-metodens bestemmelse af et rums gennemsnitlige sporgaskoncentration under ikke-stationære ventilationsforhold.

Fremgangsmåde

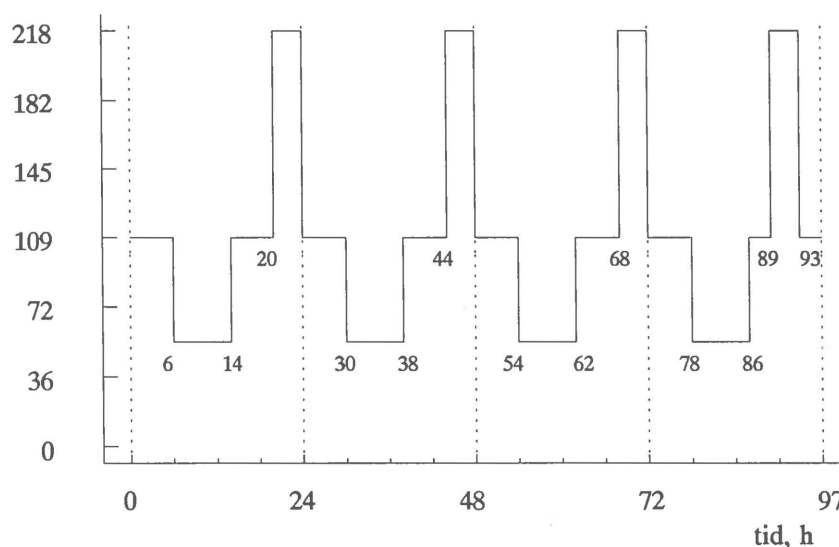
Placering af sporgaskilder og målepunkter

Ved denne undersøgelse blev anvendt samme antal sporgastyper og samme placering af disse som i undersøgelse 1. Ligeledes var antallet af anvendte passive opsamlingsrør samt målepunkterne for såvel opsamlingsrør som for CO₂-målingerne de samme som i undersøgelse 1, se tabel 3, figur 4 og figur 5.

Fuldskalarummet blev ventileret med tre forskellige luftmængder på henholdsvis 54 m³/h, 109 m³/h og 218 m³/h. Lufttilførslen blev varieret i spring og i en rytme, som vist i figur 6.

De tilførte ventilationsluftmængder og varigheden af de enkelte perioder er valgt således, at den gennemsnitlige tilførte luftmængde er 109 m³/h, som svarer til luftmængden, som blev tilført kontinuert i undersøgelse 1.

Lufttilførsel, m³/h



Figur 6. Program for variabel lufttilførsel til fuldskalarummet.

Resultater

Undersøgelse 1 viste, at det er uden betydning hvilken af de tre PFT-sporgastyper, der anvendes. Se diskussionsafsnittet sidst i dette kapitel. I tabel 5 er, for overskuelighedens skyld, kun resultaterne af målingerne baseret på sporgastype PMCP præsenteret. For hvert målepunkt er vist middelværdien af den målte sporgaskoncentration normaliseret i forhold til middelværdien af den målte sporgaskoncentration i udsugningskanalen. Tallene angiver således forholdet mellem middelkoncentrationen i målepunktet og middelkoncentrationen i udsugningskanalen.

Tabel 5. Sammenstilling af måleresultater fra undersøgelse 1 med konstant lufttilførsel og denne undersøgelse med varierende lufttilførsel til rummet. Gennemsnitlige sporgaskoncentrationer normaliseret efter middelkoncentrationen i udsugningskanalen. Den vandrette gruppeinddeling af tallene refererer til de tre vandrette måleplaner i fuldskalarummet.

Målepunkt	PFT-måling		CO ₂ -måling	
	Konstant lufttilførsel	Variierende lufttilførsel	Konstant lufttilførsel	Variierende lufttilførsel
1	-	-	Indblæsning	
2	1,07	1,16	1,44	1,66
3	0,93	1,19	-	-
4	1,04	1,26	-	-
5	1,57	1,06	-	-
6	1,00	1,05	1,13	1,51
7	1,11	1,13	-	-
8	1,91	1,14	1,66	1,63
9	0,88	0,90	0,87	0,84
10	0,99	1,04	1,11	1,20
11	1,65	1,00	0,99	1,16
12	0,99	1,00	1,10	1,19
13	1,12	1,11	1,20	1,29
14	1,27	1,59	1,03	1,00
15	0,87	0,85	0,83	0,77
16	0,97	0,94	-	-
17	0,90	0,91	-	-
18	0,98	0,92	-	-
19	1,03	0,94	-	-
20	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabellen viser en sammenstilling af måleresultaterne fra undersøgelse 1 og fra denne undersøgelse. Den gennemsnitlige lufttilførsel var i begge undersøgelser 109 m³/h.

Temperaturmålinger

På samme måde og i samme punkter som i undersøgelse 1 er der foretaget målinger af indblæsningsluftens og udsugningsluftens temperatur samt af de indvendige overfladers temperatur. Målingerne er foretaget hvert femte minut gennem hele måleperioden. Differensen mellem indblæsningsluftens temperatur og udsugningsluftens temperatur varierede mellem -0,5 °C og +0,5 °C. Den gennemsnitlige temperaturdifferens er beregnet til 0,22 °C. Målingerne af overfladetemperaturerne viste en temperaturgradient i fuldskalarummet på 0,22 °C/m.

Undersøgelse 3: Måling af vertikal koncentrationsfordeling i afhængighed af tilført luftmængde

Formål

Formålet med undersøgelsen har været at undersøge om det med PFT-metodens opsamlingsrør er muligt at registrere koncentrationsforskelle i fuldskalarummet.

Fremgangsmåde

Tre delundersøgelser

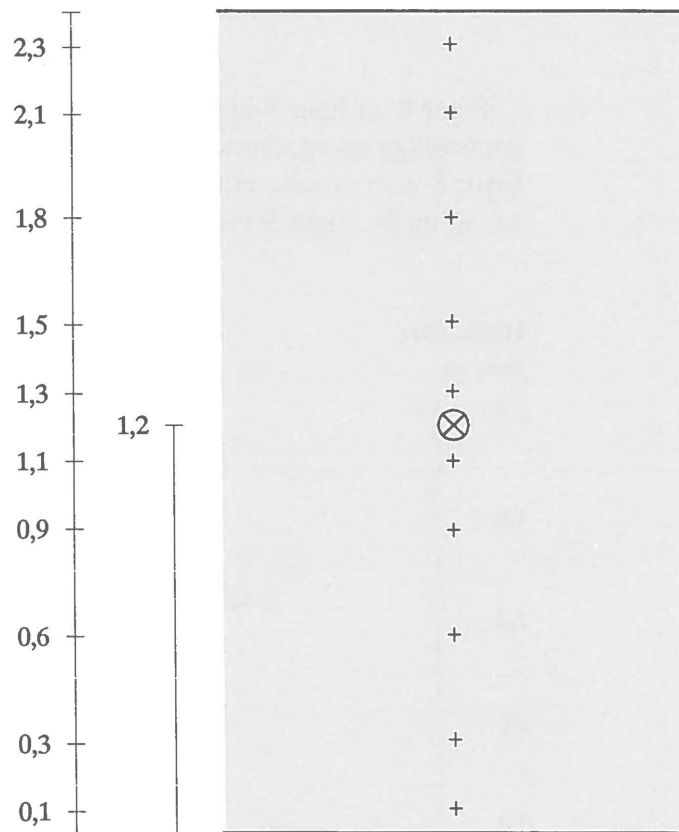
Undersøgelsen blev opdelt i tre delundersøgelser. I hver delundersøgelse blev fuldskalarummet tilført en konstant luftmængde pr. tidsenhed i ca. fire døgn. I delundersøgelse 3a blev rummet ventileret med $54 \text{ m}^3/\text{h}$. I delundersøgelse 3b blev rummet ventileret med $109 \text{ m}^3/\text{h}$ og i delundersøgelse 3c blev rummet ventileret med $218 \text{ m}^3/\text{h}$.

Placering af sporgaskilder

I hver af delundersøgelse anvendtes CO_2 - og PFT-sporgaskilder i samme antal og med samme placering, som ved undersøgelserne 1 og 2.

Målepunkter

Sporgaskoncentrationerne i rummet blev målt i 10 punkter, langs en lodret linie midt i rummet ved sporgaskilderne. Se figur 7. I hvert punkt blev såvel CO_2 -koncentrationen som PFT-koncentrationen målt. PFT-koncentrationen blev målt med to opsamlingsrør i hvert punkt. Endvidere målt sporgaskoncentrationerne i udsugningskanalen.



Figur 7. Lodret snit i fuldskalarum. Målepunkterne er placeret langs en lodret linie midt i rummet.

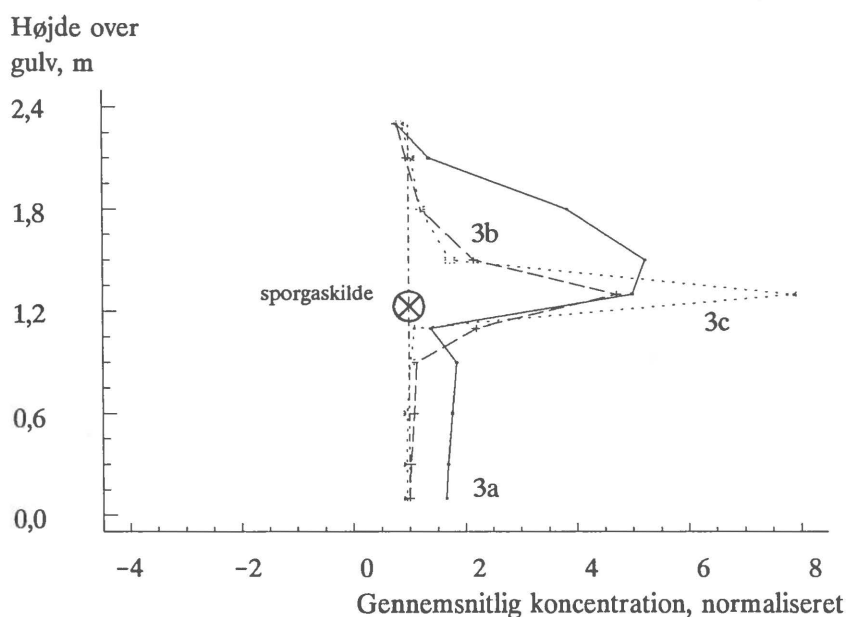
Resultater

Tabel 6 viser resultaterne for både PFT-målingerne og CO₂-målingerne for delundersøgelserne 3a, 3b og 3c. For hvert af målepunkterne er vist middelværdien af den målte sporgaskoncentration normaliseret efter middelværdien af den målte sporgaskoncentration i udsugningskanalen. Tallene angiver således forholdet mellem middelkoncentrationen i målepunktet og middelkoncentrationen i udsugningskanalen.

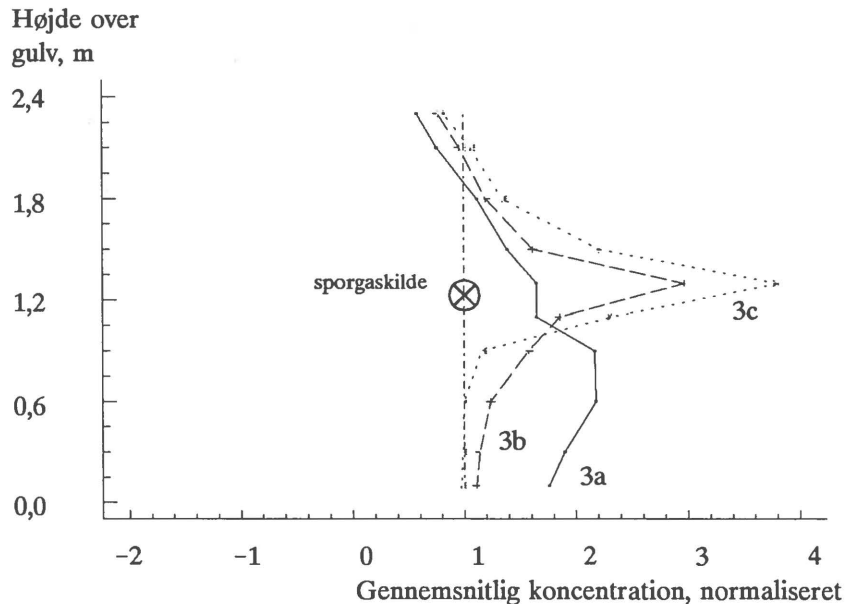
Tabel 6. Gennemsnitlige sporgaskoncentrationer, normaliseret efter middelkoncentrationen i udsugningskanalen.

Højde over gulv, m	PFT-måling Lufttilførsel			CO ₂ -måling Lufttilførsel		
	54 m ³ /h	109 m ³ /h	218 m ³ /h	54 m ³ /h	109 m ³ /h	218 m ³ /h
2,3	0,79	0,80	0,88	0,58	0,77	0,82
2,1	1,37	0,95	1,04	0,76	0,96	1,06
1,8	3,84	1,22	1,22	1,12	1,20	1,35
1,5	5,23	2,16	1,74	1,39	1,62	2,21
1,3	5,00	4,72	7,87	1,65	2,97	3,81
1,1	1,39	2,21	1,11	1,65	1,86	2,32
0,9	1,85	1,14	1,02	2,17	1,58	1,16
0,6	1,77	1,09	0,97	2,18	1,24	1,00
0,3	1,69	1,02	0,95	1,90	1,14	0,99
0,1	1,66	1,00	0,95	1,76	1,11	0,97

Figur 8 og figur 9 illustrerer tabel 6 i form af kurver af den gennemsnitlige sporgaskoncentration som funktion af højden over gulvet. Figur 8 viser resultaterne af PFT-målingerne for delundersøgelserne 3a, 3b og 3c. Figur 9 viser tilsvarende kurver for CO₂-målingerne.



Figur 8. PFT-måling. Gennemsnitlig sporgaskoncentration som funktion af højden over gulvet. Måling 3a = 54 m³/h, 3b = 109 m³/h, 3c = 218 m³/h.



Figur 9. CO_2 -måling. Gennemsnitlig sporgaskoncentration som funktion af højden over gulvet. Måling 3a = $54 \text{ m}^3/\text{h}$, 3b = $109 \text{ m}^3/\text{h}$, 3c = $218 \text{ m}^3/\text{h}$.

Temperaturmålinger

Under alle tre delundersøgelser blev indblæsningstemperatur, udsugningstemperatur samt overfladetemperatur på de indvendige overflader målt hvert femte minut. Målingerne blev foretaget i de samme punkter og på samme måde som beskrevet ved undersøgelse 1. Under delundersøgelse 3a blev temperaturerne målt i de første 17 timer. Under delundersøgelse 3b og 3c blev temperaturerne målt i hele måleperioden.

I den del af måleperioden under delundersøgelse 3a hvor temperaturerne er målt, varierede differensen mellem indblæsningsluftens og udsugningsluftens temperatur mellem $-0,35 \text{ }^\circ\text{C}$ og $+0,20 \text{ }^\circ\text{C}$. Den gennemsnitlige temperaturdifferens er beregnet til $0,16 \text{ }^\circ\text{C}$. Under delundersøgelse 3b varierede differensen mellem indblæsningsluftens og udsugningsluftens temperatur mellem $-0,40 \text{ }^\circ\text{C}$ og $+0,80 \text{ }^\circ\text{C}$, og den gennemsnitlige temperaturdifferens er beregnet til $0,33 \text{ }^\circ\text{C}$. Under delundersøgelse 3c varierede differensen mellem indblæsningsluftens og udsugningsluftens temperatur mellem $-0,40 \text{ }^\circ\text{C}$ og $+0,40 \text{ }^\circ\text{C}$. Den gennemsnitlige temperaturdifferens er beregnet til $0,22 \text{ }^\circ\text{C}$.

Målingerne af overfladetemperaturerne viste ved både delundersøgelse 3a og 3b en temperaturgradient på $0,17 \text{ }^\circ\text{C}/\text{m}$. Ved delundersøgelse 3c er temperaturgradienten beregnet til $0,12 \text{ }^\circ\text{C}/\text{m}$.

Undersøgelse 4: Måling af vertikal koncentrationsfordeling i afhængighed af placering af sporgaskilde

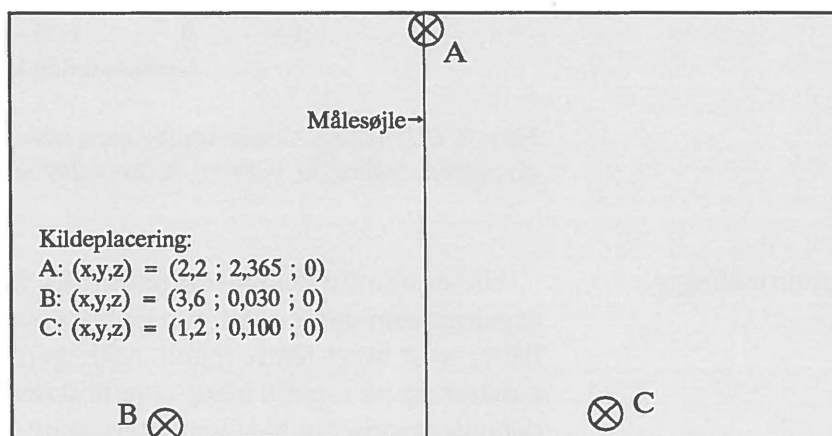
Formål

Formålet med undersøgelsen har været at undersøge om den lokale lufthastighed omkring sporgaskilden og kildens placering i rummet har indflydelse på koncentrationsfordelingen i rummet.

Fremgangsmåde

Placering af sporgaskilder

Tre forskellige PFT-sporgastyper er taget i anvendelse, anbragt tre forskellige steder i fuldskalarummet. Figur 10 viser kildernes placeringer.



Figur 10. Lodret snit i fuldskalarum. Placering af målepunkter og sporgaskilder.

Kildeplacering A er ved målesøjlen midt i rummet, se figur 7, hvor den maksimale lufthastighed i indblæsningsstrålen forekommer. Kildeplacering B er i rummet, hvor den maksimale lufthastighed i opholds-zonen forekommer. Kildeplacering C er i rummet, hvor meget lav lufthastighed forekommer. Målinger af lufthastigheder i fuldskalarummet er foretaget af AUC, og måleresultater er publiceret i [1].

Målepunkter

Antal og placering af målepunkter var de samme som i undersøgelse 3, se figur 7.

Fuldskalarummet blev ventileret med en konstant lufttilførsel på $109 \text{ m}^3/\text{h}$.

Da det ikke er muligt at gennemføre simultane målinger med tre forskellige placeringer af CO_2 -kilden, blev målingen med PFT-sporgas gennemført separat, efterfulgt af tre målinger med CO_2 -kilden placeret i henholdsvis punkt A, B og punkt C.

Måleperioden med PFT-sporgas var 101 h 20 min. Varigheden af de tre efterfølgende måleperioder med CO_2 -sporgas var henholdsvis 3 h 50 min, 16 h 20 min og 3 h 45 min.

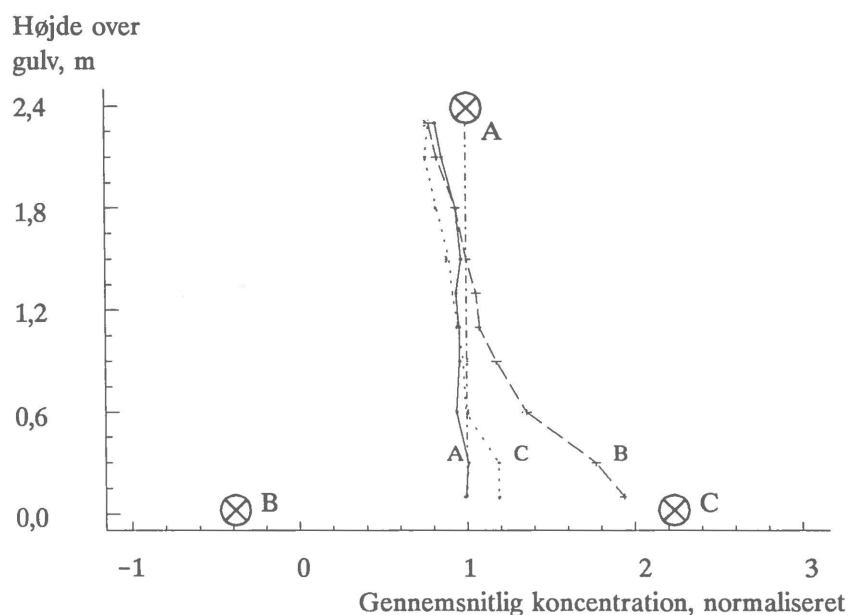
Resultater

På samme måde som ved de foregående undersøgelser er måleresultaterne i det følgende præsenteret ved den gennemsnitlige koncentration i det pågældende målepunkt normaliseret efter middelkoncentrationen i udsugningskanalen.

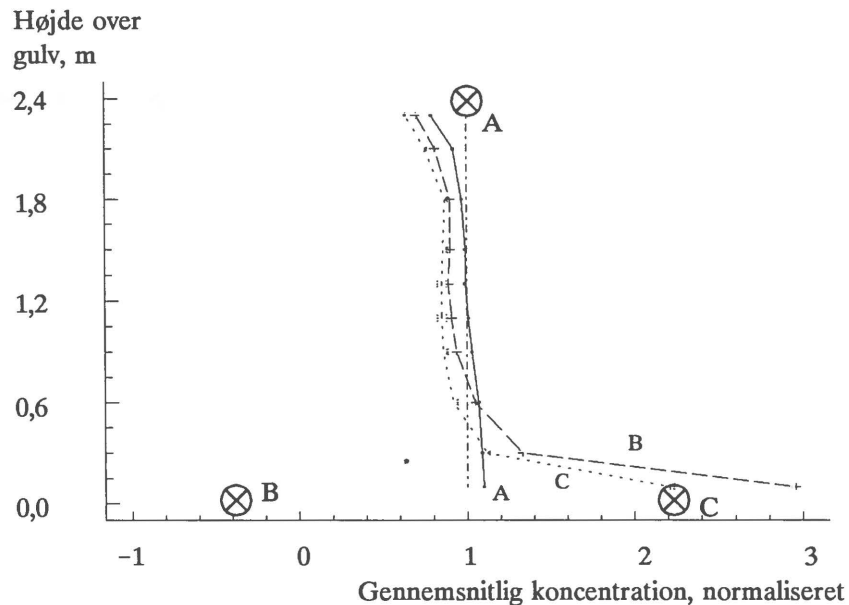
Tabel 7. Gennemsnitlige sporgaskoncentrationer, normaliseret efter middelkoncentrationen i udsugningskanalen. Vedrørende kildeplaceringer, se figur 10.

Højde over gulv, m	PFT-måling Kildeplacering			CO ₂ -måling Kildeplacering		
	A	B	C	A	B	C
2,3	0,82	0,78	0,78	0,79	0,70	0,64
2,1	0,86	0,83	0,76	0,92	0,81	0,75
1,8	0,94	0,94	0,83	0,97	0,90	0,87
1,5	0,97	1,00	0,90	0,99	0,90	0,86
1,3	0,94	1,06	0,92	0,99	0,89	0,85
1,1	0,96	1,08	0,95	1,01	0,91	0,85
0,9	0,96	1,18	0,98	1,03	0,94	0,86
0,6	0,94	1,36	0,99	1,07	1,05	0,92
0,3	1,01	1,77	1,19	1,09	1,33	1,12
0,1	0,99	1,94	1,19	1,10	2,96	2,21

Figur 11 og figur 12 illustrerer tabel 7 i form af kurver af den gennemsnitlige sporgaskoncentration som funktion af højden over gulvet. Figur 11 viser resultaterne af PFT-målingerne for kildeplacering A, B og C. Se figur 10. Figur 12 viser tilsvarende kurver for CO₂-målingerne.



Figur 11. PFT-måling. Kurverne angiver, for hver af kildeplaceringerne A, B og C, den gennemsnitlige sporgaskoncentration som funktion af højden over gulvet. Vedrørende kildeplaceringer, se figur 10.



Figur 12. CO₂-måling. Kurverne angiver, for hver af kildeplaceringerne A, B og C, den gennemsnitlige sporgaskoncentration som funktion af højden over gulvet. Vedrørende kildeplaceringer, se figur 10.

Temperaturmålinger

Under alle undersøgelserne målt temperaturen i indblæsningen og i udsugningen som tidligere beskrevet. Målingerne blev foretaget hvert femte minut.

Under PFT-målingen varierede temperaturdifferensen mellem indblæsningsluften og udsugningsluften mellem $-0,35$ °C og $+0,80$ °C. Den gennemsnitlige temperaturdifferens er beregnet til $0,17$ °C.

Varigheden af målingerne med CO₂-sporgas har været kortere end målingen med PFT-sporgas. Derfor er variationerne i temperaturdifferenserne mindre. Ved undersøgelsen med kildeplacering A varierede temperaturdifferensen mellem $0,10$ °C og $0,25$ °C, og den gennemsnitlige temperaturdifferens er beregnet til $0,20$ °C. Ved undersøgelsen med kildeplacering B varierede temperaturdifferensen mellem $-0,30$ °C og $0,20$ °C. Den gennemsnitlige temperaturdifferens er beregnet til $0,12$ °C. I den sidste undersøgelse med kilden placeret i punkt C varierede temperaturdifferensen mellem $-0,15$ °C og $0,20$ °C, og den gennemsnitlige temperaturdifferens er beregnet til $0,07$ °C.

Overfladetemperaturene i rummet blev ligeledes målt som tidligere beskrevet. Under PFT-målingen er temperaturgradienten i rummet beregnet til $0,10$ °C/m. Under de efterfølgende tre målinger med CO₂ som sporgas, er temperaturgradienterne beregnet til henholdsvis $0,07$ °C/m, $0,11$ °C/m og $0,12$ °C/m.

Diskussion

Konstant lufttilførsel

I undersøgelse 1 blev fuldskalarummet ventileret med en konstant lufttilførsel på 109 m³/h i ca. 4 døgn. Tre forskellige PFT-sporgastyper blev anvendt, og den gennemsnitlige sporgaskoncentration blev målt i 18 punkter i rummet og i ét punkt i udsugningskanalen. Koncentrationen af CO₂ blev målt i 10 af de ovennævnte punkter i rummet samt i udsugningskanalen. Doseringen af såvel de tre PFT-sporgastyper som af CO₂-sporgas skete i samme punkt midt i fuldskalarummet. Se tabel 3, figur 4 og figur 5.

Sammenhæng mellem sporgasmetoderne

En indbyrdes sammenligning af måleresultaterne af de tre PFT-sporgastyper viser en klar sammenhæng, se tabel 4. Når én sporgastype viser en høj sporgaskoncentration i et punkt, viser de to andre sporgastyper det samme. Undtaget er punkt 5 og punkt 11, hvor målingerne baseret på sporgastyperne PMCH og PDCH tydeligvis er fejlagtige. Variationen mellem de tre PFT-målinger i samme målepunkt er generelt mindre end 2 pct. Bestemmelse af den gennemsnitlige sporgaskoncentration i et rum er uafhængig af den anvendte PFT-sporgastype.

Koncentrationsforskelle i rummet

CO₂-målingen i undersøgelse 1 viser, at der optræder store koncentrationsforskelle i fuldskalarummet. Eksempelvis ses, at i punkt 8 er koncentrationen væsentlig højere end i udsugningskanalen, og i punkt 15 er koncentrationen væsentlig lavere. Den samme variation ses af PFT-målingen. Årsagen til at der måles høje koncentrationer i punkt 8 er, at punktet er placeret kun 10 cm under sporgaskilderne. Punkt 15 er placeret 1,8 m over gulvet tæt ved endevæggen modsat indblæsningen, således at luften omkring punktet i overvejende grad er påvirket af indblæsningsluften.

Med undtagelse af punkterne 2, 11 og 14 viser undersøgelse 1 en udmærket overensstemmelse mellem PFT-målingerne og CO₂-målingen med en afvigelse på ± 10 pct. Målepunkterne 2 og 14 er placeret tæt på sporgaskilderne, og den store afvigelse i disse punkter skyldes snarere forskelle i sporgassens udbredelse fra de to typer af kilder end en egentlig forskel mellem de to målemetoder.

Af tabel 4 ses, at der er store forskelle på, hvor meget sporgaskoncentrationen i de enkelte målepunkter varierer i måleperioden. I punkt 2 og punkt 8, som er henholdsvis 10 cm under og 60 cm over sporgaskilden, ses at koncentrationen i perioder bliver omtrent fire gange så høj som i udsugningskanalen. Den procentvise spredning på middelkoncentrationen i punkterne er over 30 pct. Modsætningen er fx punkterne 9 og 15, som begge ligger ved endevæggen modsat indblæsningen.

Varierende lufttilførsel

I undersøgelse 2 blev ventilationsluftmængden til fuldskalarummet varieret. Luftmængden blev varieret i tre niveauer, og såvel niveauerne som varigheden af hvert niveau blev valgt således, at rummet i middel tilførtes en luftmængde på 109 m³/h, som det var tilfældet i undersøgelse 1. Der blev målt i ca. 4 døgn. Antal og placering af sporgaskilder samt antal og placering af målepunkter var som i undersøgelse 1.

PFT-målingerne viser generelt en lidt højere koncentration i de enkelte målepunkter, når lufttilførslen til rummet er varierende, fremfor når luften tilføres konstant, se tabel 5. Beregnes den gennemsnitlige specifikke lufttilførsel på grundlag af den gennemsnitlige sporgas-

koncentration, fås altså en undervurdering af den gennemsnitlige specifikke lufttilførsel. Dette fænomen er behandlet i afsnittet om usikkerhed og fejlanalyse.

Kontinuerte
CO₂-målinger

CO₂-måleresultaterne, som er opnået ved kontinuerte målinger, viser en udmærket overensstemmelse med måleresultaterne som blev opnået i undersøgelse 1. Målepunkterne 2 og 6 viser dog væsentligt højere koncentrationsniveau ved denne undersøgelse, sammenlignet med de tilsvarende punkter i undersøgelse 1. Årsagen er, at strømningsforholdene i fuldskalarummet ændrer sig, når ventilationsluftmængden ændres. Målingerne, som er gennemført i undersøgelse 3, viser, at koncentrationsniveauet er højt ved gulvet, når den tilførte ventilationsluftmængde er lille. Se figur 9, kurven markeret 3a. Målepunkterne 2 og 6 er placeret ved gulvet.

Strømningsbilledet

Idet strømningsbilledet i fuldskalarummet ændrer sig, når ventilationsluftmængden ændres, vil det ikke være muligt at opnå samme resultat i denne undersøgelse og undersøgelse 1 i alle punkter, på trods af at den gennemsnitlige tilførte luftmængde er den samme, 109 m³/h, i begge undersøgelser. Specielt vil målepunkter beliggende nær gulvet udvise en forskel i form af et højere koncentrationsniveau ved mindre lufttilførsel.

Vertikal koncentrations-
fordeling

I undersøgelse 3, som består af 3 delundersøgelser, betegnet 3a, 3b og 3c, er det undersøgt, om PFT-metodens opsamlingsrør er i stand til at registrere vertikale koncentrationsforskelle i fuldskalarummet. I hver delundersøgelse, som varede ca. 4 døgn, blev rummet tilført en konstant luftmængde. Tre forskellige luftmængder blev undersøgt. Sporgaskoncentrationen blev registreret i 10 målepunkter anbragt i varierende højder over gulvet i en lodret linie midt i rummet. Sporgasdoseringen var placeret midt på denne lodrette linie, og der blev anvendt samme antal og samme sporgastyper som ved undersøgelserne 1 og 2. Se figur 7.

Luftens strømning i rummet i afhængighed af den tilførte ventilationsluftmængde, og med samme indblæsningsarmatur, som anvendes i disse undersøgelser, har tidligere været studeret i detaljer, [1].

I delundersøgelse 3a blev rummet tilført en ventilationsluftmængde på 54 m³/h. I [1] er det vist, at indblæsningsstrålens kastelængde er omkring 4/5 af rummets længde, og at den maksimale lufthastighed i opholdszonen er under 0,1 m/s. Af kurven markeret 3a i figur 9, som viser resultatet af CO₂-målingerne, ses, at indblæsningsstrålen kun når frem i den øverste del af rummet, og at tilbagestrømning af luft sker i den øverste del af opholdszonen. I den nederste del af rummet er lufthastighederne små, og der vil være en lille luftudskiftning. Derfor opstår der her et højt koncentrationsniveau sammenlignet med koncentrationen i udsugningskanalen.

I delundersøgelse 3b var den tilførte ventilationsluftmængde 109 m³/h. I følge [1] vil kastelængden af indblæsningsstrålen være tilnærmelsesvis lig med summen af rummets længde og rummets højde. Den maksimale lufthastighed som forekommer i opholdszonen vil være 0,16 m/s. Denne lufthastighed vil netop kunne accepteres fx i et kontorlokale.

Recirkulerende
strømning i rummet

Kurven markeret 3b i figur 9 viser, at indblæsningsstrålen når gulvniveau, og at der opstår en recirkulerende strømning langs gulvet. Koncentrationsniveauet i den recirkulerende strømning er af samme størrelsesorden som i udsugningsluften. Det høje koncentrationsni-

veau i nærheden af kilden skyldes, at lufthastighederne på dette sted er små og luftudskiftningen lille. Kurven viser, at på trods af at den tilførte luftmængde er fordoblet i forhold til den tilførte luftmængde i delundersøgelse 3a, og på trods af at det gennemsnitlige koncentrationsniveau i rummet er faldet, kan der fortsat opstå høje koncentrationsniveauer i rummet.

Høje lufthastigheder

I delundersøgelse 3c er den tilførte luftmængde øget til 218 m³/h, og den maksimale lufthastighed i opholdszonen bliver ca. 0,33 m/s, som er over komfortgrænsen for opholdsrum. Kurven markeret 3c i figur 9 har samme principielle forløb som kurven markeret 3b. Den recirkulerende strømning langs gulvet er mere udtalt.

Sammenlignes de her beskrevne måleresultater med måleresultaterne, som blev opnået med PFT-metoden, ses, at ved delundersøgelserne 3b og 3c er der en god overensstemmelse. Koncentrationsprofilerne i figur 8 og figur 9 har samme forløb, og i store dele af rummet er afvigelsen mindre end 10-15 pct. Kun i områder i umiddelbar nærhed af sporgaskilderne er der afvigelser, som kan være begrundet i forskellen i princippet for sporgasafgivelse.

Sporgasafgivelse

CO₂-sporgassen afgives fra en bordtennisbold med 6 stk. ø1 mm huller. Det betyder at sporgassen har en begyndeshastighed, der medvirker til spredning af gassen i rumluften. Fra PFT-sporgaskilderne afgives sporgassen ved diffusion fra en siliconeprop. Sporgaskilderne er placeret i et område i rummet hvor lufthastigheden og luftudskiftningen er lille. Koncentrationsniveauet kan derfor blive højt nær kilden, inden opblanding med den øvrige luft i rummet. Kurverne i figur 8 og figur 9 indikerer, at CO₂-sporgassen spredes til et større område nær kilden end PFT-sporgassen, og at koncentrationsniveauet nær kilderne er størst af PFT-sporgas.

Overensstemmelsen mellem de to målemetoder er knap så god ved delundersøgelse 3a. I området under kilderne, dvs. op til 1,2 m over gulvet, er afvigelsen af samme størrelsesorden som ved delundersøgelserne 3b og 3c, men over 1,2 m ses store afvigelser mellem de to målemetoder.

Sporgassens densitet

En mulig årsag til uoverensstemmelsen kan være at CO₂-sporgassen ikke har samme densitet som rumluften. Sporgassen består af CO₂, som opblandes med He. En lille densitetsforskel vil kunne medføre, at sporgassen strømmer mod gulvet, og at opblandingen med luften i gulvniveau bliver mindre. Dette fænomen vil først og fremmest optræde og have størst betydning ved små ventilationsluftmængder, som netop er tilfældet ved delundersøgelse 3a.

Lufthastighed omkring sporgaskilden

I undersøgelse 4 er det undersøgt i hvor høj grad placeringen af sporgaskilden og den lokale lufthastighed omkring sporgaskilden influerer på koncentrationsfordelingen i rummet. Tre forskellige typer PFT-sporgaskilder blev anvendt, anbragt tre forskellige steder i rummet. Antal og placering af målepunkter var som ved undersøgelse 3 og 4, dvs. 10 punkter langs en lodret linie midt i rummet. Rummet blev ventileret med en konstant luftmængde på 109 m³/h.

Figur 11 og figur 12 viser, at ved kildeplacering A, som er midt i rummet i indblæsningsstrålen, er der en god overensstemmelse mellem de to målemetoder. Kurverne, markeret A, viser, at sporgasserne blandes godt op med luften i indblæsningsstrålen. Dette medfører en ensformig fordeling af sporgassen i rummet.

Rummets øvre del

Rummets nedre del

Sammenlignes de to målemetoder ved en kildeplacering i punkt B eller punkt C, er der en god overensstemmelse i den øverste del af rummet, mens der er forskelle i den nederste del af rummet, hvor kilderne er placeret. Som nævnt under diskussionen af resultaterne af undersøgelse 3, kan en densitetsforskel mellem CO₂-sporgassen og rumluften medføre, at sporgassen forbliver ved gulvet, hvor den er doseret. Dette vil bevirke, at der måles høje koncentrationer i gulvniveau, som hurtigt aftager med stigende afstand til gulvet.

Resultaterne af undersøgelserne, som her er beskrevet, er opnået ved målinger i et fuldskalarum i laboratoriet. Måleperioden af de enkelte undersøgelser har været ca. 4 døgn. Undtaget undersøgelse 2, hvor lufttilførslen til rummet blev varieret, har forholdene under målingerne været stationære, og rummet har været aflukket og ubenyttet. Derved har det blandt andet været muligt at vise, at PFT-metodens opsamlingsrør er i stand til at registrere koncentrationsforskelle i et rum. I praksis vil PFT-metoden primært blive benyttet i forbindelse med undersøgelser i bygninger i brug, fx beboede boliger. Derved vil mulighederne for at registrere små koncentrationsforskelle i det enkelte rum blive mindre gunstige. Registrering af koncentrationsforskelle *mellem* rum vil derimod være mulig, hvilket jo netop kendetegner PFT-metoden, og undersøgelserne her har vist, at selv små koncentrationsforskelle vil blive registreret.

Sammenfatning

Målingerne i undersøgelse 1, med anvendelse af tre forskellige typer PFT-sporgaskilder, viste indbyrdes god overensstemmelse i koncentrationsniveauet i forskellige målepunkter. Bestemmelse af den gennemsnitlige sporgaskoncentration i et rum er uafhængig af den anvendte PFT-sporgastype.

Placeringen af kilder og rør er afgørende

Undersøgelsen viste, at bestemmelsen af den gennemsnitlige sporgaskoncentration afhænger af placeringen af målepunkter i rummet. Målepunkter tæt på sporgaskilden vil medføre måling af høje sporgaskoncentrationer, og omvendt vil målepunkter placeret i nærheden af luftindtag medføre registrering af lave sporgaskoncentrationer. Målepunkter bør placeres i områder, hvor luften forlader rummet eller jævnt fordelt i hele rummet.

Målingerne har vist, at i nogle punkter kan der forekomme store variationer i sporgaskoncentrationen. Således er ikke blot placeringen af målepunkter kritisk. Det samme gælder placeringen af sporgaskilder.

Den mest ensartede fordeling af sporgas opnås ved at placere sporgaskilden i områder af rummet, hvor lufthastigheden er høj og luftudskiftningen stor, da sporgassen derved opblandes i den strømmende luft og hurtigt transporteres rundt i rummet.

Strømningsbilledet i rummet ændrer sig, når ventilationsluftmængden ændres. Derfor er det ikke muligt at opnå samme resultater i en undersøgelse hvor lufttilførslen er konstant og en undersøgelse hvor lufttilførslen varierer, selv om den gennemsnitlige ventilationsluftmængde til rummet er den samme. De mest ensartede koncentrationsforhold opnås, når lufttilførslen er stor.

Summary

SBI-report 227: Passive tracer gas method for ventilation investigations. Description and analysis of the PFT-method.

The report concerns the *PFT*-method, which is a *multiple tracer gas method* based on the *constant emission rate principle* and so-called *passive sampling technique*.

- PFT stands for *Perfluorocarbon Tracer*. The tracer gases used are perfluorocarbons, which are organic compounds of the perfluoro-alkylcycloalkane family.
- The method is called a multiple tracer gas method because it is possible to use up to three different types of tracer gas simultaneously.
- The constant emission rate principle means that the tracer gas is dosed continuously and with a known quantity per unit of time.
- Passive sampling technique is the name given to a method in which the measuring equipment used, usually field measuring equipment, functions without use of, for example, pumps or external energy supply.

Brookhaven National
Laboratory

At the beginning of the 1980s the American research centre Brookhaven National Laboratory, BNL, published research results concerning the development of a tracer gas method based on the use of passive tracer gas sources and passive samplers. BNL had also developed a variety of special components in a gas-chromatograph and a special analysis procedure. In 1986 BNL and SBI began collaborating on testing the field measuring equipment to gain sufficient experience with it for an evaluation of the suitability of the method and the equipment for broad ventilation investigations in the field.

The collaboration with BNL and the practical testing have shown that the field measuring equipment is simple and uncomplicated to use in practice and that the method is suitable for determining total specific air supplies in buildings in use. The method also offers the possibility of using several different types of tracer gas simultaneously. It is thus possible to determine not only the building's total specific air supply, but also the specific air supply to the various rooms and air exchange between the rooms. However, this use of the method was not sufficiently tested in practice in connection with the collaboration with BNL.

SBI has procured the
necessary equipment

In 1988 SBI procured the necessary laboratory and field measuring equipment in order to use the method for field investigations in a large number of houses and to test its advantages, disadvantages, and limitations, and assess its suitability for multi-zone measurements and new applications.

The stationary laboratory equipment acquired by SBI has been designed and assembled by Princeton University, Princeton, New Jersey, and John Booker & Co., Austin, Texas. The company John Booker & Co. specializes in the construction of special gas-chromatographic

	<p>apparatus. The apparatus is based on BNL's work. The field measuring equipment, i.e. the tracer gas sources and samplers, is made at BNL, and SBI's equipment came from there.</p>
Multi-zone model	<p>This report starts with a presentation of the multi-zone model used as the basis for the PFT-method's calculation of volume flows. It presents the model by means of an example with a 2-zone situation and shows the equation system for calculation of the volume flows, both between the zones and between each zone and outside, i.e. the zone's infiltration and exfiltration.</p> <p>The PFT-method's equipment comprises field measuring equipment and stationary laboratory equipment. In the field, tracer gas sources and passive samplers are used, while in the laboratory, a gas-chromatograph is used for analysis of the passive samplers.</p>
Passive tracer gas sources	<p>The tracer gas sources are small metal canisters sealed with a silicone plug through which the tracer gas diffuses. At constant temperature the tracer gas sources emit a constant quantity of tracer gas. The rate of emission depends on the temperature, and the temperature dependence is explained in the report.</p>
Passive samplers	<p>The passive samplers consist of a small glass tube containing an adsorbent related to active carbon. The collection of tracer gas in the room air takes place by adsorption.</p>
Gas chromatography	<p>In the laboratory, the adsorption tubes are analysed by means of thermal desorption and gaschromatography. The apparatus has been specially designed for analysis of perfluorocarbon, and a short description is given in the report of the analysis procedure and the function of some of the components in the laboratory equipment. The main features of the procedure for calibrating the gas-chromatograph are also described.</p>
Error	<p>The PFT-method is suitable for field measurements, including both single measurements and broad field investigations. The report gives the principles for use of the method in practice.</p> <p>An important part of any measuring method is evaluation of instrument errors and measuring errors. These errors are treated in the report, and an explanation is given of the importance of the so-called <i>optimal condition number</i>. <i>Optimal condition number</i> is a mathematical quantity that is suitable for evaluating the stability of the equation system for calculation of volume flows and thus also the error on the calculated flows.</p>
Investigation of the method's equipment	<p>A number of investigations and tests of the PFT-method's equipment have been carried out at SBI's laboratory to check the field measuring equipment and establish procedures for routine inspection of the laboratory apparatus. The gas-chromatograph is a complicated piece of equipment, but as a result of the investigations and tests, an optimally functioning system has been achieved and more knowledge about the possibilities and limitations of the laboratory equipment has been gained. The investigations and tests are described in a separate, supplementary report, which can be obtained from the Energy and Indoor Climate Division, SBI. The report is in Danish.</p>
Supplementary report	<p>To find out more about the characteristics of the PFT-method in connection with field measurements using several different tracer gases simultaneously, a series of investigations has been carried out in collaboration with University of Aalborg, AUC, Department of Building Technology & Structural Engineering.</p>
Investigations of the method's characteristics	

The investigations were carried out in a full-scale room in the laboratory at AUC, and measurements were performed at the same time with traditional tracer gas method.

The report describes the procedure used in the investigations and discusses the results.

Placing of sources and samplers is decisive

In general, the measurements show that the placing of tracer gas sources and adsorption tubes in a room or building can have a decisive effect on the measuring result. The results of the measurements in AUC's laboratory should be read together with the instructions given in the section describing the principles for use of the method in practice. This will reduce the risk of unsuitable placing of the equipment. However, it must still be recommended that the field measuring equipment be set up by people who are familiar with the PFT-technique.

The description of the method's equipment and how it functions, together with the results of the laboratory investigations, shows that it is difficult to make a simple instruction for use of the PFT-method in the field.

Measurement form
Result data sheet

In connection with the project a form has been designed for filling out in connection with a measurement. The form ensures that all relevant parameters are considered and/or recorded. A result data sheet has also been designed giving all information about both the measuring circumstances and the results of the measurements. The result data sheet gives the *optimal condition number*, thereby enabling evaluation of the error on the measurement.

The measurement form is shown in appendix 1 and an example of a result data sheet in appendix 2.

Litteratur

- [1] Skovgaard, M., Hyldgaard, C. E. og Nielsen, P. V.
High and Low Reynolds Number Measurements in a Room with an Impinging Isothermal Jet.
Proceedings of the International Conference ROOMVENT '90, Oslo, June 1990.
- [2] Säteri, Jorma O. (Ed.)
The development of the PFT-method in the Nordic Countries. A State-of-the-art Report.
D9:1991. Byggeforskningsrådet, Stockholm, Sverige.
- [3] Dietz, R. N.
Perfluorocarbon Tracer Technology.
Presented at Ispra Courses Regional and Long-Range Transport of Air Pollution. September 15-19, 1986. Ispra (Varese) Italy.
- [4] D'Ottavio, Ted W., Senum, Gunnar I., Dietz, Russell N.
Error Analysis Techniques for Perfluorocarbon Tracer Derived Multizone Ventilation Rates.
Building and Environment, Vol. 23, No. 3, pp. 187-194, 1988.
- [5] Leaderer, Brian P., Schaap, Luc, Dietz, Russell N.
Evaluation of the Perfluorocarbon Tracer Technique for Determining Infiltration Rates in Residences.
Environmental Science & Technology, Vol. 19, December 1985.
- [6] Bergsøe, Niels C.
SBI-rapport 213: Undersøgelse af ventilationsforhold i nyere boliger. Luftskifte · Luftfugtighed · Organiske gasser og dampe. 1991.
- [7] Heiselberg, P., Bergsøe, Niels C.
Measurements of Contaminant Dispersion in Ventilated Rooms by a Passive Tracer Gas Technique.
Proceedings of International Symposium on Room Air Convection and Ventilation Effectiveness, ISRACVE.
Tokyo, July 1992. In print.

Appendiks 1

Måleskema til PFT-målinger

Skemaet er nedfotograferet fra A4-format.

PFT-measurement

Project-identification: _____ Building: _____ Mechanical air supply
Start date (day/month/year): _____ Start time (hour, min): _____ Mechanical extraction
Stop date (day/month/year): _____ Stop time (hour, min): _____ Natural ventilation
1 storey
2 storey
Basement
Your name: _____ Fireplace

Zone 1

Zoneid.: _____	Number of sources: _____	Yellow <input type="checkbox"/>
Avg. temp.: _____ °C	Volume: _____ m ³	Red <input type="checkbox"/>
		Orange <input type="checkbox"/>
Tube no.	Location	Source location
_____	_____	_____
_____	_____	_____
_____	_____	_____
_____	_____	_____
_____	_____	_____
_____	_____	_____

Zone 2

Zoneid.: _____	Number of sources: _____	Yellow <input type="checkbox"/>
Avg. temp.: _____ °C	Volume: _____ m ³	Red <input type="checkbox"/>
		Orange <input type="checkbox"/>
Tube no.	Location	Source location
_____	_____	_____
_____	_____	_____
_____	_____	_____
_____	_____	_____
_____	_____	_____
_____	_____	_____

Zone 3

Zoneid.: _____	Number of sources: _____	Yellow <input type="checkbox"/>
Avg. temp.: _____ °C	Volume: _____ m ³	Red <input type="checkbox"/>
		Orange <input type="checkbox"/>
Tube no.	Location	Source location
_____	_____	_____
_____	_____	_____
_____	_____	_____
_____	_____	_____
_____	_____	_____
_____	_____	_____

Appendiks 2

Resultatskema, eksempel

Skemaet er nedfotograferet fra A4-format.

PFT-measurement

Building : Fictive building Date: 16.07.92
 Project : Information
 Emitter file: SOURCES.EMT Start: 14.02.89 at 21:00 GC analysis: 16.03.89
 Input file : ANALYSIS.CAT End: 22.02.89 at 09:30 # Hours: 180.5

Results

Building Infiltration Rate: 133.3 m³/h, (12.7) [10%]
 Building Exchange Rate : 0.74 ACH (0.07)

Zone	Infiltration			Exfiltration			Total Flow		
	(m ³ /h)	SD	%SD	(m ³ /h)	SD	%SD	(m ³ /h)	SD	%SD
1	77.6	12.0	[15]	91.9	14.4	[16]	96.8	14.8	[15]
2	36.5	5.8	[16]	31.1	6.2	[20]	44.4	7.0	[16]
3	19.2	2.9	[15]	10.3	3.0	[29]	21.9	3.3	[15]

Interzone flow				Interzone flow			
Zone	(m ³ /h)	SD	%SD	Zone	(m ³ /h)	SD	%SD
1 to 2	4.0	0.9	[23]	2 to 1	11.5	2.6	[23]
2 to 3	1.8	0.4	[23]	3 to 2	3.9	0.9	[23]
1 to 3	0.8	0.2	[24]	3 to 1	7.7	1.8	[23]

GC-analysis

Zone	Tube	Measured Volume (pl)		
		PMCP	PMCH	PDCH
1	1234	59.5	5.5	3.8
1	5678	62.2	5.2	3.9
1	9012	58.7	5.6	3.7
2	3456	5.5	41.5	4.1
2	7890	5.9	45.3	3.9
3	2345	2.9	3.9	43.4
3	6789	2.7	3.6	40.5
blk	8901	0.1	0.1	0.1

Zone	Type	Average Zone Concentration (pl/l)					
		PMCP	%SD	PMCH	%SD	PDCH	%SD
1	PMCP	36.2	[3]	3.5	[4]	2.7	[3]
2	PMCH	3.4	[5]	28.1	[6]	2.8	[4]
3	PDCH	1.7	[5]	2.4	[6]	29.4	[5]

Zone and emitter data					Emission Rates			
Zone	Zoneidentification	Volume (m ³)	Type	Number	Ref. rate (nl/h)	Purity	Temp (C)	Est. rate (nl/h)
1	Living rooms	100	PMCP	2	3960	1.00	22.0	3455
2	Master bedroom	50	PMCH	1	1470	1.00	21.0	1225
3	Bedroom	30	PDCH	1	798	1.00	20.0	635

Notes:

Uncert. of GC = 10 %, uncert. of mixing = 5 %, uncert. of adsorbers = 2 %, uncert. of emitters = 10 %
 Rack factors: PMCP: 0.97 PMCH: 0.98 PDCH: 0.99 Rack factors are not included in measured volumes.
 Uncert. of conc. matrix = 0.115 Uncert. of flow matrix = 0.138 Condition nr. of conc. matrix = 1.03

Appendiks 3

Generelt ligningssystem på matrixform

I dette afsnit vises i uforkortet form såvel matricerne, som beskriver ligningssystemet for sporstofbalanceligningerne, som matricerne, som beskriver de kombinerede sporstofbalanceligninger og luftbalanceligninger. Formelnumrene henviser til de tilsvarende formler i rapporten.

Indledningsvis resumeres, at det beregningsmæssige grundlag for ventilationstekniske målinger ved hjælp af sporgasteknik er stofbalanceligningen. I dens simpleste form, gældende for konstant sporgaskoncentration, haves

$$n = \frac{m}{(c \cdot V)} \quad (1)$$

hvor

n = specifik lufttilførsel i l/s pr. m^3 rumvolumen

m = tilført sporgasmængde i l/s

c = sporgaskoncentration i l sporgas pr. l rumluft

V = rumvolumen i m^3

Ved simultan anvendelse af flere forskellige sporgastyper kan en bygning opdeles i et tilsvarende antal zoner, som forsynes med hver sin sporgastype. Foretages en registrering i hver enkelt zone af rumluftens indhold af hver enkelt sporgastype, kan der for hver zone opstilles et antal ligninger, som udtrykker en sporstofbalance. Antallet af ligninger vil svare til antallet af anvendte sporgastyper. Ved luftbalancebetragtninger kan der opstilles et antal ligninger, som udtrykker udelufttilførslen til hver enkelt zone, infiltrationen. Antallet af ligninger vil svare til antallet af zoner.

Formel (1) kan omformes til:

$$c \cdot (n \cdot V) = m$$

Indføres symbolet q for volumenstrømmen ($n \cdot V$) fås:

$$c \cdot q = m \quad (2)$$

I rapportens afsnit om formelgrundlaget for PFT-metoden er, med en 2-zone situation som eksempel, vist opstillingen af ligningssystemet for sporstofbalanceligningerne. Ligningssystemet kan opstilles på matrixform, og i det generelle tilfælde med X zoner fås:

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1X} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2X} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{X1} & c_{X2} & \dots & c_{XX} \end{bmatrix}$$

$$\cdot \begin{bmatrix} q_{1-1} & -q_{1-2} & \dots & -q_{1-X} \\ -q_{2-1} & q_{2-2} & \dots & -q_{2-X} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ -q_{X-1} & -q_{X-2} & \dots & q_{X-X} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & m_X \end{bmatrix}$$

hvor

c_{ij} = konc. af sporgastype i i zone j i l sporgas pr. l rumluft

m_i = tilført sporgasmængde i zone i i l/s

q_{i-j} = luftoverføring fra zone i til zone j i l/s

Desuden er

q_{i-i} = den totale tilførte luftmængde til zone i i l/s

Ovenstående matricer kan kombineres luftbalanceligningerne, som ligeledes er anført i rapportens afsnit om formelgrundlaget for PFT-metoden og der fås:

$$\begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 0 & c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1X} \\ 0 & c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2X} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & c_{X1} & c_{X2} & \dots & c_{XX} \end{bmatrix}$$

$$\cdot \begin{bmatrix} q_{0-0} & q_{0-1} & q_{0-2} & \dots & q_{0-X} \\ q_{1-0} & q_{1-1} & -q_{1-2} & \dots & -q_{1-X} \\ q_{2-0} & -q_{2-1} & q_{2-2} & \dots & -q_{2-X} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ q_{X-0} & -q_{X-1} & -q_{X-2} & \dots & q_{X-X} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ m_1 & m_1 & 0 & \dots & 0 \\ m_2 & 0 & m_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ m_X & 0 & 0 & \dots & m_X \end{bmatrix}$$

hvor

q_{i-0} = luftoverføring fra zone i til ude, dvs. exfiltration i l/s

q_{0-i} = luftoverføring fra ude til zone i , dvs. infiltration i l/s

q_{0-0} = total infiltration til bygningen i l/s

I matrixnotation kan ligningsystemet skrives:

$$\mathbf{C} \cdot \mathbf{Q} = \mathbf{M} \tag{5}$$

Appendiks 4

Optimal condition number

I forbindelse med vurdering af resultaterne af en flerzone-måling med PFT-metoden, er det nødvendigt at kunne vurdere, i hvor høj grad metodens forudsætninger har været opfyldt under målingen.

Et eksempel kunne være, at der under en flerzone-måling har fundet så betydelige luftudvekslinger sted mellem zonerne, at sporgaskoncentrationen er præcis den samme i alle zonerne. Koncentrationsmatricen C , se ligningssystemet (5) i rapporten, vil da indeholde flere rækker eller flere søjler, der er ens. I tilfælde af at mindst to rækker eller mindst to søjler er ens, vil determinanten af C være 0. Ligningssystemet kaldes singulært, og der findes i dette tilfælde ingen entydig løsning.

I praksis er det højst usandsynligt, at to rækker eller to søjler i C er helt ens, altså at sporgaskoncentrationen er præcis den samme i to eller flere zoner. Men ved måling i en bygning hvor adskillelsen mellem to zoner er meget svag, kan en betydelig luftudveksling mellem zonerne medføre, at der i begge zoner optræder omtrent den samme sporgaskoncentration af begge sporgastyper. Derved vil determinanten af C være tæt ved 0, og en lille ændring af én af de målte sporgaskoncentrationer vil medføre store ændringer i de beregnede volumenstrømme.

Determinanten af koncentrationsmatricen C kan således give en indikation af stabiliteten af ligningssystemet og dermed af usikkerheden på bestemmelsen af volumenstrømmene. Indikationen vil imidlertid ikke være entydig. Fx vil en koncentrationsmatrice, hvis elementer indeholder små værdier, have en determinant tæt ved 0, uafhængig af ligningssystemets stabilitet. For at opnå et udtryk, som er uafhængig af elementernes størrelse, defineres det såkaldte *optimal condition number* for koncentrationsmatricen.

Indledningsvis defineres for en vilkårlig, kvadratisk matrix A

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{N1} & a_{N2} & \dots & a_{NN} \end{bmatrix}$$

følgende regneregler:

$$\text{For en række i } \mathbf{A} \text{ gælder: } \|A_i\| = \left[\sum_{j=1}^N a_{ij}^2 \right]^{1/2}$$

$$\text{For hele matricen } \mathbf{A} \text{ gælder: } \|\mathbf{A}\| = \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij}^2 \right]^{1/2}$$

Efter ovenstående regneregler dannes diagonalmatricen \mathbf{D} ud fra koncentrationsmatricen \mathbf{C} :

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\|C_1\|} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\|C_2\|} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{\|C_x\|} \end{bmatrix}$$

hvorefter *optimal condition number* af koncentrationsmatricen \mathbf{C} defineres ved:

$$K(\mathbf{C}) = \|\mathbf{DC}\| \ \|(\mathbf{DC})^{-1}\|$$

Rapporten handler om PFT-metoden, som er en multi-sporgasmetode baseret på passiv opsamlingsteknik. I rapporten redegøres for metodens beregningsgrundlag; måleudstyret og dets anvendelse beskrives, og der vises resultater fra en række laboratorieundersøgelser. Rapporten henvender sig til ventilations- og indeklimateknikere, som inden for det byggetekniske og sundhedsfaglige område er beskæftiget med undersøgelser af bygningers ventilationsforhold blandt andet ved hjælp af sporgasteknik.

