



**AALBORG UNIVERSITY**  
DENMARK

**Aalborg Universitet**

## **Forurenende processer**

*og den almene ventilation*

Nielsen, Peter Vilhelm

*Publication date:*  
1990

*Document Version*  
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

*Citation for published version (APA):*

Nielsen, P. V. (1990). *Forurenende processer: og den almene ventilation*. Institut for Bygningsteknik, Aalborg Universitetscenter. U / Bind U9008

### **General rights**

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

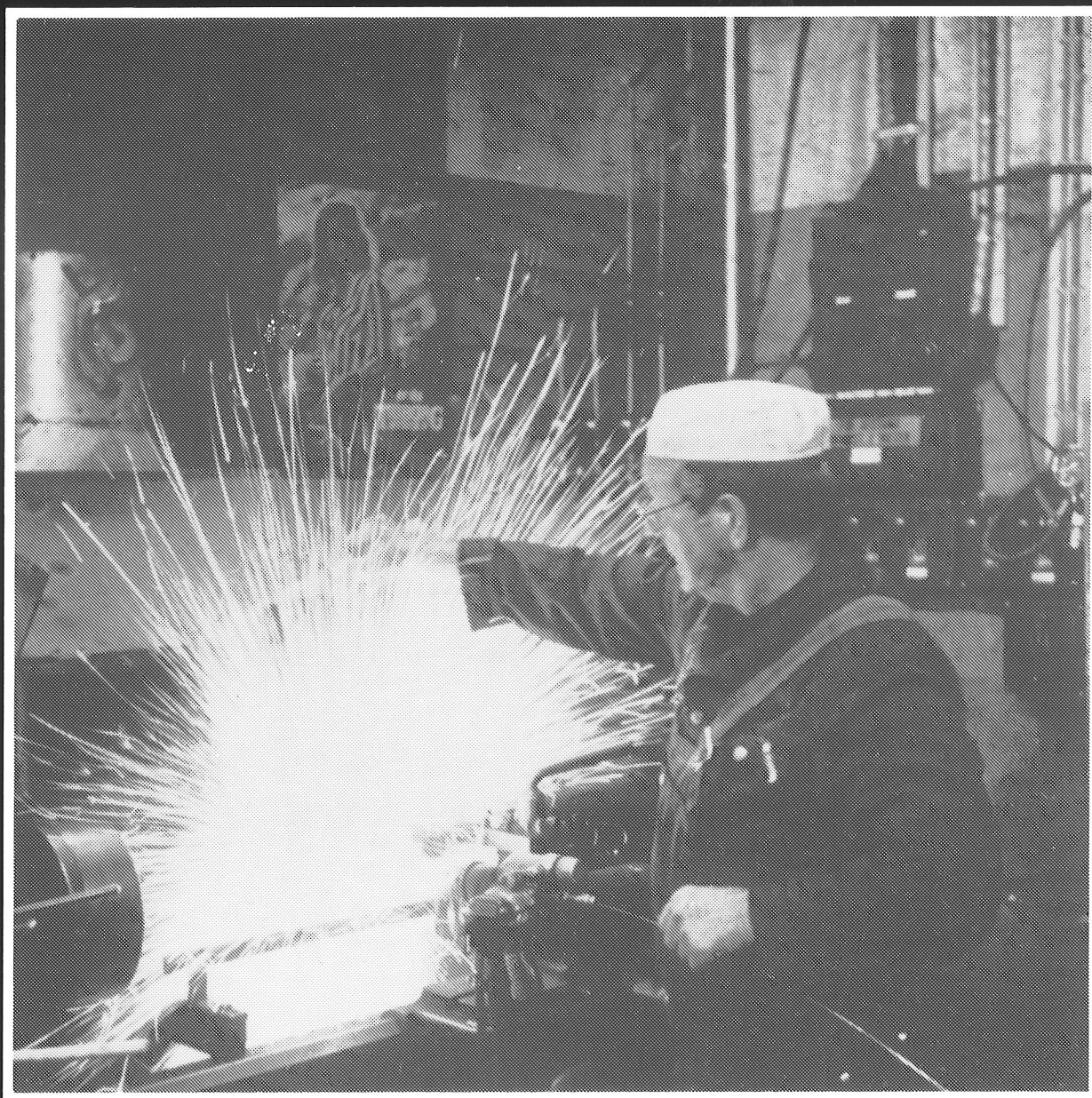
- ? Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- ? You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- ? You may freely distribute the URL identifying the publication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

### **Take down policy**

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

# FORURENENDE PROCESSER - og den almene ventilation

Peter V. Nielsen



# **Forurenende processer - og den almene ventilation**

**Peter V. Nielsen  
Instituttet for Bygningsteknik  
Aalborg Universitetscenter  
December 1990  
ISSN 0902-8002 U9008**

**INDHOLDSFORTEGNELSE**

|  |    |
|--|----|
| Symbolliste . . . . .  | iv |
| 1. Indledning . . . . .  | 1  |
| 2. Kilde og kildestyrke . . . . .                                      | 3  |
| 3. Den lokale forureningsfordeling . . . . .                           | 7  |
| 4. Den almene ventilation . . . . .                                    | 10 |
| 5. Stråleventilation . . . . .   | 12 |
| Fordelingen af luftformige stoffer og gasser . . . . .                 | 12 |
| Placering af udsugningsåbninger . . . . .                              | 17 |
| Ventilationseffektivitet . . . . .                                     | 19 |
| 6. Fortrængningsventilation . . . . .                                  | 23 |
| Fortrængningsventilation i lokale med få termiske kilder . . . . .     | 23 |
| Fortrængningsventilation i lokaler med mange termiske kilder . . . . . | 27 |
| Ventilationseffektivitet . . . . .                                     | 31 |
| 7. Litteratur . . . . .  | 34 |

## FORORD

Nye stoffer og nye produktionsprocesser samt stigende viden om stoffer og gassers skadelige virkning på mennesker vil i de kommende år medvirke til store investeringer i forskning og forbedring af arbejdsmiljøet.

Dette hefte er skrevet på denne baggrund, og det gennemgår den betydning, som den almene ventilation har for skabelsen af et sundt indeklima i et industrimiljø. Det er skrevet for studerende på Aalborg Universitetscenter, men det henvender sig også til rådgivende ingeniører og Bedriftsundhedstjenesten. Hftet er skrevet på grundlag af et indlæg på temadagen "Industriventilation - hvordan og hvor meget" på Jysk Teknologisk i 1989.

Jeg vil gerne takke civilingeniør N.O. Breum, Arbejdsmiljøinstituttet, for gennemlæsning af manuskriptet og for mange gode råd samt Bente Kjærgaard og Ingrid Christensen for henholdsvis renskrivning af manuskript og fremstilling af tegninger.

Peter V. Nielsen

Aalborg Universitetscenter  
Oktober 1990

## SYMBOLLISTE

|           |                                     |                           |
|-----------|-------------------------------------|---------------------------|
| A         | Kontrolflade omkring emissionskilde | $m^2$                     |
| c         | Koncentration                       | $mg/m^3$ eller $cm^3/m^3$ |
| $\bar{c}$ | Middelkoncentration i lokalet       | $mg/m^3$ eller $cm^3/m^3$ |
| $c_{op}$  | Middelkoncentration i opholdszonen  | $mg/m^3$ eller $cm^3/m^3$ |
| $c_p$     | Koncentration i et punkt            | $mg/m^3$ eller $cm^3/m^3$ |
| $c_x$     | Koncentration i afstand x           | $mg/m^3$ eller $cm^3/m^3$ |
| $c_u$     | Koncentration i udsugningsåbningen  | $mg/m^3$ eller $cm^3/m^3$ |
| d         | Diameter                            | m                         |
| h         | Spaltehøjde                         | m                         |
| H         | Lokalehøjde                         | m                         |
| L         | Lokalelængde                        | m                         |
| n         | Specifikt luftskifte                | $h^{-1}$                  |
| N         | Antal varmekilder                   |                           |
| $q_V$     | Volumenstrøm                        | $m^3/s$                   |
| $q_{V_y}$ | Volumenstrøm i højde y              | $m^3/s$                   |
| $q_{V_x}$ | Volumenstrøm i afstand x            | $m^3/s$                   |
| S         | Emission, kildestyrke               | $mg/s$ eller $cm^3/s$     |
| $t_o$     | Indblæsningstemperatur              | $^{\circ}C$               |
| $t_{op}$  | Middeltemperatur af opholdszonen    | $^{\circ}C$               |
| $t_u$     | Udsugningstemperatur                | $^{\circ}C$               |
| v         | Lufthastighed                       | m/s                       |
| $v_o$     | Indblæsningshastighed               | m/s                       |

|                  |   |   |
|------------------|---|---|
|                  |   | v |
| $x$              | Vandret afstand                         | m |
| $y$              | Lodret afstand                          | m |
| $y_m$            | Maksimal højde i termisk strømning      | m |
| $y_{st}$         | Lagdelingshøjde                         | m |
| $y_t$            | Ligevægtshøjde                          | m |
| $\beta$          | Vinkel                                  | ° |
| $\Delta t_o$     | Temperaturdifferens                     | K |
| $\bar{\epsilon}$ | Middelventilationseffektivitet          |   |
| $\epsilon_{op}$  | Ventilationseffektivitet i opholdszonen |   |
| $\epsilon_p$     | Ventilationsindeks                      |   |
| $\epsilon_t$     | Temperatureffektivitet                  |   |
| $\Phi_k$         | Konvektiv varmeeffekt                   | W |

## 1. INDLEDNING

Industriel produktion kan være forbundet med generering af gasser og stoffer, som er generende eller direkte skadelige for de personer, der opholder sig i nærheden af produktionsprocessen. Ved etablering af en ny produktion eller ved ændring af en bestående produktion er det derfor nødvendigt at overveje en række spørgsmål

- Kan der anvendes en produktionsproces, hvor der ikke bruges eller genereres skadelige gasser eller skadelige stoffer.
- Hvis det er nødvendigt at arbejde med et skadeligt materiale i produktionen, er det så muligt at håndtere dette materiale i et lukket kredsløb.
- Hvorledes dimensioneres en effektiv punktudsugning, hvis der anvendes et åbent kredsløb med emission.
- Hvorledes dimensioneres den almene ventilation i lokalet, således at koncentrationsniveauet af skadelige stoffer og gasser i opholdszonen minimeres.

Spørgsmålene har forskellige niveauer, og det ses, at det øverste spørgsmål svarer til den mest radikale løsning. Det er naturligvis bedst, at produktionen gennemføres under forhold som beskrevet ved de første spørgsmål, men i praksis kan det ofte blive nødvendigt at anvende både punktudsugning og almen ventilation for at opnå et acceptabelt koncentrationsniveau i et produktionslokale.

Som eksempel på omlægning af en produktionsproces så der anvendes uskadelige stoffer, skal nævnes fremstilling af eternitprodukter uden anvendelse af asbest.

Der er mange eksempler på anvendelse af effektive og specielle punktudsugninger ved en emissionskilde. Her kan for eksempel nævnes, at der i dag anvendes en dobbelt anæstesimaske til bedøvelse, hvor der er indbygget en udsugning langs randen af masken. Elektrosvejseudstyr med indbygget udsugning er et andet eksempel på en integreret løsning.

Det ses af de indledende vurderinger, at den almene ventilation kun har til opgave at fjerne den del af de luftformige stoffer og gasser, som ikke kan fjernes med passende punktudsugninger. Det kan være fra få procent ved stråleventilation til en stor del af emissionen i tilfælde af fortrængningsventilation.

Arbejds miljølovgivningen stiller nogle krav til produktions- og ventilationsudstyr, som følger de samme betragtninger. Det fastsættes,

- at påvirkningen fra stoffer og materialer skal nedbringes så meget, som det er teknisk muligt under arbejdet
- at sundhedsfarlige eller eksplosive luftarter samt røg, damp o.l., der udvikles i arbejdsrum, så vidt muligt skal fjernes på udviklingsstedet
- at fastsatte grænseværdier skal overholdes



Det ses således, at arbejdsmiljøloven foreskriver meget mere end overholdelse af hygiejniske grænseværdier, og målet er naturligvis, at de personer der opholder sig i lokalet udsættes for så lille en eksponering som muligt.

I forbindelse med måling af koncentrationsfordeling skal man være opmærksom på, at grænseværdierne sættes i relation til koncentrationen i en persons indåndingszone. Denne zone defineres som en fremadrettet halvkugle med 30 cm i diameter og med centrum i et imaginært punkt imellem personens ører.

Mange parametre har indflydelse på den eksponering, som personer udsættes for i et industrilokale. Her skal især arbejdes med forholdene ved selve emissionskilden, den lokale forureningsfordeling omkring kilden samt den almene ventilation.

Punktudsugning er et andet væsentligt område, som dog ikke vil blive behandlet i denne rapport.

Det skal til slut bemærkes, at der er en parallel imellem behandlingen af forurenende stoffer og behandlingen af en stor varmeudvikling. Hvis man dimensionerer et system, hvor der kan opstå en stor varmeudvikling, bør man indlede med at undersøge mulighederne for at reducere denne varmeudvikling, som for eksempel ved at styre den elektriske belysning efter dagslysniveau. Man kan anvende intern køling af særlig energiudviklende udstyr, og man kombinerer i visse situationer udsugningen med lysarmaturer, så en del af belysningsvarmen fjernes før den tilføres lokalet.

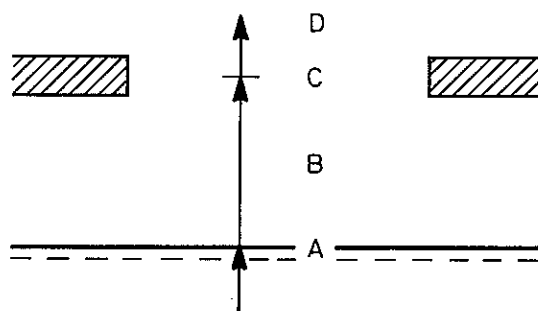
## 2. KILDE OG KILDESTYRKE

Selve forureningens kilde og dens lokale egenskaber er en væsentlig faktor for størrelsen af emissionen (kildestyrken). Den er også en væsentlig faktor for en punktudsugnings virkningsgrad, og tilsyneladende små detaljer ved forureningskilden kan få en stor betydning for størrelse og fordeling af den koncentration, der opstår i lokalet i forbindelse med den almene ventilation. Det er derfor vigtigt, at man analyserer og bearbejder forholdene omkring kilden for at minimere kildestyrken og den lokale koncentration i rummet.

Det er et begrænset antal mekanismer, der fører til forurening i en produktionsindustri, og de fleste kan samles i følgende grupper [1]:

- Fysisk tilstandsændring (lækage fra kar, ledninger m.m.)
- Kemisk reaktion som giver gasformige stoffer (ved rumtemperatur)
- Ekstern energitilførsel (forbrænding, ophedning ved lokal termisk eller mekanisk bearbejdelse, fordampning fra flader, tørring, ...)
- Mekanisk fragmentering (sprøjtemaling, slibning, ...)

Når en kilde er identificeret, er der flere niveauer, hvor der kan arbejdes med begrænsning af emissionen. Figur 1 viser en kilde, hvor en væske fordamper og forurener omgivelserne. Ved fasegrænsen A foregår der en fordampning, som kræver en energitilførsel. Denne energitilførsel finder ofte sted ved at supplere den væskemængde, der er fordampet. Det er vigtigt at holde en lav temperatur på kilden, da fordampningen forøges med temperaturen.



Figur 1. En kilde i form af en væske hvorfra der foregår fordampning.

Ved gassens transport fra væskeoverflade til kontrolflade, C, har luftens bevægelse stor betydning. Tilstedeværelse af luftbevægelse og turbulens forøger transporten voldsomt i forhold til den laminare diffusion, der vil finde sted i stillestående luft. Luftbevægelsen kan skabes af mekanisk bevægelse, termiske kræfter m.m.

Temperaturen i dette område er også vigtig. Man kan for eksempel anvende køleflader, som nedkøler en del af gassen, så den kondenserer og løber tilbage til væskeresservoiret. Denne metode er anvendt i anlæg, hvor der renses med triklorethylen.

Gassen passerer kontrolfladen ved C. Det vil derfor begrænse forureningen, hvis denne kontrolflade holdes så lille som muligt i så lang tid som muligt. For eksempel åbner man ikke en beholder, før man skal bruge noget af indholdet, og man lukker beholderen igen hurtigst muligt efter brug.

Det er også vigtigt, at man kontrollerer trykforholdene ved åbningen. Det vil være effektivt med et undertryk i området B, så der altid er en luftbevægelse imod emissionens retning, som det er tilfældet med stinkskebe, og man bør i alle tilfælde undgå overtryk.

Forstyrrende luftstrømninger i området D foran kontrolfladen bør begrænses. Med disse strømninger tænkes der ikke så meget på luftbevægelsen, på grund af den almene ventilation, men mere på forhold som relativ bevægelse af kontrolfladen i et produktionsudstyr eller forstyrrelser fra personer, der passerer tæt ved fladen C.

Luftstrømninger, der opstår på grund af termiske kræfter, kan i høj grad være med til at transportere emission bort fra kontrolfladen og ud i området D. Massefyldforskelle imellem den omgivende luft og den forurenende gas vil også bidrage med kræfter, der vil påvirke emissionen og de lokale koncentrationer, der kan opstå i rummet.

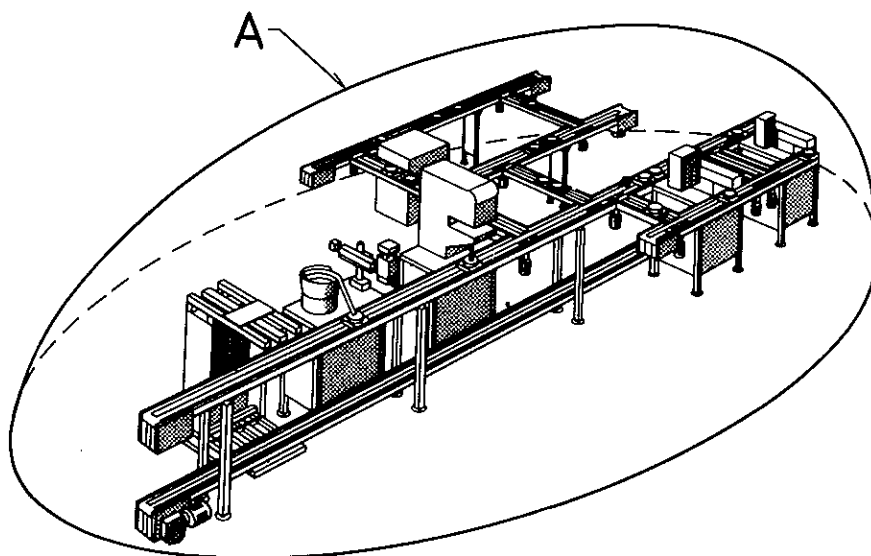
Det er væsentligt at kende emissionen  $S$  - eller kildestyrken - fra kilden. Denne størrelse er et udtryk for den forurening, der produceres, og den måles i enheder som  $g/s$  eller  $cm^3/s$ . Det er ikke svært at bestemme kildestyrken ved laboratorieforsøg, hvor der er kontrol med alle detaljer ved en kilde, men det kan være mere vanskeligt at bestemme den under praktiske forhold. Der findes principielt fem forskellige metoder, der kan anvendes til bestemmelse af emissionen  $S$  [1].

- Integration over omsluttende kontrolflade.
- Indkapsling af kilde.
- Styring af luftstrømmen til udsugning.
- Indirekte måling v.h.a. sporgas.
- Produktionsdata.

Man kan omslutte kilden med en kontrolflade og foretage følgende integral, se figur 2.

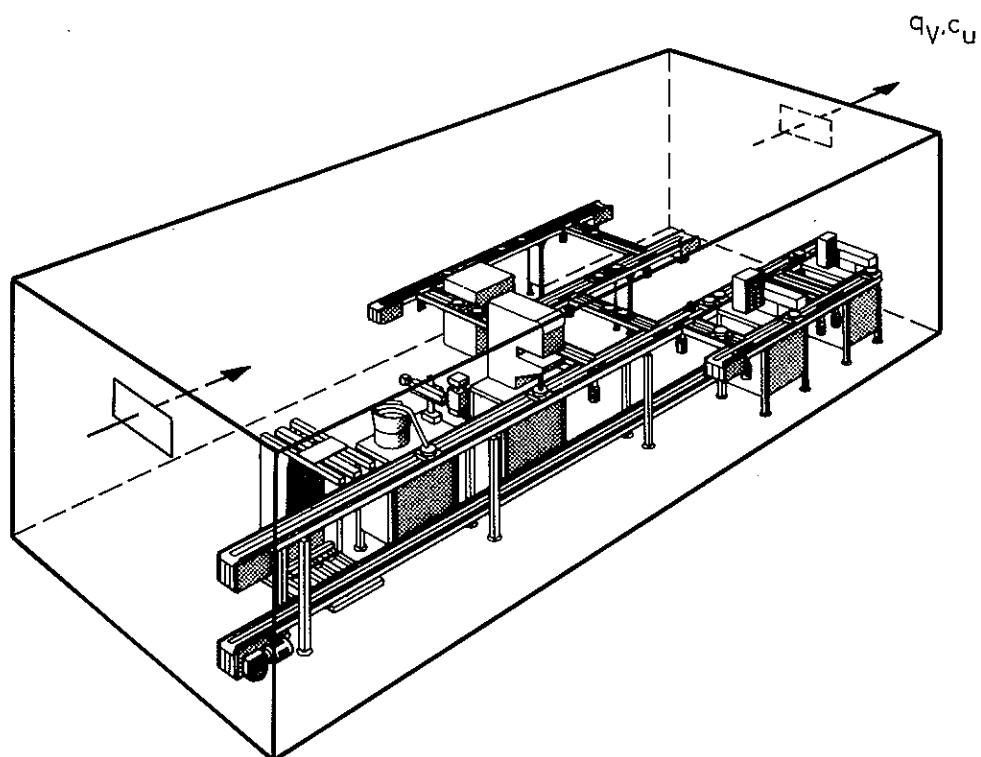
$$S = \int_A \vec{v} \cdot c \cdot d\vec{A} \quad (1)$$

hvor  $\vec{v}$  er den lokale hastighedsvektor ved fladeelementet  $dA$ , og  $c$  er den lokale koncentration. Der ses ved denne beregning bort fra laminar diffusion over kontrolfladen på grund af koncentrationsgradienter, da denne størrelse ofte vil være meget lille.



Figur 2. Forureningskilde og kontrolflade.

Ved praktiske målinger opdeles fladen A i større elementer, og de tilhørende normalhastigheder og koncentrationer bestemmes. Kildestyrken findes ud fra ligning (1) ved at omskrive denne ligning til en summation.



Figur 3. Forureningskilde omsluttet af fast kontrolflade.

Hvis det er muligt at indkapsle processen, som vist på figur 3, kan kildestyrken beregnes ud fra ligningen,

$$S = c_u \cdot q_V \quad (2)$$

hvor  $c_u$  er koncentrationen i udsugningen, og  $q_V$  er volumenflowet, der passerer det omsluttede produktionsudstyr. Hvis der kun er en enkelt forureningskilde af en given type i et lokale, kan kildestyrken således bestemmes ud fra måling af  $c_u$  og  $q_V$  på ventilationsudstyret. Man skal dog være opmærksom på måletekniske problemer som exfiltration samt tilstedeværelse af eventuelle dræn for emissionskilden i selve rummet i måleperioden som for eksempel absorption af en forurenende gas.

I visse situationer er det muligt at bestemme kildestyrken ved at styre luftstrømmingen forbi kilden og direkte til en udsugning. Udsugningen placeres tæt ved kilden, og der anvendes så store luftmængder, at alt emission bringes igennem udsugningen. Kildestyrken bestemmes ud fra ligning (2), da det styrede hastighedsfelt giver en omslutning af kilden. Det er vigtigt, at kildestyrken ikke er væsentligt påvirket af hastighedsfeltet, eller at der dannes et hastighedsfelt, som er karakteristisk for driftsituationen.

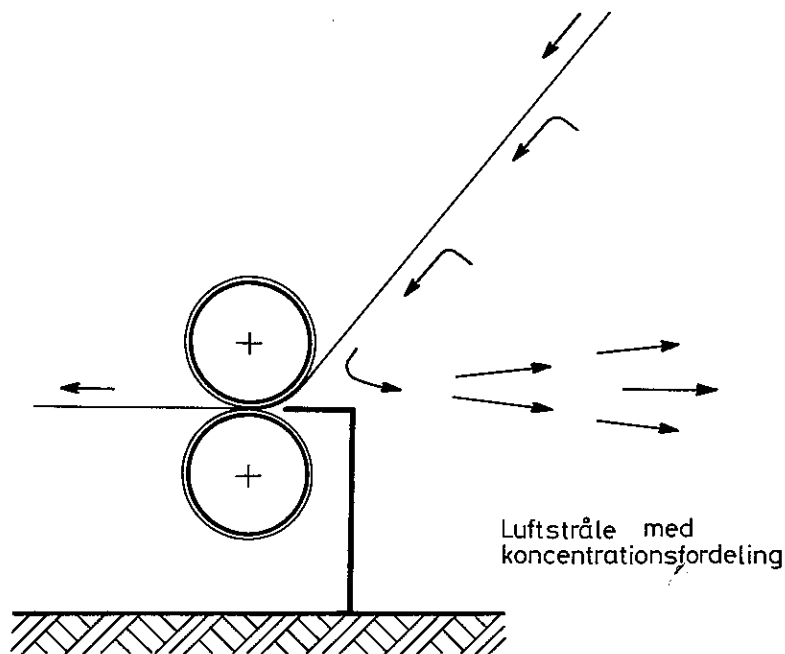
Kildestyrken kan også bestemmes ved at foretage en indirekte måling ved hjælp af sporgas. Der tilføres en kendt mængde sporgas ved kilden, og sporgaskoncentrationen så vel som forureningskoncentrationen måles samtidig i et andet punkt. Hvis det forudsættes, at sporgassen spredes på samme måde som forureningen, er der et konstant forhold imellem sporgaskoncentrationen og forureningskoncentrationen overalt i lokalet. Kildestyrken bestemmes ud fra dette forhold samt den tilførte sporgasmængde.

Til slut skal det nævnes, at man kan få et skøn over kildestyrkens størrelse ud fra produktionsdata, dvs. ud fra det daglige forbrug af det forurenende stof i produktionsprocessen. I dette tilfælde må man også foretage et skøn over eventuelle instationære forløb af selve emissionen.

I reference [2] er der givet en detaljeret behandling af væskeformede forureningskilder, som kan give grundlag for en beregning af kildestyrken ud fra den specifikke fordampningshastighed.

### 3. DEN LOKALE FORURENINGSFORDELING

I visse tilfælde kan man betragte et større område omkring forureningskilden som et område, der er rimeligt uforstyrret af den almene ventilation. I denne situation er det muligt at give nogle udsagn om forureningsfordelingen alene ud fra forholdene omkring kilden.



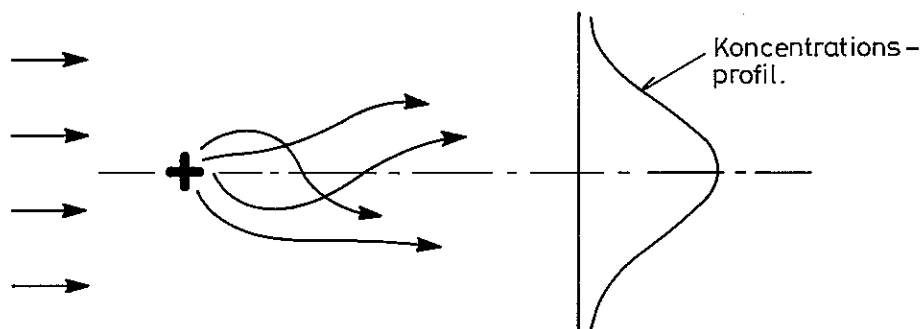
Figur 4. Del af rotationspresse hvor papirbanen med tryksværte virker som en forureningskilde.

Som et eksempel betragtes papirbanen i en rotationspresse. Den kan virke som forureningskilde, så længe den fordamper og tørrer de forskellige tryksværter, der er påført. Figur 4 viser, hvorledes papirbanen medriver luft, som sendes ud i opholdszonen i form af en stråle, reference [1]. Koncentrationen i denne stråle vil falde omvendt proportionalt med afstanden eller med kvadratroden af afstanden fra strålens begyndelsespunkt.

$$c_x \sim \frac{1}{x} \quad \text{eller} \quad \frac{1}{\sqrt{x}} \quad (3)$$

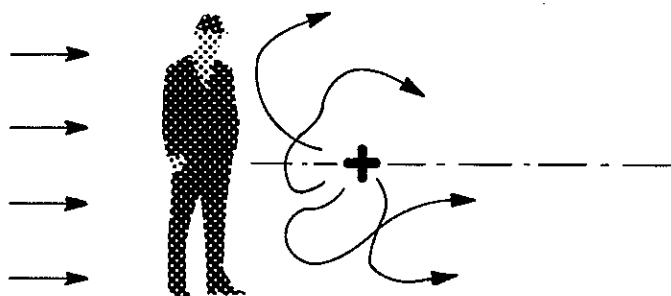
Dette forløb af den lokale koncentration er helt identisk med et tilsvarende fald i lufthastighed. De fysiske forhold i stråler er bestemt nærmere i reference [3]. Det ses, at kilden virker som en luftstråle, der sendes ind i opholdszonen, samt at medrivning af luft er i stand til at sænke koncentrationen i nogen afstand fra rotationspressen. Det er oplagt at integrere en lokaludsugning ind ved valserne eller eventuelt føre papirbanen i et lukket område.

Strømningen omkring slibesten, polerskiver m.m. er et andet eksempel på en kilde, der udøver en kraftig påvirkning på den lokale luftbevægelse ved kilden.



Figur 5. Emissionskilde placeret i et område med et konstant hastighedsfelt.

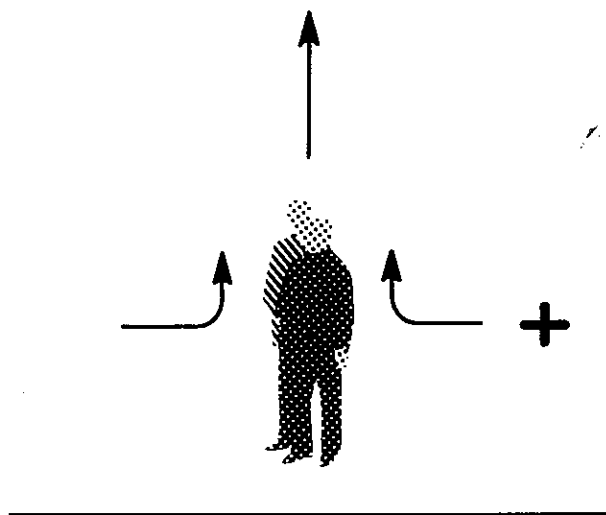
Hvis det er muligt at etablere et større område med et konstant hastighedsfelt af tilstrømmende ren luft, vil der dannes et koncentrationsprofil i kildens læside, se figur 5. Profilets bredde vil vokse med afstanden fra kilden, fordi turbulent opblanding af luft på tværs af bevægelsesretningen udtynner koncentrationen, som det er antydnet på figuren. Udtyndingen vil ligeledes betyde, at koncentrationen falder hen igennem strømmingen. Det kan umiddelbart slutes, at en høj lokal lufthastighed vil resultere i et lavt koncentrationsniveau, medens en lav hastighed vil give høj koncentration. Denne effekt fremgår også af figur 14 i en mere generel situation. Spredningsmodellen, der er illustreret på figur 5, kaldes en Gaussisk spredningsmodel, og den anvendes ofte i det eksterne miljø. Den kan måske anvendes i specielle situationer, som for eksempel i udsnit af meget store rum eller i rene rum. Forsøg har vist, at den er vanskelig at eftervise i almindelig ventilation, se reference [4].



Figur 6. Eksempel på lokal forstyrrelse ved en emissionskilde.

Figur 6 viser, hvorledes lokale forhold kan give en kraftig forstyrrelse. Hvirvler fra læsiden af for eksempel en person kan bringe sporstof til at bevæge sig imod hovedstrømningen og op i personens indåndingszone, som det er vist i reference [5], hvor der også gives andre eksempler på vekselvirkning imellem lokal luftbevægelse og fordeling af sporstof fra en punktkilde.

Hvis et område af et lokale har stillestående luft, vil en kilde i dette område kunne skabe høje koncentrationer. I fortrængningsventilation er der store områder i opholdszonen, hvor luftbevægelsen er lav, men også ved anlæg med stråleventilation kan der være områder med en lav lufthastighed, som det for eksempel ses på figurerne 11 og 14. Hvis en termisk neutral kilde frigør et forurenende stof i et sådan område, vil en person tiltrække denne forurening, fordi det termiske grænselag fra kroppen medriver luft fra omgivelserne. Holmberg m.f. [6] har ved fuldskalaforsøg vist, at dette problem kan opstå i et lokale med fortrængningsventilation samt i tilfælde, hvor der er tale om stråleventilation med begrænset luftskifte. Målingerne viser ekstremt høje koncentrationer i personens indåndingszone, medens den falder igen i større højder over personer, se figur 7.



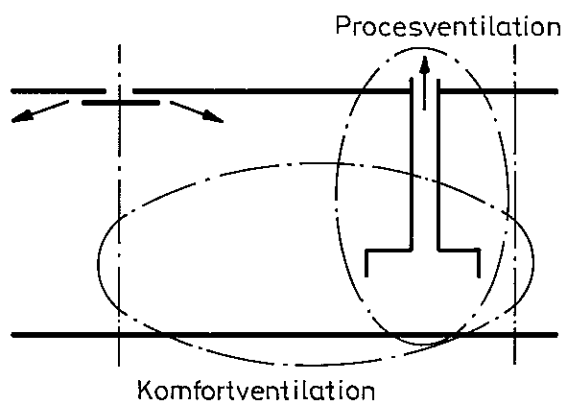
Figur 7. Skitsen viser, hvorledes termiske grænselag omkring personer tiltrækker sporstof fra en kilde.



#### 4. DEN ALMENE VENTILATION

Som det er nævnt i indledningen, skal den almene ventilation fjerne den forurening, som det ikke er muligt at eliminere ved forskellige forholdsregler ved kilden eller fjerne ved en punktudsugning. Det er klart, at det primært er nødvendigt at udnytte de tekniske muligheder, der kan opnås ved punktudsugning, men i den forbindelse skal henvises til anden litteratur om dette emne, [7] og [8].

Det er hensigtsmæssigt at opdele den almene ventilation af lokalet i to hovedområder, nemlig stråleventilation eller opblandingsventilation, afsnit 5, samt fortrængningsventilation, afsnit 6.

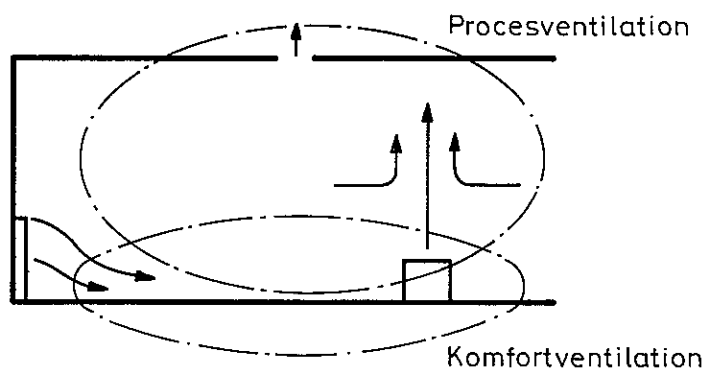


Figur 8. Industrielokale med stråleventilation og punktudsugning. Det er angivet, hvorledes ventilationen også kan opdeles i procesventilation og komfortventilation.

I stråleventilation er luftbevægelsen primært styret af indblæsningsluftens impuls. De indblæste stråler danner recirkulerende strømninger med en stor opblanding af luft og lav lufthastighed i opholdszonen. Figur 8 viser en skitse af et system med stråleventilation. Det ses, at det også er muligt at skelne imellem et område, hvor komfortventilationen er det vigtigste, og et område hvor der er tale om procesventilation. Komfortventilation defineres som den ventilation, der har til formål at skabe et godt atmosfærisk og termisk klima i opholdszonen, og procesventilation er den ventilation, der for eksempel køler maskiner, tilfører luft til forbrænding, fjerner røg, gasser m.m.

Figur 9 skitserer strømmingen i et lokale med fortrængningsventilation. I dette tilfælde tilføres indblæsningsluften med lav impuls direkte i opholdszonen, og det er de termiske kræfter, der styrer luftbevægelsen. Der kan opstå lagdeling i luftstrømmingen, og der dannes en lodret temperaturgradient. Som det ses af figuren, er procesventilationen en integreret del af den almene ventilation, selvom der naturligvis stadig kan være tale om at anvende punktudsugning i visse områder.

Stråleventilation og fortrængningsventilation repræsenterer de to hovedområder inden for almen ventilation, men der findes også forskellige kombinationer af de to typer anlæg samt andre specielle anlæg som for eksempel luftfordelingssystemer, der anvendes i rene rum.

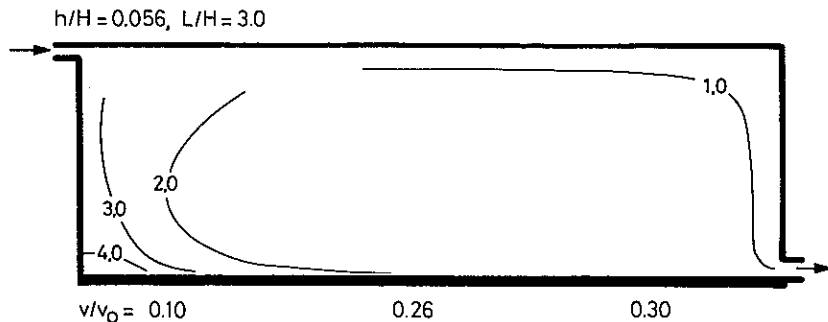


Figur 9. Industrielokale med fortrængningsventilation og en koncentreret varmekilde.

## 5. STRÅLEVENTILATION

Dette afsnit beskriver primært fordelingen af luftformige stoffer og gasser i et ventileret lokale med emissionskilder. Det beskriver endvidere betydningen af udsugningsåbningens placering, samt hvorledes begrebet ventilationseffektivitet anvendes til at undersøge forholdene i et lokale med stråleventilation.

### Fordelingen af luftformige stoffer og gasser



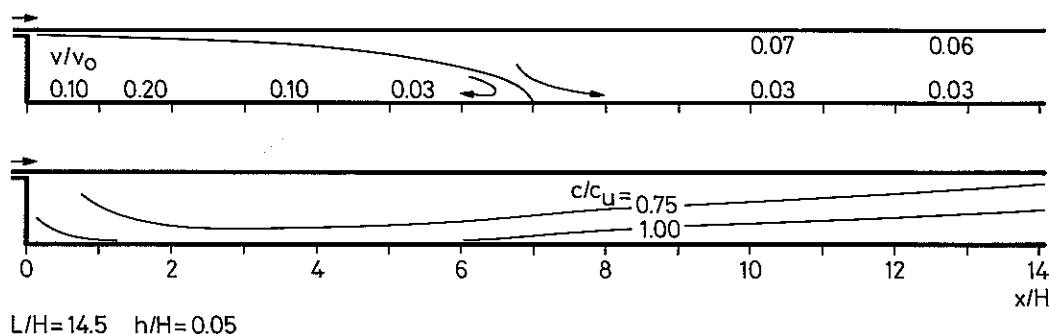
Figur 10. Koncentrationsfordelingen i et lokale med to-dimensional isothermisk strømning. Fra reference [9].

Figur 10 viser koncentrationsfordelingen i et lokalet med en spalteindblæsning og to-dimensional isothermisk strømning. Emissionskilden er jævnt fordelt over gulvfladen, og koncentrationen er på figuren angivet som den relative koncentration  $c/c_u$ , hvor  $c$  er den lokale koncentration, og  $c_u$  er koncentrationen i udsugning-en. Indblæsningsspalten har størrelsen  $h = 0,056 H$ , hvor  $H$  er lokalehøjden, og dette er en relativ stor åbning. Emissionen har i dette tilfælde ingen impuls, og forureningen følger luftens strømning i lokalet.

Det ses på figur 10, at koncentrationen i venstre side af lokalet under indblæsnings-spalten er fire gange så stor som koncentrationen i udsugningsåbningen. Ideen bag stråleventilation er at opnå en stor opblanding og derved en ensartet koncentration i hele lokalet. I praksis kan der dog opstå store koncentrationsforskelle, fordi det forurenende stof ikke bliver fuldstændig opblandet. Det forurenende stof bliver i stedet transporteret af den recirkulerende luft. Hvis der anvendes en mindre indblæsningsspalte, fås der en mere ensartet koncentration. En spaltestørrelse på  $0,001 H$  - som er en typisk størrelse - giver en maksimal koncentration i lokalet på to gange koncentrationen i udsugningen, som det er vist i reference [9]. Det må generelt konkluderes, at det ikke er tilstrækkeligt at dimensionere efter en forudsætning om fuldstændig opblanding af luften i lokalet.

I mange ældre industribygninger skal luftfordelingssystemet dække et dybt lokale, som det er illustreret på figur 11. Indblæsningsarmaturerne danner en plan stråle, som maksimalt når en længde på  $7 H$  ind i lokalet, hvor  $H$  er rumhøjden. Denne indtrængningslængde er ved isothermisk strømning uafhængig af indblæsningshastigheden  $v_0$ . Det ses, at hastigheden i opholdszonen maksimalt er 20% af indblæsningshastigheden, medens den i store områder kun er 3%.

Den nederste skitse på figur 11 viser koncentrationsfordelingen  $c/c_u$  i det tilfælde, emissionskilden er jævnt fordelt over gulvfladen. Den relative koncentrationsfordeling viser en tilsyneladende jævn fordeling, men det skal tages i betragtning, at den absolutte værdi kan blive meget høj, da udsugningskoncentrationen  $c_u$  ved  $x/H = 14,5$  rummer emissionen fra hele lokale længden.



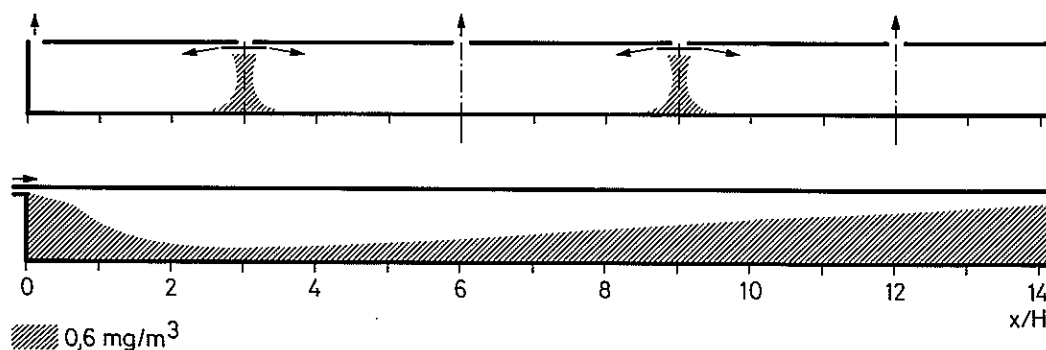
Figur 11. Hastighedsfordeling og forureningsfordeling i et dybt lokale.  $L$ ,  $H$  og  $h$  er henholdsvis lokale længde, lokale højde og ækvivalent højde af indblæsningsspalte.

Forureningsfordelingen i det dybe lokale viser, at koncentrationsniveauet er lavest i det område, hvor der foregår en recirkulerende strømning, medens den når større værdier i det område, hvor der foregår en form for parallel strømning.

Koncentrationsniveauet i et lokale er afhængigt af den tilførte friskluftmængde  $q_V$ . Således er koncentrationen i udsugningen  $c_u$  givet ved

$$c_u = \frac{S}{q_V} \quad (4)$$

hvor  $S$  er kildestyrken. Det er muligt at sænke koncentrationsniveauet i et lokale ved at forøge friskluftmængden, men der skal i denne forbindelse også tages hensyn til den termiske komfort, som sætter en øvre grænse for friskluftmængden.

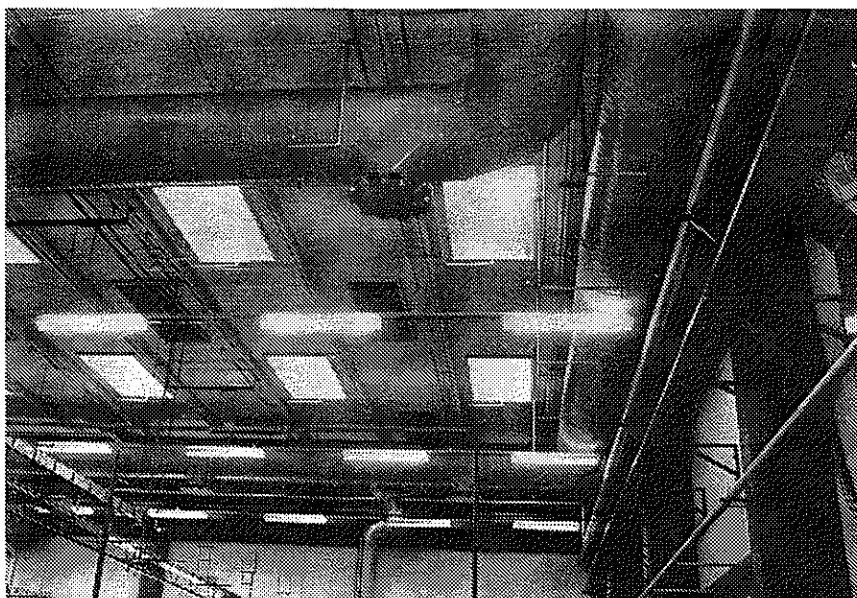


Figur 12. Koncentrationsfordeling i et industrilokale med to forskellige layout af luftfordelingssystemet. Der er samme emission og samme maksimalhastighed i de to tilfælde.

Figur 12 viser et eksempel på de niveauer, der kan etableres i et stort industrilokale ved to forskellige layouts af luftfordelingssystemet. Der regnes med en lokalehøjde  $H$  på 5 m og en maksimal hastighed i opholdszonen på 0,15 m/s. Emissionskilden er jævnt fordelt over gulvfladen, og den har en styrke på  $S = 0,002$  mg/s pr.  $m^2$  gulvareal.

Luftfordelingssystemet på den øverste skitse på figur 12 er delt i sektioner med længden  $3H$ , og data fra figur 10 kan bruges til bestemmelse af lufthastighed og koncentrationsfordeling. Den nederste skitse på figur 12 viser resultatet med det luftfordelingssystem, der er beskrevet i forbindelse med figur 11. Det ses, at de bedste resultater opnås med det luftfordelingssystem, der dækker korte sektioner af hele lokalet. Figuren viser, at der i dette tilfælde kun er tale om mindre områder, hvor koncentrationen bliver over  $0,6$  mg/ $m^3$ , medens hele opholdszonen har koncentrationen over  $0,6$  mg/ $m^3$ , i det tilfælde at industrilokalet ventileres med en enkelt plan stråle fra den ene endevæg.

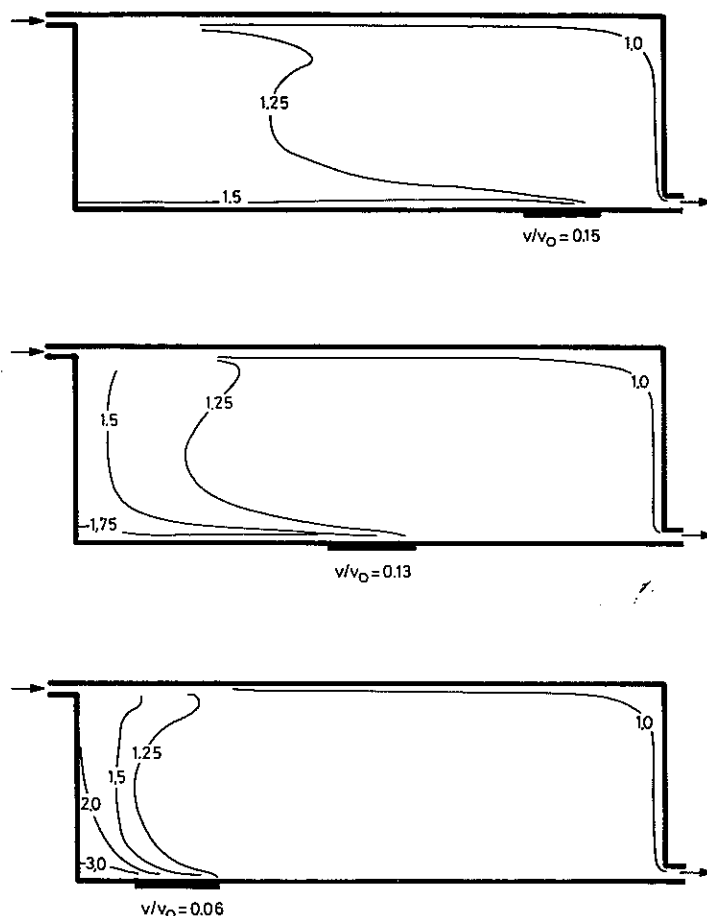
Det er en generel erfaring, at et luftfordelingssystem kan fjerne den største termiske belastning, hvis lokalet er delt op i mange sektioner med hver sit armatur, se [10] og [11]. Eksemplet på figur 12 illustrerer, at et sådant design af den almene ventilation også giver det laveste forureningsniveau.



Figur 13. Tæt placering af armaturer i et industrilokale.

Figur 13 viser en typisk løsning med armaturer fordelt under tagkonstruktionen i et lokale. Ud over fordelene med et godt termisk og atmosfærisk klima giver denne løsning også andre fordele. En jævn fordeling af armaturer giver et ensartet klima i bygningen, og det er muligt at eliminere lokale problemer som for eksempel koldt nedfald fra tagvinduer.

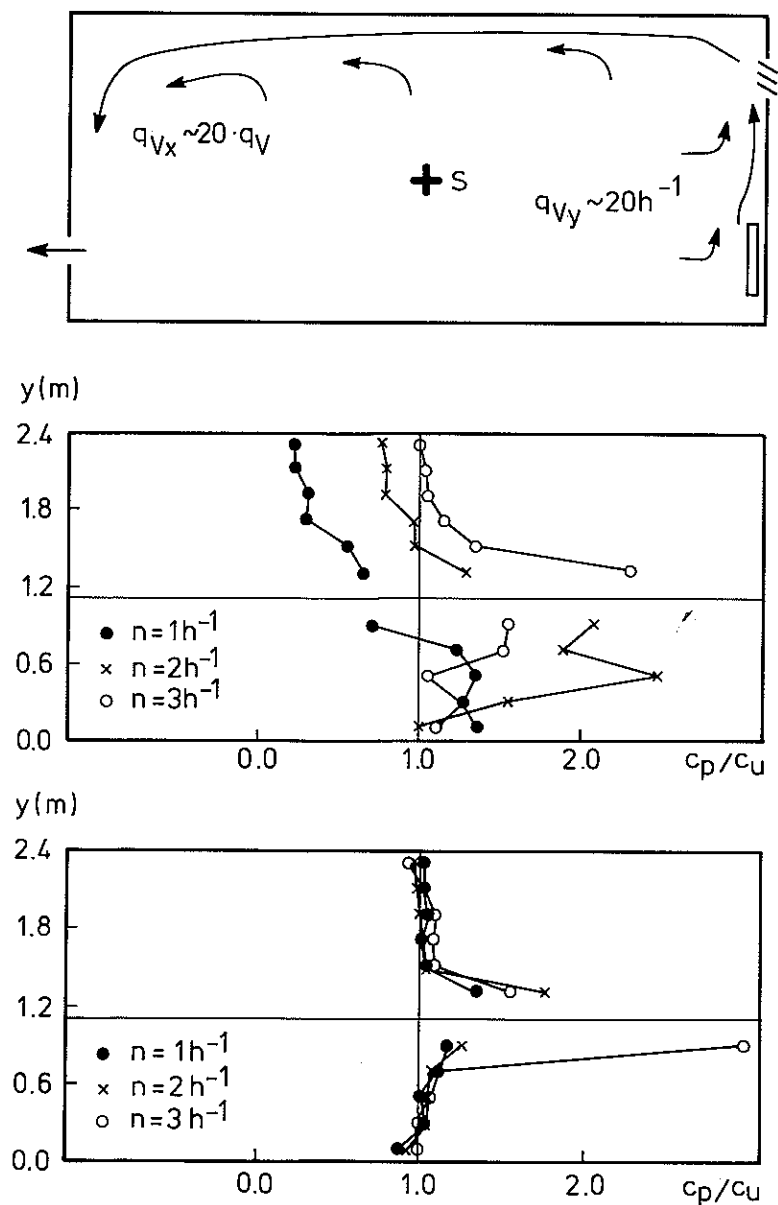
Et stort lokale kan opdeles i mindre sektioner ved at anvende et princip med styrestråler, [11]. I dette tilfælde transporteres luften frem under loftfladen med en impuls fra vandrette styrestråler, og det sendes ned i opholdszonen med lodrette styrestråler.



Figur 14. Fordeling af normeret koncentration  $c/c_u$  ved forskellig placering af emissionskilden.  $h/H = 0,01$  og  $L/H = 3,0$ . Fra reference [9].

Figur 14 viser et eksempel med koncentrationsfordeling fra en liniekilde. Det fremgår tydeligt, at kildens placering har stor betydning for koncentrationsfordelingen i lokalet. På den øverste skitse er forureningskilden placeret i nærheden af det område, hvor hastigheden i opholdszonen er størst (15% af indblæsningshastigheden), og den maksimale værdi af  $c/c_u$  i opholdszonen bliver 1,25 - 1,5 i området under indblæsningen. Placeres kilden under indblæsningen, som vist på den nederste skitse, vil der dannes koncentrationer helt op til 3,0, fordi kilden er placeret i et område med lav lufthastighed (6% af indblæsningshastigheden).

Det er ikke alene indblæsningsstråler, der skaber opblanding af luften og dermed en udjævning af koncentrationerne. Den termiske strømning over en radiator, eller anden varmekilde, samt koldt nedfald er også i stand til at skabe en effektiv opblanding af rumluften.



Figur 15. Lodret koncentrationsprofil i rum med stråleventilation og radiatoropvarmning. Den midterste skitse viser koncentrationsprofiler ved isothermisk stråleventilation, og den nederste skitse viser koncentrationsprofiler ved en kombination af stråleventilation og radiatoropvarmning. Reference [12].

Figur 15 viser nogle målinger af koncentrationsprofiler i et rum med stråleventilation og radiatoropvarmning. Emissionskilden er placeret midt i lokalet, og der måles langs den lodrette linie over og under kilden ved de tre luftskifter 1, 2 og  $3h^{-1}$ . Den midterste skitse viser koncentrationsprofilerne ved isothermisk ventilation. Det er nødvendigt med et luftskifte på  $3h^{-1}$ , før koncentrationsprofilen nærmer sig den konstante værdi, der gælder for større luftskifter.

Hvis man betragter den luftmængde, der medrives i strålen under loftfladen, er der tale om, at denne del af strømningen sætter et flow i gang, som svarer til et luftskifte på 20 til  $60h^{-1}$ .

Den nederste skitse på figur 15 viser koncentrationsprofilen, når der tilføres en effekt på 800 W fra radiatoren. Den termiske strømning over varmekilden forøger den recirkulerende strømning i rummet med en luftmængde, der svarer til et luftskifte på  $20h^{-1}$ . Medrivningen giver en sekundær luftbevægelse i det lagdelte temperaturfelt i opholdszone. En kombination af disse effekter er med til at danne det ensartede koncentrationsprofil, som ses på den nederste skitse på figur 15.

Det kan konkluderes, at termisk strømning er med til at udjævne koncentrationsprofiler i lokaler. Denne effekt har stor betydning for lokaler uden ventilation. Derfor kan forholdene i sådanne lokaler være kritiske i overgangsperioden, hvor der ikke er behov for opvarmning.

### Placering af udsugningsåbninger

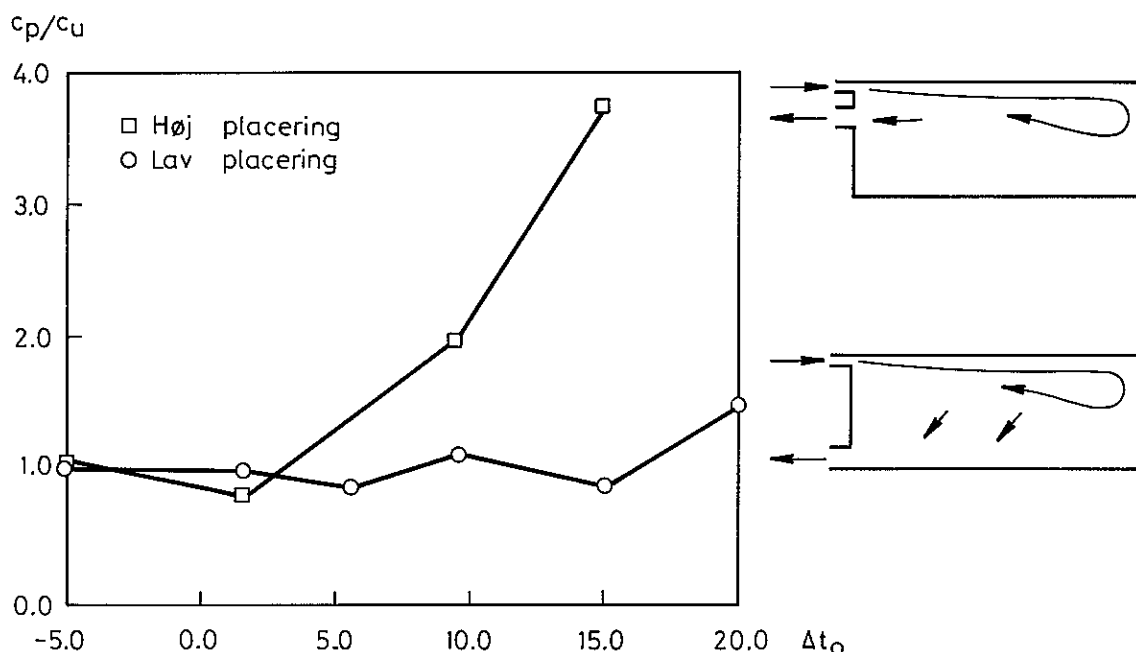
I et lokale med almen ventilation og punktudsugning vil det være naturligt at lade den størst mulige luftmængde passere punktudsugningen. Så længe den almene ventilation skal være væsentlig større end punktudsugningens dimensionerende luftmængde, kan det betale sig at øge punktudsugningens udsugede luftmængde samt dens virkningsgrad, reference [8].

I situationer hvor der ikke anvendes punktudsugninger, eller den udsugede luftmængde igennem punktudsugningerne er lille, bør det nøje overvejes, hvor udsugningsåbninger til den almene ventilation skal placeres.

Til forskel fra en indblæsning vil en udsugning ikke skabe noget væsentligt hastighedsfelt i sin nærhed. Luften strømmer til fra alle sider og har derfor en relativ lav hastighed. Passerer for eksempel en stråle forbi en udsugningsåbning, vil den hastighed, som udsugningen genererer ofte være meget lille i forhold til strålens hastighed, og den vil passere uden nogen væsentlig påvirkning. Da indblæsningsstråler medriver store mængder fra omgivelserne, se figur 15 øverst, vil den luft, som bliver fjernet igennem udsugningsåbningen også i det store og hele være rumluft.

Selv om en udsugningsåbning kun har ringe indflydelse på hastighederne i et lokale, har dens placering stor betydning for en eventuel forureningsfordeling. Åbningen bør placeres højt, hvis der er stor varmeudvikling i lokalet, og lavt hvis lokalet skal opvarmes ved hjælp af ventilationsluften.





Figur 16. Koncentrationsniveau i et lokale med varmluftindblæsning og to forskellige placeringer af udsugningsåbningen. Luftskefte  $n = 3h^{-1}$ .

Målingerne vist på figur 16 er udført af Mathisen og Skåret [13]. Der er tale om en situation, hvor der fortrinsvis er varmluftindblæsning med en temperaturdifferens  $\Delta t_o$  imellem indblæsning og udsugning.

Koncentrationen  $c_p$  er middelværdien i højden 1,7 m. Ved høj placering af udsugningsåbningen betyder den termiske lagdeling, at luftfornyelsen i opholdszonen bliver ringe. Kilder i opholdszonen hæver koncentrationsniveauet i højden 1,7 m til 4 gange værdien i udsugningen ved en temperaturdifferens  $\Delta t_o$  på  $15^\circ\text{C}$ . En temperaturdifferens på denne størrelse er ikke nogen høj værdi ved varmluftindblæsning.

Figur 16 viser, at en lav placering af udsugningen fastholder koncentrationsniveauet  $c_p/c_u$  på ca. 1,0 ved store temperaturdifferenser. De to skitser på figuren illustrerer, at strømningsbilledet vil være næsten ens ved de to forskellige placeringer af udsugningen. Ved en lav placering af udsugningen er der dog tale om, at luften langsomt forskydes ned igennem opholdszonen, så forureningens opholdstid i dette område bliver mindre end ved en høj placering af udsugningen.

I en køregård, hvor lastbiler bliver læsset med truck, anvendes der ofte varmluftindblæsning til at skabe et rimeligt arbejdsklima og give en hurtig opvarmning efter de forstyrrelser, der opstår, når porte åbnes, og nedkølede biler køres ind. Figur 17 viser et eksempel på en gulvudsugning, der anvendes i en køregård. Udsugningen er placeret tæt ved bilernes udstødning. Udsugningen er med til at give en god luftfornyelse i opholdszonen, og den er samtidig afløbsrist for regn- og smeltevand fra bilerne.



Figur 17. Gulvudsugningen i en køregård.

Hvis luftfordelingssystemets primære opgave er at fjerne en varmeudvikling fra lokalet, og varmekilderne samtidig afgiver forurenende stoffer, er det sandsynligt, at der er størst forureningsniveau i luften øverst i lokalet. I dette tilfælde vil en høj placering af udsugningsåbningerne give den laveste koncentration i lokalet.

Udsugningsåbningernes placering og udsugningsmængdens størrelse kan også udnyttes til at styre trykfordelingen i en bygning eller et afsnit af et lokale, så luften fra forurenende processer, som fx catering, hærkning og galvanisering, fastholdes inden for et mindre område.

### Ventilationseffektivitet

Hvis der i et lokale er en middelmiddelt koncentration i opholdszonen  $c_{op}$ , som er mindre end koncentrationen i udsugningen  $c_u$ , er der et gunstigt samspil imellem emissionskilde og luftfordelingssystem. Situationen betyder bl.a., at der kan anvendes mindre friskluftmængde til ventilationen.

Disse forhold udtrykkes ved at beskrive en ventilationseffektivitet i opholdszonen ud fra følgende formel

$$\epsilon_{op} = \frac{c_u}{c_{op}} \quad (5)$$

Det er desuden muligt at definere en middelventilationseffektivitet ved følgende udtryk

$$\bar{\epsilon} = \frac{c_u}{\bar{c}} \quad (6)$$

samt et ventilationsindeks som

$$\epsilon_p = \frac{c_u}{c_p} \quad (7)$$

Det ses direkte fra de tre formler, at situationen, hvor koncentrationen er stor i udsugningen i forhold til koncentrationen i lokalet, giver ventilationseffektiviteter, der er større end 1,0, medens fuldstændig opblanding giver en effektivitet på 1,0.

Det ses også, at den normerede koncentrationsfordeling  $c/c_u$  er lig med den reciprokke værdi af det ventilationsindeks, der er givet i ligning (7).

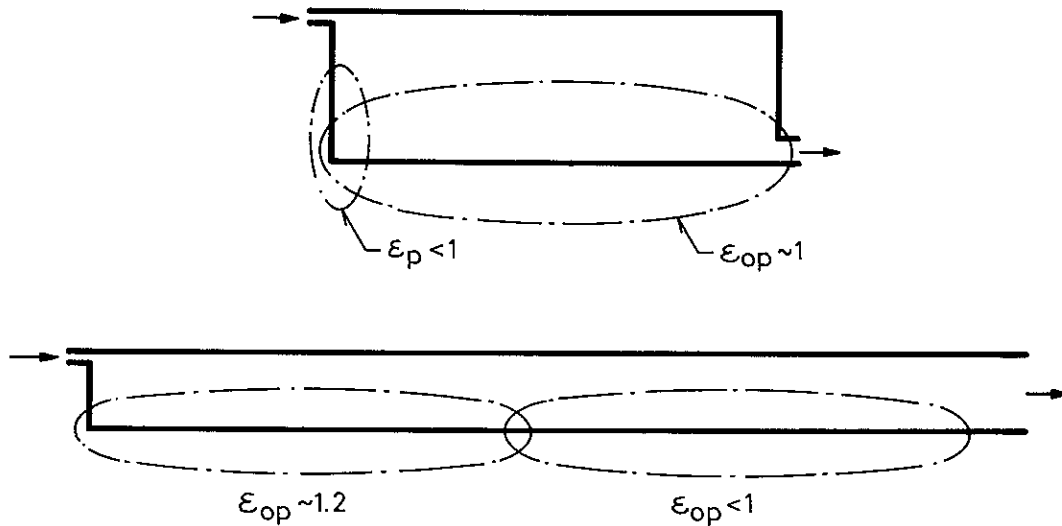
Det kan vises, at ventilationseffektiviteten er et udtryk for den opholdstid - eller den alder - som luften har, når den passerer udsugningen, i forhold til den alder som forureningen har, reference [3]. En stor ventilationseffektivitet betyder således, at den forurenede luft, som forlader lokalet, har en kort opholdstid i lokalet i forhold til hele ventilationsluftens opholdstid.

Ventilationseffektivitetens størrelse er et udtryk for samspillet imellem kilde, emission og luftfordelingssystem. Ventilationseffektiviteten kan kun defineres i de situationer, hvor der er en kilde i lokalet. Den er afhængig af kildens placering i lokalet, som det for eksempel ses af figur 14, hvor en høj lufthastighed omkring kilden medvirker til at hæve effektiviteten. De forskellige lokale forhold omkring kilden, som omtales i afsnit 2 og 3, vil have stor indflydelse på størrelsen af ventilationseffektiviteten. Figur 15 viser, at andre strømningsforhold i lokalet, som for eksempel termisk strømning, også kan påvirke effektivitetens størrelse.

Luftfordelingssystemet har naturligvis også en stor indflydelse på ventilationseffektivitetens størrelse, og en god løsning er en løsning, hvor alle forhold er taget i betragtning, så man får et acceptabelt koncentrationsniveau uden uheldige spidsværdier.

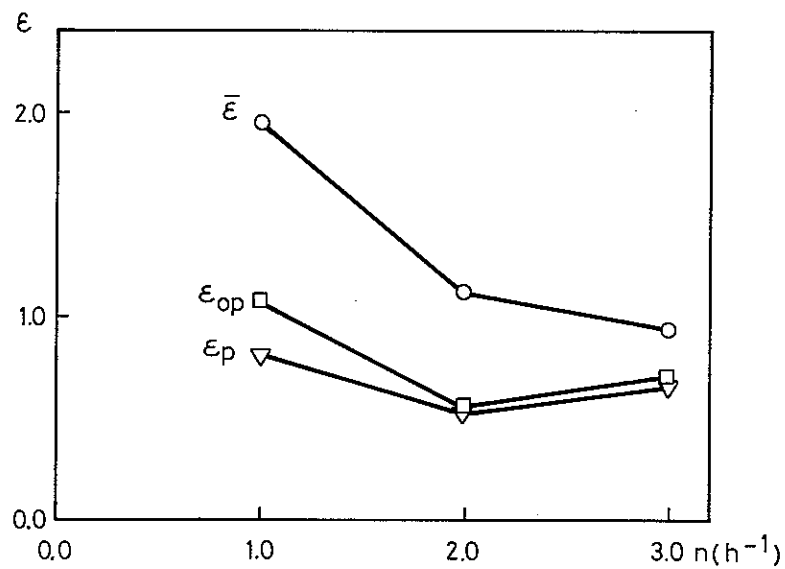
Figur 18 viser, at det ikke er nok at arbejde med ventilationseffektivitetens størrelse alene. Effektiviteten på 1,2 i områder af det dybe lokale er ikke i sig selv et udtryk for en hensigtsmæssig situation. Det er tidligere vist, at der skal arbejdes både med design af luftfordelingssystem, luftmængde og termisk komfort for at finde det laveste koncentrationsniveau i opholdszonen.

Hvis emissionen fra kilden kan styres, kan man bestemme middelventilationseffektiviteten  $\bar{\epsilon}$  (ligning (6)) i små lokaler ved følgende fremgangsmåde. Først bestemmes koncentrationen  $c_u$  i udsugningsåbningen, eller returluftkanalen, under stationære driftforhold. Derefter standses ventilationsanlægget, og det sikres, at der intet flow er igennem kanalsystemet. Emissionen fra kilden standses på samme tidspunkt, og rumluften blandes kraftigt med en ventilator. Middelkoncentrationen i lokalet  $\bar{c}$  bestemmes nu med en enkelt måling, og  $\bar{\epsilon}$  kan beregnes ud fra de to målinger.



Figur 18. Ventilationseffektivitet i lokalerne på figur 10 og figur 11.

I store industrilokaler vil det være vanskeligt at sikre en tilstrækkelig opblanding. Derfor bestemmes middelmiddelt koncentrationen  $\bar{c}$  i dette tilfælde ved at dividere den totale masse af forurening i rummet med rumvolumenet. Den totale masse af forurening bestemmes ved at integrere koncentration gange volumenstrøm over tiden på grundlag af målinger, der er foretaget i udsugningen.



Figur 19.  $\bar{\epsilon}$ ,  $\epsilon_{op}$  og  $\epsilon_p$  mål i lokalet på figur 15 ved isothermisk strømning.

Hvis man ønsker at bestemme ventilationseffektiviteten i opholdszonen  $\epsilon_{op}$ , er det nødvendigt at gennemføre en række målinger i forskellige punkter af opholdszonen under stationære forhold for at beregne middelmiddelt koncentrationen  $c_{op}$ . Denne ventilationseffektivitet kræver altså flere målinger, men den giver også et mere konkret billede af koncentrationsfordelingen i opholdszonen.

Figur 19 viser, hvorledes en måling af  $\bar{\epsilon}$  giver en begrænset information. Tilsyneladende er der en høj ventilationseffektivitet ved luftskiftet  $1h^{-1}$ . I virkeligheden viser målinger fordelt i lokalet, at koncentrationen er høj i opholdszonen, medens den er lav i området under loftet, som gennemstrømmes af den indblæste stråle. Ved bestemmelse af middelmiddelt koncentrationen er den rene luft i den øverste halvdel af rummet med til at give en lav værdi af  $\bar{\epsilon}$ . Kurven for  $\epsilon_{op}$  giver et mere ærligt indtryk af situationen, og kurven for  $\epsilon_p$  giver et reelt billede af situationen i et givet punkt  $p$ . Ved bestemmelse af  $c_{op}$  er opholdszonens højde sat til 1,75 m, og  $c_p$  er målt i højden 0,7 m. Lokalet på figur 15 har højden 2,4 m.

Ventilationseffektiviteten kan også bestemmes ud fra måling af et tidsafhængigt forløb. Et sådant forløb etableres for eksempel ved momentant at tilsætte et sporstof med konstant emission fra måleperiodens starttidspunkt. Det vil føre for vidt at komme ind på disse metoder og den grundlæggende teori bag dem, og der skal blot henvises til Sandbergs arbejde på dette område [14].

I visse situationer kan det være vanskeligt at fastlægge en entydig placering af forureningskilderne i et lokale. Her tænkes for eksempel på en køregård med lastbiler og truck eller et opholdslokale, hvor det er personerne, der belaster det atmosfæriske klima. I dette tilfælde kan det være relevant at bestemme luftudskiftningseffektiviteten. Denne størrelse er et udtryk for, hvor hurtigt luften udskiftes i rummet, og den er således afhængig af luftfordelingssystem, lokalegeometri, placering af varmekilder m.m., medens forureningskildens placering og forureningsfordelingen i rummet ikke indgår i problemstillingen, se reference [14], [3], [15] og [16].

Der er nu udviklet måleudstyr for luftudskiftningseffektiviteten, som integrerer måling og den tilhørende databehandling på en PC'er [17].

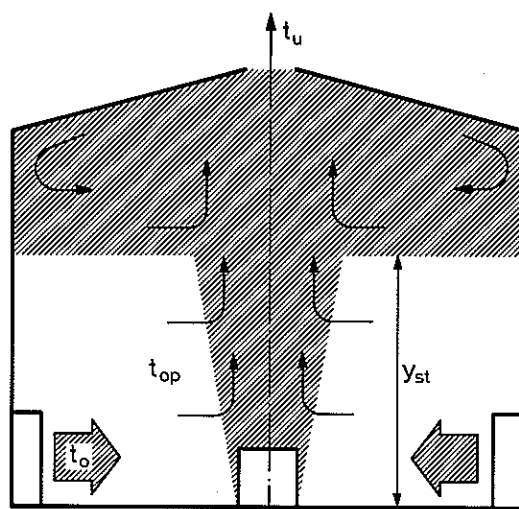
## 6. FORTRÆNGNINGSVENTILATION

Fortrængningsventilation er en ventilationsform, der traditionelt har været anvendt i situationer med høj belastning som for eksempel i sværindustrien. Den finder en stigende anvendelse i visse andre situationer, fordi den ved korrekt dimensionering kan fjerne store varmemængder og forureningsmængder samt give en god energiøkonomi og en høj ventilationseffektivitet.

Ved fortrængningsventilation placeres indblæsningsåbningerne lavt, og luften tilføres direkte i opholdszonen. Konvektion over varmekilder giver en opadrettet luftbevægelse i rummet, og den varme luft fjernes ved udsugningsåbninger, der altid er placeret højt.

I forbindelse med industriventilation er det hensigtsmæssigt at betragte situationen med få termiske kilder adskilt fra situationer med mange kilder og lav termisk belastning. Denne opdeling anvendes i det følgende, og der afsluttes med et afsnit om ventilationseffektivitet og temperatureffektivitet. Fortrængningsventilation i forbindelse med industriforhold er bl.a. beskrevet i referencerne [11] og [18].

### Fortrængningsventilation i lokaler med få termiske kilder

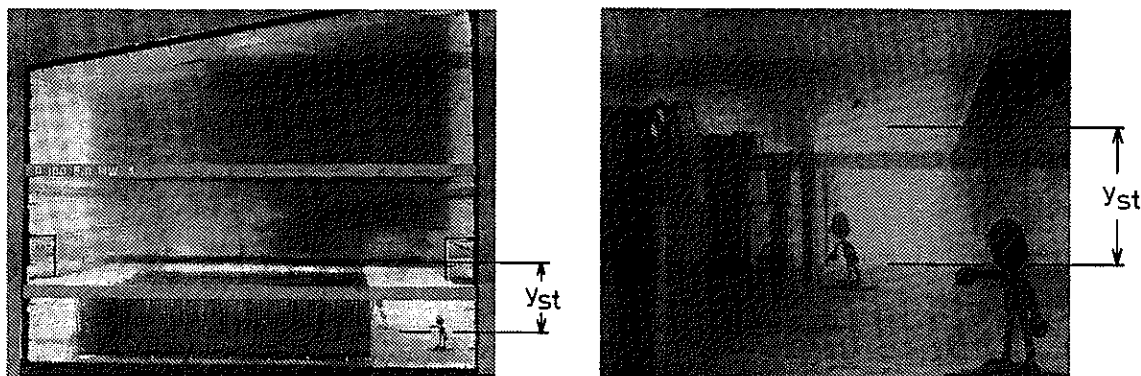


Figur 20. Eksempel på strømning i et lokale med en enkelt varmekilde og fortrængningsventilation.

Figur 20 viser princippet i fortrængningsventilation. En varmekilde danner en opadstigende luftstrømning. Op til højden  $y_{st}$  medriver strømmingen en luftmængde, der svarer til den mængde, der tilføres i opholdszonen. I sit videre forløb medriver strømmingen luft fra en varm - og forurennet - recirkulerende strømning under loftet. I højden  $y_{st}$  dannes der et spring i koncentrationsprofilet, medens temperaturprofilet har et mere kontinuerligt forløb igennem dette område.

Lagdelingshøjden  $y_{st}$  reguleres af den tilførte luftmængde. Ved en forøgelse af luftmængden bliver  $y_{st}$  større, fordi der er mere primær luft til rådighed til medrivning i den termiske strømning over varmekilden. En forøget luftmængde betyder en formindskelse af temperaturdifferensen  $t_u - t_o$ , hvor  $t_u$  og  $t_o$  er henholdsvis udsugningstemperatur og indblæsningstemperatur. I den forbindelse er det vigtigt, at temperaturdifferensen er tilstrækkelig til at fastholde lagdelingen. En formindsket luftmængde vil sænke lagdelingshøjden  $y_{st}$ . Den vil samtidig stabilisere lagdelingen, fordi temperaturdifferensen bliver større.

Koldt nedfald langs væggen og vinduer har stor betydning for lagdelingshøjden, fordi denne strømning transporterer luft fra den øverste zone ned i den nederste zone. Den har desuden en afgørende indflydelse på forureningsfordelingen i opholdszonen, da nedfaldet transporterer forurenede luft ned i dette område. Der kan være tale om, at forureningen transporteres helt ned i gulvhøjde, hvor den fordeles over gulvfladen, eller der opstår et lag af forurenede luft i en højde i lokalet, der svarer til det niveau, hvor det kolde nedfald standses af andre termiske strømninger. En sådan lagdelt forurening af luften ses på figur 32 ved de store luftskifter.

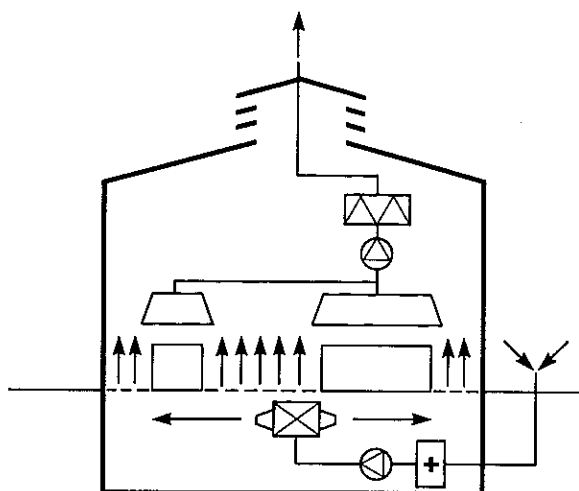


Figur 21. Modelforsøg til bestemmelse af lagdelingshøjde i et industrilokale med få koncentrerede varmekilder. (Foto: Vassdrags- og Havnelaboratoriet, Trondheim).

Figur 21 viser et eksempel på modelforsøg med strømninger i et industrilokale. Industrilokalet er ventileret med naturlig ventilation, dvs. det er trykdifferensen over indblæsningerne i bygningens sider og udsugningen i kippen, som driver tilstrømningen af frisk luft, reference [19]. I lokalet er der en række ovne, der producerer siliciumkarbid. Ovnene afgiver varme, CO-gas, røg og støv. Modelforsøgene fastlægger lagdelingshøjden, og figur 21 viser, at der dannes et rimeligt område i opholdszonen, som består af ren luft. Erfaring med fortrængningsventilation viser, at der kan være tale om koncentrationer så lave som  $c = 0,2 \cdot c_u$  eller lavere, hvor  $c_u$  er koncentrationen i udsugningen. Indsugningsåbningerne er placeret 4,5 m over gulvet. Modelforsøgene viser, at det ikke er en optimal løsning, da faren for medrivning af forurenede luft er stor i dette tilfælde.

Industrilokalet på figur 21 indeholder en række ovne. Ovnene opvarmes diskontinuerligt, og det viser sig, at man bør undgå, at to ovne ved siden af hinanden er opvarmet samtidigt. På grund af Coanda-effekten vil den termiske strømning over to ovne tiltrække hinanden, og der opstår en nedadrettet forurenede strømning imellem ovnene, som vil hæve koncentrationen i dette område.

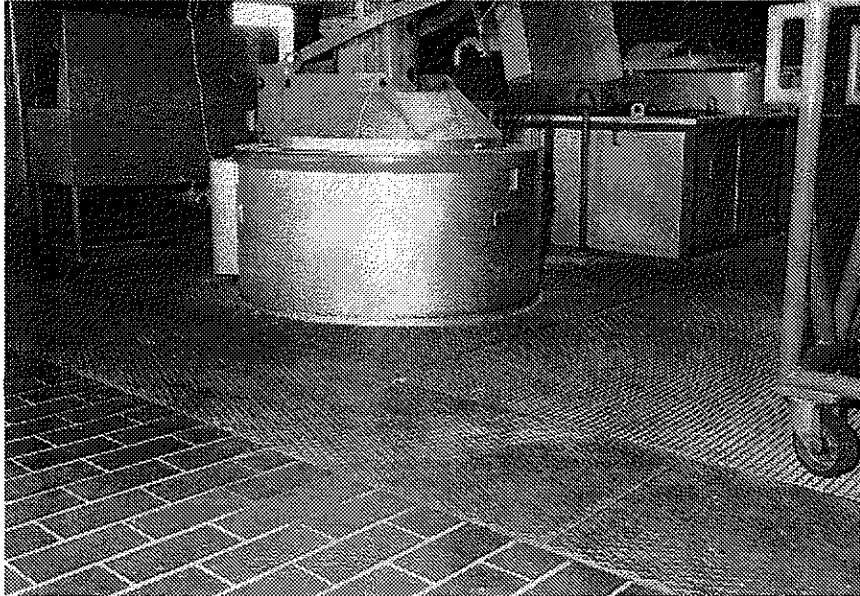
Formålet med fortrængningsventilation er at skabe et friskluftområde i opholdszonen samt et område med varm og forurenede luft, der ligger over opholdszonen. Princippet kan forstærkes, hvis indblæsningsåbningerne integreres ind i arbejdszonen. Figur 22 viser et ventilationssystem i et hærderi, hvor luften tilføres i opholdszonen. Systemet skaber et rent arbejdsområde ved at indblæse luft igennem en del af gulvet, der er udformet som en rist. På denne måde er lokalets arbejdszone placeret i et område med parallelstrømning af indblæsningsluft, dvs. i princippet i en indblæsningsstråles kernezone. Udsugning fra systemet foregår delvis igennem punktudsugning over de enkelte bade og delvis ved naturlig ventilation op igennem bygningen. For at få en jævn luftfordeling over gulvet anvendes der et indblæsningssystem i kælderen, der giver recirkulerende strømning i dette område, reference [11].



Figur 22. Ventilation af hærderi. Luften tilføres igennem en del af lokalets gulv for at opnå et forureningsfrit arbejdsområde.

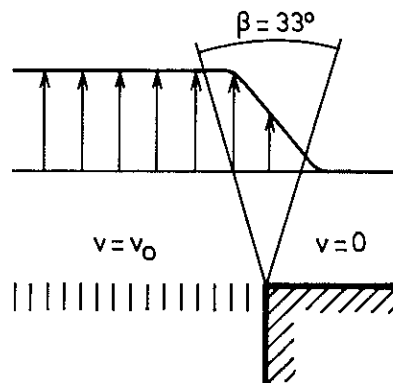
Figur 23 viser et af hærdebadene omgivet af en rist med friskluftforsyning. I rene rum skabes en lignende luftbevægelse med parallelstrømning uden recirkulation, men i dette tilfælde vil strømmingen ofte være nedadrettet eller have en horisontal retning.





Figur 23. Hærdebad omgivet af rist.

Hvis området med parallelstrømning er stort, vil det være vanskeligt at skabe en hastighed, der er så høj, at den ikke forstyrres af sekundære strømninger, som for eksempel koldt nedfald fra væggene. Figur 24 viser desuden, at kanten af en kernezonestrømning har et turbulent blandingslag, som begrænser det volumen, hvor der er parallelstrømning af ren luft.



Figur 24. Turbulent blandingslag i kanten af en kernezone.

### Fortrængningsventilation i lokale med mange termiske kilder

Fortrængningsventilation har været anvendt i rum med høj termisk belastning i mange år. Oprindeligt i form af naturlig ventilation som ved forsøgene på figur 21. Et eksempel på en moderne løsning er ventilation af maskinstuen i et EDB-center. Ventilationsprincippet kan også anvendes i lokaler med en lav termisk belastning og mange små kilder, som det skal vises i dette afsnit.

Volumenstrømningen i den termiske strømning over en kilde kan beskrives ved ligningen

$$q_{V_y} \sim \Phi_k^{1/3} (y + d)^{5/3} \quad (8)$$

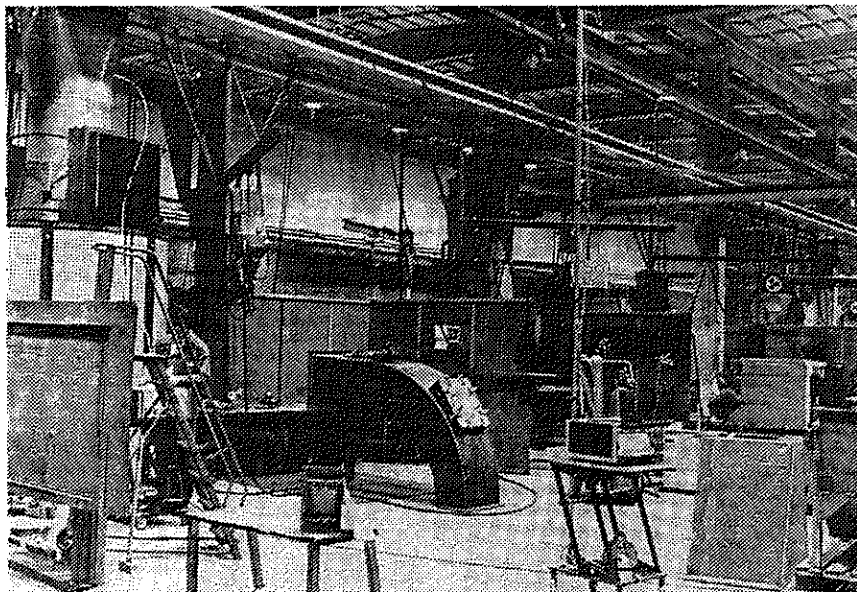
hvor  $y$ ,  $d$  og  $\Phi_k$  er henholdsvis højde over kilde, diameter af kilde og den effekt som varmekilden giver ved konvektion, se [3].

Ud fra ligning (8) ses det, at ved konstant lagdelingshøjde stiger luftmængden  $q_{V_y}$  med antallet af termiske kilder  $N$  efter følgende formel

$$q_{V_y} \sim N^{2/3} \Phi_k^{1/3} \quad (9)$$

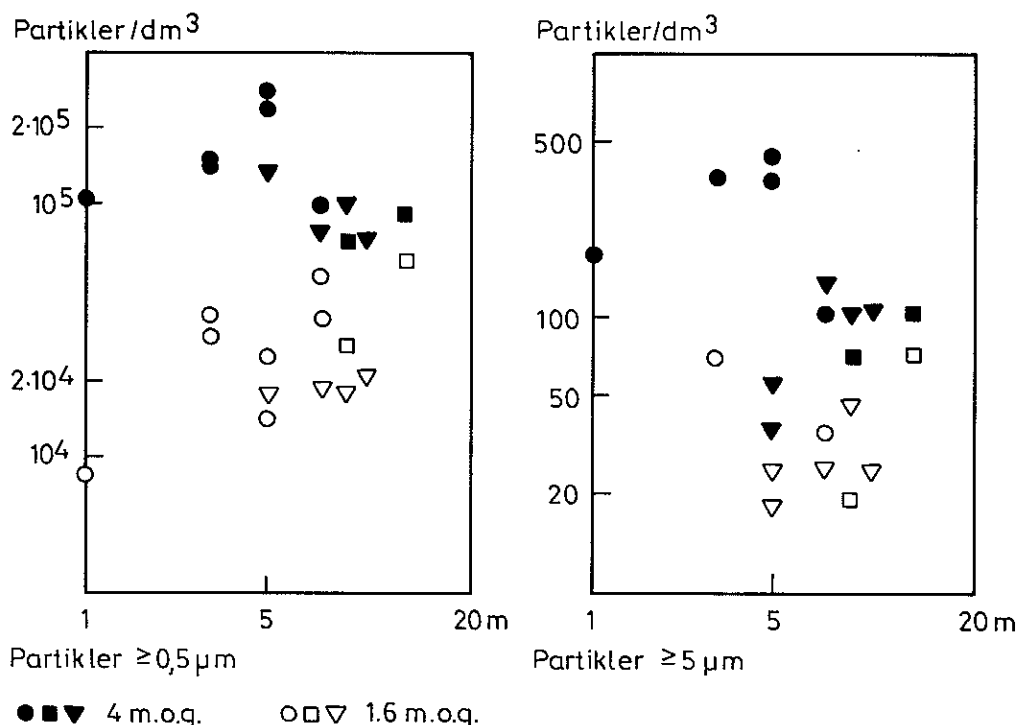
For eksempel giver 10 varmekilder på 100 W en forøgelse af luftmængden  $q_{V_y}$  på 5 i forhold til en varmekilde på 1000 W.

Forøgelsen af luftmængde ved mange små termiske kilder giver et tilsvarende fald i temperaturdiffensen, hvilket kan påvirke lagdelingens stabilitet.



Figur 25. Industrihal hvor der foregår svejsearbejde. Et radiale fortrængningsarmatur ses i billedets venstre side. (Foto: Stratos Ventilation AB).

En feltundersøgelse af Belin [20] belyser forholdene i et svejselokale. Der er monteret 6 armaturer i lokalet, og figur 25 viser et typisk udsnit. I figurens venstre side ses et af de radiale armaturer, og man ser ligeledes svejseboksene, som er placeret ned igennem lokalet med en indbyrdes afstand af 6 m.

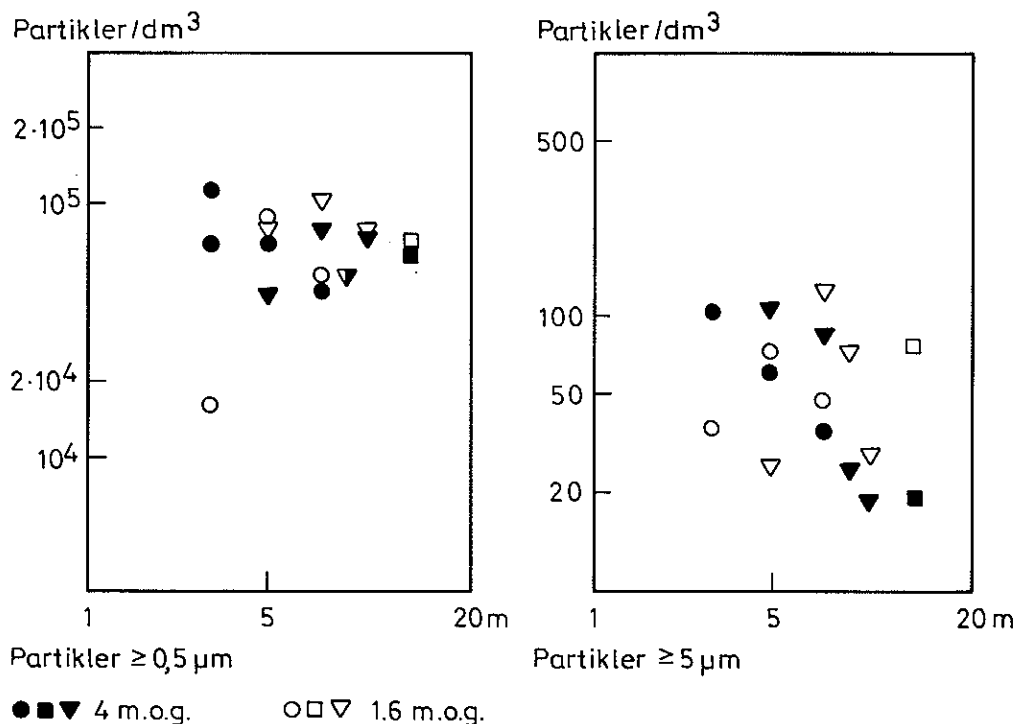


Figur 26. Måling af partikelkoncentration i højden 1,6 m og 4 m over gulvet.

Figur 26 viser partikelkoncentrationen i højden 1,6 m og 4 m over gulvet. Partiklerne stammer fra svejserøgen, og det er tydeligt, at der er en lagdeling med de højeste koncentrationer øverst i lokalet. Det er også tydeligt, at koncentrationsgradienten er til stede i meget stor afstand fra armaturet.

Målingerne foregår under almindelige driftforhold, og det kan derfor være forskellige forstyrrelser, som er med til at give spredningen på måleresultaterne. Ved målingerne på figur 26 er der en lodret temperaturgradient i lokalet svarende til ca.  $2^\circ\text{C}$  temperaturdifferens imellem opholdszone og lokalets øverste område.

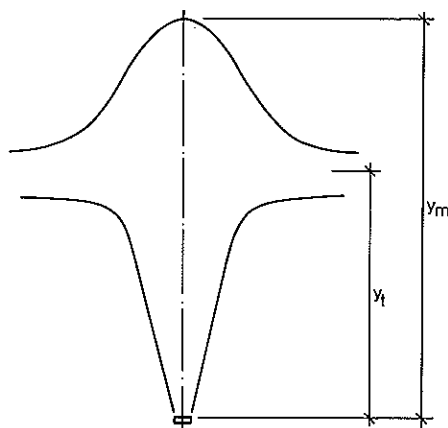
Nogle af forsøgene er udført uden ventilation i svejselokalet, [20]. Åbenstående porte kan i mange situationer skabe en naturlig ventilation, som danner en passende lodret temperaturgradient. I disse tilfælde bliver koncentrationsprofilerne lige så gunstige som dem, der er vist på figur 26. En løsning med naturlig ventilation fra åbenstående porte eller lignende er dog ikke hensigtsmæssig i praksis, fordi det ikke er muligt at styre den termiske komfort og den lodrette temperaturgradient.



Figur 27. Måling af partikelkoncentration i højden 1,6 m og 4 m over gulvet i et svejselokale hvor der ikke er etableret en lodret temperaturgradient.

Forsøgene i svejselokalet understreger betydningen af en lodret temperaturgradient. Figur 27 viser målinger uden en temperaturgradient, og det ses tydeligt, at rumluften er opblandet med en ret ensartet partikelkoncentration i begge højder.

Forholdene i et lokale med for eksempel svejsning kan belyses lidt mere detaljeret ved at se på den termiske strømning, der dannes over en varmekilde (svejseelektrode).



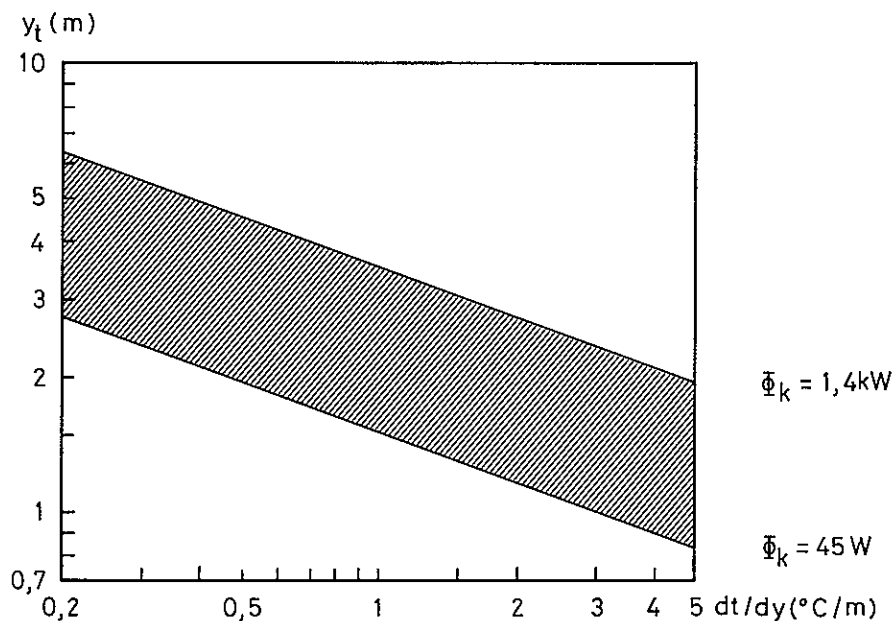
Figur 28. Termisk strømning over en punktkilde i et område med en lodret temperaturgradient.

I den første del af strømningen over en varmekilde omsættes opdriften i strømningen til bevægelsesmængde. Der medrives luft fra omgivelserne, hvilket er med til at sænke strømningens middeltemperatur. Da strømning foregår i et felt med en lodret temperaturgradient, bringes luften op i et område, hvor der er koldere end opgivelserne, og den når den maksimale højde  $y_m$  som vist på figur 28. Derefter strømmer luften ned i et lavere niveau,  $y_t$ , hvor temperaturen svarer til den lokale temperatur, se reference [21]. Den maksimale højde er bl.a. afhængig af den lodrette temperaturgradient efter følgende udtryk

$$y_m = \text{konst}(dt/dy)^{-3/8} \quad (10)$$

Lagdelingshøjden eller ligevægtshøjden  $y_t$  for den termiske strømning har størrelsen  $0,54 \cdot y_m$ , [21].

Da en varmekilde, som en svejseelektrode, også er en forureningskilde, siger formel (10) noget om, hvor højt forureningen bliver sendt op i lokalet,  $y_t$ , som funktion af temperaturgradienten.

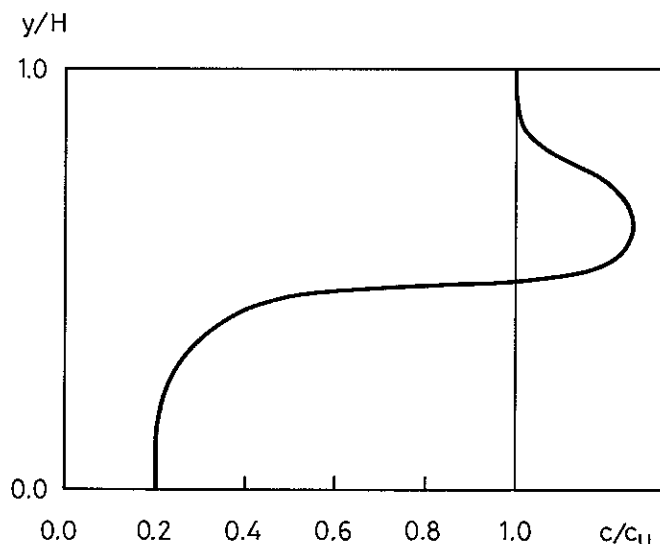


Figur 29. Ligevægtshøjden  $y_t$  for den termiske strømning over en svejseelektrode.

Olander [22] har gennemført en række målinger på svejseelektroder og fundet ligevægtshøjden for elektroder med forskellig svejseeffekt. Figur 29 viser ligevægtshøjden for den mindste og den største elektrode. De har en konvektiv varmeafgivelse på 45 W og 1,4 KW, hvilket svarer til 6,25% af svejseeffekten. De afgiver en emission på henholdsvis 0,31 mg/s og 67 mg/s.

Figur 29 viser, at det er hensigtsmæssigt med en lille temperaturgradient i lokalet, hvis man vil være sikker på, at svejserøgen når op over opholdszonen. Man må dog være opmærksom på, at en lille temperaturgradient nok betyder, at forureningen i første omgang bliver ført højt op i lokalet, men der er også en fare for, at der opstår en total opblanding i lokalet, så fortrængningsventilationen nedbrydes, som det fremgår af resultaterne på figur 27.

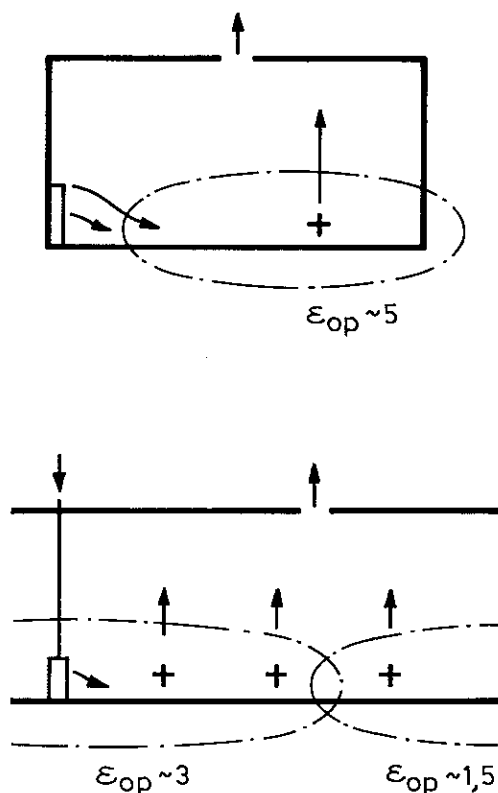
Størrelsen af den konvektive effekt spiller en rolle for lagdelingshøjden. Når den mest forurenende konvektionsstrømning ikke er den varmeste, kan der dannes et luftlag med en koncentration, der er højere end koncentrationen i udsugningen, se reference [23]. Figur 30 viser, hvorledes de varmeste kilder opnår den største ligevægtshøjde, medens en kilde med stor emission og lav konvektiv effekt, i henhold til figur 29, afsætter sin forurening i en lavere højde. Den yderste konsekvens af dette forhold er, at en emissionskilde i opholdszonen vil kunne give meget høje koncentrationer i dette område, hvis den ikke samtidig er en termisk kilde.



Figur 30. Lodret koncentrationsprofil i et lokale hvor den mest forurenende kilde har lavere temperatur end de øvrige varmekilder.

### Ventilationseffektivitet

Ventilationseffektiviteten er en størrelse, som ofte nævnes i forbindelse med fortrængningsventilation. Figur 31 viser effektiviteten for et lokale med høj termisk belastning og koncentreret kilde samt effektiviteten for et lokale med lav termisk belastning og spredte kilder. Der er tale om de to situationer i figur 21 og figur 25, og det ses at selv i den ugunstige situation i svejsehallen, kan der opnås en betragtelig ventilationseffektivitet i stor afstand fra armaturet.



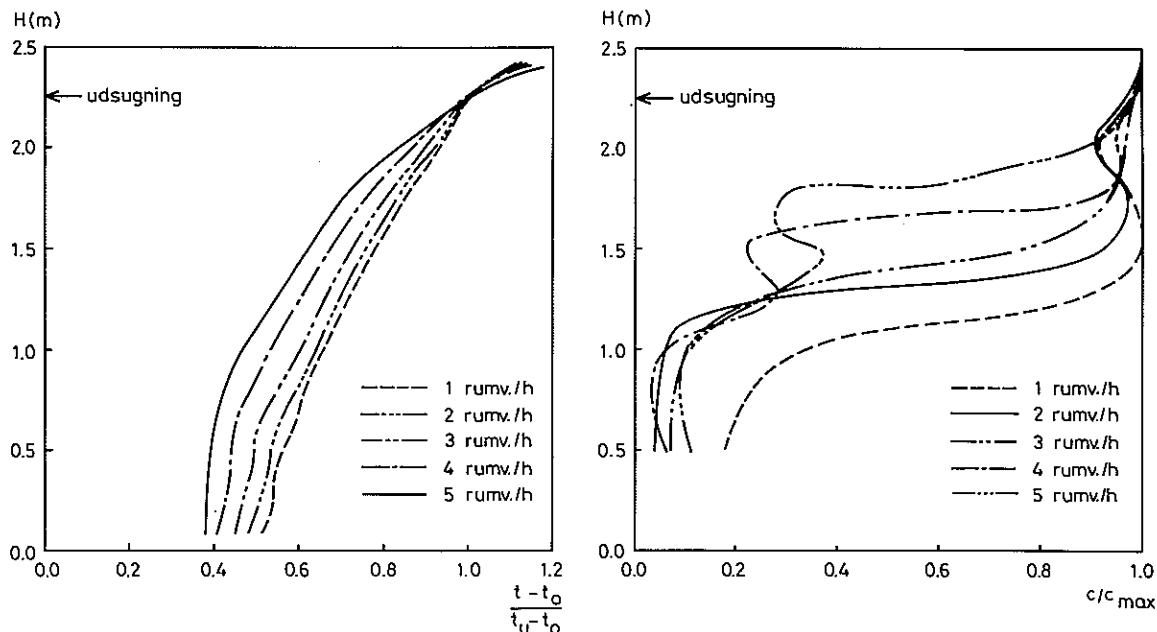
Figur 31. Ventilationseffektiviteterne i lokalerne på figur 21 og figur 25.

Det er dog ikke givet, at ventilationseffektiviteten altid er større end 1,0. Figur 30 viser en situation, hvor et ventilationsindeks  $\epsilon_p$  er mindre end 1,0 i de områder, hvor den lokale koncentration er større end udsugningskoncentrationen  $c_u$ . I afsnittet om den lokale forureningsfordeling blev det ligeledes vist, at en emissionskilde i opholdszonen kan give meget høje koncentrationer, hvis emissionen ikke er forbundet med varmeudvikling, og især hvis den foregår i et område med lav lufthastighed. En sådan situation resulterer i et meget lille ventilationseffektivitet  $\epsilon_{op}$ .

Fortrængningsventilation er både karakteriseret ved en lodret koncentrationsprofil og en lodret temperaturprofil. Den lodrette temperaturprofil betyder, at udsugningstemperaturen  $t_u$  ofte er højere end middeltemperaturen  $t_{op}$  i opholdszonen, og dette er med til at gøre fortrængningsventilation til et energieffektivt system. Man kan kvantificere dette forhold ved at definere en temperatureffektivitet ved udtrykket

$$\epsilon_t = \frac{t_u - t_o}{t_{op} - t_o} \quad (11)$$

hvor  $t_o$  er indblæsningstemperaturen.



Figur 32. Lodret temperaturfordeling og lodret koncentrationsfordeling i lokale med en enkelt varmekilde, der samtidig er emissionskilde for sporstof.

Målinger på figur 32 af Heiselberg og Sandberg [24] viser en typisk forskel på det lodrette temperaturprofil og det lodrette koncentrationsprofil i et lokale. Da varmekilden i lokalet på figur 32 samtidig er emissionskilde for sporstof, er der tale om identiske kilder og identiske strømningsligninger for både energitransport og massetransport. Den store forskel i temperaturprofil og koncentrationsprofil er derfor et resultat af strålingen imellem loft, gulv og vægge samt varmetab fra rummet. Det ses, at strålingen fra loftfladen er i stand til at hæve gulvtemperaturen og temperaturen i opholdszonen til et niveau, der er 0,4 - 0,5 gange temperaturforskellen imellem udsugning og indblæsning.

Strålingens indflydelse på temperaturfordeling i lokaler med fortrængningsventilation betyder, at temperatureffektiviteten  $\epsilon_t$  ofte er begrænset til niveauet 1,5 - 2,0, [25], medens ventilationseffektiviteten  $\epsilon_{op}$  kan være af størrelsen 2,0 op til 5,0.



## 7. LITTERATUR

- [1] Korostenski, J. og P. Vikström,  
Kartläggning och katalogisering af källstyrkor, Grafiska Forskningslaboratoriet, Sverige, 1985.
- [2] Olsen, E. og T. Schneider,  
Karakterisering af luftforureninger, Afsnit i Basisbog i Tekniske Arbejdshygiejne, Redaktion T. Schneider, Arbejdstilsynet, København, 1986.
- [3] Nielsen, P.V.,  
Luftfordeling i rum, afsnit i Varme- og Klimateknik, Grundbog, Danvak, 1987.
- [4] Hansen, T.B.,  
Spredning af luftformig forurening i arbejdslokaler, (Dansk) VVS, Vol. 25, nr. 9, august 1989.
- [5] Ljungqvist, B.,  
Some Observations on the Interaction Between Air Movements and the Dispersion of Pollution, Swedish Council for Building Research, DOC D811979, Stockholm, 1979.
- [6] Holmberg, R.B., K. Folkesson og L-G. Stenberg,  
Experimental Analysis of Office Room Climate using Various Air Distribution Methods, Room Vent 87, International Conference on Air Distribution in Ventilated Spaces, Stockholm, 1987.
- [7] Valbjørn, O.,  
Ventilation i industrien, 2. udgave, SBI-anvisning 106, Statens Byggeforskningsinstitut, 1983.
- [8] Valbjørn, O.,  
Punktudsugning og almen ventilation, (Dansk) VVS, nr. 9, 1977.
- [9] Nielsen, P.V.,  
Forureningsfordeling i ventilerede lokaler med plan recirkulerende luftstrømning, Seminarium om spårgasmåtningar och ventilationseffektivitet, Meddelande M81:16, Statens Institut för Byggnadsforskning, 1981.
- [10] Skåret, E.,  
Ventilasjonsteknikk, Kompendium, Norges Tekniske Højskole, Institutet for Varme og Ventilasjons- og Sanitærteteknikk, 1986.
- [11] Nielsen, P.V.,  
Luftstrømning i ventilerede arbejdslokaler, SBI-rapport 128, Statens Byggeforskningsinstitut, 1981.
- [12] Heiselberg, P. og P.V. Nielsen,  
Flow Conditions in a Mechanically Ventilated Room with a Convective Heat Source, 9th AIVC Conference on Effective Ventilation, Gent, Belgien, 1988.

- [13] Mathisen, H.M. og E. Skåret,  
Ventilation Efficiency - Part 4, SINTEF report, STF15 A84047, The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, 1983.
- [14] Sandberg, M.,  
Distribution of Ventilation Air and Contaminants in Ventilated Rooms - Theory and Measurements, Faibo Grafiska, Stockholm, 1984.
- [15] Stampe, O.B. og N.O. Breum,  
Ventilation, Afsnit i Basisbog i Teknisk Arbejdshygiejne, Redaktion T. Schneider, Arbejdstilsynet, København, 1986.
- [16] NORDTEST method, NT VVS 047,  
Building - Ventilating Air: Mean Age of Air, 1985.
- [17] Breum, N.O. og J. Skotte,  
Måling af ventilationseffektivitet, Arbejds miljøfondet, 1987.
- [18] Skåret, E.,  
Ventilation by displacement - Characterization and Design Implications, Ventilation '85, Redaktion H.D. Goodfellow, Elsevier, Amsterdam, 1986.
- [19] Kalleberg, K.,  
Ventilasjon av ovnshus for Silisiumkarbidproduksjon, SINTEF SIF60 A77017, Vassdrags- og Havnelaboratoriet, NTH, Trondheim, 1977.
- [20] Belin, K.,  
Allmänventilation med deplacerande strömning, R77:1978, Byggeforskningen, Stockholm, 1978.
- [21] Rodi, W.,  
Turbulent Buoyant Jets and Plumes, Pergamon Press, England, 1982.
- [22] Olander, L.  
Welding Fume Plumes in Industrial Workrooms, Ventilation '85, Redaktion H.D. Goodfellow, Elsevier, Amsterdam, 1986.
- [23] Skistad, H.,  
Fortrengningsventilasjon i komfortanlegg med lavimpuls lufttilførsel i oppholdszonene, Norsk VVS Teknisk Forening, Oslo, 1989.
- [24] Heiselberg, P. og M. Sandberg,  
Convection From a Slender Cylinder in a Ventilated Room, Room Vent 90, International Conference on Air Distribution in Ventilated Spaces, Oslo, 1990.
- [25] Nielsen, P.V.,  
Displacement Ventilation in a Room with Low-Level Diffusers, Kälte-Klima-Tagung, Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e.V., München, 1988.