



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



Rapport

R44 :1991

**Mätning av luftflöden med
spårgas**

Jan-Bertil Mattson

V-HUSETS BIBLIOTEK, LTH



15000

400135551

Byggforskningsrådet

MÄTNING AV LUFTFLÖDEN MED SPÅRGAS

Jan-Bertil Mattson

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 880587-9 från Statens råd för byggnadsforskning till Institutionen för Byggnadskonstruktionslära, Lunds Tekniska Högskola.

REFERAT

Rapporten beskriver en metod för spårgasmätning, där byggnaden och dess ventilationssystem beskrivs med en multicellmodell, och luftflöden identifieras med kvadratisk programmering. Metoden används för samtidig bestämning i varje rum av tillufts-, frånlufts- och överluftsflöden samt infiltration och exfiltration. Dessutom erhålles ventilationssystemets återluftsföring samt avlufts- och uteluftsflöden.

För att praktiskt pröva metoden genomfördes mätningar i experimentbyggnaden Minilab. Experimenten omfattade som mest sju rum, varvid ytterligare två celler utgjordes av huvudkanalerna för tilluft och frånluft. Experimenten genomfördes för såväl en del av som för hela byggnaden och ventilationssystemet samt både med och utan återluft. För samtliga experiment kunde luftflöden identifieras och noggrannheten i skattningarna bedömas efter olika kriterier. Dels jämförs luftflöden från spårgasmätningar och mätflänsar, dels jämförs residualspridningen med genomsnittlig spårgastillförsel, och dels jämförs uppmätta och simulerade koncentrationer där identifierade luftflöden används vid simuleringen. Vid jämförelse med mätflänsar blev sannolikt mätfel +/-11% för experimentet med störst avvikelse. Av detta utgör metodfelet +/-8%, vilket avser förenklingar i multicellmodellen.

I Byggnadsforskningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

Denna skrift är tryckt på miljövänligt, oblekt papper.

R44:1991

ISBN 91-540-5362-5

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Gotab 94033, Stockholm 1991

Innehåll

Sammanfattning	7
1 Inledning	9
1.1 Spårgasteknik inom ventilation	9
1.2 Spårgasteknik för multiceller	10
1.3 Kort om experiment och skattningar	11
2 Utrustning	13
2.1 Experimentbyggnad	13
2.2 Flödesmätning med mätfläns	13
2.3 Utrustning för mätning av koncentration	14
2.4 Gasanalysatorns mätprincip	14
2.5 Kalibrering av gasanalysator	16
2.6 Utrustning för spårgastillförsel	17
2.7 Kalibrering av spårgasflöde	19
2.8 Mät dator	20
2.9 Datorprogram för spårgasmätning	20
2.10 Överföring av mätdata till PC	21
2.11 Datorprogram för identifiering	21
3 Teori	23
3.1 Enkelcellmodell med integrerad flödesbalans	23
3.2 Enkelcellmodell med linjär regression	24
3.3 Multicellmodell med integrerad flödesbalans	25
3.4 Identifiering med kvadratisk programmering	31
3.5 Interpolering av koncentrationen	32
3.6 Regulator för konstant koncentration	33
4 Experiment med reglerad spårgastillförsel	37
4.1 Fyra rum utan ventilation	37
4.2 Mätning inom del av större byggnad	40
4.3 Bestämning av luftflöden med enkelcellmodellen	46
4.4 Interpolerade mätdata för multicellmodellen	50
5 Experiment med konstant spårgastillförsel	57
5.1 Beskrivning av experimentet	57
5.2 Fixa parametrar	58
5.3 Fria parametrar	63

6	Slutsatser	65
6.1	Att välja spårgastillförel	65
6.2	Mätresultat	66
6.3	Multicellmodellens användbarhet	69
	Referenser	71

Sammanfattning

Hur mäter man samtidigt luftflöde genom otäta yttreväggar, mellan rum, och i ventilationskanaler? En bra metod är spårgasmätning, där byggnaden och dess ventilationssystem beskrivs med en multicellmodell, och luftflöden identifieras med kvadratisk programmering. Metoden används för samtidig bestämning i varje rum, av tillufts-, frånlufts- och överluftsflöden, samt infiltration och exfiltration. Dessutom erhålles ventilationssystemets återluftsföring samt avlufts- och uteluftsflöden.

I teorin har metoden många tillämpningar, som att utvärdera ventilationssystem och bestämma lufttäthetens inverkan på ventilationen. Särskilt för beräkning av byggnaders energibalanser är det nödvändigt att identifiera varje luftflöde. Problemet är dock att multicellmodellen beskriver en förenklad verklighet, som inte helt stämmer med hur byggnader verkligen ser ut eller hur mätutrustningen fungerar.

För att praktiskt pröva metoden genomfördes mätningar i experimentbyggnaden Minilab. Experimenten omfattade som mest sju rum, varvid ytterligare två celler utgjordes av huvudkanalerna för tilluft och frånluft. Experimenten genomfördes för såväl en del av som för hela byggnaden och ventilationssystemet, samt både med och utan återluft.

För samtliga experiment kunde luftflöden identifieras och noggrannheten i skattningarna bedömmas efter olika kriterier. Dels jämförs luftflöden från spårgasmätningar och mätflänsar, dels jämförs residualspridningen med genomsnittlig spårgastillförsel, och dels jämförs uppmätta och simulerade koncentrationer, där identifierade luftflöden används vid simuleringen. Låg residualspridning innebär god anpassning mellan mätvärden och beräknade luftflöden, d.v.s. små fel i spårgasbalansen.

Vid jämförelse med mätflänsar blev sannolikt mätfel $\pm 11\%$ för experimentet med störst avvikelse. Av detta utgör metodfelet $\pm 8\%$, vilket avser förenklingar i multicellmodellen.

Spårgastillförseln kalibrerades dels med hjälp av en luftcylinder och kalibreringspåse, dels genom att mäta koncentrationen vid spårgastillförsel i ett slutet rum. Vid en jämförelse av residualspridningen från identifieringarna, visade sig sistnämnda kalibreringsmetod ge bäst resultat.

Experimenten utförs både med konstant och reglerad spårgastillförsel. Fördelen med reglerad spårgastillförsel är att ingen injustering och kalibrering behövs för nya experiment. Med reglerad spårgastillförsel i nio celler, var det dock nödvändigt med interpolerade koncentrationer för att luftflöden skulle kunna identifieras.

Identifieringen görs genom att volymerna antingen är fria parametrar eller fixa till sina geometriska värden. Luftflöden visade sig bli bäst skattade vid fixa volymer. Detta var särskilt viktigt för rum med sämre luftomblandning.

I större byggnader är utrustningen för liten för att samtidigt mäta i alla rum. Eftersom övriga rum indirekt tillförs spårgas kommer detta särskilt att påverka koncentrationen i frånluftkanalen. Problemet löses genom att komplettera mätdatafilen med simulerade koncentrationer i en s.k. dummycell.

I ett av experimenten användes både enkel- och multicellmodellen för identifiering. Vid en jämförelse med mätflänsar var avvikelsen större för luftflödena som identifierades med enkelcellmodellen. Förutom egenskapen att kunna skilja luftflöden i en byggnad, ger således multicellmodellen även en större mätnoggrannhet.

1 Inledning

1.1 Spårgasteknik inom ventilation

Spårgas för att mäta ventilation har använts länge, och är ibland enda möjlighet att bestämma luftrörelser och luftflöden. Tekniken innebär att spårgas tillförs i ett rum eller en kanal, varefter koncentrationen mäts. Sättet att tillföra spårgas varierar, liksom metoderna att analysera mätresultatet.

Två storheter som bestäms med spårgas, och som karakteriserar hur luften rör sig i ett rum, är ventilationseffektivitet och luftutbyteseffektivitet. Ventilationseffektiviteten anger förhållandet mellan spårgaskoncentration i rummet och frånluftkanalen, och är därmed ett mått på hur effektivt föroreningar avlägsnas. Luftutbyteseffektiviteten är förhållandet mellan nominell tidskonstant och utbytestiden för luften i rummet, och anger hur väl luftutbytet sker (Sandberg 1989). En annan tillämpning för spårgas är flödesmätning i kanaler (NVG 1982), där den kan ge en bättre mätnoggrannhet än andra metoder.

Den vanligaste applikationen är bestämning av luftomsättning eller snarare uteluftflöde genom en byggnad. Genom att betrakta byggnaden som en enda volym kan flödet bestämmas ur mätningarna med enkla formler. Den teori som ligger till grund bygger på en s.k enkelcellmodell.

För mätningar på enkelceller används ett antal metoder som indelas efter hur spårgastillförsel sker. Vanligast är avklingningsmätning. Spårgas tillförs och blandas väl i rummet innan mätningen av koncentrationen börjar. Under själva mätningen tillförs ingen spårgas, med följd att koncentrationen avklingar exponentiellt. Luftflödet kan sedan beräknas ur lutningen på avklingningskurvan.

En annan metod är konstant spårgastillförsel, där ett litet konstant flöde av spårgas tillförs under hela mätningen. När spårgaskoncentrationen i rummet inte längre ökar kan uteluftflödet beräknas som kvoten mellan spårgasflöde och koncentration.

En tredje metod är att spårgastillförseln regleras för konstant koncentration. Metoden har fördelen att även kunna mäta vid varierande luftflöde, och dessutom kan uteluftflödet i enskilda rum bestämmas var för sig. Genom att reglera koncentrationen undviks risken att hamna utanför gasanalysatorns mätområde.

Enkelcellmodellen har visat sig användbar för byggnader som kan betraktas som en cell. Med kännedom av vilka spårgasmängder som tillförs och hur spårgaskoncentrationen förändras med tiden, kan totalt uteluftflöde beräknas.

I byggnader med mekanisk ventilation är lufttrycket olika i olika rum och utomhus, vilket ger infiltration, exfiltration och överluft. Enkelcellmodellen, som enbart beaktar uteluftflöden räcker inte för att bestämma luftflöden mellan rum, eller att skilja mellan infiltration och tilluft, respektive exfiltration och frånluft. För att beräkna dessa luftflöden måste byggnaden beskrivas som en multicell, med varje rum som en cell.

1.2 Spårgasteknik för multiceller

Syftet med rapporten är att presentera en utprovad mätmetod för bestämning av alla förekommande luftflöden i en byggnad eller en del av byggnaden. Metoden bygger på multicellmodellen, och gör det möjligt att i en och samma mätning bestämma luftflöden för uteluft, tilluft, överluft, frånluft, återluft, avluft, infiltration och exfiltration.

En mätmetod som klarar att bestämma samtliga luftflöden kan få stor praktisk användning för undersökningar av ventilation och energibalanser i byggnader. Hur väl ventilationen fungerar beror bland annat av mängden behandlad luft som tillförs via tilluftdonen, men också av överluft från angränsande rum, eller infiltration genom läckage i ytterväggar. För att göra en fullständig energibalans är det också nödvändigt att kunna identifiera varje luftflöde. Med metoden kan man även bestämma hur mycket energi som är förlorad för värmeåtervinning på grund av infiltration och exfiltration.

Vid identifiering av luftflöden med multicellmodellen utnyttjas samtliga mätdata, som därmed bildar ett överbestämt ekvationssystem. Genom att lägga in koncentrationer, spårgastillförsel och luftflöden i matriser, så kan lösningen formuleras för kvadratisk programmering, där luftflödets riktning bestämmer bivillkoren. Kvadratisk programmering innebär en multipel linjär regression, med tillägg att vissa olikheter skall uppfyllas. Medan enkelcellmodellen bestäms genom skalära samband, innebär identifiering av multicellmodellen följdaktligen komplicerade matrisberäkningar.

Till förfogande finns experimentbyggnaden Minilab, som innehåller sju rum anslutna till ett gemensamt ventilationssystem. Till, från och mellan rummen löper ventilationskanaler som alla är försedda med kalibrerade mätflänsar. Dessutom finns utrustning för spårgastillförsel, koncentrationsmätning, kalibrering och databehandling.

Med ett antal fullskaleförsök skall metoden att identifiera multicellmodellen med kvadratisk programmering utprovas. Varken byggnad eller mätutrustning uppfyller

alla villkor, varför det finns anledning att ifrågasätta modellens praktiska användbarhet. En av svårigheterna är att i varje cell få fullständig omblandning. Om kravet är besvärligt för enskilda rum, kan det förefalla omöjligt om även huvudkanalerna skall utgöra celler. Därtill kommer begränsningar hos utrustningen, som att koncentrationerna inte mäts samtidigt i varje cell, eller att spårgasflödet inte alltid är konstant under en hel mätperiod.

Ett vanligt praktiskt problem är att bara en del av en byggnad kan mätas samtidigt, beroende av utrustningens begränsade storlek. Detta kan man lösa genom att betrakta övriga byggnaden som en dummy-cell, vilket skall testas i Minilab.

Spårgastillförsel vid multicellförsök sker på samma sätt som för enkelceller, dvs med avklingningsmätning, konstant spårgastillförsel eller konstant koncentration. Eftersom ett bra resultat förutsätter mycket mätdata räcker i praktiken inte enbart ren avklingning, utan ett aktivt försök är nödvändigt. Ett aktivt försök innebär att spårgas tillförs samtidigt som koncentrationen mätes. Under experimenten prövas olika sätt att tillföra spårgas. Det gäller dels att jämföra konstant med reglerad spårgastillförsel, men också att mera i detalj finna fram till lämpliga regler för programstyrning.

Spårgasflöde kalibreras dels med luftcylinder och kalibreringspåse, dels genom att mäta koncentrationen vid spårgastillförsel i ett slutet rum. En möjlighet till förbättring är att anpassa spårgasflödet i mätdatafilen, så att skattad och geometrisk volym ungefär överensstämmer. Man kan också pröva olika spårgasflöden i mätdatafilen och välja det som ger lägst residualspridning, d.v.s. har bäst anpassning.

1.3 Kort om experiment och skattningar

Kapitel 2 beskriver byggnad, mätutrustning och dataprogram. Metoder för kalibrering av mätflänsar, gasanalysator och spårgastillförsel redovisas och sannolikt mätfel beräknas. Detta bestäms för mätflänsar till 6%, för gasanalysatorn till 6,5% och för spårgasflödet till 4%.

Kapitel 3 handlar om teorin för identifiering av luftflöden med enkelcellmodellen och multicellmodellen. Avsnittet redogör även för den adaptiva regulatorm för konstant koncentration, samt interpolering av mätvärden. Eftersom spårgaskoncentrationen i cellerna mäts 30 sekunder efter varandra, kan mätperioden uppdelas i 30-sekundersperioder med interpolerade värden för att bättre anpassas till modellen. I vissa fall är interpolering nödvändig för en lösning, medan resultatet försämras i andra fall, eftersom interpoleringen utnyttjar approximativa luftflöden.

Mätningarna kan indelas i fyra experiment, där vart och ett har sina speciella förutsättningar. Figur 1.1 ger i sammandrag vad som utmärker experimenten.

Kapitel	4.1	4.2	4.4	5
Egenskap	Utan ventilation	Dummycell	Interpolering	Konstantflöde
Antal celler	4	6 (7)	9	9
Antal rum	4	4	7	7
Ventilationssystem	nej	ja	ja	ja
Återluftföring	ja	ja	nej	ja
Spårgastillförsel	reglerad	reglerad	reglerad	konstant
Mätperiod	2 min	3 min	5 min	4,5 min
Kalibrering (ml/s)	118	118	118/127,8	8,8/8,36

Figur 1.1 Förutsättningar för experimenten

Tre av experimenten har reglerad spårgastillförsel, och dessa beskrivs i kapitel 4. I första försöket används fyra celler, men inget ventilationssystem. Varje cell är ett rum, och luftflöden identifieras utan ingrepp i mätdatafilen. I nästa experiment utförs mätningarna inom en del av en större byggnad. Spårgaskoncentrationen mäts i fyra av rummen, samt i huvudkanalerna för till- och frånluft. För att kunna göra en skattning kompletteras mätdatafilen med simulerade koncentrationer i en s.k. dummycell. Försöket skall visa om luftflöden kan identifieras inom en begränsad del av en byggnad eller ett ventilationssystem, vilket i så fall vore en viktig egenskap.

Det tredje experimentet med reglerad spårgastillförsel, använder alla sju rum samt huvudkanalerna, vilket totalt utgör nio celler. Ventilationen är utan återluft, varför spårgastillförseln kan styras så att uteluftflödet i varje cell går att skatta med både enkelcell- och multicellmodellen. Enkelcellmodellen identifieras med integrerade flödesbalanser och multipel regression, medan multicellmodellen prövas både med och utan interpolation. Experimentet ger också tillfälle att jämföra de båda metoderna för kalibrering av spårgasflödet.

I kapitel 5 redovisas försök med konstant spårgastillförsel under lång tid i varje cell. För att kunna tillföra spårgas i en längre tid utan att gasanalysatorns mätområde överskrides, stryps gasflödet kraftigt. Identifieringen sker både med fixa och fria parametrar för volymer och nollflöden. Eftersom inget luftflöde är möjligt mellan rum som saknar förbindelse, kan dessa nollflöden jämföras med identifierade luftflöden vid fria parametrar, och därmed antyda mättelets storlek.

I kapitel 6 sammanfattas och jämföres resultaten från experimenten. Dels jämföres residualspridningen, dels medel- och standardavvikelse mellan uppmätta och skattade koncentrationer. Luftflöden har bestämts både med mätflänsar och med spårgasmätningar, och även dessa avvikelser redovisas för varje experiment. Där avvikelsen är störst beräknas spårgasmetodens sannolika mätfel genom kvadratisk addition av rotmedelkvadratfelet och mätflänsarnas sannolika mätfel. Genom kvadratisk subtraktion av instrumentfelet bestäms det s.k. metodfelet. Metodfelet varierar från försök till försök, och beror på att förutsättningarna inte helt överensstämmer med teorin för multicellmodellen.

2 Utrustning

2.1 Experimentbyggnad

Samtliga spårgasexperiment har genomförts i experimentbyggnaden Minilab. Till förfogande finns där sju ungefär lika stora rum, med ett gemensamt ventilationssystem av typ FT. Luftbehandlingsaggregatet är försett med spjäll för återluft. Längst bort på huvudkanalerna finns en by-pass direkt mellan tilluft och frånluft. En skiss över experimentbyggnaden finns i kapitel 5, figur 5.1.

Överluft mellan olika rum skapas med fläktar, spirorör och flexislangar. Fläktarna och olika strypning på luftdonen skapar över- eller undertryck i rummen, som i sin tur medför infiltration och exfiltration.

För experimenten utnyttjas fyra eller sju rum, som vardera utgör en cell i multicellmodellen. Volymen av rum 1, 2, 4, 5 och 7 är 29 m³, medan rum 3 och 6 är 24 m³. Varje rum har en blandningsfläkt, och dessutom finns en liten fläkt på ändan av tillförselslangen. Rummen är nästan tomma, med ett visst undantag för rum 7, där det också är något svårare att nå fullständig omblandning.

I några av experimenten utgör huvudkanalerna för till- och frånluft ytterligare två celler. Kanalerna uppfyller förvisso inte kravet på fullständig omblandning, men dess spårgaskoncentration kan anses tämligen homogen, om spårgastillförseln får ske kontinuerligt under en tid av flera mätperioder. Dessutom är volymen liten och har uppmätts till omkring 2 m³ per kanal.

2.2 Flödesmätning med mätfläns

Alla till- från- och överluftkanaler har samma dimension (80 mm), och är försedda med mätflänsar vars k_v -värde är 2,1 l/s vid tryckfallet 1 Pa. Genom att mäta tryckfallet över mätflänsarna med u-rör kan luftflödena beräknas och jämföras med resultatet från spårgasmätningarna. Om tryckdifferansen är Δp (Pa), beräknas luftflödet Q (l/s) med den välbekanta formeln:

$$Q = k_v \sqrt{\Delta p} \quad (2.1)$$

Mätflänsarna har provats genom att anslutas i serie med spirokanaler som tätats noggrant så att samma luftflöde passerar varje fläns. De mätflänsar vars avvikelser är större än 2% från medelvärdet har kasserats, medan övriga har använts i ventilations-systemet.

Sannolikt mätfel m beräknas enligt följande formel (NVG:s rapport T32:1982):

$$m = \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + m_3^2} \quad (2.2)$$

Från seriekopplingen erhöles mätflänsarnas slumpmässiga fel $m_1 = 2\%$. Enligt NVG:s rapport är mätmetodens fel $m_2 = 5\%$. Avläsningsfelet $m_3 = 3\%$, motsvarar 0,5 på 15 skalenheter (Pa). Därmed kan det sannolika felet för mätningarna med mätfläns beräknas till $m = 6\%$. Flänsarnas mätområde är 8-25 l/s.

2.3 Utrustning för mätning av koncentration

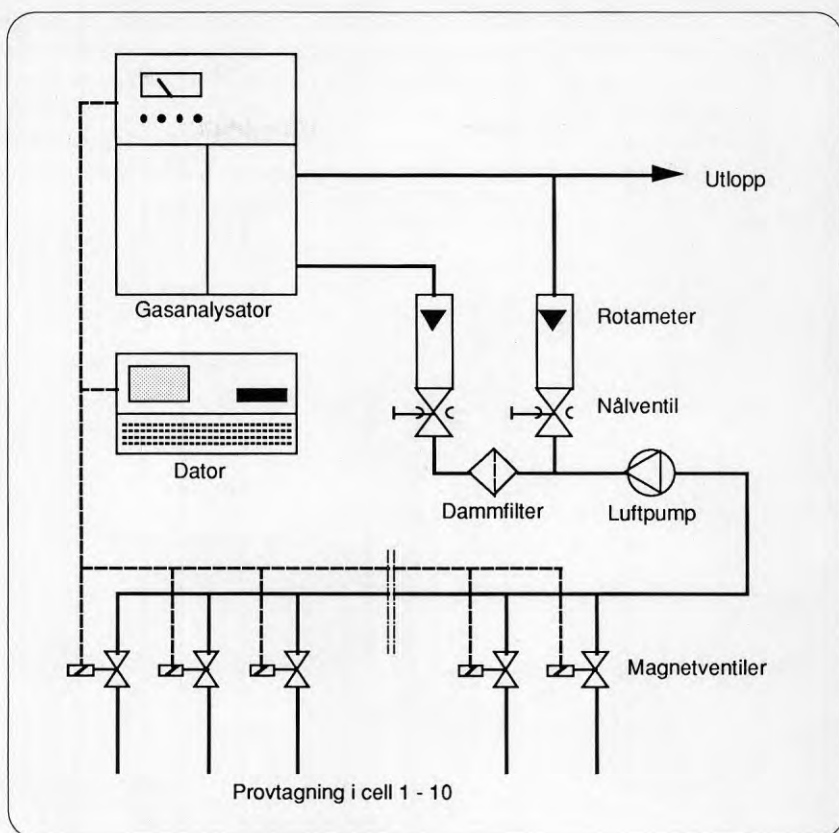
För att mäta spårgaskoncentration används en gasanalysator av typ Binos 1.1 från Leybold-Heraeus. Gasanalysatorn är avsedd för att mäta koncentrationen av lustgas, N_2O , inom mätområdet 0-1000 ppm.

På mätsidan är analysatorn kompletterad med ett ventilblock med 10 magnetventiler, som vardera är anslutna till 25 meter plastslang i dimension 8/6 mm. Luften, vars koncentration skall mätas, sugs genom plastslang och magnetventil med en luftpump, vars kapacitet är 5,0 l/min. Luften passerar sedan ett dammfilter och en flödesmätare med nålventil innan den når själva gasanalysatorn. Med nålventilen justeras luftflödet så att 2,5 l/min passerar analysatorn, medan resten går by-pass. På så sätt skapas ett högre flöde i plastslangen och därmed en lägre tidsfördröjning i mätningen. Flödesschemat visas i figur 2.1.

Observera att luftpumpens kapacitet är 5,0 l/min eller 0,1 l/s, vilket påverkar luftbalansen i sista decimalen (0,0 - 20,0 l/s).

2.4 Gasanalysatorns mätprincip

När infraröd strålning passerar en gas absorberas en del av strålningsenergin. Detta sker i för gasmolekylen karakteristiska våglängder, som motsvarar övergångar till tillstånd med större energi. Avgörande om övergångar kan ske är om strålningsfältet innehåller våglängder vars energi exakt motsvarar skillnaden mellan olika energinivåer hos gasen. Dessa villkor uppfylls enbart av vissa våglängder, och därmed skapas ett absorptionspektra som är karakteristiskt för gasen.



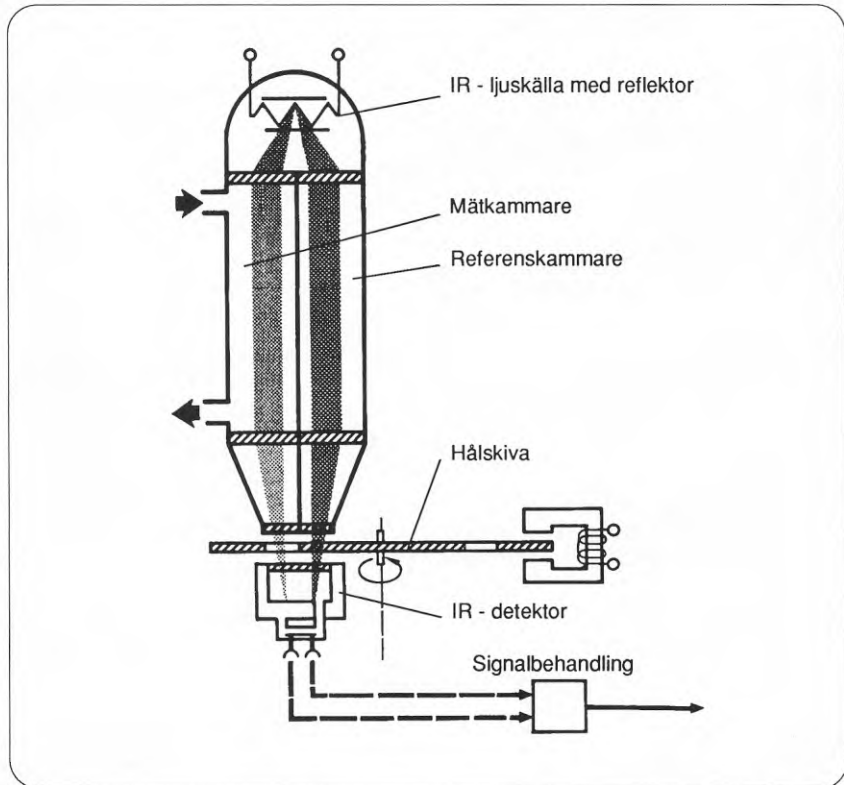
Hans Follin, LTH

Figur 2.1 Flödesschema för mätning av koncentration

Mätprincipen för gasanalysatorn bygger på att analysera absorptionsspektra från infraröd strålning. För detta användes två kamrar, dels en mätkammare där luftflödet får passera, och dels en referensammare som är fylld med N_2O . Bägge kamrarna belyses med infrarött ljus, och en IR-detektor mäter och jämför ljusintensiteten växelvis efter kamrarna. En skiss på gasanalysatorn visas i figur 2.2.

Avgörande för hur mycket energi som absorberas i kamrarna är antalet gasmolekyler, som i sin tur beror på temperaturen. För att kunna omvandla mätvärdet till volymprocent är därför gasanalysatorn termostatreglerad för $+50\text{ }^\circ\text{C}$. Antal gasmolekyler påverkas även av trycket, varför kalibrering skall ske vid aktuella tryckförhållanden för experimentet.

Absorptionsbanden från N_2O och närbesläktade gaser kan delvis överlappa varandra (interferens). De störningar som främmande gaser åstadkommer, finns redovisade i tabeller från leverantören. Tabellerna ger emellertid enbart riktvärden, varför det är bättre om utrustningen är försedd med optiskt filter, som eliminerar inverkan av interferens. Ett optiskt filter kan göras i form av ett gasfilter, som är fylld av den gas man vill undvika interferens med, och därför enbart släpper igenom våglängder där absorptionsbanden inte överlappar varandra. I den aktuella utrustningen ingår ett optiskt filter för att förhindra interferens med vattenånga.



Hans Pollin, LTH

Figur 2.2 Gasanalysator

2.5 Kalibrering av gasanalysator

Mätfel hos gasanalysatorn kan dels vara nolldrift och dels ett instrumentfel, som av tillverkaren anges till max 2% av fullt utslag (1000 ppm). Bruset är mindre än 5 ppm.

Gasanalyserns totala mätfel vid korrekt nollställning, är enligt tillverkaren högst 20 ppm.

Kalibreringen görs dels med uteluft, och dels med en testgas. Ute luften används vid nollpunktsinställning, som kontrolleras före varje nytt experiment. Justeringen av skalan görs med skruvmejsel på frontpanelen.

Testgas med luft som bärgas, finns i 1-liters flaskor med 25 bars tryck, och har N_2O -koncentrationen 196 ppm med 5 % tolerans. Flaskan öppnas genom att skruva in en nippel, som via en ventil och kort plastslang skall anslutas till gasanalysern. Gasen släpps på genom att försiktigt öppna ventilen, medan luftpumpen är frånslagen. Mätutrustningen styrs från datorn av ett program för kontinuerlig mätning.

N_2O -koncentrationen uppmättes till 204 ppm. Värdet avviker med 8 ppm eller 4 % från angivet värde på testgasen, men ligger inom dess felmarginal. Mätvärdet ligger också inom det av tillverkaren angivna totala mätfel på högst 20 ppm. Av de skälen sker ingen korrigerig i samband med kalibreringen.

För att undvika att spårgasen i den provtagna luften skall påverka det fortsatta experimentet, så släpps den utomhus. Slangen mellan utomhus och mätkammaren skapar visserligen ett mottryck som påverkar koncentrationen, men detta är ingen skillnad mot förhållandet vid kalibreringen, utan snarare en förklaring till en del av avvikelserna. Eftersom kalibrering och experiment sker vid samma tryckförhållanden, kan lufttryckets inverkan på koncentrationsmätningen försummas. Även inverkan av densitetsskillnaden mellan luft och spårgas kan bortses ifrån (Jensen 1988c).

Mätfelet för koncentrationen har beräknats till 6,5%, genom kvadratisk addition av avvikelserna i kalibreringen (4%) och testgasens noggrannhet (5%). Detta motsvarar ett totalt mätfel på 20 ppm vid en genomsnittlig koncentration på 300 ppm.

2.6 Utrustning för spårgastillförsel

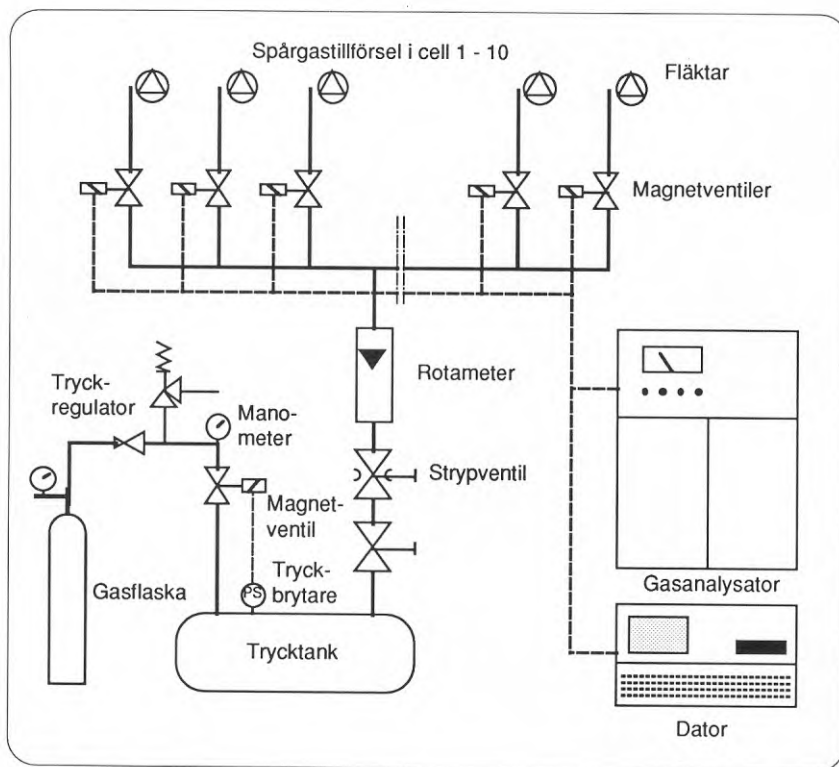
Kondenserad N_2O förvaras i en gasflaska, där den förångas innan den strömmar via en reducentventil och magnetventil till en trycktank. Tankens volym är 50 liter och trycket är 300 kPa. Tryckhållningen i tanken sker med en tryckbrytare som öppnar och stänger magnetventilen strax över och under 300 kPa.

Från tanken fortsätter gasen till ett ventilblock, som även detta består av 10 magnetventiler, och sedan vidare genom någon av de tio plastslangarna. Plastslangarna är vardera 25 meter långa med diametern 4/2 mm och leder till var sin cell.

Multicellmodellen förutsätter samma spårgaskoncentration i hela rummet. Därför sitter en liten fläkt vid utloppet av varje slang för att snabbt sprida spårgasen. Flödesschemat för spårgastillförseln visas i figur 2.3.

Magnetventilerna är direktstyrda med stängt inlopp vid strömlöst tillstånd. Dess storlek uttryckt som spårgasflöde N_2O är 85 ml/s vid tryckfallet 0.1 bar och atmosfärstryck på utloppet. Det faktiska spårgasflödet bestäms dock genom kalibrering. Det kan tilläggas att läckagekontroll har gjorts för magnetventilerna på tillförselsidan, utan att någon gas har spårats.

Under experimentet med konstant spårgastillförsel har en strypventil och flödesmätare satts in direkt efter tanken. Flödesmätaren är en rotameter typ Brooks 1355, storlek 150 mm, och är kalibrerad för N_2O inom mätområdet 0-13,8 ml/s.



Hans Föllin, LTH

Figur 2.3 Flödesschema för spårgastillförsel

2.7 Kalibrering av spårgasflöde

Bestämningen av luftflödena blir inte bättre, än den noggrannhet varmed spårgasflödet är kalibrerad. Kalibreringen görs genom att ansluta en av slangarna för spårgastillförsel till en kalibreringspåse. Med hjälp av datorn öppnas motsvarande magnetventil, och spårgas strömmar genom slangen och fyller påsen under inprogrammerad tid. Spårgasvolymen mäts genom att tömma påsen genom en luftcylinder, och räkna antal kolvslag.

Genom att fylla påsen med spårgas under olika långa perioder, kan dels ett stationärt flöde bestämmas och dels startvolymen. Startvolymen orsakas av det extra flöde som strömmar ut i det ögonblick när magnetventilen öppnar. Det dynamiska förloppet varar mindre än 1 sekund.

Kalibrering görs dels för strypt och dels för fullt spårgasflöde. Strypt spårgasflöde används i experiment med konstant spårgastillförsel, och fullt flöde används vid reglerad spårgastillförsel.

Som komplement till kalibrering är inkopplat en rotameter för att mäta flödet vid strypt spårgastillförsel. Även rotametern kan kalibreras med cylinder och kalibreringspåse vid olika inställningar på strypventilen. Däremot går det inte att kalibrera spårgastillförseln med tillverkarens kalibreringskurva för rotametern. Med hjälp av rotametern har spårgasflödets variation beroende av trycket i tanken, uppmätts till $\pm 1,5\%$.

Spårgasflöde och startvolym har kalibrerats genom linjär regression på 25 mätningar. Vid strypt tillförsel blev spårgasflödet 8,8 ml/s (standardavvikelse 0,05 ml/s) och startvolymen 90 ml (standardavvikelse 18 ml). Storleken på startvolymen stämmer med den gasmängd som finns mellan magnetventil och strypventil. Vid full tillförsel blev spårgasflödet 127,8 ml/s (standardavvikelse 0,6 ml/s) och startvolymen 77 ml (standardavvikelse 12 ml). Standardavvikelsen anger ett slumpmässigt medelfel under kalibreringen, vilket är mycket litet för spårgasflödet. Däremot kan det finnas ett betydligt större systematiskt fel, orsakad av kalibreringsutrustningen.

Det finns ytterligare ett sätt att kalibrera flödet, som innebär att spårgas tillförs i ett rum under en bestämd tid, samtidigt som koncentrationen mäts. Rummet är helt slutet och har en bra omblandning av luften. Eftersom rummets volym är känd liksom magnetventilens öppningstid kan spårgasflödet beräknas, och blir 118,0 ml/s. Metoden har fördelen att även ta hänsyn till mätfel för koncentrationen när spårgasflödet kalibreras.

Skillnaden mellan kalibreringarna blev 8 %, vilket visar en stor osäkerhet vad gäller spårgasflöde. Detta förstärks av att spårgastillförseln i allmänhet sker under en begränsad del av mätperioden, medan den i datorn omvandlas till ett konstant flöde för hela perioden. Om det sker en kort men kraftig tillförsel blir koncentrationen lägre

nästa mätperiod, än om samma spårgasvolym tillförs under en längre tid men med mindre flöde.

Ett alternativ till kalibrering är att använda olika spårgasflöde i mätdatafilen vid identifieringen. Det flöde som ger bäst anpassning, dvs lägst residualspridning, blir det som får gälla. För ett av experimenten gjordes en sådan jämförelse i intervall om 10 ml/s, varvid lägsta residualspridning inträffade för 118 ml/s, vilket stämmer med kalibrering i slutet rum. Det innebär att noggrannheten i spårgasflödet blir ± 5 ml/s eller $\pm 4\%$.

2.8 Mät dator

För att styra spårgastillförsel och lagra mätresultat används bordsdatorn Hewlett-Packard HP-85. Datorn är försedd med ett RAM-minne på 32 kb, som är avsett för applikationsprogram. Dessutom finns ROM-moduler på 48 kb för operativsystem och Basic-kompilator. Processorn använder 8 adressbitar.

Som sekundärminne finns magnetbandskassetter på 210 kb, där mätvärdena lagras. Dessutom är datorn försedd med en 5 tums grafisk skärm, och termisk skrivare för 4,3 tums pappersrulle.

Applikationsprogram skrivs således i Basic. För spårgasförsök finns ett huvudprogram, samt ett antal hjälpprogram för kalibrering, diagramritning och sortering av mätresultat (Jensen 1988b). Den version av huvudprogrammet som används i dessa försök heter TGEX ver 3.0, och upptar 23 kb i Ram-minnet.

För kommunikation med spårgasutrustningen är datorn försedd med ett expansionskort med seriell port. Detta interface på datorn anslutes via en 25-polig V.24/RS-232 kontakt till mikroprocessorn i spårgasutrustningen. Inställning av gränssnittet mellan spårgasutrustningen och datorn sker dels med DIP-omkopplare direkt på expansionskortet, och dels i själva datorprogrammet. Överföringen är inställd för 300 baud, ingen paritet, 8 databitar och 2 stoppbitar.

2.9 Datorprogram för spårgasmätning

För styrning av spårgasutrustning och insamling av mätdata används alltså datorprogrammet TGEX. Samtidigt med programstyrning och mätdatainsamling skattar programmet luftflöde och volym med enkelcellmodellen.

Spårgastillförsel liksom mätning av koncentration sker i högst tio celler, med en cell åt gången. Mätningarna sker med 30 sekunders mellanrum, och en mätperiod är totala tiden för en mätning i samtliga celler. Mätvärdena lagras på kassetband.

Indata sker huvudsakligen genom att ange programstyrning (Program control) och parameterinställningar (Control parameters) i TGEX. I programstyrningen väljer man hur spårgasen skall tillföras i respektive cell under olika delar av experimentet. En del av mätningarna kan genomföras som styrt experiment med avklingningsmätning eller konstant spårgastillförsel, medan en annan del kan ha reglerad spårgastillförsel. För reglerade experiment används någon variant av den inprogrammerade adaptiva regulatorm.

Inför varje experiment skall ett antal parametrar inställas. Den viktigaste av dessa är spårgasflödet, som kräver en noggrann kalibrering. För reglerade försök skall ytterligare parametrar anges, som regulator typ, börvärde, reglertid samt startvärden för luftflöde och volym (Control parameters).

TGEX resulterar främst i en mätdatafil med tidpunkter, spårgaskoncentrationer och spårgasflöden. Dessutom görs utskrifter av skattade luftflöden och volymer, samt vissa statistiska uppgifter. Varje timme plottas mätvärdena i ett diagram.

2.10 Överföring av mätdata till PC

I jämförelse med 90-talets persondatorer är Hewlett-Packard HP-85 inte särskilt kraftfull. Emellertid är dess uppgift endast i mindre utsträckning att bearbeta mätresultat, medan huvuduppgiften är att styra magnetventiler för spårgastillförsel och mätning av spårgaskoncentration. Som sådan är HP-85'ans kapacitet fullt tillräcklig.

För identifiering av luftflödena i multicellmodellen överförs mätfilerna till en Vaxdator. Överföringen sker via en IBM AT, som även har kapacitet att klara de flesta beräkningarna. Till IBM AT anslutes samma serieport på HP-85'ans expansionskort, som tidigare kopplades till spårgasutrustningen. Eftersom två datorer anslutes, användes kabel med korsade stift mellan datorernas RS-232 kontakter.

Dataöverföringen inleds med att på IBM AT starta upp ett program för att öppna en kommunikationsport och reservera plats på hårddisken. Sedan väntar IBM AT på mätdata. Därefter startas på HP-85 ett program för överföring med 300 baud, udda paritet, 7 databitar och 1 stoppbit. Slutligen läggs magnetbandet med mätvärdena i kassettluckan på HP-datorn varpå överföringen kan börja.

2.11 Datorprogram för identifiering

För bearbetning av mätdata och identifieringen av luftflöden i en multicell har utvecklats ett programpaket, vars viktigaste delar bygger på Hedin (1989). Huvudprogrammet heter MCSPID, och är skrivet i Fortran (Jensen 1990) för

beräkningsdator VAX 3500 under operativsystemet VAX/VMS 5.2. VAX-datorn är via ett lokalt nätverk ansluten till en persondator typ IBM AT, som används för de övriga dataprogrammen.

Med kvadratisk programmering tas det hänsyn till krav som att inga flöden eller volymer får vara negativa. Dessutom är det lämpligt att beakta att vissa parametrar faktiskt är kända på förhand. Det kan gälla rumstorlek, eller att luftflöden mellan vissa rum är omöjliga. Dessa volymer och flöden kan sättas som fixa parametrar i indatafilen. Däremot nollställes aldrig infiltration eller exfiltration, eftersom dessa kan uppträda samtidigt.

Utdatafilen innehåller multicellens samtliga luftflöden och volymer, som skrivs ut efter varje iteration. Om någon volym tenderar att bli noll falerar beräkningen och ett nytt försök får göras med fix volym. Minimering sker med avseende på residualkvadratsumman, som når ett lägsta värde efter 3-4 iterationer.

Identifierade luftflöden och volymer kan användas för att simulera nya koncentrationer efter hur spårgastillförseln skett. Verkliga och simulerade koncentrationer bildar en utdatafil, och kan plottas i samma figur (t.ex med hjälp av programmet Simnon) för att ge en bild av identifieringen. Jämförelsen av koncentrationerna kan också uttryckas i medel- och standardavvikelse för varje cell, vilka bildar ännu en utdatafil. I den fortsatta analysen kommer dessa båda utdatafiler väl till användning.

3 Teori

3.1 Enkelcellmodell med integrerad flödesbalans

Enkelcellmodellen används för att beräkna uteluftflöde, vilket ofta är av tilluftflöde och infiltration. För att bestämma cellens totala luftflöde måste all luft, inklusive överluft från andra lokaler, vara fri från spårgas. Ingen spårgastillförsel får förekomma utom den direkta tillförseln från spårgasutrustningen.

Ett annat krav är att lokalen har fullständigt omblandad ventilation. Om dessa villkor uppfylls är det möjligt att ur enkelcellmodellen bestämma det totala luftflödet Q ur kända värden på volymen V , mätperioden T , koncentrationen $c(t)$ och spårgasflöde $p(t)$. Sambandet kan uttryckas både i kontinuerlig och diskret tid.

I kontinuerlig tid beskrivs flödesbalansen med:

$$V \frac{d c(t)}{dt} = -Q c(t) + p(t) \quad (3.1)$$

Luftflödet bestäms genom att integrera flödesbalansen för m antal mätperioder. Under mätningarna har koncentration och spårgasflöde för varje mätperiod lagrats i en datafil. Integralerna uppskattas ur mätdatafilen som summan av spårgastillförsel respektive summan av koncentrationernas medelvärde under denna tid:

$$V (c(t) - c(t-mT)) = -Q C(t) + P(t) \quad (3.2)$$

$$P(t) = T \sum_{i=1}^m p(t_i)$$

$$C(t) = T \sum_{i=1}^m \frac{c(t_i-T) + c(t_i)}{2}$$

Därmed erhålles luftflödet direkt som kvoten mellan tillförsel och koncentration, med korrigering för volymens ackumulering av spårgas:

$$Q = \frac{P(t)}{C(t)} - \frac{V (c(t) - c(t-mT))}{C(t)} \quad (3.3)$$

3.2 Enkelcellmodell med linjär regression

Flödesbalansen kan även uttryckas i diskret tid, varvid koncentrationen är proportionell mot föregående mätperiods koncentration och spårgastillförsel. Sambandet karakteriseras av konstanterna F och G , som beror av Q , V och T .

$$c(t) = F c(t-T) + G p(t-T) \quad (3.4)$$

För att beräkna F och G användes multipel regressionsanalys, vilket innebär att med minsta kvadratmetoden anpassa den samplade modellen till mätningarna. Liksom i det kontinuerliga fallet sker skattningen ur de m senaste mätperioderna. Minsta kvadratmetoden innebär att regressionskoefficienterna F och G bestäms genom att minimera sambandet:

$$M = \sum_{i=1}^m (c(t_i) - F c(t_i-T) - G p(t_i-T))^2 \quad (3.5)$$

Lösningen fås om M deriveras med avseende på F och G , och derivatorna sätts lika med noll.

$$\frac{dM}{dF} = -2 \sum_{i=1}^m (c(t_i) - F c(t_i-T) - G p(t_i-T)) c(t_i-T) \quad (3.6)$$

$$\frac{dM}{dF} = 0$$

$$\frac{dM}{dG} = -2 \sum_{i=1}^m (c(t_i) - F c(t_i-T) - G p(t_i-T)) p(t_i-T) \quad (3.7)$$

$$\frac{dM}{dG} = 0$$

Eftersom spårgastillförsel och koncentrationer är kända, är de enda obekanta de båda regressionskoefficienterna F och G , som då kan bestämmas.

Om man i stället utgår från flödesbalansen i kontinuerlig tid enligt ekvation (3.1), så kan denna skrivas om på tillståndsform med konstanterna A och B .

$$\frac{dc(t)}{dt} = A c(t) + B p(t) \quad (3.8)$$

$$A = -\frac{Q}{V} \quad B = \frac{1}{V} \quad \frac{A}{B} = -Q$$

Sambandet mellan F och G i det samplade systemet, och A och B i motsvarande tidskontinuerliga system är:

$$F = e^{AT} \quad (3.9)$$

$$G = \int_0^T e^{AT} B \, dT = (e^{AT} - 1) \frac{B}{A} \quad (3.10)$$

Detta ger även sambandet mellan regressionskoefficienterna och luftflödet:

$$G = \frac{1 - F}{Q} \quad (3.11)$$

När F och G är bestämda med multipel regression, kan således luftflödet Q beräknas. Eftersom $F = e^{-QT/V}$, kan även volymen V bestämmas:

$$Q = \frac{1 - F}{G} \quad (3.12)$$

$$V = -\frac{QT}{\ln(F)} \quad (3.13)$$

Om experimentet genomförs utan spårgastillförsel avklingar koncentrationen i rummet exponentiellt, och den samplade modellen förenklas till:

$$c(t) = F e^{-qt-T} \quad (3.14)$$

För ett rent avklingningsförsök sker anpassning med enkel regression, varvid F beräknas. Medan multipel regression bestämmer både volym och flöde, kan enbart deras inbördes förhållande, d.v.s. luftomsättningen beräknas vid enkel regression. Då mätperioden T är känd, och om volymen får bestämmas av geometrin, kan emellertid uteluftflödet beräknas.

$$Q = -\frac{V \ln(F)}{T} \quad (3.15)$$

3.3 Multicellmodell med integrerad flödesbalans

En multicell är ett system med flöden som rör sig mellan olika celler. I ett öppet flödessystem är multicellen i kontakt med omgivningen, medan ett slutet system karakteriseras av att ingenting existerar utanför systemet. Multicellmodellen är lämplig för att beskriva luftflöden i en byggnad, där varje rum utgör en egen cell.

Byggnaden är ett öppet system där uteluft kommer in från omgivningen som infiltration, och inneluft försvinner ut som exfiltration. Omgivningen förser även tilluftssystemet med uteluft, och tar emot avluft via frånluftssystemet.

Multicellmodellen utgår liksom enkelcellmodellen från förutsättningen om ideal blandning och konstanta luftflöden. Från enkelcellmodellen känner man också igen flödesbalansen:

$$V \frac{dc(t)}{dt} = -Q dt + p(t) \quad (3.16)$$

Medan enkelcellens ekvation består av skalärer, så bildas multicellen av vektorer och matriser. Om multicellen omfattar n celler, så är V en $n \times n$ diagonalmatris med cellernas volymer som diagonalelement. Även Q -matrisen för luftflöden har dimensionen $n \times n$. Övriga storheter är $n \times 1$ vektorer, där $c(t)$ betecknar koncentrationen i varje cell, och $p(t)$ spårgasflödet till varje cell.

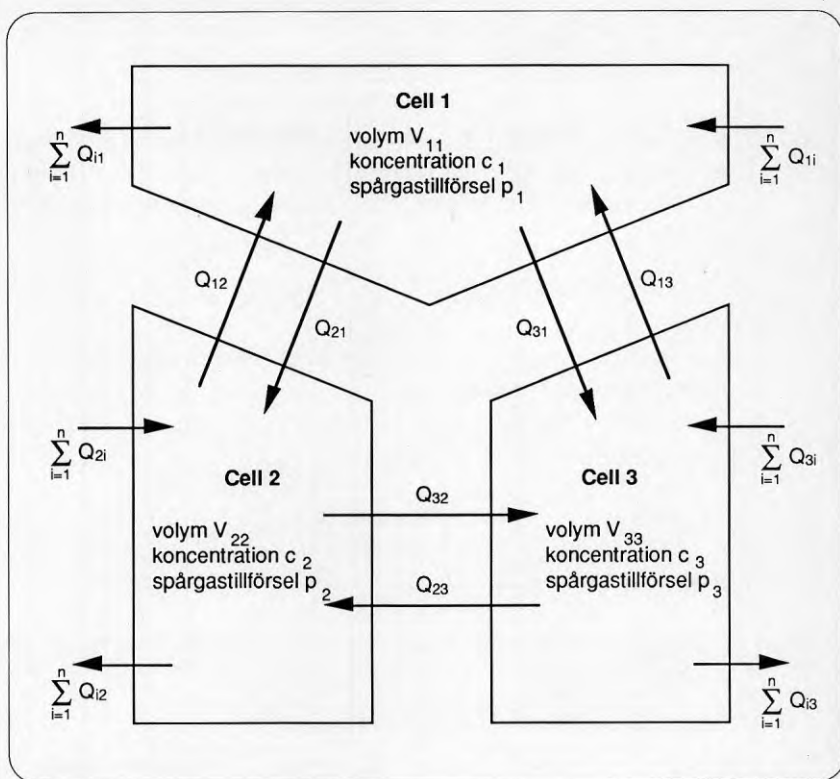
För flödesmatrisen Q gäller att diagonalelementen är respektive cells totala luftflöde, och ingår med positivt tecken. Övriga element i flödesmatrisen är negativa och utgör överluftflöden. Numret på kolonnen anger varifrån luften kommer, medan radnumret anger vart den går. För cell i blir därför flödesbalansen följande:

$$V_{ii} \frac{dc_i(t)}{dt} = Q_{i1} c_1 + Q_{i2} c_2 + \dots - Q_{ii} c_i + \dots + Q_{in} c_n + p_i \quad (3.17)$$

Här betyder V_{ii} volymen för cell i . Q_{ii} betyder totala luftflödet genom cell i , medan övriga Q_{i1}, \dots, Q_{in} betyder luftflödet till cell i från cell 1... n . Indexering av luftflöden framgår av figur 3.1, som visar en multicell i ett öppet flödessystem.

Luftflöden till och från omgivningen anges inte explicit i flödesmatrisen Q , men kan enkelt beräknas. Eftersom diagonalelementen utgör totalt flöde, blir luftflödet från omgivningen (infiltration) summan av radelementen, och luftflödet till omgivningen (exfiltration) summan av kolonnelementen.

Om infiltration och exfiltration inkluderas och totala luftflödet exkluderas för varje cell, blir antal luftflöden n^2+n . Tillsammans med n volymer omfattar modellen därmed sammanlagt $n(n+2)$ modellparametrar.



Hans Follin, LTH

Figur 3.1 Multicell med tre celler

Koncentrationsvektorns derivata kan direkt uttryckas som funktion av uppmätta koncentrationer, och man får en momentan lösning för varje cell (Hedin 1989). Ett alternativ till en momentan lösning är att integrera flödesbalansen under en mätperiod T , med avseende på tiden s . Det är den sistnämnda metoden som i fortsättningen kommer att användas vid identifiering av luftflöden.

$$V \int_t^{t+T} dc = -Q \int_t^{t+T} c(s) ds + \int_t^{t+T} p(s) ds \quad (3.18)$$

$$V (c(t+T) - c(t)) = -Q c t + p t \quad (3.19)$$

Integralen av spårgasflöde och koncentration blir:

$$p t = T p(t) \quad (3.20)$$

$$c(t) = \int_0^T c(t+s) ds \quad (3.21)$$

Startvärdet på integralen av koncentrationen bestäms av dess medelvärde vid mätperiodens början och slut. Därmed fås även startvärden för volymer och luftflöden. Integralen av koncentrationen $c(t)$ beräknas sedan iterativt med hjälp av den samplade modellen.

$$c(t+T) = F c(t) + G p(t) \quad (3.22)$$

Sambandet mellan F och G i det samplade systemet, och A och B i motsvarande tidskontinuerliga system är:

$$F = e^{AT} \quad (3.23)$$

$$G = H B \quad H = \int_0^T e^{A^+ t} dt \quad (3.24)$$

F och G är konstanta matriser som beräknas med serieutveckling. I är enhetsmatrisen.

$$F = I + AT + \frac{A^2 T^2}{2!} + \frac{A^3 T^3}{3!} + \frac{A^4 T^4}{4!} + \dots \quad (3.25)$$

$$H = T + \frac{AT^2}{2!} + \frac{A^2 T^3}{3!} + \frac{A^3 T^4}{4!} + \dots \quad (3.26)$$

Jämföres serieutvecklingarna erhålles:

$$F = I + A H \quad (3.27)$$

$$G = (F - I) B A^{-1} \quad (3.28)$$

Sambandet mellan spårgaskoncentrationerna vid mätperiodens början och slut är:

$$c(t+T) = e^{AT} c(t) + (e^{AT} - I) B A^{-1} p(t) \quad (3.29)$$

$$c(t) = e^{-AT} c(t+T) + (e^{-AT} - I) B A^{-1} p(t) \quad (3.30)$$

Därmed kan även $c(t+s)$ bestämmas vid mätperiodens början och slut, och dess medelvärde användas vid beräkningen av integralen.

$$c(t+s)_i = e^{As} c(t) + (e^{As} - I) BA^{-1} p(t) \quad (3.31)$$

$$c(t+s)_f = e^{A(s-T)} c(t+T) + (e^{A(s-T)} - I) BA^{-1} p(t) \quad (3.32)$$

Medelvärde av spårgaskoncentrationen under mätperioden blir:

$$c(t+s) = \frac{1}{2} (c(t+s)_i + c(t+s)_f) \quad (3.33)$$

$$c(t+s) = \frac{1}{2} (e^{As} c(t) + e^{A(s-T)} c(t+T)) + \frac{1}{2} (e^{As} + e^{A(s-T)} - 2 I) BA^{-1} p(t) \quad (3.34)$$

Därmed kan integralen av spårgaskoncentrationen beräknas:

$$ct = \int_0^T c(t+s) ds \quad (3.21)$$

$$ct = k_1 c(t) + k_2 c(t+T) + k_3 p(t) \quad (3.35)$$

$$k_1 = \frac{1}{2} \int_0^T e^{As} ds = \frac{1}{2} (e^{AT} - I) A^{-1}$$

$$k_2 = \frac{1}{2} \int_0^T e^{A(s-T)} ds = \frac{1}{2} (I - e^{AT}) A^{-1}$$

$$k_3 = \frac{1}{2} \int_0^T (e^{As} + e^{A(s-T)} - 2 I) BA^{-1} ds = (k_1 + k_2 - T I) BA^{-1}$$

Genom att låta beräknade luftflöden och volymer ingå i uttrycket för koncentrationen, fås ett modellbaserat värde på integralen $ct(t_k)$. För tidpunkt t_k ($k=1 \dots m$) kan därför integralen på hela flödesbalansen enligt ekvation 3.19, omskrivas till:

$$V (c(t_k+T) - c(t_k)) + Q c(t_k) = pt(t_k) \quad (3.36)$$

För enbart cell i gäller då:

$$V_{ii} (c_i(t_k+T) - c_i(t_k)) - Q_{i1} c_1(t_k) - \dots + Q_{ij} c_j(t_k) - \dots - Q_{in} c_n(t_k) = pt_i(t_k) \quad (3.37)$$

Modellparametrarna är konstanta under hela experimentet och kan samlas i en gemensam kolonnvektor x_i . Vektorn innehåller cellens volym V_{ii} , totalt luftflöde samt alla överluftflöden till cell i , $Q_{i1} \dots Q_{in}$.

$$x_i = (V_{ii} \quad -Q_{i1} \quad -Q_{i2} \quad \dots \quad +Q_{ij} \quad \dots \quad \dots \quad -Q_{in})^T \quad (3.38)$$

För koncentrationerna bildas en matris K_i och för spårgastillförsel en kolonnvektor s_i , där varje rad (t_k) motsvarar en mätperiod. Antal celler är n och antal mätperioder är m .

$$K_i = \begin{pmatrix} c_i(t_{1+1}) - c_i(t_1) & ct_1(t_1) & \dots & ct_n(t_1) \\ \vdots & \vdots & ct_k(t_k) & \vdots \\ c_i(t_{m+1}) - c_i(t_m) & ct_1(t_m) & \dots & ct_n(t_m) \end{pmatrix} \quad (3.39)$$

$$s_i = (pt_i(t_1) \quad \dots \quad pt_i(t_k) \quad \dots \quad pt_i(t_m))^T \quad (3.40)$$

Därmed kan flödesbalansen för cell i omskrivas till:

$$K_i x_i = s_i \quad (3.41)$$

Emellertid var uppgiften att bestämma samtliga luftflöden, och modellen utvidgas därför från en cell till att gälla samtliga celler. För koncentrationen bildas en ny matris K , där matriserna K_i placeras i diagonalerna. Eftersom K_i har dimensionen $(n+1)*m$ får K dimensionen $n(n+1)*nm$.

$$K = \begin{pmatrix} K_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & K_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & K_n \end{pmatrix} \quad (3.42)$$

För modellparametrarna bildas en ny kolonnvektor x genom att placera x_i efter varandra. Eftersom dimensionen på modellparametervektorn x_i för en cell var $(n+1)*1$, så blir dimensionen för samtliga celler $n(n+1)*1$. På liknande sätt skapas för spårgastillförsel en kolonnvektor s med samtliga spårgasflöden för samtliga celler, varvid dimensionen blir $mn*1$.

$$x = (x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_i \quad \dots \quad x_n)^T \quad (3.43)$$

$$s = (s_1 \quad s_2 \quad \dots \quad s_i \quad \dots \quad s_n)^T \quad (3.44)$$

Med en sådan form på matriser och vektorer kan följande linjära samband mellan koncentrationer, modellparametrar och spårgastillförsel skapas, där antal ekvationer är $m \cdot n$, dvs produkten av antal mätningar och antal celler.

$$K x = s \quad (3.45)$$

Samtliga luftflöden kan således bestämmas, genom tillräckligt många mätningar av koncentrationer och spårgastillförsel.

3.4 Identifiering med kvadratisk programmering

För identifiering krävs det minst lika många mätningar av spårgastillförsel och koncentration som det finns modellparametrar. I själva verket görs betydligt fler mätningar för att förbättra noggrannheten, och K , x och s blir matriser i ett överbestämt ekvationssystem, där modellparametrarna x bestäms genom att minimera kvadratsumman av residualerna r under vissa begränsningar.

$$r = K x - s \quad (3.46)$$

$$f(x) = \sum_{i=1}^{mn} r_i^2 = r^T r \quad (3.47)$$

$$f(x) = (K x - s)^T (K x - s) \quad (3.48)$$

$$f(x) = s^T s - 2 K s^T x + x^T K^T K x \quad (3.49)$$

Sätt: $d = -2 K^T s$ och $D = K^T K$

Eftersom $s^T s$ är en konstant term har den ingen inverkan på x vid minimering. Med dessa förenklingar kan en ny objektfunktion bildas:

$$Z = d^T x + x^T D x \quad (3.50)$$

En fördel av att bilda objektfunktionen av kvadratsumman av residualerna, är att dimensionen på coefficientmatriserna i objektfunktionen blir oberoende av antal mätperioder. Matrisen D får dimensionen $n(n+1) \cdot n(n+1)$, och vektorn d dimensionen $n(n+1) \cdot 1$, och blir till skillnad från matrisen K och vektorn s enbart beroende av antal celler. Därför kan mätningarna få pågå under längre tid, varvid mätbrusets inverkan minskar och identifieringen förbättras, utan att behovet av datorkapacitet växer nämnvärt.

Den multicell som skall identifieras är ett öppet flödessystem, och lösningen skall uppfylla vissa fysikaliska villkor. Dessa är att luftflöden mellan rum aldrig kan vara negativa, eftersom varje flöde hör ihop med koncentrationen i det rum varifrån flödet kommer. Detsamma gäller för de flöden som lämnar eller kommer in i systemet, dvs för exfiltration och infiltration. Villkoren uttryckes i matrisform som linjära begränsningar:

$$x \geq 0 \quad Hx \geq b \quad (3.51)$$

Vänster olikhet gäller alla volymer och luftflöden. Höger olikhet uttrycker kontinuitetsvillkoren för flödessystemet, vilket bl.a. innebär att summan av flödesmatrisens kolonn- och radelement skall vara större än noll. H är därför en $2n \times n(n+1)$ -matris, vars element är +1, -1 eller 0, och b är en nollvektor.

Luftflödena i en multicell bestäms således genom att minimera summan av residualernas kvadrater under vissa bivillkor, vilket görs med kvadratisk programmering (Hedin 1989). Lösningen av problemet erhålles genom att formulera följande komplementära matrissamband.

$$\begin{pmatrix} v \\ u \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D+D^T & -H^T \\ H & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d \\ -b \end{pmatrix} \quad (3.52)$$

$$u, v, x, y \geq 0$$

$$v^T x + u^T y = 0$$

där u är en slackvariabel, och (y, v) är Lagrangemultiplikatorer som bestäms av villkoret att volymer och luftflöden är positiva samt av kontinuitetsvillkoren. Dimensionen på ekvationssystemet blir $n(n+1)+2n$, vilket är antal modellparametrar plus antal ex- och infiltrationsflöden.

Lösningen erhålles med Lemkes komplementära pivoteringsalgoritm, som finns som Fortranprogram av Ravindran (1972). Där införs en artificiell basvektor och man får en startlösning. Genom upprepade basbyten, till dess att den artificiella basvektorn åter lämnar basen, når man slutligen den komplementära lösningen.

3.5 Interpolering av koncentrationen

Multicellmodellen bygger på vissa förutsättningar som spårgasutrustningen inte klarar. En skillnad mellan modell och verklighet är att verklig spårgastillförsel kan ske under några sekunder med ett stort flöde, medan den lagras i mätdatafilen som ett litet genomsnittligt flöde för hela mätperioden. En annan skillnad är att modellen förutsätter samtidig mätning i alla celler, medan mätningarna i verkligheten ligger

med 30 sekunders förskjutning. För nio celler är det således upp till 240 sekunder mellan mätningar i samma period. Under den tiden kan koncentrationen ha förändrats högst betydligt, och på ett för modellen oförklarligt sätt.

För att klara problemen används modellbaserad interpolation. Mätintervallet delas upp i delintervall på 30 sekunder, dit spårgastillförseln fördelas efter hur den verkligen äger rum. Koncentrationen $c(t)$ interpoleras fram för varje delintervall, och bestäms av uppmätta koncentrationer (randvillkor), totalt luftflöde genom cellen Q , cellens volym V , samt direkt spårgasflöde $p(t)$, vilka alla är mer eller mindre kända. Utöver direkt tillförsel kommer spårgas även via överluft från andra celler. För hela mätperioden är detta i genomsnitt Δp , och utgör ytterligare en parameter vid interpolationen, som sker med en samplad modell.

Om $p(t+iT)$ är spårgastillförseln under delperiod i , antal delperioder är n per mätperiod, och randvillkoren uppmättes till $c(t)$ respektive $c(t+nT)$, så beräknas Δp ur sambandet:

$$c(t+nT) = F^n c(t) + G \sum_{i=1}^n F^{n-i} (p(t+iT) + \Delta p) \quad (3.53)$$

När Δp är känd kan koncentrationen bestämmas för varje delintervall.

$$c(t+T) = F c(t) + G (p(t) + \Delta p) \quad (3.54)$$

$$F = e^{-QT/V} \quad G = \frac{1-F}{Q}$$

Interpoleringen utförs före identifieringen, med följd att man tvingas använda approximativa luftflöden. Det är emellertid möjligt att även göra en exakt modellbaserad interpolation efter varje iteration i den kvadratiske programmeringen. I så fall får man tillgång till beräknade istället för approximativa luftflöden, vilket förbättrar interpoleringen av koncentrationerna. Interpolering med approximativa luftflöden skall endast tillgripas om lösningen med kvadratisk programmering inte konvergerar. I annat fall riskerar den att försämrade mätdata.

3.6 Regulator för konstant koncentration

Spårgasförsök kan indelas i öppet styrda och reglerade försök. Som styrda försök räknas konstant spårgastillförsel och avklingning. Reglerade försök innebär att reglera spårgastillförseln till önskad koncentration.

För att välja regleralgoritm för konstant koncentration, är det lämpligt att återvända till flödesbalansen, som den uttryckes i kontinuerlig tid:

$$V \frac{d c(t)}{dt} + Q c(t) = p(t) \quad (3.55)$$

Processen karakteriseras av tidskonstanten T_k och förstärkningen g , som definieras som faktorn för derivatan respektive insignalen när utsignalen uttryckes explicit. För rummet gäller därför:

$$T_k = \frac{V}{Q} \quad (3.56)$$

$$g = \frac{1}{Q} \quad (3.57)$$

Rummet utgör ett öppet system, till vilket en regulator skall väljas. Valet av parametrar beror på regleringens svårighetsgrad, som definieras som kvoten mellan dödtid T_d och tidskonstant T_k hos det öppna systemet. Enligt tyska normer (DIN 19226) motsvarar kvoten $T_d/T_k=0,05$ lätta, medan $T_d/T_k=0,5$ innebär svåra dynamiska egenskaper. Vid den lägre svårighetsgraden räcker det med P-funktion i regulatorm, medan PI-reglering krävs för svårare och PID-reglering för de allra svåraste applikationerna.

Låt oss undersöka svårighetsgraden för reglerade försök i normalt ventilerade kontorsrum. Tidskonstanten $T_k=V/Q$, är inverterat värde av specifika flödet (luftomsättning) i rummet. Den kan vara i storleksordningen 30 minuter, vilket motsvarar en luftomsättning på omkring 2 ggr/timma.

Dödtiden är tiden som förflyter från att spårgastillförseln startar tills koncentrationen börjar öka i rummet. Ökningen fördelas till en början ojämnt, varför det är lämpligt att dröja en tid mellan spårgastillförsel och mätning, för att uppfylla kravet på ideal blandning. Denna fördröjning utgör dödtiden och är mindre än en minut.

Med en uppskattad tidskonstant på 30 minuter och dödtid på 1 minut blir regleringens svårighetsgrad $T_d/T_k=1/30 \approx 0,03$. Det är således en enkel regleruppgift att hålla konstant spårgaskoncentration i ett rum, och en P-regulator blir därför ett lämpligt val.

Reglerproblemet kompliceras av att systemet påverkas av störningar, genom att luftflödet kan variera. Störningen kan inte direkt mätas, men luftflödet kan skattas ur tidigare mätperioder, för att sedan ingå som parameter i regulatorm. Regulatorm är således adaptiv och det skattade luftflödet används både för framkoppling och återkoppling.

Utsignalen från regulatorm skall ge en spårgastillförsel som kompenserar dels för spårgaskoncentrationens avvikelse från referensvärdet i själva mätögonblicket, dels för den spårgasmängd som försvinner ut med frånluften. För att få ett sådant samband integreras flödesbalansen för tiden T_i , som är reglertiden (reglerhorisonten), d.v.s. den

tid som regulatorn får på sig att eliminera avvikelserna mellan börvärdet c_r och uppmätt koncentration c .

$$V(c_r - c) + Q C = P \quad (3.58)$$

$$P = p T_r \quad (3.59)$$

$$C = T_r \frac{c + c_r}{2} \quad (3.60)$$

Volymen är bestämd av rummets geometri, medan däremot luftflödet skattas med hjälp av de m senaste mätperioderna. Eftersom volym och luftflöde är skattade storheter betecknas dessa som \hat{V} och \hat{Q} . Skattningen av luftflödet sker med integrerad flödesbalans, enligt beskrivning i kapitel 3.1. Uttryckt som spårgasflöde, blir då regulatorns utsignal:

$$p = \left(\frac{\hat{V}}{T_r} - \frac{\hat{Q}}{2} \right) (c_r - c) + \hat{Q} c_r \quad (3.61)$$

Spårgasflöde p är inte direkt anpassad som styrsignal för utrustningen, vilket däremot magnetventilens öppettid är. Om spårgasflödet genom magnetventilen är kalibrerat till q_s , och T är mätperiodens längd, så blir öppettiden T_o direkt proportionell mot spårgasflödet enligt sambandet:

$$T_o = \frac{p T}{q_s} \quad (3.62)$$

Regleralgoritmen (3.61) innehåller dels en term för återkoppling dels en för framkoppling. Återkopplingen fungerar som en proportionell regulator, där förstärkningen verkar direkt på reglerfelet. Framkopplingen kan närmast betraktas som regulatorns I-del, eftersom luftflödets skattning är en funktion av tidigare reglerfel.

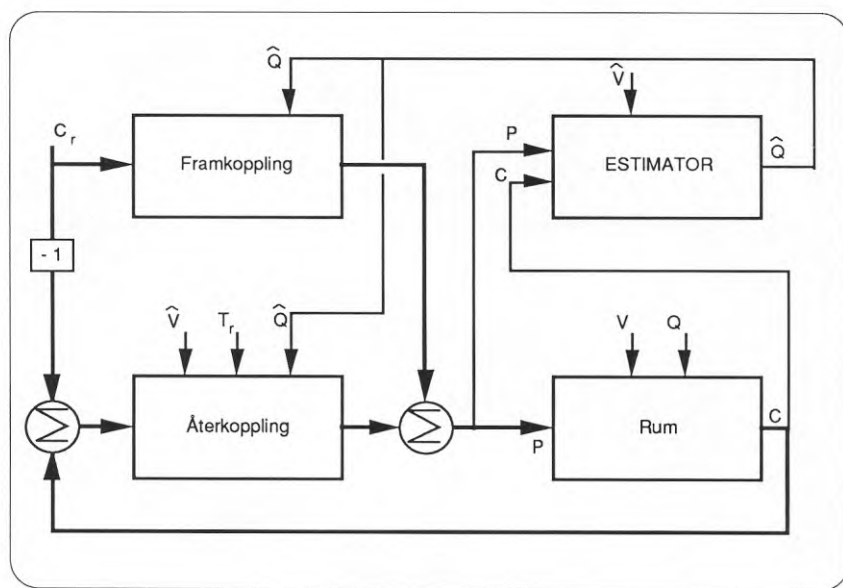
Resultatet är en adaptiv modellbaserad regulator. Hur rummet och regulatorn påverkar varandra visas av blockschemat i figur 3.2. Estimatoren innehåller regulatorns adaptiva funktion och ger en successivt förbättrad skattning av luftflödet, medan volymen är fix. Den adaptiva regulatorn finns i två varianter. I den andra varianten skattas både volym och luftflöde, vilket sker med multipel regression på det sätt som beskrivits i kapitel 3.2.

Inställningen av regulatorerna görs genom att bl.a. ange reglertid (reglerhorisont) samt startväden på luftflöde och rummets volym. I den ena av regulatorerna fixeras volymen till startvärdet, och i den andra skattas volymen. Skillnaden mellan reglermetoderna är försumbar av tre skäl. För det första är omblandningen i rummen tillräckligt bra för att den skattade volymen skall bli ungefär som den geometriska. För det andra kommer regulatorn med skattad volym att ändå utnyttja förinställd volym till dess den har en användbar skattning. För det tredje så ingår reglertid och

volym i samma term, varför skillnaden mellan geometrisk och skattad volym har liten betydelse, jämfört med de betydligt större skillnader som kan göras i valet av reglertid.

En kort reglertid innebär en stor förstärkning, med svängningar i koncentrationen. Så länge som skattningen inte är exakt, tillförs under det ena mätintervallet för mycket spårgas och under nästa intervall ingenting alls. En längre reglertid medför mindre variationer i spårgastillförseln, och en mjukare insvängning mot börvärdet. Eftersom skattat och verkligt luftflöde avviker särskilt i början, är det lämpligt att välja reglertiden längre än en mätperiod för att undvika svängningar i koncentrationen.

Regulatorns inverkan på skattningen av luftflöden är dock marginell. En sämre regulator torde snarare underlätta identifieringen, eftersom den ger en mer varierande koncentration och spårgastillförsel. Skattningen förbättras om koncentrationen regleras till olika nivåer. Fördelen med ett reglerat försök är att man på ett enkelt sätt når lämpliga koncentrationer, men nackdelen är att det ges ingen ny information om man ligger kvar på samma koncentration så länge att även spårgastillförseln blir konstant.



Hans Föllin, LTH

Figur 3.2 Blockschemata för reglering av konstant spårgaskoncentration.

4 Experiment med reglerad spårgastillförsel

4.1 Fyra rum utan ventilation

Det första experimentet utnyttjar fyra av rummen i Minilab enligt figur 4.1. Rummen är anslutna i serie med varandra, så att varje rum får överluft från ett rum och lämnar överluft till ett annat. Däremot är det befintliga ventilationssystemet bortkopplat och till- och frånluftkanalerna pluggade. Varje rum utgör en cell, och mätning sker i varje cell med 30 sekunders förskjutning. En mätperiod blir därför 120 sekunder.

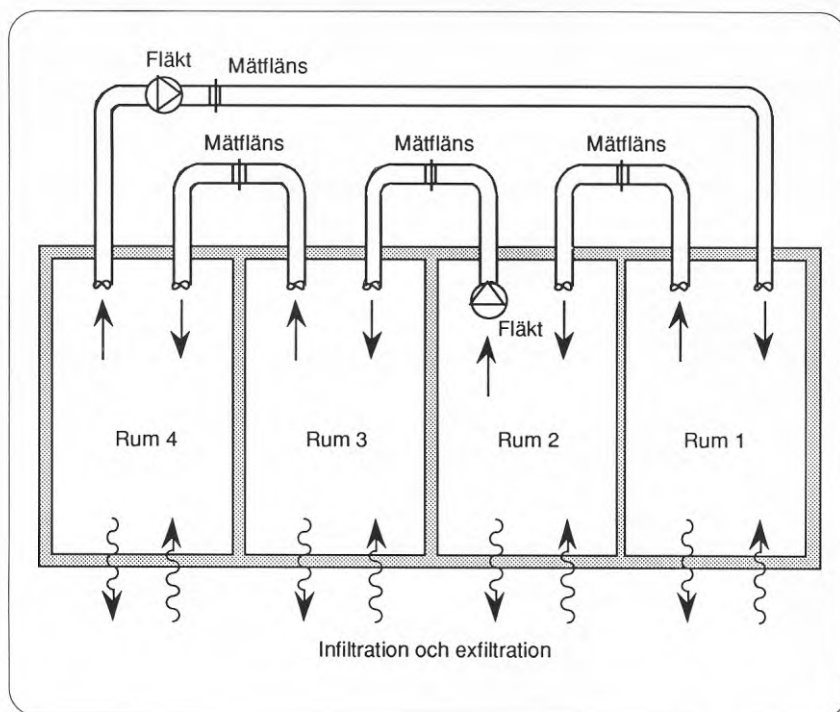
Rummen tillförs i tur och ordning spårgas, tills koncentrationen blir ungefär 500 ppm. Därefter sker en reglerad spårgastillförsel under en dryg timma. Genom att köra upp koncentrationen innan regleringen startar undviks att spårgastillförsel samtidigt sker i två celler, vilket utrustningen inte är kalibrerad för. Spårgasflödet är kalibrerat till 118 ml/s, och extra spårgasmängd var gång magnetventilen öppnar är 75 ml. I mätdatafilen lagras genomsnittligt spårgasflöde för varje mätperiod.

Försöket varar i fyra timmar, och figur 4.4 visar koncentrationerna, vars börvärde i respektive cell är 200, 300, 400 och 500 ppm. I rummet med lägst börvärde är spårgastillförseln med överluften för stor för att inställt värde skall kunna nås.

Spårgas tillförs med adaptiv reglering, där förstärkningen i reglerkretsen bestäms av skattat luftflöde ur tidigare mätperioder. Eftersom luftflödena är konstanta och skattningen successivt förbättras, kommer koncentrationen med tiden att avvika allt mindre från börvärdet.

Reglertiden är den tid som regulatorn får på sig att eliminera avvikelse i koncentrationen. Om luftflödet skattades korrekt i regulatorn vore en lämplig reglertid en mätperiod. Det dröjer dock en tid innan skattningen blir bra, varför man väljer en längre reglertid för att få mjukare insvängning. Reglertiden sätts till 5 min., medan en mätperiod är 2 min.

Mätningarna på de fyra cellerna genomförs under närmast ideala förhållanden, där varje cell är ett rum med god luftomblandning. I jämförelse med andra experiment som också har reglerad spårgastillförsel bör därför standardavvikelser och residualspridning bli relativt låga.



Hans Pollin, LTH

Figur 4.1 Byggnad med fyra celler

När mätningen är klar kan luftflödena identifieras. I multicellmodellen används integrerade volymbalanser för att beräkna sambandet mellan spårgastillförsel, koncentration och luftflöde. Kvadratisk programmering görs med fem iterationer. Däremot sker ingen interpolation som tar hänsyn till att mätvärdena är 30 sekunder förskjutna.

Varje ny iteration minskar residualspridningen och förbättrar beräkningen av luftflöden, som blir enligt figur 4.2. Residualspridningen är 0.39 ml/s, vilket är 4,6% av genomsnittlig spårgastillförsel. Identifieringen genomförs med volymerna fixa till sina geometriska värden. I figur 4.2 kan man observera en hög infiltration och exfiltration, vilket beror på kraftigt läckande över- och undertryck i rummen.

För att verifiera spårgasmätningen görs även en flödesmätning med mätfläns och urrör, vars resultat visas i figur 4.3. Skillnaden i uppmätta luftflöden mellan mätfläns och spårgas är mycket små, och uppgår till 0.05 ± 0.31 l/s. Det är mätflänsarna som här ger det högre flödet, och uttryckt i procent blir skillnaden $0,5 \pm 3,2\%$. Det första värdet (0,5%) anger medelavvikelsen, och det andra värdet (3,2%) anger standardavvikelsen.

Som jämförelse görs även en identifiering med fria volymer. Skillnaden mellan spårgas och mätflänsar ökar då till $0,5 \pm 0,6$ l/s, vilket motsvarar $5 \pm 6\%$ av genomsnittligt luftflöde. Den här gången ger spårgasmätningarna störst luftflöden.

Från \ Till	Rum 1	Rum 2	Rum 3	Rum 4	Infiltration
Rum 1				6,5	5,7
Rum 2	8,7				9,6
Rum 3		14,5			8,2
Rum 4			8,4		4,0
Exfiltration	3,5	3,7	14,3	5,9	
Totalt	12,2	18,3	22,8	12,4	

Figur 4.2 Luftflöden (l/s) uppmätta med spårgas i fyra celler. Fixa volymer

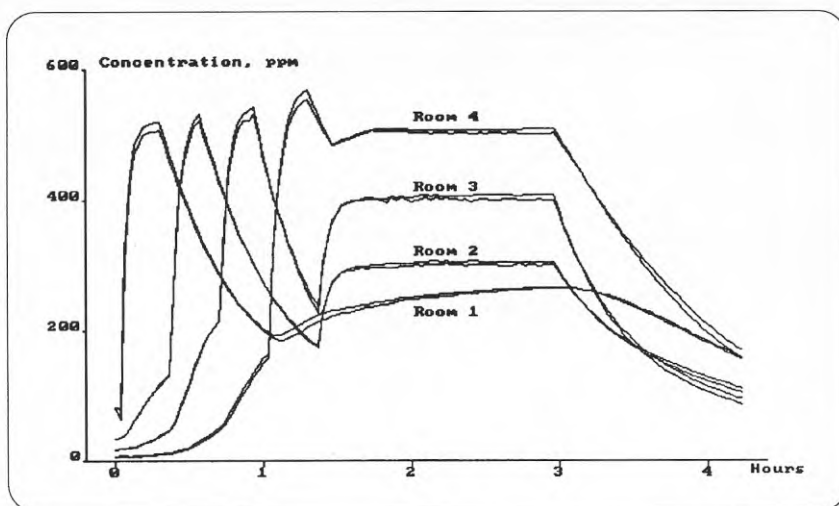
Från \ Till	Rum 1	Rum 2	Rum 3	Rum 4
Rum 1				6,6
Rum 2	8,9			
Rum 3		14,1		
Rum 4			8,7	

Figur 4.3 Luftflöden (l/s) uppmätta med mätflänsar i fyra celler

Med kända luft- och spårgasflöden simuleras sedan koncentrationerna. En jämförelse mellan uppmätta och simulerade koncentrationer visas i figur 4.4, där varje kurvvar nästan identiskt följs åt. Lagg märke till koncentrationen för rum 1, som efter ca 1,5 timma har börvärdet 200 ppm. Börvärdet är emellertid för lågt för att kalla på spårgastillförsel, eftersom för mycket spårgas medföljer överluften från rum 4. Frånsett de första minuterna sker således ingen direkt tillförsel till rum 1, vilket försämrar skattningen.

Spårgaskoncentrationerna borde reglerats med olika börvärden, istället för att vara konstanta för varje rum under stor del av mättiden. Allmänt gäller att identifieringen från spårgasmätningarna förbättras när koncentrationen får variera. Dessutom förbättras identifieringen om mätningarna får pågå under en längre tid, eftersom det slumpmässiga mätfelet minskar omvänt proportionellt med kvadratroten av antal mätdata.

Avvikelser mellan verkliga och simulerade koncentrationer enligt figur 4.4, kan även anges i tabellform enligt figur 4.5. Där framgår att standardavvikelsen är som högst 7,0 ppm, och i genomsnitt 5,8 ppm.



Figur 4.4 Uppmätt och simulerad spårgaskoncentration i fyra celler

	Standard avvikelse	Medel avvikelse	Max. avvikelse	Min. avvikelse
Rum 1	5,11	3,36	21,16	-3,74
Rum 2	4,48	1,16	10,58	-7,18
Rum 3	6,32	-0,12	17,56	-10,62
Rum 4	7,00	-0,45	14,51	-12,87

Figur 4.5 Avvikelser mellan uppmätt och simulerad koncentration i fyra celler

4.2 Mätning inom del av större byggnad

Begränsad kapacitet på spårgasutrustning och datorer gör det ofta nödvändigt att dela upp mätningar för större byggnader och ventilationssystem, och identifiera luftflödena i varje del för sig. Vare sig man söker luftbalansen i en del av eller hela byggnaden är det nödvändigt att ta hänsyn till den del som för tillfälligt inte ingår i mätningarna.

En första tanke kunde vara att låta den övriga byggnaden ingå i modellen enbart som exfiltration och infiltration i huvudkanalerna. Detta kommer dock inte fungera eftersom tilluften innehåller en viss koncentration av spårgas, dels via återluft och dels genom direkt spårgastillförsel i kanalen. Från tilluften sprids spårgas till övriga byggnaden för att sedan återvända i frånluftkanalen, med följd att luftflödet från övriga byggnaden inte kan identifieras som infiltration i frånluftkanalen.

En bättre approximation är att betrakta övriga byggnaden som en s.k. dummy-cell, vars koncentration läggs in i mätdatafilen. För att simulera koncentrationer för dummy-cellen räcker det att ungefär uppskatta dess luftomsättning. Identifieringen genomförs sedan med fri parameter för dummy-cellens volym.

Mellan den del av byggnaden där mätningarna äger rum och dummy-cellen, skall allt luftutbyte ske med ventilationssystemets till- och frånluftkanaler. Tilluftkanalen svarar då för totala lufttillförseln, medan infiltration och exfiltration istället direkt påverkar flödesbalansen i frånluftkanalen.

Med dessa förutsättningar kan koncentrationen i dummy-cellen simuleras med följande samplade tillståndsekvation:

$$c(t) = F c(t-T) + G p(t-T) \quad (4.1)$$

$$G = \frac{1-F}{Q} \quad F = e^{-QT/V}$$

Samtliga parametrar är skalärer, varvid $c(t)$ =koncentration, och $p(t)$ =spårgastillförsel T =mätperiod, Q =luftflöde, V =volym.

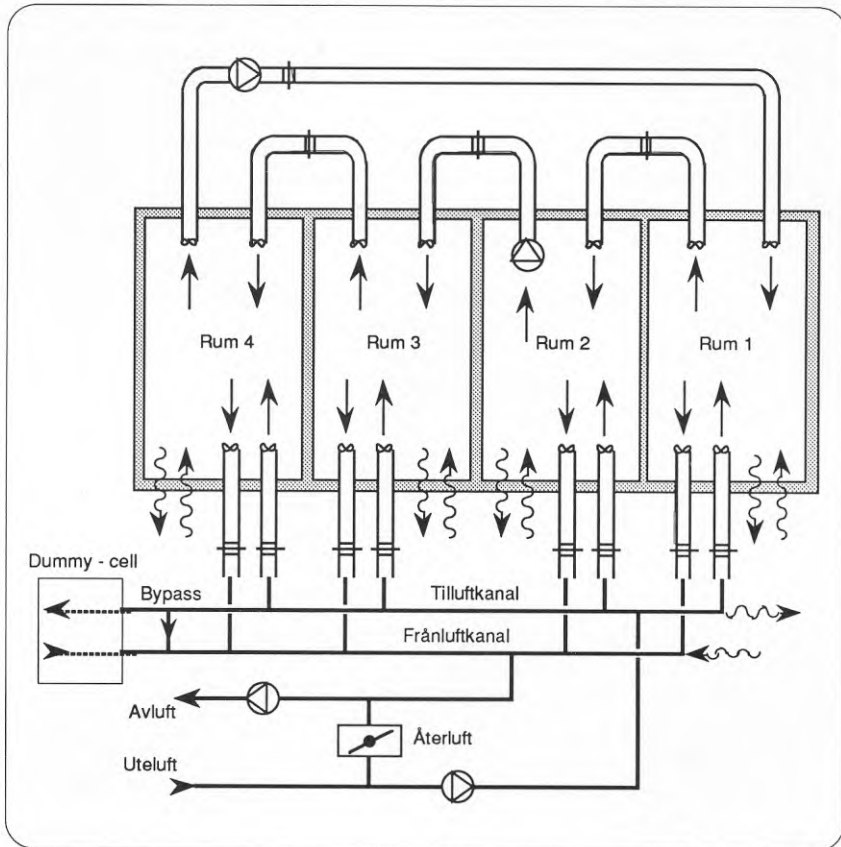
All spårgastillförsel i dummy-cellen kommer med tilluften och bestäms av dess koncentration $c_T(t)$:

$$p(t) = Q c_T(t) \quad (4.2)$$

Eftersom tilluftsystemet är snabbt, bestäms koncentrationen i dummy-cellen av koncentrationen i tilluftflödet under samma period:

$$c(t) = F c(t-T) + (1-F) c_T(t) \quad (4.3)$$

F är enbart beroende av luftomsättningen (specifikt luftflöde Q/V), som således är enda okända parameter och skall väljas i rätt storleksordning. Det kan förefalla riskabelt att behandla den övriga byggnaden genom att införa en dummy-cell i mätdatafilen. Koncentrationen är emellertid ganska stabil, eftersom det saknas direkt spårgastillförsel dit. Konsekvensen av hur luftomsättningen väljs visar sig därför inte bli så stora, om valet görs inom rimliga gränser. Det kan vara lämpligt att pröva olika mätdatafiler med olika luftomsättning, och välja den där dummy-cellens identifierade och geometriska volym bäst överensstämmer.



Hans Föllin, LTH

Figur 4.6 Byggnad med sex celler och en dummy-cell

För att pröva metoden genomförs mätningar inom en del av experimentbyggnaden. Spårgastillförsel och koncentrationmätning sker i samma fyra rum som under föregående experiment, men dessutom i huvudkanalerna för tilluft och frånluft. Kanalerna är även anslutna till övriga byggnaden där inga mätningar sker. Se figur 4.6.

Mätningarna genomförs således i sex celler, och mätperioden blir 180 sekunder. Spårgastillförsel sker med en inprogrammerad adaptiv regulator, vars parameter för luftflödet skattas med integrerad flödesbalans. Reglertiden är 300 sekunder.

Kalibrerat spårgasflöde är som tidigare 118 ml/s. Spårgastillförsel sker så att koncentrationen först stiger i varje cell, med början i till- och frånluftkanalen. Därefter sker inreglering till olika börvärden i olika rum. På så sätt kommer aldrig mer än en magnetventil för spårgastillförsel att vara öppen åt gången.

Mätningarna avslutas, och sedan sker komplettering av mätdatafilen med simulerade koncentrationer för dummy-cellen. För att undersöka hur valet av luftomsättning påverkar skattningen av luftflöden, skapas sex nya mätdatafiler, vardera med olika luftomsättning i dummy-cellen. Luftomsättningen väljs från 0,5 oms/h till 3,0 oms/h.

Figur 4.7 visar att valet av luftomsättning knappast alls påverkar totala luftflödet i de uppmätta cellerna. Inverkan blir något större för till- och frånluftkanalen än för rummen. Vad som inte framgår av figuren är hur luftomsättningen påverkar en cells interna flödesbalans, men även detta är försumbart.

I verkligheten torde man ha en grov uppfattning ($\pm 50\%$) om luftomsättning, med följd att felet på grund av dummy-cellen blir litet. Dessutom kan identifieringen göras med olika luftomsättning och fri parameter för dummy-cellens volym. Den skattade volym som då bäst överensstämmer med geometrisk volym torde svara mot lämpligaste luftomsättning.

Figur 4.8 visar skattningen av övriga byggnadens volym vid identifiering med olika luftomsättningar. Den geometriska volymen är ca. 85 m³, vilket stämmer bäst med den skattade volymen vid luftomsättningen 1,0 ggr/h.

Luftomsättning	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Rum 1	12,3	12,2	12,1	12,1	12,1	12,2
Rum 2	17,3	17,4	17,5	17,5	17,5	17,5
Rum 3	18,4	18,5	18,5	18,5	18,4	18,3
Rum 4	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1
Tilluft	150,6	151,1	151,1	151,1	151,1	151,2
Frånluft	154,5	156,0	157,8	159,2	160,1	160,8
Dummy	30,6	28,4	29,7	30,3	30,6	30,9

Figur 4.7 Totalt luftflöde (l/s) uppmätt med spårgas i sex celler och en dummy-cell, som är simulerad med olika luftomsättning (ggr/tim.).

Luftomsättning	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Dummycell volym	213	98	67	51	41	34

Figur 4.8 Skattade volymer (m³) vid olika luftomsättning (ggr/tim) i dummy-cellen

Luftflöden har identifierats ur spårgasmätningarna med hjälp av multicellmodellen och integrerade volymbalanser. Beräkningarna genomfördes med fixa parametrar för volymerna, med undantag för dummy-cellen. Kvadratisk programmering görs med fem iterationer, varvid residualspridningen kommer ner till 0,39 ml/s, vilket här är 3,2% av genomsnittlig spårgastillförsel.

Figur 4.9 visar luftflöden som de skattats när spårgasmätningarna kompletterats med dummy-cellen vid luftomsättningen 1,0 ggr/h. Tabellen skall förstås, så att infiltration (96,8 l/s) i tilluftkanalen motsvarar uteluftflödet, medan exfiltration (101,7 l/s) från frånluftkanalen motsvarar avluftflödet. Totala tilluftflödet är 151,1 l/s, varav 64% är uteluft och 36 % är återluft.

Figur 4.10 visar storleken på luftflöde som uppmätts med mätfläns och u-rör. Värden inom parentes ligger utanför mätområdet. Infiltration och exfiltration har satts in som restposter i flödesbalansen.

Vid en jämförelse mellan spårgas och mätfläns blir avvikelserna mycket små. Jämförelsen görs enbart för de fyra värden som ligger innanför mätflänsarnas mätområde, varvid skillnaden blir $0,08 \pm 0,32$ l/s. (Första värdet anger medelavvikelse, och andra värdet standardavvikelse). Det är spårgasen som här ger det något högre medelvärde. I procent av luftflödets medelvärde är avvikelsen $0,8 \pm 3,3\%$.

När luftflöden är identifierade från mätningarna kan nya koncentrationer simuleras efter hur spårgasen har tillförts. Figur 4.11 visar simulerade och verkliga spårgaskoncentrationer som två nästan identiska kurvor för varje cell. Hur stor avvikelsen är anges i figur 4.12. Standardavvikelsen är som högst 23 ppm, och i genomsnitt 12 ppm.

Den goda överensstämmelse som fanns mellan mätningarna med spårgas och mätfläns, gäller inte i samma grad simulerade och verkliga spårgaskoncentrationer. Orsaken är att koncentrationen i huvudkanalerna blir antingen maximal eller minimal när spårgastillförseln startar och slutar, trots att tillförseln äger rum under endast en del av mätperioden. Detta är ett problem vid mätning i huvudkanalerna som inte är betingat av att en dummy-cell införes.

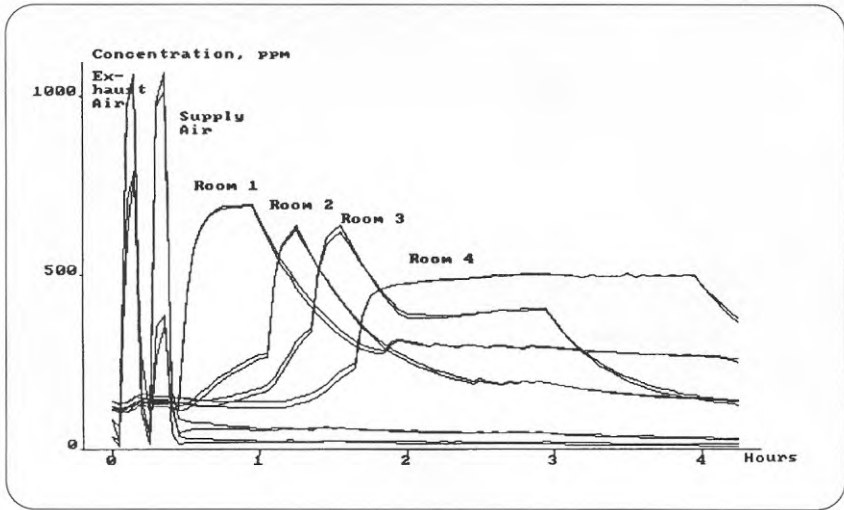
Resultatet från övriga jämförelser visar dock att det är möjligt att genomföra en spårgasmätning inom en del av ett större system, varvid luftflöden kan identifieras genom att införa en dummy-cell. Därmed har man också en metod att använda för bestämning av samtliga luftflöden i stora byggnader och ventilationssystem.

Till \ Från	Rum 1	Rum 2	Rum 3	Rum 4	Dummy	Tilluft	Frånluft	Infiltration
Rum 1				6,4		1,7		4,1
Rum 2	8,7					3,1		5,6
Rum 3		15,0				2,4		1,0
Rum 4			7,8			2,2		1,1
Dummy						28,3		0,1
Tilluft							54,3	96,8
Frånluft	3,5	2,4	4,9	2,3	28,4	110,0		4,6
Exfiltration	0	0	5,8	2,4	0	3,5	101,7	
Totalt	12,2	17,4	18,5	11,1	28,4	151,1	156,0	

Figur 4.9 Luftflöden (l/s) uppmätta med spårgas i sex celler och en dummy-cell

Till \ Från	Rum 1	Rum 2	Rum 3	Rum 4	Tilluft	Infiltration
Rum 1				6,8	(3,0)	(1,6)
Rum 2	8,4				(3,6)	(4,9)
Rum 3		14,8			(3,0)	
Rum 4			7,6		(3,0)	
Frånluft	(3,0)	(2,1)	(4,2)	(3,3)		
Exfiltration			(6,0)	(0,5)		

Figur 4.10 Luftflöden (l/s) uppmätta med mätflänsar i sex celler



Figur 4.11 Uppmätt och simulerad koncentration i sex celler

	Standard avvikelse	Medel avvikelse	Max. avvikelse	Min. avvikelse
Rum 1	7,4	-4,4	15,3	-19,8
Rum 2	6,2	-5,4	11,4	-17,1
Rum 3	9,2	-7,1	19,8	-22,0
Rum 4	8,1	-6,7	4,3	-21,0
Dummy	2,3	-4,7	2,9	-6,2
Tilluft	14,0	-5,8	87,0	-72,7
Frånluft	23,6	-6,0	102,4	-161,6

Figur 4.12 Avvikelser mellan uppmätt och simulerad koncentration i sex celler och en dummy-cell

4.3 Bestämning av luftflöden med enkelcellmodellen

Totala luftflödet i ett rum kan även beräknas med enkelcellmodellen, under förutsättning att ingen annan spårgas tillförs rummet än direkt genom tillförselslangen. Totala luftflödet inbegriper då även överluft från angränsande rum.

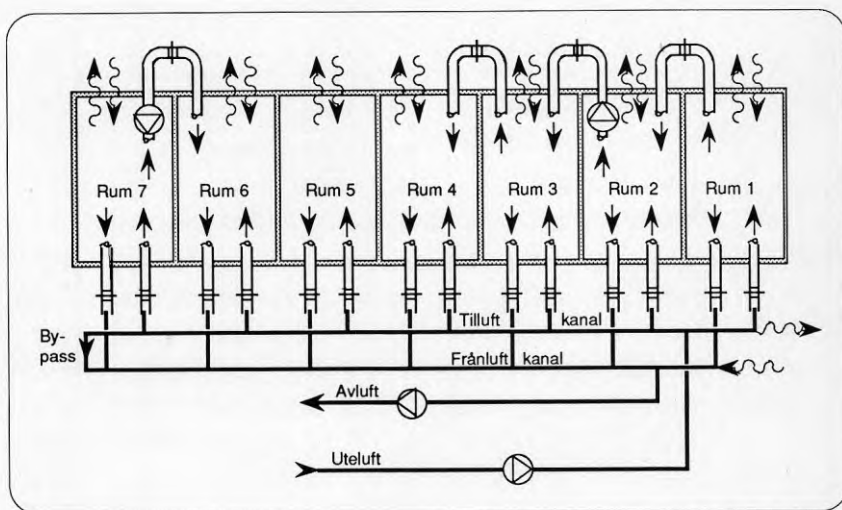
Experimentet utnyttjar hela experimentbyggnaden, vilken består av 7 rum samt tilluft- och frånluftkanaler, enligt figur 4.13. Totalt blir det nio celler. Dessutom

tillkommer en tionde blindcell, varvid mätperioden blir 300 sekunder. Mätningarna genomförs med reglerad spårgastillförsel, där koncentrationen ändras mellan några olika nivåer.

Avsikten är att ta fram mätdata som kan användas för både enkelcellmodellen och multicellmodellen, för att sedan jämföra resultaten. För att totala luftflödet skall kunna skattas med enkelcellmodellen sker till skillnad från tidigare ingen återluftföring. Enkelceller åstadkommes genom att tillföra spårgas i baklänges ordning jämfört med hur luften går. Således först i frånluften, och därefter i rum 7, 6, 5 osv., och slutligen i tilluften. Det är viktigt att ingen spårgas tillförs en cell genom överluft, innan luftflödet i cellen har bestämts med enkelcellmodellen.

Experimentet är uppdelat på två mätningar, som gjordes med två månaders mellanrum. Vid en av mätningarna (oktober) kalibrerades spårgastillförseln till 118 ml/s genom att tillföra spårgas i ett rum och mäta koncentrationen. För den andra mätningen (augusti) bestämdes spårgastillförseln till 127,8 ml/s med cylinder och kalibreringspåse.

Medan en särskild beräkningsdator behövs vid identifiering med multicellmodellen, så beräknas luftflöden med enkelcellmodellen under mätningarna direkt i mät datorn. Programstyrningen fungerar så att totalt luftflöde och volym beräknas för en ny cell var 20:de mätintervall. Dels görs en skattning av flöde med given volym, där flödesbalansen integreras i ett tidskontinuerligt system, och dels skattas luftflöde och volym i en tidsdiskret flödesmodell, som löses med multipel regression.



Hans Pollin, LTH

Figur 4.13 Byggnad med nio celler utan återluft.

Resultatet från mätningarna identifierade med enkelcellmodellen visas i figur 4.14. Dessa kan jämföras med luftflöden som de uppmättes med mätflänsar och u-rör. Då spårgastillförseln kalibrerades 127,8 ml/s (augusti) uppmättes luftflödena enligt figur 4.15, och för mätserien med kalibreringen 118 ml/s (oktober) blev luftflödena enligt figur 4.16. Märk att flera av tilluft- och frånluftflödena ligger betydligt under gränsen för mätflänsarna mätområde inom parentes, med följd att även totalt flöde förlorar i noggrannhet. Exfiltration och infiltration har erhållits genom att subtrahera övriga flöden från det totala flödet.

I jämförelse med mätflänsar ger spårgasmätning högre luftflöden. Hur stor avvikelser är till mätflänsar vid bestämning av luftflöden med spårgas enligt enkelcellmodellen framgår av figur 4.17. Bäst överensstämmer mätningarna då kalibreringen är 118 ml/s, och både luftflöde och volymer är fria parametrar i enkelcellmodellen. Då är således skillnaden till mätflänsar $8 \pm 5\%$, varav en viss del kan hänföras till att rummen har både infiltration och exfiltration, vilket inte beaktas med mätflänsar. Att så är fallet kommer att framgå vid identifiering med multicellmodellen, och visas i figur 4.20 och 4.21.

Luftflöden i enkelcellmodellen identifierades bäst med fria volymer, i motsats till multicellmodellen där skattningen genomgående blev bättre med fixa geometriska volymer. Ändå avvek enkelcellmodellens luftflöden betydligt mer från mätflänsarna än samtliga beräkningar med multicellmodellen. Det är dock rimligt att enkelcellmodellen ger sämre resultat, eftersom totalt luftflöde för respektive cell bara kan bestämmas under den korta tiden då ingen spårgas tillförs cellen med tilluft- eller överluftflöden. Här har varje cell 20 mätperioder till förfogande, medan de vid identifiering med multicellmodellen kan utnyttja samtliga mätperioder.

	Augusti kalibrering 127,8 ml/s				Oktober kalibrering 118,0 ml/s			
	Integrering		Regression		Integrering		Regression	
	Volym	Flöde	Volym	Flöde	Volym	Flöde	Volym	Flöde
Rum 1	30,0	17,1	33,5	16,6	29,0	15,5	31,1	15,1
Rum 2	30,0	25,2	33,8	24,5	29,0	19,4	31,1	19,1
Rum 3	25,0	23,8	30,0	22,8	24,0	24,1	27,9	23,4
Rum 4	30,0	16,8	34,7	15,9	29,0	15,1	31,8	14,5
Rum 5	30,0	16,9	32,3	16,5	29,0	12,0	28,7	12,1
Rum 6	25,0	25,3	29,9	24,4	24,0	22,0	27,4	21,4
Rum 7	30,0	22,2	37,0	20,9	29,0	18,0	33,8	17,1
Tilluft	2,0	180,7	12,7	180,7	2,0	177,4	15,2	189,1
Frånluft	2,0	213,5	12,6	214,0	2,0	184,5	14,2	195,9

Figur 4.14 Luftflöden (l/s) och volymer (m^3) enligt enkelcellmodellen, vid två mätningar med olika kalibrering. Reglerad spårgastillförsel i nio celler

Till \ Från	Rum 1	Rum 2	Rum 3	Rum 4	Rum 5	Rum 6	Rum 7	Tilluft	Infiltration
Rum 1								9,1	(5,0)
Rum 2	10,2							(4,1)	(5,9)
Rum 3		14,4						(3,5)	
Rum 4			9,0					(3,2)	(1,3)
Rum 5								(6,2)	(7,3)
Rum 6								14,0	(8,1)
Rum 7						9,6		(3,0)	(3,7)
Frånluft	(3,9)	(5,8)	(4,5)	13,5	13,5	12,5	16,3		
Exfiltration			(4,4)						
Totalt	14,1	20,2	17,9	13,5	13,5	22,1	16,3		

Figur 4.15 Luftflöden (l/s) uppmätta i augusti med mätfläns.

Till \ Från	Rum 1	Rum 2	Rum 3	Rum 4	Rum 5	Rum 6	Rum 7	Tilluft	Infiltration
Rum 1								14,3	
Rum 2	9,2							(4,5)	(4,5)
Rum 3		14,3						(7,1)	
Rum 4			10,0					(3,3)	(0,3)
Rum 5								8,1	(3,5)
Rum 6								16,6	(3,8)
Rum 7						9,5		(4,2)	(0,5)
Frånluft	(3,3)	(3,9)	(4,2)	13,6	11,6	10,9	14,2		
Exfiltration	(1,8)		(7,2)						
Totalt	14,3	18,2	21,4	13,6	11,6	20,4	14,2		

Figur 4.16 Luftflöden (l/s) uppmätta i oktober med mätfläns.

Kalibrering	127,8 ml/s		118,0 ml/s	
Beräkningsmetod	Integrerad flödesbalans	Multipel regression	Integrerad flödesbalans	Multipel regression
Avvikelse i flöde	$4,2 \pm 1,3$ l/s	$3,4 \pm 1,1$ l/s	$1,8 \pm 1,1$ l/s	$1,3 \pm 0,9$ l/s
Procentuell avvikelse	25 ± 8 %	20 ± 7 %	11 ± 7 %	8 ± 5 %

Figur 4.17 Avvikelse vid bestämning av luftflöden mellan mätningar med spårgas och mätflänsar. Identifiering med enkelcellmodellen för nio celler

4.4 Interpolerade mätdata för multicellmodellen

Samma mätdata som tidigare bearbetades i enkelcellmodellen skall också utnyttjas för att identifiera luftflöden med multicellmodellen. Detta sker liksom tidigare med integrerade volymbalanser, kvadratisk programmering med fem iterationer, och fixa geometriska volymer. Denna gången konvergerar emellertid inte lösningen, på grund av att verkligheten tydligt avviker alltför mycket från modellen.

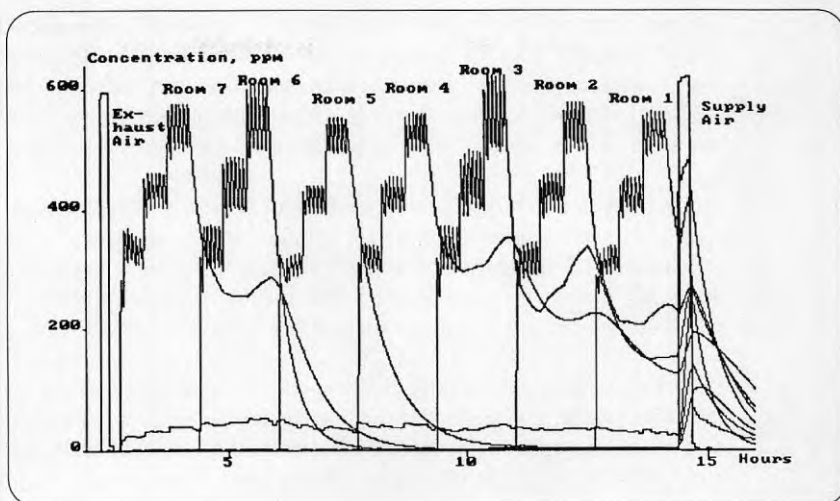
En svaghet är att den verkliga spårgastillförseln sker under några sekunder med ett stort flöde, medan det i mätdatafilen lagras som ett genomsnittligt flöde under 300 sekunder. Dessutom bygger modellen på samtidig mätning i alla celler, medan i verkligheten mätningarna ligger med upp till 240 sekunders förskjutning. Under den tiden kan koncentrationen ha förändrats betydligt.

För att bemästra problemet görs en modellbaserad interpolation. Mätintervallet delas upp i tio intervall på vardera 30 sekunder, dit spårgastillförseln fördelas efter hur den verkliga äger rum. Var tionde koncentration kommer då att utgöra verkliga mätningar och bildar randvillkor. Ett antaget totalt luftflöde genom varje cell är också nödvändig ingångsdata. Genom det sätt som spårgas tillfördes i just detta experiment, kunde dessa luftflöden som bekant skattas med en enkelcellmodell.

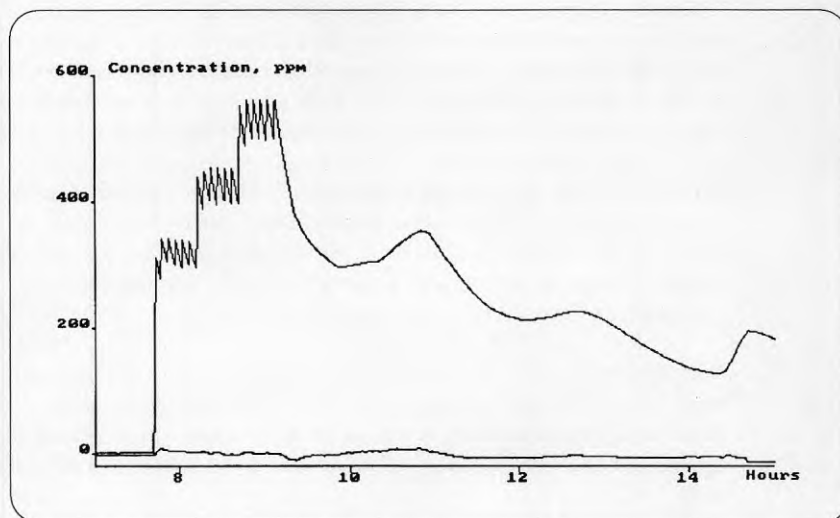
Sambandet mellan direkt spårgastillförsel, randvillkor, volym och luftflöde avgör hur mycket spårgas som måste ha kommit med överluften. Detta fördelas lika mellan de tio 30-sekundersintervallen och ingår tillsammans med övriga parametrar i de samplade tillståndsekvationer som enligt beskrivning i teoriavsnittet bildar de interpolerade koncentrationerna.

Uppmätt spårgaskoncentration visas i figur 4.18 för mätningarna när kalibreringen var 118 ml/s. Figuren visar koncentrationen efter interpolering, varför enbart vart tionde värde verkligen är uppmätt. Koncentrationerna svänger med minima kring börvärdena 300, 400 och 500 ppm. Varje minima är ett verkligt mätvärde som följs av spårgastillförsel, varvid koncentrationen når en topp, för att sedan sjunka till nästa mätvärde. Avståndet mellan minima är således 300 sekunder. Figur 4.19 visar koncentrationen i rum 4, där man känner igen de karakteristiska spetsarna när

spårgastillförel äger rum. Den undre kurvan som rör sig kring noll, visar avvikelserna mellan uppmätt/interpolerad och simulerad koncentration.



Figur 4.18 Uppmätt/interpolerad koncentration vid reglerad spärgastillförel i nio celler. Oktober kalibrering



Figur 4.19 Uppmätt/interpolerad koncentration vid reglerad spärgastillförel i rum 4 (övre kurva). Avvikelse mellan uppmätt/interpolerad och simulerad koncentration (undre kurva). Oktober kalibrering

Med interpolerade mätvärden kan nu luftflöden identifieras ur multicellmodellen, och blir enligt figur 4.20 och 4.21. Motsvarande flöden uppmätta med mätfläns blev enligt de tidigare figurerna 4.15 och 4.16.

Låt oss först undersöka luftflöden identifierade med multicellmodellen, från spårgasförsöket där kalibreringen var 127,8 ml/s. Jämförs resultatet från spårgasmätningarna med med luftflöden uppmätta med mätfläns och u-rör, blir totalluftflödet i varje rum $1,8 \pm 1,0$ l/s högre med spårgas än med mätfläns. Detta motsvarar $10,7 \pm 6,0$ %, vilket är en halvering jämfört med enkelcellmodellen.

Bestämning av totalluftflöde med mätflänsar blir osäkert eftersom det är summan av luftflöden även utanför mätområdet. Jämförelsen mellan spårgas och mätflänsar förbättras därför om den begränsas till de tolv flöden som ligger innanför mätområdet. Spårgasförsöket med multicellmodellen ger då $0,7 \pm 0,9$ l/s högre luftflöden än mätflänsarna, och skillnaden har därmed reducerats till $5,9 \pm 7,9$ %.

Låt oss sedan jämföra luftflöden då spårgasflödet kalibrerades till 118 ml/s. Det totala luftflödet i varje rum vid identifiering med multicellmodellen är fortfarande högre än med mätflänsar, men avvikelserna har reducerats till $0,1 \pm 0,9$ l/s eller $0,6 \pm 5,5$ %. Samma jämförelse för de tolv luftflöden som ligger inom mätområdet ger $0,4 \pm 0,7$ l/s eller $3,2 \pm 6,5$ %, fast här ger mätflänsarna högst luftflöden. Identifiering med multicellmodellen avviker således betydligt mindre från mätflänsar än enkelcellmodellen. Den gav som bekant 8 ± 5 % vid multipel regression och spårgasflöde 118 ml/s.

Eftersom spårgasflödet 118 ml/s ger bäst resultat används dessa mätningar för identifiering av luftflöden, när de i sin tur skall utnyttjas för beräkning av simulerade koncentrationer. Om simulerade och verkliga (interpolerade) koncentrationer jämföres blir avvikelserna enligt figur 4.22. Även den undre kurvan i figur 4.19, som gäller rum 4, visar hur väl simulerade och verkliga koncentrationer överensstämmer.

Det finns flera skäl till att multicellmodellen ger tillförlitligare resultat än enkelcellmodellen. Dels utnyttjar enkelcellmodellen enbart 20 mätintervall per cell medan multicellmodellen använder sig av samtliga. Dels tar enkelcellmodellen enbart hänsyn till mätningar i en cell, medan multicellmodellen bestämmer totalluftflödet i en cell från mätningarna i samtliga celler.

Vid jämförelse mellan spårgasmätningar och mätflänsar avviker luftflödena alltid mest i rum 7. Liknande iakttagelse görs för standardavvikelser mellan uppmätta och simulerade koncentrationer. Även där har samma rum genomgående sämst anpassning. Detta visar betydelsen av god luftomblandning, som just i rum 7 stördes av lådor o.dyl.

Till \ Från	Rum 1	Rum 2	Rum 3	Rum 4	Rum 5	Rum 6	Rum 7	Tilluft	Frånluft	Infiltration
Rum 1								9,0		6,5
Rum 2	11,1							4,1		7,2
Rum 3		15,9						4,0		0,8
Rum 4			10,3					2,9		1,9
Rum 5								6,3		9,1
Rum 6								13,0		8,9
Rum 7						9,5		2,6		7,4
Tilluft										181,3
Frånluft	4,3	6,6	5,0	14,5	15,5	12,5	17,8	135,2		1,9
Exfiltration	0	0	5,4	0,5	0	0	1,7	4,1	213,5	
Totalt	15,5	22,5	20,7	15,0	15,5	22,0	19,5	181,3	213,5	

Figur 4.20 Lufflöden (l/s) uppmätta i augusti vid reglerad spårgastillförsel i nio celler. Kalibrering 127,8 ml/s. Multicellmodell

Till \ Från	Rum 1	Rum 2	Rum 3	Rum 4	Rum 5	Rum 6	Rum 7	Tilluft	Frånluft	Infiltration
Rum 1								13,5		0,7
Rum 2	8,8							4,0		5,2
Rum 3		14,2						6,1		1,0
Rum 4			10,1					3,1		0,9
Rum 5								7,7		3,8
Rum 6								14,4		5,2
Rum 7						9,0		3,2		3,9
Tilluft										191,4
Frånluft	3,4	3,7	5,4	14,0	11,5	10,6	15,0	133,7		0
Exfiltration	1,9	0	5,9	0	0	0	1,1	5,7	197,3	
Totalt	14,2	18,0	21,3	14,0	11,5	19,5	16,0	191,4	197,3	

Figur 4.21 Lufflöden (l/s) uppmätta i oktober vid reglerad spårgastillförsel i nio celler. Kalibrering 118 ml/s. Multicellmodell

	Standard avvikelse	Medel avvikelse	Max. avvikelse	Min. avvikelse
Rum 1	3,54	-1,50	15,22	-17,82
Rum 2	2,50	-1,77	6,39	-7,11
Rum 3	3,47	-1,70	11,82	-14,98
Rum 4	4,29	-2,05	9,23	-13,30
Rum 5	4,52	-3,59	4,73	-24,99
Rum 6	6,85	-3,96	9,44	-45,97
Rum 7	8,55	-4,29	23,64	-20,94
Tilluft	1,95	-2,64	31,65	-38,94
Frånluft	6,59	-2,48	168,96	-170,63

Figur 4.22 *Avvikelser mellan uppmätt/interpolerad och simulerad koncentration vid reglerad spårgastillförsel i nio celler. Kalibrering 118 ml/s*

Experimentet har utgått från två skilda sätt att kalibrera spårgastillförseln. Ett sätt har varit att tillföra spårgas direkt i en kalibreringspåse, som sedan töms via en cylinder med kolv, samtidigt som antal kolvslag räknas. På så sätt bestämdes det stationära spårgasflödet till 127,8 ml/s, och extra spårgasvolym när en magnetventil öppnar (startvolym) till 77,2 ml.

Det andra sättet var att fylla ett slutet rum med spårgas, och bestämma spårgasflödet genom att mäta koncentrationen. Den metoden gav spårgasflödet 118 ml/s, men ingen startvolym. Istället användes startvolymen från den tidigare kalibreringsmetoden, vilken avrundades till 75 ml. En fördel med sistnämnda metod är att den även kalibrerar med avseende på koncentrationen.

Om man jämför mätningarna med spårgas och mätfläns, så blir avvikelsen lägst för 118 ml/s. Att tillföra spårgas i ett slutet rum visade sig åtminstone i detta avseendet vara en bättre kalibreringsmetod än cylinder och kalibreringspåse.

Ett annat sätt att kontrollera om spårgastillförseln är rätt kalibrerad är att pröva olika spårgasflöden i mätdatafilen, och se hur residualspridningen påverkas. Jämförelsenivån läses genom att fixera volymerna. Det spårgasflöde som ger lägst residualspridning kan anses som rätt.

Koncentrationerna hämtas från experimentet där spårgasflödet kalibrerades till 118 ml/s. Dess mätdata justeras genom att byta ut kalibrerade 118 ml/s mot 98 ml/s, 108 ml/s och 128 ml/s. På så sätt skapas tre nya mätdatafiler som identifieras med multicellmodellen, varvid residualspridningen blir enligt figur 4.23.

För att förhindra att residualspridningen minskar enbart på grund av lägre spårgasflöde, så har rummen fixa geometriska volymer. Det visar sig då att residualspridningen blir lägst vid spårgasflödet 118 ml/s, vilket överensstämmer med kalibreringen. Residualspridningen för 118 ml/s är 0,315 ml/s, vilket är 3,2% av genomsnittlig spårgastillförsel. En jämförelse har även gjorts av standardavvikelseerna för de fyra fallen, och även den ger bäst resultat för 118 ml/s.

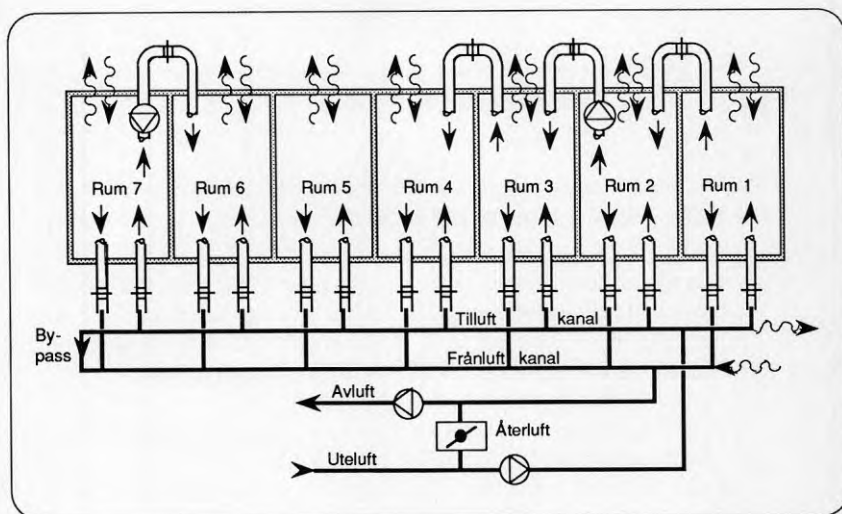
Spårgasflöde	98 ml/s	108 ml/s	118 ml/s	128 ml/s
Residualspridning	0,399 ml/s	0,318 ml/s	0,315 ml/s	0,391 ml/s

Figur 4.23 Residualspridning för olika spårgasflöden.

5 Experiment med konstant spårgastillförsel

5.1 Beskrivning av experimentet

Medan tidigare experiment hade reglerad spårgastillförsel för konstant koncentration, så genomförs detta med konstant spårgastillförsel. Experimentet använder samtliga sju rum i Minilab, och dessutom tilluft- och frånluftkanalerna, enligt figur 5.1. Sammanlagt är det nio celler, och mätperioden är 270 sekunder. Tillförseln sker under ca. en timma i varje cell, med början i tilluftkanalen. Därefter följer rummen i tur och ordning och slutligen tillförs spårgas i frånluftkanalen. Mätningarna varar ungefär 12 timmar.



Hans Follin, LTH

Figur 5.1 Byggnad med nio celler och återluft

För att konstant spårgastillförsel skall vara möjlig under en längre tid, är det nödvändigt att reducera spårgasflödet. Detta har gjorts med en stypventil så att spårgasflödet blir 8,8 ml/s, och den extra spårgasmängd när en magnetventil öppnar blir 90 ml. Dessa är kalibrerade värden.

När identifieringen sker med fria parametrar för volymerna, kommer dessa att bli något för stora jämfört med geometrin. För att få beräknade och geometriska volymer ungefär att överensstämna reduceras därför spårgasflödet i mätdatafilen med 5% till 8,36 ml/s. Storleken på de identifierade volymerna blir då enligt figur 5.2. Det är svårt att undvika systematiska fel vid kalibreringen. Att på detta sätt justera mätdatafilen efter volymerna är en möjlighet att förbättra resultatet.

Vid en jämförelse mellan skattade och geometriska volymer enligt figur 5.2 så avviker rum 7 mest, vilket innebär att omblandningen är sämst där. Detta bekräftas även av standardavvikelsen i figur 5.8, som är störst i det rummet.

Byggnadens luftflöden kommer dels att identifieras med kalibrerat spårgasflöde 8,8 ml/s, och dessutom med reducerat spårgasflöde 8,36 ml/s, samtidigt som vissa parametrar får vara fria. I en av beräkningarna är samtliga parametrar fria, medan nästa har nollflöden fixerade, och i ytterligare en beräkning är även volymerna fixerade.

	Rum 1	Rum 2	Rum 3	Rum 4	Rum 5	Rum 6	Rum 7	Till- luft	Från- luft
Fixa volymer	29,0	29,0	24,0	29,0	29,0	24,0	29,0	2,0	2,0
Fria volymer	29,8	30,4	25,7	29,3	29,0	25,2	35,1	9,7	6,9

Figur 5.2 Jämförelse mellan fria och fixa volymer vid identifiering i nio celler. Konstant spårgastillförsel 8,36 ml/s

5.2 Fixa parametrar

Den första identifieringen sker med den ursprungliga mätdatafilen, där spårgasflödet har behållit sitt kalibrerade värde 8,8 ml/s. Mellan rum där luft omöjligen kan passera har luftflödet fixerats till noll. Volymerna har fixerats till sin geometriska storlek. Med dessa förutsättningar beräknas luftflöden enligt figur 5.3.

För tilluftkanalen innebär infiltration utluftflöde (97,1 l/s), medan för frånluftkanalen exfiltration innebär avluftflöde (100,2 l/s). Luftflödet till tilluftkanalen från frånluftkanalen utgör återluften (62,5 l/s), medan luftflödet från tilluftkanalen till frånluftkanalen utgör by-pass (102,7 l/s). Återluftföringen är således 39%.

Övriga datakörningar görs med justerad mätdatafil, där spårgasflödet reducerats till 8,36 ml/s. Om parametrarna för volymer och nollflöden fixerats, skattas luftflöden enligt figur 5.4. Med fria volymer blir luftflöden enligt figur 5.5.

Luftflöden uppmätta med mätflänsar framgår av figur 5.6. Vid en jämförelse gav oftast mätningarna med spårgas något högre värde än med mätfläns. I figur 5.7 visas hur stor avvikelsen är när spårgasmätningarna identifieras under olika villkor.

Jämförelsen har enbart gjorts för de luftflöden som ligger innanför mätflänsarnas mätområde, 8-25 l/s. De tilluft- och frånluftflöden som ligger utanför mätområdet har i figur 5.6 markerats med parentes. Exfiltration och infiltration har beräknats som skillnaden mellan totalt luftflöde och övrig luft till och från rummen.

Residualspridningen blir 0,24 ml/s med fixa volymer och spårgasflöde 8,8 ml/s. Detta utgör 3,5% av genomsnittlig spårgastillförsel. Om man behåller fixa volymer men reducerar spårgasflödet till 8,36 ml/s, blir residualspridningen 0,21 ml/s vilket är 3,2% av genomsnittlig spårgastillförsel. Eftersom volymerna är oförändrade, så beror den minskade residualspridningen på att 8,36 ml/s är ett mer korrekt spårgasflöde. Att i efterhand anpassa spårgasflödet till mätningarna, så att identifierad och geometrisk volym ungefär blir lika, är således en möjlighet att förbättra identifieringen.

Med fria volymer minskar residualspridningen ytterligare och blir 0,19 ml/s. (2,9% av genomsnittlig spårgastillförsel.) Fria parametrar innebär alltid minskad residualspridning men innebär ej att skattningen av luftflödena förbättras.

I samtliga experiment har avvikelsen mellan spårgasmätning och mätfläns varit lägst vid fixa geometriska volymer. I experimentet med konstant spårgasflöde 8,36 ml/s och fixa volymer var skillnaden således $3,4 \pm 8,6\%$.

Med skattade luftflöden och känd spårgastillförsel kan koncentrationen i rummen och huvudkanalerna simuleras. Avvikelse mellan uppmätt och simulerad koncentration beräknas för de olika skattningarna och visas i figur 5.8.

Figur 5.9 visar hur verklig och simulerad koncentration i rum och huvudkanaler följs åt under de 12 timmar som experimentet pågår. Koncentrationerna är simulerade med spårgasflödet 8,8 ml/s och luftflöden identifierade med fixa volymer.

Genom reducerad spårgastillförsel kommer magnetventilen att förbli öppen under hela mätperioder. Därmed blir verklig spårgastillförsel lika med mätperiodens genomsnittliga spårgastillförsel, dvs med det värde som lagras i mätdatafilen. Konstant spårgastillförsel borde därför innebära bättre anpassning till multicellmodellen och lägre residualspridning än reglerad spårgastillförsel. En nackdel är att den kräver mer förberedelser för injustering av strypventil och kalibrering.

Till \ Från	Rum 1	Rum2	Rum 3	Rum 4	Rum 5	Rum 6	Rum 7	Tilluft	Frånluft	Infiltration
Rum 1								12,3		1,1
Rum 2	9,0							5,0		4,5
Rum 3		15,2						4,2		0,1
Rum 4			9,0					3,6		0,4
Rum 5								7,3		4,5
Rum 6								16,4		4,1
Rum 7						12,4		5,5		2,7
Tilluft									62,5	97,1
Frånluft	3,5	2,5	4,6	12,9	11,3	7,0	18,2	102,7		
Exfiltration	0,9	0,7	5,9	0,2	0,5	1,2	2,3	2,7	100,2	
Totalt	13,4	18,5	19,5	13,1	11,8	20,5	20,6	159,6	162,7	

Figur 5.3 Luftflöden (l/s) uppmätta vid konstant spårgastillförsel i nio celler. Fixa volymer, spårgasflöde 8,8 ml/s

Till \ Från	Rum 1	Rum2	Rum 3	Rum 4	Rum 5	Rum 6	Rum 7	Tilluft	Frånluft	Infiltration
Rum 1								11,6		1,1
Rum 2	8,8							4,5		4,5
Rum 3		14,8						3,8		0,1
Rum 4			8,8					3,2		0,5
Rum 5								7,0		4,2
Rum 6								15,7		3,8
Rum 7						12,1		5,0		2,7
Tilluft									59,4	92,3
Frånluft	3,4	2,4	4,4	12,2	10,7	6,6	17,4	97,6		
Exfiltration	0,2	0,5	5,6	0,3	0,5	0,8	2,3	3,2	95,3	
Totalt	12,7	17,7	18,8	12,5	11,2	19,5	19,7	151,6	154,7	

Figur 5.4 Luftflöden (l/s) uppmätta vid konstant spårgastillförsel i nio celler. Fixa volymer, spårgasflöde 8,36 ml/s

Till \ Från	Rum							Tilluft	Frånluft	Infiltration
	Rum 1	Rum 2	Rum 3	Rum 4	Rum 5	Rum 6	Rum 7			
Rum 1								11,8		0,9
Rum 2	9,1							4,4		4,5
Rum 3		15,2						3,7		0,1
Rum 4			8,9					3,3		0,4
Rum 5								7,2		4,0
Rum 6								16,2		3,4
Rum 7						13,3		4,2		2,8
Tilluft									59,1	91,9
Frånluft	3,4	2,5	4,5	12,6	11,0	6,3	18,3	100,0		
Exfiltration	0,2	0,2	5,7	0,0	0,2	0,0	2,0	0,4	99,3	
Totalt	12,7	17,9	19,1	12,6	11,2	19,6	20,3	151,0	158,4	

Figur 5.5 Luftflöden (l/s) uppmätta vid konstant spårgastillförsel i nio celler. Fria volymer, spårgasflöde 8,36 ml/s

Till \ Från	Rum							Tilluft	Infiltration
	Rum 1	Rum 2	Rum 3	Rum 4	Rum 5	Rum 6	Rum 7		
Rum 1								11,1	(0,9)
Rum 2	9,0							(3,9)	(4,7)
Rum 3		15,0						(3,5)	
Rum 4			8,9					(3,0)	(0,5)
Rum 5								-	-
Rum 6								14,9	(5,5)
Rum 7						14,4		(3,0)	
Frånluft	(3,0)	(2,6)	(3,9)	12,4	10,7	(6,0)	15,3		
Exfiltration			(5,7)				(2,1)		

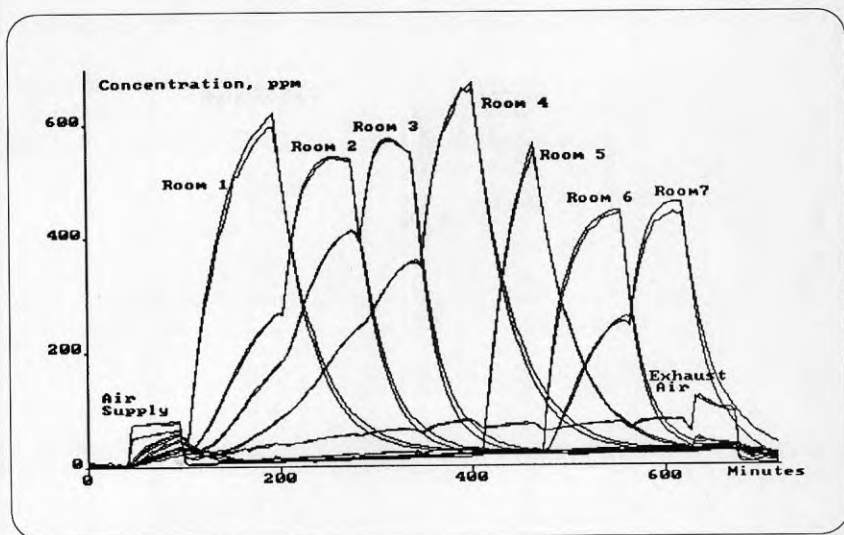
Figur 5.6 Luftflöden (l/s) uppmätta med mätflänsar i nio celler

Spårgasflöde	8,8 ml/s	8,36 ml/s	8,36 ml/s
Identifiering	Fixa volymer	Fixa volymer	Fria volymer
Avvikelse i flöde	0,56 ± 1,32 l/s	0,42 ± 1,07 l/s	0,52 ± 1,12 l/s
Procentuell avvikelse	4,5 ± 10,6 %	3,4 ± 8,6 %	4,2 ± 9,0 %

Figur 5.7 Avvikelser mot mätflänsar vid bestämning av luftflöden med konstant spårgastillförsel i nio celler

Spårgasflöde	8,8 ml/s		8,36 ml/s		8,36 ml/s	
	Fixa volymer		Fixa volymer		Fria volymer	
Identifiering	Standard avvikelse	Medel avvikelse	Standard avvikelse	Medel avvikelse	Standard avvikelse	Medel avvikelse
Rum 1	8,54	-0,82	4,56	-0,9	2,88	-0,45
Rum 2	6,12	-1,52	3,42	-1,33	1,8	-0,74
Rum 3	6,97	-1,71	4,39	-1,42	1,82	-0,7
Rum 4	7,05	-2,13	4,3	-1,57	3,39	-0,91
Rum 5	3,61	-0,72	2,25	-0,55	2,07	-0,27
Rum 6	5,96	-0,77	3,74	-0,64	1,94	-0,27
Rum 7	10,85	-1,52	9,03	-1,37	3,14	-0,75
Tilluft	2,29	-0,51	2,19	-0,47	1,92	-0,35
Frånluft	2,36	-0,88	2,09	-0,77	1,83	-0,54

Figur 5.8 Avvikelser mellan uppmätt och simulerad koncentration vid konstant spårgastillförsel i nio celler



Figur 5.9 Uppmätt och simulerad spårgaskoncentration i nio celler vid konstant spårgastillförsel 8,8 ml/s och fixa volymer

5.3 Fria parametrar

Identifiering med kvadratisk programmering innebär linjär regression, med villkoret att kontinuitetsvillkoren är uppfyllda och alla flöden är positiva. Metoden tillåter också att parametrar kan vara givna på förhand. Det har gällt volymer som bestämts av rummens geometri, samt luftflöden, vilka har satts till noll mellan rum som ligger avskilda från varandra. Eftersom dessa s.k nollflöden är exakta kan det vara intressant att jämföra dessa med identifierade flöden vid fria flödesparametrar.

Identifiering med spårgasflöde 8,36 ml/s ger luftflöden enligt figur 5.10. Vid jämförelse med skattade luftflöden vid fixa parametrar, så finner man att av i verkligheten 38 nollflöden avviker 17 identifierade flöden från noll. Dessa anges med parenteser i figuren, och avviker i genomsnitt 0,2 l/s.

I de tidigare experimenten har mätningarna med spårgas och mätflänsar jämförts. Med alla parametrar fria blir avvikelserna denna gång $0,2 \pm 0,9$ l/s, vilket innebär att spårgasmätningarna är $1,4 \pm 7,2\%$ större än med mätflänsar.

Avvikelseerna mellan spårgas och mätfläns är ofta små och sällan över 0,2 l/s. Frånluftkanalen uppvisar något högre avvikelser, men kraftigast är skillnaden för rum 7 där den är 1,0-2,3 l/s. Detta bekräftar tidigare iakttagelser att ett stort mätbrus får

större konsekvenser vid fler fria parametrar. Som tidigare påpekats innehöll rum 7 föremål som kunde störa luftblandningen och därmed öka mätbruset.

Även för andra experiment har det visat sig vid identifiering med fria volymer, att avvikelser till mätflänsar ökar mest, där avvikelser redan med fixa volymer var störst. En genomgående trend är att med fler fria parametrar ökar risken att något luftflöde "rusar" iväg.

Till \ Från	Från							Tilluft	Frånluft	Infiltration
	Rum 1	Rum 2	Rum 3	Rum 4	Rum 5	Rum 6	Rum 7			
Rum 1	-	(0,2)						10,9	(0,4)	1,3
Rum 2	9,1	-	(0,1)					3,4	(0,5)	4,9
Rum 3	(0,1)	15,2	-					2,9	(0,5)	0,5
Rum 4		(0,1)	8,9	-	(0,2)			2,4	(0,4)	0,7
Rum 5			(0,1)		-			6,8	(0,2)	4,3
Rum 6						-	(0,2)	15,1	(0,5)	3,9
Rum 7						13,3	-	2,3	(1,2)	3,6
Tilluft				(0,4)	(0,1)		(1,0)	-	55,2	91,7
Frånluft	3,4	2,4	4,5	12,2	10,9	6,4	17,6	98,3	-	
Exfiltration	0,3	0,2	5,6				1,7	6,2	96,9	
Totalt	12,8	18,0	19,1	12,6	11,2	19,7	20,5	148,5	155,7	

Figur 5.10 Luftflöden (l/s) uppmätta med konstant spårgasflöde i nio celler. Alla parametrar fria, spårgasflöde 8,36 ml/s

6 Slutsatser

6.1 Att välja spårgastillförsel

Under experimenten har spårgas tillförts på två olika sätt. Dels har det skett med konstant spårgasflöde under en längre tid, och dels har spårgastillförseln reglerats för att tidvis hålla koncentrationen konstant inom varje cell.

Konstant spårgastillförsel kräver att gasflödet reduceras med strypventil. I ett av experimenten stryptes spårgasflödet till 7,5 % av fullt flöde, och därmed kunde spårgastillförseln vara öppen under obegränsad tid, utan att koncentrationen översteg tillåtna 1000 ppm. En alltför kraftig strypning kan emellertid ge låga koncentrationer och större relativa mätfel, särskilt i huvudkanalerna.

Fördelen med strypt tillförsel är att spårgasflödet blir konstant under hela mätperioder, vilket är teoretiskt riktigt enligt multicellmodellen. Dessutom flukturerar spårgas-koncentrationen mindre, och därmed mildras konsekvensen av att mätningarna inte sker samtidigt i varje cell.

För huvudkanalerna är det nödvändigt att spårgastillförseln sker med konstant flöde under flera sammanhängande mätperioder. Koncentrationens förändring vid spårgastillförsel under korta intervall riskerar att inte mätas på ett representativt sätt, eftersom mätperioden kan vara lång i jämförelse med luftomsättningen i kanalen.

Alternativet till konstant spårgasflöde är reglerad spårgastillförsel. Om många celler skall regleras samtidigt krävs att koncentrationen först höjs i var cell, för att sedan falla ner till sina börvärden. Därmed blir spårgaspytsningarna korta och man undviker att flera magnetventiler samtidigt är öppna, vilket spårgasutrustningen då inte behöver vara kalibrerad för. Med reglerad spårgastillförsel är det viktigt att ändra börvärdet i varje cell flera gånger under en mätserie, för att undvika ett stationärt tillstånd som försvårar identifieringen. Valet av reglerparametrar har liten inverkan på identifieringen. Däremot för att få en bra reglering, visade det sig lämpligt att välja reglerhorisonten minst dubbelt så lång som mätperioden.

För kalibrering av spårgasflöde har använts två metoder, som gav något olika resultat. Kalibreringen blev bäst när koncentrationen uppmättes i ett slutet rum med känd volym, samtidigt som spårgas tillfördes. Den metoden kalibrerar även för mätfel i koncentrationen.

6.2 Mätresultat

Vid reglerad spårgastillförsel kan verkligheten och modellen avvika så mycket att identifiering blir omöjlig, vilket inträffade med reglerad spårgastillförsel i nio celler. För att där klara identifiering fick mätdatafilen indelas i mindre intervall med anpassade gasflöden och interpolerade koncentrationer. Interpoleringen gjordes med samplade tillståndsekvationer där insignalen korrigerades med spårgasflödet från överluften.

En annan orsak att ändra i mätdatafilen är att kontrollera kalibreringen, vilket kan ske på två sätt. Ett sätt är att först identifiera med fria volymer. Om luftomblandningen anses som mycket bra i ett rum justeras spårgasflödet i mätdatafilen, så att det rummets geometriska och skattade volym ungefär överensstämmer. Detta gjordes i experimentet med konstant spårgastillförsel i nio celler. Genom att reducera spårgasflödet i mätdatafilen med 5 %, reducerades residualspridningen 12 %.

Det andra sättet är att pröva olika spårgasflöden i mätdatafilen, varefter luftflöden identifieras med fix volym mot de uppmätta koncentrationerna. Det spårgasflöde som ger lägst residualspridning torde bäst överensstämma med verkligt flöde. Jämförelsen gjordes för experimentet med reglerad spårgastillförsel i nio celler, med resultat att flödet med lägst residualspridning den gången var samma som kalibrerat flöde.

Ett ytterligare tillfälle då man direkt går in och justerar mätdatafilen, är för att skatta luftflöden inom en del av en större byggnad. Mätdatafilen kompletteras då med en dummycell, vars koncentrationer är simulerade värden som beror på koncentrationerna i tilluftkanalen.

Luftflöden har identifierats med hjälp av en multicellmodell med integrerade volymbalanser och kvadratisk programmering. Beräkningarna har genomförts med volymer som både fria och fixa parametrar. Avvikelsen i mätningarna mellan spårgas och mätflänsar visade sig bli minst vid fixa geometriska volymer. Vid identifiering med fria volymer inträffade att avvikelsen för ett enstaka flöde påtagligt kunde öka, och detta särskilt för celler där man kunde misstänka att luftomblandningen varit mindre god.

Hur bra är egentligen skattningen i de olika experimenten? För att undersöka detta används tre skilda mått. Det är dels residualspridning, som anger det procentuella felet i spårgasbalansen. Residualspridningen framgår av figur 6.1, och är 3-4%. En låg residualspridning innebär små fel i spårgasbalansen, vilket är samma sak som en god anpassning mellan mätvärden och beräknade luftflöden.

Experiment	Spårgasflöde (ml/s)	Residualspridn. (%)
Fyra celler utan ventilation	118	4,6
Sex celler och dummy-cell	118	3,2
Nio celler, regl. gasflöde, interpol.	118	3,2
Nio celler, konstant gasflöde	8,36	3,2

Figur 6.1 Residualspridning uttryckt i procent av genomsnittlig spårgastillförsel, vid skattning av luftflöden med fixa volymer

Ett annat mått på skattningarnas tillförlitlighet är att jämföra verklig koncentration och simulerad koncentration. Simuleringen görs med hjälp av skattade luftflöden och verklig spårgastillförsel. Avvikelsen anges i medelavvikelse och standardavvikelse, och i figur 6.2 finns genomsnittligt värde för avvikelserna i varje experiment. Med ett undantag är medelavvikelsen ± 2 ppm och standardavvikelsen ca 5 ppm.

Experiment	Spårgasflöde (ml/s)	Medelavvikelse (ppm)	Standardavvikelse (ppm)
Fyra celler utan ventilation	118	1,2	5,8
Sex celler och dummy-cell	118	-5,7	12,0
Nio celler, regl. gasflöde, interpol.	118	-2,7	5,1
Nio celler, konstant gasflöde	8,36	-1,9	4,5

Figur 6.2 Avvikelse mellan verklig och simulerad koncentration vid skattning av luftflöden med fixa volymer

Den bedömning av skattningarna som skall undersökas lite närmare är jämförelsen mellan mätflänsar och spårgas. Det var i omkring hälften av kanalerna som luftflödet låg inom mätområdet för mätflänsarna. För dessa kanaler har mätresultatet från spårgas och mätflänsar jämförts, och skillnaderna vid skattning av luftflöden framgår av figur 6.3. I allmänhet gav spårgasmätningen något högre flöde än mätflänsar, men där mätflänsarna gav störst medelvärde betecknas det med minustecken i figuren.

Experiment	Fria volymer (%)	Fixa volymer (%)
Fyra celler utan ventilation	5,0 \pm 6,0	-0,5 \pm 3,2
Fyra celler och dummy-cell	4,1 \pm 5,4	0,8 \pm 3,3
Nio celler, regl. gasflöde, interpol.	-	-3,2 \pm 6,5
Nio celler, konstant gasflöde	4,2 \pm 9,0	3,4 \pm 8,6
Nio celler, enkelcellmodellen	8,0 \pm 5,0	11,0 \pm 7,0

Figur 6.3 Medelavvikelse och standardavvikelse mellan mätflänsar och spårgasmätning vid skattning av luftflöden med fria och fixa volymer.

En större skillnad mellan spårgasmätning och mätflänsar inträffar vid identifiering med enkelcellmodellen. Det är också rimligt att multicellmodellen ger bättre resultat, eftersom den utnyttjar hela experimentet för var cell, medan enkelcellmodellen delar upp experimentet för identifiering av en cell åt gången. Dessutom skall den totala flödesbalansen stämma för multicellmodellen.

Vid identifiering med multicellmodellen och fixa volymer avviker luftflödena från spårgasmätningen som mest med $3,4 \pm 8,6\%$ från mätningarna med mätflänsar. Där utgör 3,4% medelavvikelse och 8,6% standardavvikelse. Kvadratisk addition av medel- och standardavvikelsen ger rotmedelkvadratfelet som blir 9,2%.

I kapitel 2.2 bestämdes slumpmässigt fel för mätflänsarna till 6%. Med kvadratisk addition erhöles då ett sannolikt mätfel för spårgas som blir 11%. Felet har bestämts från experimentet med sämst överensstämmelse mellan spårgas och mätflänsar, men å andra sidan tenderar felet att underskattas med kvadratisk addition.

Med multicellmodellen har således en fullständig flödesbalans bestämts för byggnaden, med ett sannolikt mätfel på 11%. Mätfelet gäller för större luftflöden som kunde jämföras med mätflänsar, varför man inte kan dra slutsatsen att samma relativa fel även gäller för små flöden.

En felkälla vid spårgasmätning är ofullständigt blandade volymer. Dålig blandning märks vid identifieringen med fria volymer, när identifierad volym blir betydligt större än geometrisk. Andra s.k. metodfel uppstår av att koncentrationen i cellerna inte mäts samtidigt, och att spårgasflödet inte är konstant under hela mätperioden.

I kapitel 2.5 och 2.7 har instrumentfelen behandlats, varvid mätfelet hos gasanalysatorn bestämdes till 6,5% och felkalibrerad spårgastillförsel till 4%. Om dessa instrumentfel subtraheras från sannolika mätfelet återstår 8%, som är metodfel.

Metodfelet är därmed den faktor som har störst betydelse för mätfelet, men är också den faktor som är mest beroende av förhållanden vid varje ny spårgasmätning. Därför går det inte att ange något generellt mätfel för en godtycklig byggnad. Under experimenten i Minilab har förhållanden varit extremt goda för spårgasmätning, varför det finns skäl att anta att sannolikt mätfel betydligt överskrider 11% vid mätning i normala byggnader.

6.3 Multicellmodellens användbarhet

Experimenten genomfördes således under goda byggnadsmässiga förhållanden, där varje cell utgjorde ett väldefinierat rum med nästan ideal luftomblandning. För några av försöken utgjordes dock två av cellerna av de båda huvudkanalerna för tilluft och frånluft, där kravet på fullständig omblandning de facto omöjligen kan uppfyllas. Men även om ingen luftomblandning sker i kanalerna så är koncentrationen tämligen homogen. Eftersom kanalernas volymer är små är det enbart när spårgastillförseln just startar och slutar som koncentrationen varierar längs kanalen.

För mätutrustningen är det däremot svårare att klara modellens förutsättningar. Dels mäts koncentrationen inte samtidigt i alla celler, och dels är spårgasflödet inte alltid konstant under hela mätperioder. Trots mätutrustningens begränsningar visade det sig ändå, att samtliga luftflöden kunde bestämmas med multicellmodellen. Luftflöden beräknades i varje avgrening i kanalsystemet för tilluft, frånluft samt by-pass, och för luftbehandlingsaggregatet bestämdes flöden för avluft, uteluft och återluft.

Ett av försöken var även intressant därför att mätningarna genomfördes i en begränsad del av en större byggnad. Det är viktigt att i etapper kunna bearbeta av en byggnad och ett ventilationssystem, eftersom mätutrustningen sällan är stor nog att på en gång klara hela byggnaden. Problemet löstes genom att den övriga byggnaden representerades av en dummy-cell med simulerade koncentrationer.

Som påpekats flera gånger är det viktigt med en bra luftomblandning i varje rum. Rum 7 innehåller utrymmen med sämre blandning, vilket ger utslag när de båda nio-cells experimenten skall identifieras. Nästan hela avvikelserna mot mätflänsar hänförs till rum 7, liksom den största standardavvikelsen mellan verkliga och simulerade mätdata. Det visar sig i alla skattningar att fler fria parametrar leder till att avvikelserna mot mätflänsar kraftigt kan öka för något enstaka luftflöde.

Experimenten visade att multicellmodellen kan användas för att skilja luftflöden i ventilationskanaler från överluft och läckage genom väggar. Medan enkelcellmodellen endast klarar att bestämma totalt uteluftflöde genom ett rum, så klarar multicellmodellen i ett enda försök att separera byggnadsdelens samtliga tilluftflöden och frånluftflöden från infiltration och exfiltration. Dessutom identifieras både exfiltration och infiltration i samma rum.

För en byggnad som består av nio celler, klarar man med enkelcellmodellen att bestämma uteluftflödet till var och en av cellerna, dvs man kan skatta 9 luftflöden. För samma byggnad kan emellertid 99 olika luftflöden identifieras med multicellmodellen. Dessutom blir skattningen mer noggrann, vilket också framgår av experimenten. Orsaken är dels att samtliga mätdata utnyttjas för varje cell, dels att luftbalansen skall stämma för alla celler.

Eftersom multicellmodellen klarar att identifiera samtliga luftflöden i en byggnad blir den mycket användbar. En tillämpning är för att bedömma ventilationssystemets funktion. Det kan ske genom att bestämma specifika flödet, vilket anger uteluftsflödet i förhållande till total ventilerad volym. Förutom tilluftsflöde ingår i uteluftsflöde även infiltrationen, som snarast försämrar komforten och som därför bör mätas separat, vilket multicellmodellen klarar.

Med hjälp av multicellmodellen kan lufttäthetens betydelse bestämmas för energibalansen under verkliga driftförhållanden. Både infiltration och exfiltration är i hög grad avgörande för hur effektiv värmeåtervinningen kan bli. Exfiltration är också intressant för att bedöma risken för konvektion av fuktig inomhusluft i väggar och tak.

Andra tillämpningar är för beräkning av en byggnads eller lokals energi- och effektbehov. För att undvika s.k. restposter i energibalansen är det nödvändigt att skilja på luftflöden som kommer genom överluft, infiltration eller tilluft. Det finns ett antal beräkningsprogram för termisk simulering av byggnader. För att dessa skall kunna testas och förbättras, måste också samtliga luftflöden kunna identifieras.

Experimenten har således visat att en multicellmodell och kvadratisk programmering, kan göra spårgasmätning till en effektiv metod för bestämning av byggnaders luftflöden, med möjlighet till många tillämpningar inom byggnadsfysiken och ventilationstekniken.

Referenser

Hedin, B., 1989, Identifiering av multicellmodeller för flödessystem med kvadratisk programmering. Rapport BKL 1989:14, Inst. för Byggnadskonstruktion, Lunds Tekniska Högskola.

Jensen, L., 1987, Bestämning av flöde och volym med spårgasförsök. Rapport BKL 1987:9, Inst. för Byggnadskonstruktion, Lunds Tekniska Högskola.

Jensen, L., 1988a, Determination of flows and volumes in multiple cell systems. Air Infiltration Review, February 1988.

Jensen, L., 1988b, Datorprogram för spårgasförsök. Rapport BKL 1988:4 och BKL 1989:8, Inst. för Byggnadskonstruktion, Lunds Tekniska Högskola.

Jensen, L., 1988c, Enklare kontroller vid spårgasförsök. Rapport BKL 1988:12, Inst. för Byggnadskonstruktion, Lunds Tekniska Högskola.

Jensen, L., 1990, Datorprogram MCSPID. Inst. för Byggnadskonstruktion, Lunds Tekniska Högskola. /Opublicerad./

Leybold-Heraeus, 1987, Betriebsanleitung IR-VIS/UV Gasanalysator Binos.

Mattson, J.B., 1990, An experiment for airflow determination by quadratic programming. Air Infiltration Review, September 1990.

Nordiska ventilationsgruppen (NVG), 1982, Metoder för mätning av luftflöden i ventilationsinstallationer. Rapport T32:1982, Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm.

Ravindran, A., 1972, A computer routine for quadratic and linear programming problems. Communications of the ACM, Vol. 15, Number 9.

Sandberg, M., Skåret, E., 1989, Luftutbytes- och ventilationseffektivitet - nya hjälpmedel för ventilationskonstruktörer. Meddelande M22, Statens institut för byggnadsforskning, Gävle.

Sinden, F.W., 1978, Multi-chamber theory of air infiltration. Building and Environment, Vol. 13.

R44 : 1991

ISBN 91-540-5362-5

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6811044

Abonnementsgrupp:
W. Installationer

Distribution:
Svensk Byggtjänst
171 88 Solna

Cirkapris: 52 kr exkl moms