

Luftvekslings- og ventilasjonseffektivitet - nytt hjelpemiddel for ventilasjonsbransjen



Professor Eimund Skåret og tekn. dr. Mats Sandberg

Ventilasjonseffektivitet er et uttrykk som etter hvert har dukket opp i stadig flere diskusjoner om ventilasjonssystemer og deres fortrefelighet. Professor Eimund Skåret ved Institutt for VVS-teknikk og tekn. dr. Mats Sandberg ved Statens Institut for bygnadsforskning har for Nordisk Ventilasjonsgruppe (NVG) utarbeidet retningslinjer som med dette presenteres VVS-bransjen til uttalelse. En «engere» krets har tidligere fått forslaget til gjennomsyn og kommentar, her presenteres det endelige forslag.

Sammendrag

LUFTVEKSLINGSEFFEKTIVITETEN er en virkningsgrad og et mål for hvor hurtig luften i rommet skiftes ut. Ved en gitt tilførsel av uteluft er luftvekslingseffektiviteten avhengig av tilufts- og avtrekksventilens plassering, ventiltype og innblåsningshastigheter, temperaturforskjellen mellom tilluft og avtrekksluft, forekomst av varme- og kuldekilder, samt aktiviteten i rommet.

VENTILASJONSEFFEKTIVITETEN er et mål for hvor hurtig en forurensning transporteres bort fra rommet. Den tid det gjennomsnittlig tar å transportere bort en forurensning fra rommet bestemmer gjennomsnittskonsentrasjonen i rommet. Ventilasjonseffektiviteten er, i tillegg til tidligere nevnte faktorer, vanligvis avhengig av forurensningstype og -egenskaper.

Det er til syvende og sist forholdene i oppholdssonen som er mest interessant, og for å karakterisere forholdene her, innføres begrepene **LOKAL GJENNOMSNITTSALDER** og **VENTILASJONSINDEKS**.

Alder og luftvekslingseffektivitet er nye begreper, mens definisjonen av ventilasjonseffektiviteten er i overensstemmelse med den klassiske definisjon.

Begrepene som presenteres i artikkelen gir et underlag for en adekvat beskrivelse av ventilasjonsfunksjonen ved forskjellige driftsforhold. Med tilgang til opplysninger om ventilasjonseffektivitet og luftvekslingseffektivitet kan konstruktøren velge et effektivt ventilasjonssystem. For å sikre en god funksjon ved både kontinuerlige og kortvarige utslipp av forurensning bør konstruktøren tilstrebe å plassere tilufts- og avtrekksventilene på en måte som gir de gunstigste verdier på luftens alder og ventilasjonsindekset i oppholdssonen.

Vi installerer ventilasjonssystemer i bygninger for at luftkvaliteten skal bli akseptabel sett fra et hygienisk synspunkt. Samtidig skal alle komfortparametre i oppholdssonen holdes innenfor tillatte verdier.

Når ventilasjonen er dårlig, pleier man populært å si at luften er gammel eller at det lukter gammelt. Dette er en treffende uttrykksmåte som kan tas som utgangspunkt for å kvantifisere et ventilasjonssystems funksjon. Om man har en god eller dårlig gjennomventilering av et område kan kvantifiseres ved måling av luftens lokale gjennomsnittsalder.

LUFTENS LOKALE GJENNOMSNITTSALDER er den tid det tar for luften å komme fra tilluftsventilen til det aktuelle området. All luft som passerer et område av rommet kommer vanligvis ikke dit samtidig. Luften har med andre ord en viss aldersfordeling. Aldersfordelingen og dermed luftens lokale gjennomsnittsalder kan bestemmes ved hjelp av sporgassteknikk.

Gjennomsnittsalderen for all luft i rommet er direkte relatert til den tid det tar å skifte ut luften i rommet. Man kan teoretisk vise at for å skifte ut all luft tar det i gjennomsnitt en tid som er lik to ganger luftens gjennomsnittsalder i rommet.

Gjennomsnittsalderen for all luft i rommet er tette bygninger med mekanisk ventilasjon bestemmes ved måling i avtrekkskanalene.

Man kan innføre et aldersbegrep for forurensninger på samme måte som for luft. Forurensningens alder er den tid som er gått siden forurensningen er tilført. Gjennomsnittskonsentrasjonen i rommet ved stasjonære forhold er direkte proporsjonal med forurensningens gjennomsnittsalder når den forlater rommet, og denne kan bestemmes alene ved måling i avtrekkskanalene.

Det finnes ikke noen almenyldig kvantitativ sammenheng mellom lokale konsentrasjoner og forurensningens — eller luftens lokale gjennomsnittsalder.

I artikkelen defineres og omtales i tillegg til luftens lokale gjennomsnittsalder betydningen av følgende størrelser:

- **SPESIFIKK LUFTMENGDE**, som angir mengden av tilført luft (friskluft, uteluft).
- **LUFTVEKSLINGSEFFEKTIVITETEN**, som angir hvor hurtig luften i rommet skiftes ut i forhold til den teoretisk hurtigst mulige utskifting av luften.
- **VENTILASJONSEFFEKTIVITETEN**, som angir gjennomsnittskonsentrasjonen i hele rommet i forhold til konsentrasjonen i avtrekksluften.
- **(LOKALT) VENTILASJONSINDEKS**, som angir den lokale konsentrasjonen i forhold til konsentrasjonen i avtrekksluften.

LUFTEN

VENTILASJONSLUFTMENGDEN OG SPESIFIKK TILFØRT LUFTMENGDE

I ventilasjonssammenheng må vi skille mellom forskjellig slags luft. Når det gjelder tilført luft, er det bare mengden av «ren» luft som har noen form for «ventilerende» innvirkning. Med *ventilasjonsluftmengden* menes derfor volumstrømmen, q (m^3/h), av «ren» luft som tilføres rommet, dvs. vanligvis mengden av uteluft. Ved omluftssystem er det altså, hvis det ikke foretas spesiell rensing, bare mengden av uteluft som er av interesse og ikke den totale tilluftmengden. Vi kan angi hvor mye ventilasjonsluft vi tilfører ved å oppgi den *spesifikke tilluftmengden*, som vi definerer som mengden av tilført «ren» luft (uteluft) i forhold til det totalt ventilerende volum. Den spesifikke luftmengden angir vi med n , og den beregnes som:

$$n = \frac{q}{V} \left(\frac{m^3/h}{m^3} \right) \quad (1)$$

Legg merke til den fysiske dimensjon, det er her tale om en mengde pr. volumenhet. Vi skal altså *ikke* forkorte bort dimensjonene slik at vi ender opp med (1/h). Ett eksempel: En bolig med volum $150 m^3$ ventileres med en total uteluftsmengde på $75 m^3/h$. Den spesifikke luftmengden blir altså $75/150 = 0,5 (m^3/h)/m^3$. Den spesifikke luftmengden ble som kjent tidligere betegnet med «luftomsetning» med benevnningen ganger/time. Dette er misvisende, da det gir inntrykk av at luften skiftes ut så mange ganger pr. time.

Det er dessuten viktig å gjøre forskjell mellom den luft som vi tilfører, q (m^3/h) og den luft som befinner seg i rommet, V (m^3). Vi tilfører ventilasjonsluft blant annet for å fornye luften som befinner seg i rommet fordi dens kvalitet forringes på grunn av forurensning og oksygenforbruk.

Hvor hurtig luften i rommet skiftes ut bestemmes ikke bare av tilluftmengden og rommets volum. Utskiftningstiden er i høyeste grad avhengig av hvordan luften strømmer i rommet. Forskjellige strømningsmønstre gir forskjellige utskiftingstider. For bedre å kunne forklare hvordan man kan be-

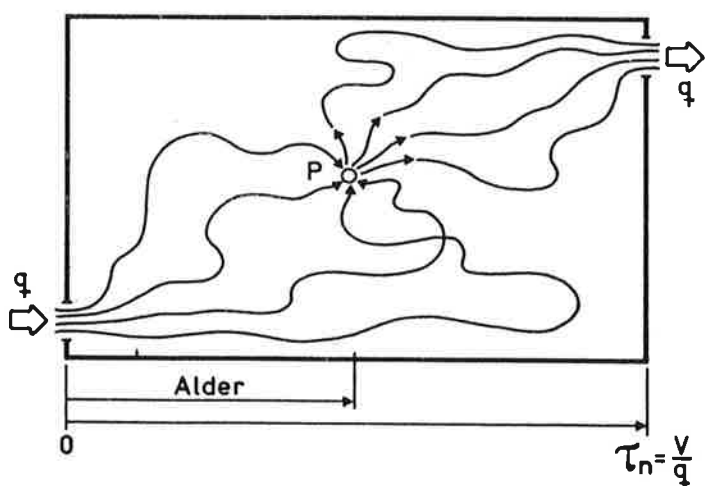


Fig. 1. Definisjon av luftens alder. V = romvolum.

stemme utskiftingstiden for luften i rommet, skal vi først se hva som menes med luftens alder.

LUFTENS ALDER OG LUFTVEKSLINGS-EFFEKTIVITETEN

I fig. 1 vises hvordan tilluftens molekyler kommer frem til et punkt p , i et rom med volumet V . Når luften passerer tilluftsventilen, settes tiden lik null. Luften kommer vanligvis frem til det aktuelle området via forskjellige veier, og det tar derfor forskjellig tid for tilluftens molekyler å nå frem.

Ved å danne gjennomsnittsverdien av ankomsttidene får vi luftens gjennomsnittlige ankomsttid $\bar{\tau}_p$. Denne kan kalles for luftens gjennomsnittsalder i det aktuelle området. Ved å danne luftens gjennomsnittsalder i alle deler av rommet, får vi luftens gjennomsnittsalder $\langle \bar{\tau} \rangle$ for den totale luftmengden i rommet som er lik V (m^3). Den tid som den tilførte ventilasjonsluftmengde, q (m^3/h), i gjennomsnitt har oppholdt seg i rommet (denne er lik luftens gjennomsnittsalder når den passerer avtrekksventilen) er lik *ventilasjonsystemets nominelle tidskonstant* τ_n , som igjen er lik

$$\tau_n = \frac{V}{q} \quad (h) \quad (2)$$

I dette tilfelle kan vi altså forkorte bort dimensjonene slik at vi står igjen med dimensjonen tid. For vår bolig i det tidligere eksempel blir den nominelle tidskonstanten $150/75 (m^3/(m^3/h)) = 2$ h. Den nominelle tidskonstanten er gitt direkte av rommets størrelse, V , og av tilført mengde uteluft.

Den tid det tar å skifte ut luften i rommet, dvs. erstatte romvolumet V (m^3) med ny luft, gis ikke av den nominelle tidskonstanten. *Utskiftingstiden* for luften i rommet er direkte relatert til luftens gjennomsnittsalder, $\langle \bar{\tau} \rangle$, i rommet.

Den tid som det i gjennomsnitt tar å skifte ut luften i rommet er lik to ganger romluftens gjennomsnittsalder. Den tid det tar å skifte ut romluftens kaller vi *utskiftingstiden*, og vi betegner den med τ_r .

Vi har altså:

$$\text{Utskiftingstiden } \tau_r = 2 \cdot \langle \bar{\tau} \rangle \quad (3)$$

Den teoretisk korteste utskiftingstiden for luften i rommet er lik τ_n . Det er lett å vise at stempelstrøm gir en utskiftingstid som er lik τ_n . Denne strømningsstype representerer et ideelt spesialtilfelle. I praksis er utskiftingstiden lengre.

Luftvekslingseffektiviteten, ϵ_a , definerer vi derfor som forholdet mellom den nominelle tidskonstanten og utskiftingstiden for luften i rommet. Vi betegner den med ϵ_a , altså:

$$\epsilon_a = \frac{\tau_n}{2\langle \bar{\tau} \rangle} \times 100 = \frac{\tau_n}{\tau_r} \times 100 \quad (\%) \quad (4)$$

LUFTENS ALDERSFORDELING — NOEN TYPISKE EKSEMPLER

Vi kan bestemme både luftens gjennomsnittsalder i hele rommet og lokalt i deler av dette ved hjelp av sporgassteknikk. Ett måleprinsipp baseres på at hele rommet fylles opp med sporgass som så blandes inn i luften ved hjelp av vifter så man oppnår fullstendig omblending i rommet. Deretter slås viftene av og vi måler hvor hurtig luften kommer frem og erstatter sporgassen (sporgassen uttynnes).

Stempelstrømning

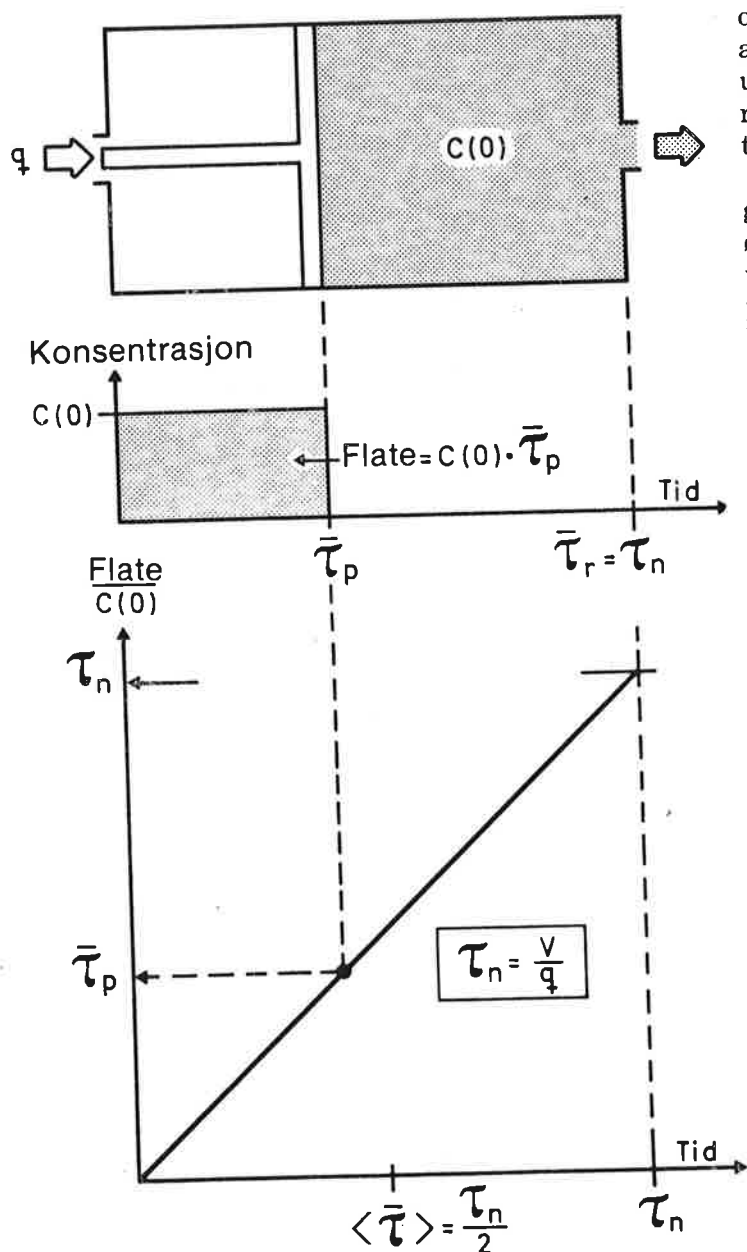


Fig. 2. Luftens alder. Stempelstrømning.

Fig. 2 illustrerer stempelstrømning. Stempelstrømning er, som tidligere nevnt, en ideell strømning som ikke opptrer helt i praksis. Ved tid null var all luft i rommet merket med sporgass som var jevnt fordelt med konsentrasjonen $C(0)$. Ved stempelstrømning fungerer ventilasjonsluften som et stempel som skyver luften i rommet foran

seg. All ventilasjonsluft som passerer et bestemt snitt i rommet kommer derfor frem samtidig. Dette tidspunktet er altså luftens gjennomsnittsalder, $\bar{\tau}_p$, i punktet p. Hvis vi i et bestemt punkt registrerer konsentrasjonen som funksjon av tiden, får vi et rektangel med høyde lik begynnelseskonsentrasjonen $C(0)$ og lengde lik $\bar{\tau}_p$. Flaten blir derfor lik $C(0) \cdot \bar{\tau}_p$. Hvis vi dividerer flaten med begynnelseskonsentrasjonen $C(0)$, får vi altså følgende sammenheng:

$$\bar{\tau}_p = \frac{\text{Flate}}{C(0)} \quad (5)$$

Sammenhengen (5) har vi vist for et helt spesielt tilfelle. Men man kan vise at (5) gjelder generelt, og vi kan alltid måle luftens gjennomsnittsalder i et bestemt punkt ved å beregne flaten under uttynningskurven. Dette er i prinsippet meget enkelt, se forøvrig omtale senere i tilknytning til fig. 5.

Ved ideell stempelstrømning viser fig. 2 at luftens gjennomsnittsalder i de forskjellige deler av rommet øker lineært med avstanden fra tilluftsventilen, og at ventilasjonsluftens gjennomsnittsalder når den passerer avtrekksventilen er lik V/q , slik som man kan vente. I henhold til fig. 2 er luftens gjennomsnittsalder i rommet lik $\tau_n/2$. Etter (3) gir dette en utskiftingstid for luften i rommet lik τ_n . I henhold til fig. 2 stemmer dette nøyaktig.

Fullstendig omrøring

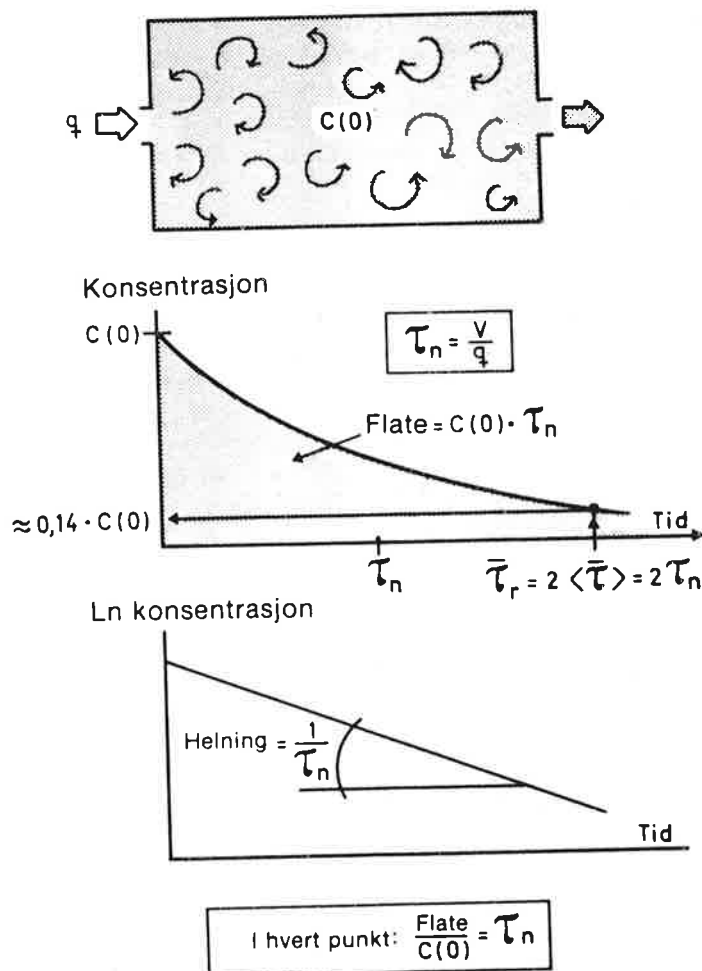


Fig. 3. Luftens alder. Fullstendig omrøring.

All luft i rommet er skiftet ut etter tiden τ_n . Luftvekslingseffektiviteten blir i dette tilfellet altså 100 %.

Fig. 3 viser registrert konsentrasjon som funksjon av tiden ved fullstendig omrøring. Vi får den velkjente uttynningskurven som, uttrykt i τ_n ($\tau_n = \frac{V}{q}$), blir:

$$C(\tau) = C(0) e^{-(\tau/\tau_n)} \quad (6)$$

Flaten under kurven får vi ved å integrere (6) med hensyn på tiden.

$$Flaten = C(0) \int_0^{\infty} e^{-(\tau/\tau_n)} d\tau = C(0) \cdot \tau_n$$

Etter sammenhengen i (5) blir luftens gjennomsnittsalder $\bar{\tau}_p$ lik:

$$\bar{\tau}_p = \frac{Flate}{C(0)} = \tau_n$$

Ved fullstendig omrøring får vi nå overalt samme uttynningskurve (6) og luftens gjennomsnittsalder i alle deler av rommet blir lik τ_n . Derav følger at luftens gjennomsnittsalder i rommet blir τ_n og utskiftingstiden for luften i rommet blir i henhold til (3) lik $2 \cdot \tau_n$. Nå er riktignok ikke all luften i rommet skiftet ut etter denne tid. Det finnes fremdeles tilnærmet 14 % tilbake av den opprinnelige luften. Utskiftingstiden angir kun hvor lang tid det i gjennomsnitt tar å skifte ut luften i rommet. Luftvekslingseffektiviteten blir ved fullstendig omrøring lik 50 %.

Fig. 4 viser forløpet ved såkalt kortslutnings-

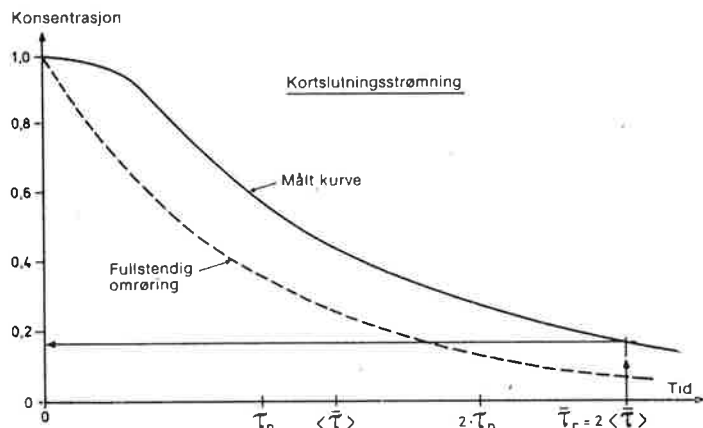


Fig. 4. Luftens alder. Kortslutningsstrømning. Til sammenligning er innlagt konsentrasjonskurven for fullstendig omrøring.

strømning. Det tar her lang tid for luften å komme frem og erstatte sporgassen. Vi får en såkalt stagnasjonssone. Flaten under sporgasskurven blir større enn ved fullstendig omrøring, og vi får:

$$\bar{\tau}_p > \tau_n$$

Ved utpreget kortslutningsstrømning opptar stagnasjonssonen en stor del av rommets volum, og

luftens gjennomsnittsalder i hele rommet blir derfor større enn τ_n . Utskiftingstiden for luften i rommet blir i henhold til (3) større enn $2 \tau_n$ og luftvekslingseffektiviteten blir som følge av dette lavere enn 50 %. I tabell 1 gis en sammenstilling av luftvekslingseffektiviteten ved forskjellige luftstrømningsforhold.

Tabell 1. Utskiftingstiden for luften i rommet ved forskjellige luftstrømningsforhold.

| Luftstrømning | Utskiftingstiden τ_r for luften i rommet | Luftvekslingseffektiviteten ϵ_a |
|---|---|--|
| Stempelstrømning | τ_n | 100 % |
| Deplaserende (tendens til stempelstrømning) | $\tau_n < \bar{\tau}_r < 2 \tau_n$ | $50 \leq \epsilon_a < 100 \%$ |
| Fullstendig omrøring | $\bar{\tau}_r = 2 \tau_n$ | $\epsilon_a = 50 \%$ |
| Kortslutningsstrømning | $\bar{\tau}_r > 2 \tau_n$ | $\epsilon_a < 50 \%$ |

Luftens gjennomsnittsalder i rommet kan bestemmes ved måling i avtrekksluften. Dette kan gjøres for eksempel ved uttynningsforsøk. Først fylles rommet opp med sporgass og det sørges for jevn konsentrasjon i hele rommet ved hjelp av god omrøring. Konsentrasjonen i avtrekksluften, $C_e(\tau)$, måles med jevne tidsintervaller, $\Delta \tau$. I fig. 5 vises

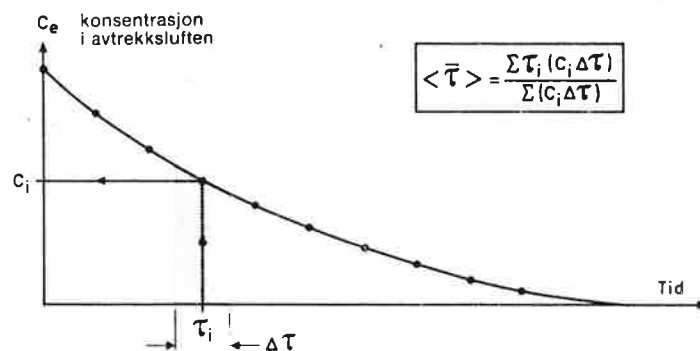


Fig. 5. Bestemmelse av luftens gjennomsnittsalder i rommet ved måling i avtrekksluften.

hvordan man beregner luftens gjennomsnittsalder i rommet. Man deler inn kurven i et antall deltrapeser (den skraverte flaten i fig. 5). Flaten av hvert deltrapes er omtrent lik med $(C_i \cdot \Delta \tau)$. Total flate under kurven får vi som summen, $\sum (C_i \Delta \tau)$, av alle deltrapesenes flater. Luftens gjennomsnittsalder i rommet får vi ved først å multiplisere hvert deltrapes' flate med tilsvarende måletid, τ_i . For hvert deltrapes får vi da størrelsen, $\tau_i (C_i \Delta \tau)$ som vi summerer for alle deltrapeser. Denne sum, $\sum \tau_i (C_i \Delta \tau)$, dividerer vi siden med den totale flate

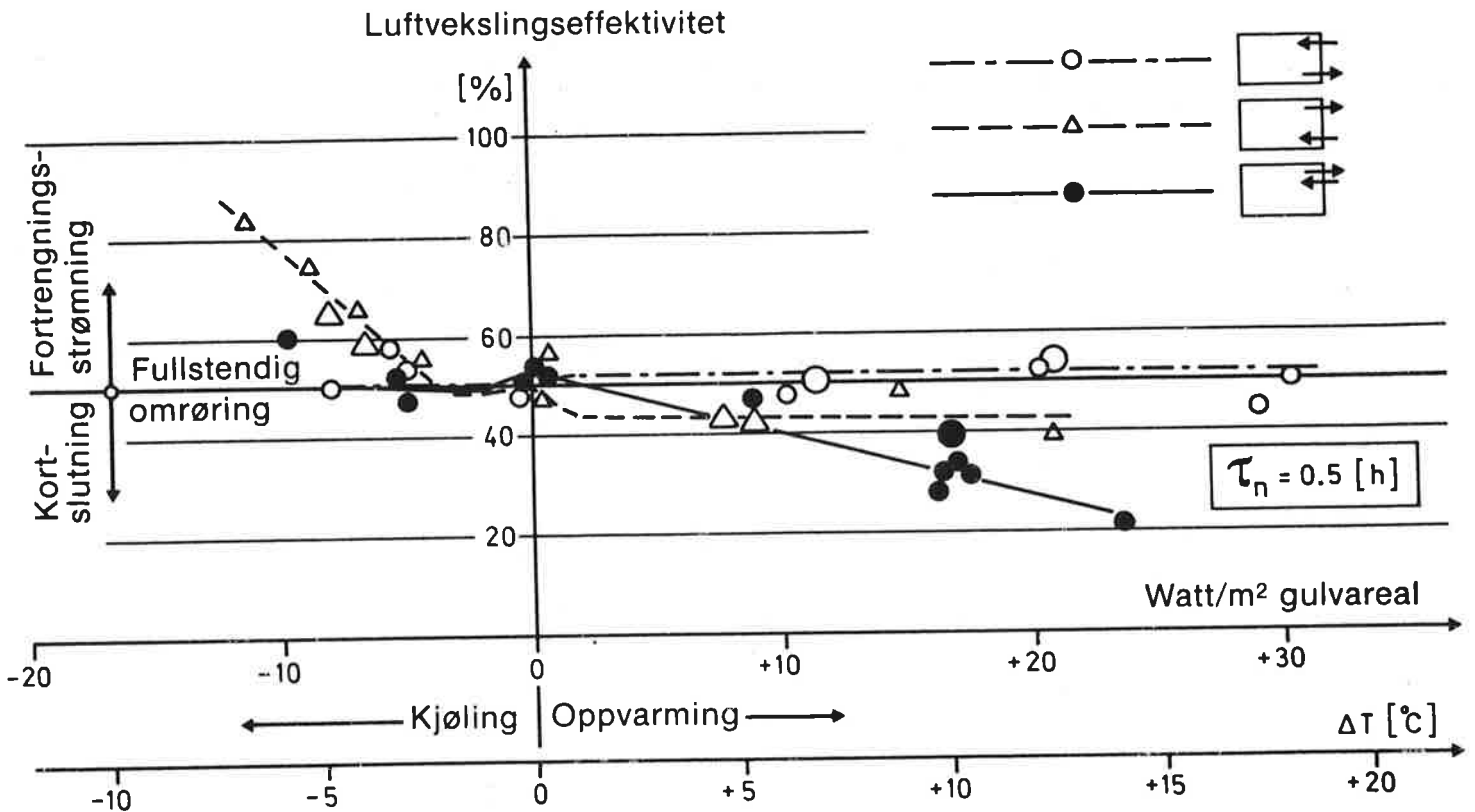


Fig. 6. Målt luftvekslingseffektivitet. Små symboler viser forsøk i tomt rom, store symboler forsøk med en simulert person i rommet (SIBMAN).

under kurven. Luftens gjennomsnittsalder når den forlater rommet kan også bestemmes ved pulserende utslipp (kort puls) av sporgass i tilluften eller ved å injisere sporgass kontinuerlig i tilluften.

I fig. 6 vises eksempel på målt luftvekslingseffektivitet for tre forskjellige systemer. Ventilasjonsluften er benyttet som energibærer ved både oppvarming og kjøling. Luftvekslingseffektiviteten gis som funksjon av tilført eller bortført effekt pr. m² gulvareal og som funksjon av temperaturforskjellen mellom til- og avtrekksluften. I neste figur, fig. 7, vises noen eksempler på målinger av luftens aldersfordeling i vertikalplanet.

For systemet i venstre delfigur i fig. 7 ser vi at det tar meget lang tid for luften å komme frem til oppholdssonen, hvilket fører til at denne blir meget dårlig gjennomventilert. Hele oppholdssonen blir en stagnasjonssone. For systemet i høyre delfigur har vi en helt annen situasjon. Luften kommer hurtig frem til oppholdssonen, som blir godt gjennomventilert. I en gitt situasjon får vi den beste gjennomventilering av oppholdssonen når luftens lokale alder der er lavere enn gjennomsnittsalderen på luften i rommet. Vi ser altså at med kjennskap til luftens alder kan vi avgjøre om vi har en bra eller dårlig gjennomventilering av oppholdssonen. Dette er en viktig informasjon som kan utnyttes av en konstruktør ved valg av riktig system.

FORURENSNINGER

Luftvekslingseffektiviteten som er definert i forrige avsnitt er vanligvis bare en indikator på hvor effektivt ventilasjonsanlegget makter å frakte bort forurensninger som er produsert i rommet.

Luftkvalitet uttrykt i forurensningskonsentrasjoner beror også på andre faktorer som kildens størrelse og forurensningens egenskaper. Vi kan klassifisere forurensningskildene etter flere inndelinger:

- Utstrekning i rommet (punkt, flate eller homogen).
- Dynamisk aktiv eller passiv. Forurensningen er dynamisk aktiv hvis den er lettere eller tyngre enn omgivelsesluften. Den betraktes også som aktiv hvis den tilføres med en viss hastighet, dvs. hvis den har en viss bevegelsesenergi.

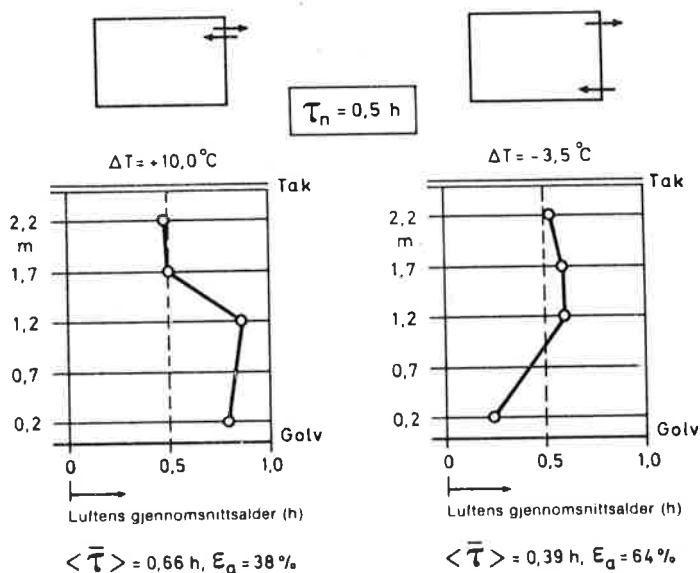


Fig. 7. Luftens gjennomsnittsalder i vertikalplan.

- Kortvarig, intermittert eller kontinuerlig utslipp.
- Kjemisk aktiv eller passiv.
- Adsorberes på flater eller ikke.

Vi skal i det etterfølgende forutsette at forurensningen er kjemisk passiv og ikke adsorberes på flater.

Selv om forurensningene stort sett spres med luftstrømmene, kan forurensningene ha en annen fordeling enn ventilasjonsluften. Dette er innlysende hvis forurensningene f.eks. genereres lokalt og er dynamisk aktive. I fig. 8 vises et eksempel på

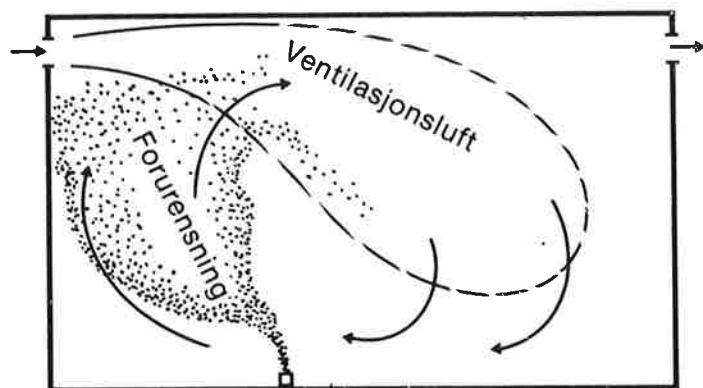


Fig. 8. Forskjellen mellom luftens fordeling i rommet og fordelingen av en forurensning.

forskjellig fordeling av luft og forurensning. I kun to tilfeller er luftens og forurensningens fordeling like:

- Ved fullstendig omrøring av både luft og forurensning i rommet.
- Forurensningskilden er dynamisk passiv og homogen (genereres i hele rommet med samme kildestyrke overalt).

I begge tilfeller gis den lokale likevektskonsentrasjon entydig av luftens gjennomsnittsalder i det aktuelle punktet. Imidlertid er ingen av de ovennevnte forutsetninger oppfylt i praksis.

LIKEVEKTSKONSENTRASJONEN OG GJENNOMSNIITTSKONSENTRASJONEN I ROMMET

I nedenstående formler for konsentrasjon av en forurensning forutsetter vi at forurensningen ikke forekommer i uteluften. Hvis den gjør det, må

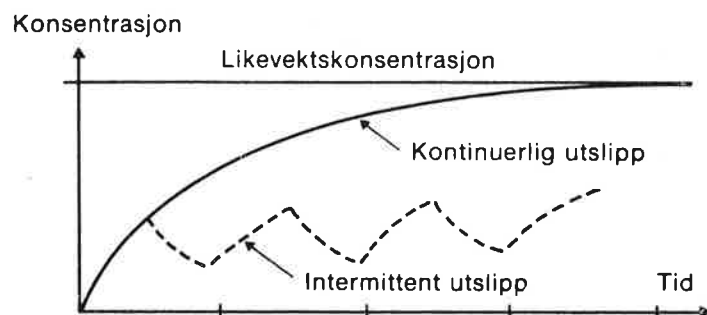


Fig. 9. Kontinuerlig, respektive intermittert utslipp.

konsentrasjonen i uteluften trekkes fra de nedenfor angitte konsentrasjoner.

I fig. 9 vises registrert konsentrasjon ved et kontinuerlig utslipp av forurensning i rommet.

Plutselig, ved et tidspunkt som i fig. 9 kalles $\tau=0$, begynner en forurensning å strømme ut med en konstant mengde \dot{m} (kg/h). I en overgangsperiode stiger forurensningskonsentrasjonen i rommet. Etter en stund oppnås likevekt og konsentrasjonen blir konstant. Likevekt oppnås når like store mengder forurensning fraktes bort som det tilføres pr. tidsenhet. Likevektskonsentrasjonen i avtrekksluften, $C_e(\infty)$, er da lik forholdet mellom produsert forurensning pr. tidsenhet og ventilasjonsluftmengden, altså:

$$C_e(\infty) = \frac{\dot{m}}{q} \quad (7)$$

Hvis vi betegner gjennomsnittskonsentrasjonen i rommet ved likevekt med $\langle C(\infty) \rangle$, så er den totale forurensningsmengden i rommet ved likevekt $V \cdot \langle C(\infty) \rangle$.

Forurensningens alder når den forlater rommet betegner vi med τ_e^C . Følgende sammenheng gjelder mellom den totale mengden forurensning i rommet og forurensningens gjennomsnittsalder når den forlater rommet:

$$V \cdot \langle C(\infty) \rangle = \dot{m} \cdot \tau_e^C \quad (8a)$$

Uttrykt i ord sier sammenhengen (8 a) at mengden av forurensning i rommet er lik den mengde forurensning som genereres pr. tidsenhet multiplisert med forurensningens gjennomsnittsalder når den forlater rommet.

Hvis vi dividerer med V , får vi at gjennomsnittskonsentrasjonen i rommet kan uttrykkes som:

$$\langle C(\infty) \rangle = \frac{\dot{m}}{V} \cdot \tau_e^C \quad (8b)$$

Ved hjelp av uttrykket (2) for volumet V og sammenhengen (7) for likevektskonsentrasjonen i avtrekksluften kan (8 b) skrives som:

$$\langle C(\infty) \rangle = C_e(\infty) \frac{\tau_e^C}{\tau_n} \quad (8c)$$

Forurensningens gjennomsnittsalder når den forlater rommet, τ_e^C , varierer avhengig av forurensningens egenskaper og luftstrømningsforholdene. Dette illustreres i fig. 10, som viser fotografier fra to forsøk. Forurensningen visualiseres med røyk. På det øverste bildet når forurensningen raskt frem til avtrekkesventilen og forurensningens gjennomsnittsalder når den forlater rommet blir derfor liten. På det nedre bildet blir forurensningen delvis «innelåst», og det tar derfor lang tid å evakuere forurensningen.

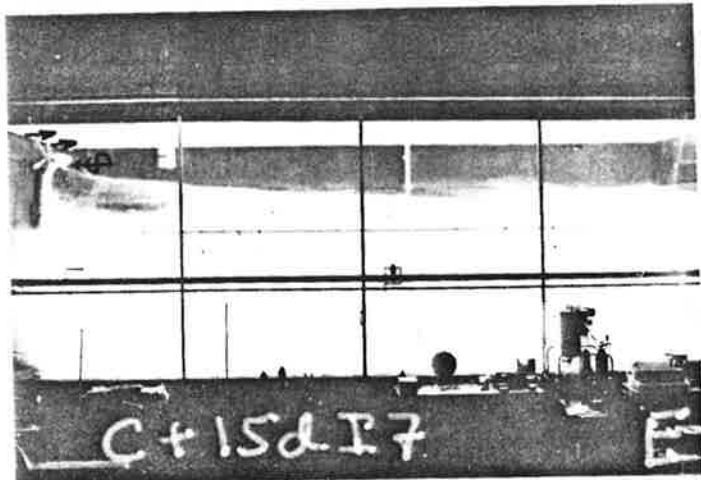
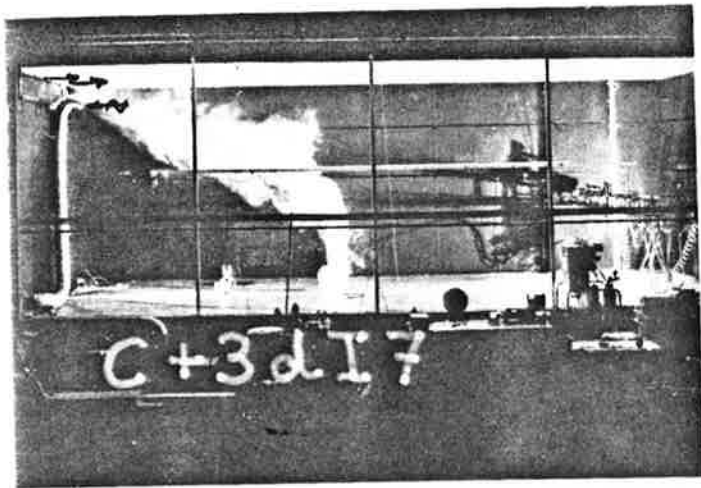


Fig. 10. Røykvisualisering av forurensningsutslipp. Øverste bilde viser hurtig evakuering av forurensning, og nedre bilde en langsom evakuering.

Fig. 11 viser hvorledes man ved «step-up»-forsøk kan beregne forurensningens gjennomsnittsalder idet den forlater rommet, τ_e^C , ved målinger av konsentrasjonen i avtrekksluften. «Step-up»-forsøk innebærer at man regulerer utslippet av forurensning slik at man ved tidspunktet null momentant starter genereringen. Den markerte flaten er forurensningens alder når den forlater rommet.

GJENNOMSNIITTLIG VENTILASJONSEFFEKTIVITET OG LOKALT VENTILASJONSINDEKS

Gjennomsnittlig ventilasjonseffektivitet, $\langle \epsilon \rangle^C$, ved et bestemt utslipp av forurensning i rommet defi-

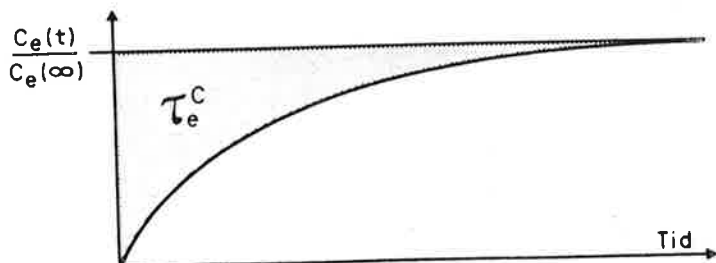


Fig. 11. Forurensningens omsetningstid ved et «step-up» forsøk. C_e er konsentrasjonen i avtrekksluften.

nerer vi som forholdet mellom konsentrasjonen i avtrekksluften, $C_e(\infty)$, og gjennomsnittskonsentrasjonen i rommet, $\langle C(\infty) \rangle$:

$$\langle \epsilon \rangle^C = \frac{C_e(\infty)}{\langle C(\infty) \rangle} \times 100 \quad (9a)$$

Dette er i overensstemmelse med den klassiske definisjon av ventilasjonseffektivitet som ble tillempet av bl. a. Yaglou og Witheridge (1937) i USA, samt Rydberg og Kulmar (1947) i Sverige.

Ved hjelp av (8c) kan vi uttrykke gjennomsnittlig ventilasjonseffektivitet i alderstermer:

$$\langle \epsilon \rangle^C = \frac{\bar{\tau}_n}{\tau_e^C} \times 100 \quad (9b)$$

Gjennomsnittlig ventilasjonseffektivitet er således forholdet mellom luftens gjennomsnittsalder og forurensningens gjennomsnittsalder når den forlater rommet.

Gjennomsnittlig ventilasjonseffektivitet kan bli større enn 100%. I fig. 2 vises eksempel på målt ventilasjonseffektivitet for gulv til tak-systemet i fig. 6. Gjennomsnittlig ventilasjonseffektivitet er beregnet i henhold til sammenhengen (9b).

Forurensninger som både var tyngre (●), lettere (○) og med omtrent samme densitet som luft (⊙) ble sluppet ut midt i rommet.

Gjennomsnittlig ventilasjonseffektivitet, $\langle \epsilon \rangle^C$, som er definert tidligere, er basert på gjennomsnittskonsentrasjonen i hele rommet. Normalt forekommer det store avvik i rommet fra gjennomsnittskonsentrasjonen. F. eks. kan det i en stor industrihall være store forskjeller mellom konsentrasjonen i oppholdssonen og konsentrasjonen oppunder taket.

For å ta hensyn til de lokale konsentrasjonsnivåene innfører vi derfor et lokalt ventilasjonsindeks, ϵ_p , for et vilkårlig punkt i rommet.

$$\epsilon_p = \frac{C_e(\infty)}{C_p(\infty)} \times 100 \quad (\%) \quad (10)$$

$C_p(\infty)$ = likevektskonsentrasjonen i punktet p.

Størrelsesordenen på det lokale ventilasjonsindeks, som karakteriserer luftkvaliteten i oppholdssonen,

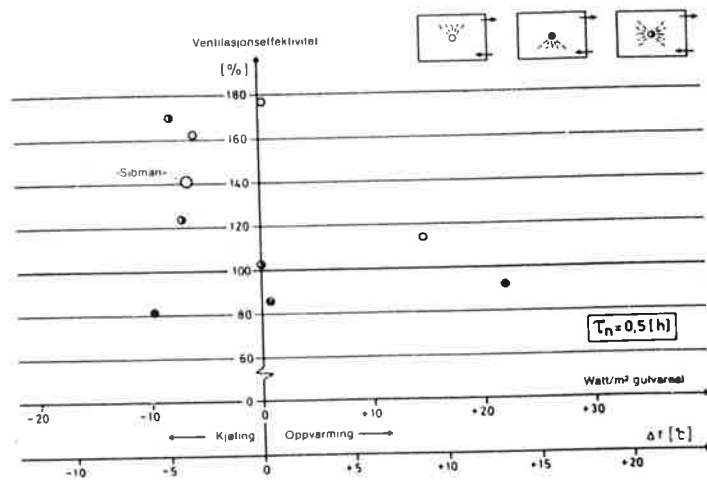


Fig. 12. Målt gjennomsnittsentilasjonseffektivitet for forskjellige typer av simulerte forurensninger.

er naturligvis sterkt avhengig av målepunktets plassering. Med et målepunkt nær tilluftsventilen kan ε_p uavhengig av systemtype teoretisk bli uendelig stort. Derfor kalles ε_p for et ventilasjonsindeks. ε_p er interessant først og fremst i personenes pustesone.

Overskuddsvarme kan betraktes som en forurensning. Derfor kan vi i formel (9 a) respektive formel (10) bytte ut konsentrasjonen mot overtemperatur og vi får da *temperatureffektivitet*.

KORTVARIG ELLER INTERMITTENT UTSLIPP

Hittil har vi forutsatt at forurensningsutslippet har pågått så lenge at likevektskonsentrasjonen er oppnådd. Ved kontinuerlig tilgang av forurensning oppnås likevektskonsentrasjon først etter en tid lik ca. fire ganger τ_c^c . Ved små luftmengder i store volumer (f. eks. enebolig) kan det dreie seg om flere timer. Vi kan sammenligne dette med den tid det tar å røyke en sigarett som er ca. 4–5 minutter. Kortvarige utslipp kalles de utslipp av forurensninger som pågår i en tid som er meget kort i forhold til τ_c^c .

Ved kortvarige utslipp er man mest interessert i den totale dosen (ofte kalt total eksponering). Den totale dosen D_p er lik flaten under konsentrasjonstidskurven, se fig. 13. Vi har følgende sammenheng mellom den totale dosen i punkt p og likevektskonsentrasjonen i samme punkt ved et kontinuerlig utslipp:

$$C_p(\infty) = \frac{\dot{m}}{m} D_p \quad (11)$$

m = utslippet mengde under det kortvarige utslipp.

Forutsetningene for at forholdet (11) gjelder er at strømningsbildet er det samme ved kontinuerlig respektive kortvarig utslipp.

Ofte foregår utslipp av forurensning «on-off» uten at likevektskonsentrasjonen i det hele tatt oppnås. Forurensningskonsentrasjonen ved et slikt intermittert utslipp vises i fig. 9. Hurtigheten i utbredelsesfasen, dvs. når utslippet av forurensning er opphørt, bestemmes hovedsaklig av luftens strømningsmønster i rommet. Det vil si at en høy luftvekslingseffektivitet innebærer at vi får en hurtig evakuering av forurensningen. Det betyr igjen at dosen (eksponeringen) blir mindre.

REFERENSER

1. Nordtest metod NT VVS 019. Buildings — Ventilation Air: Local Mean Age.
2. Nordtest Project: 366-82 Part 2. A proposed method for: Determination of mean-age of air in a ventilated space.

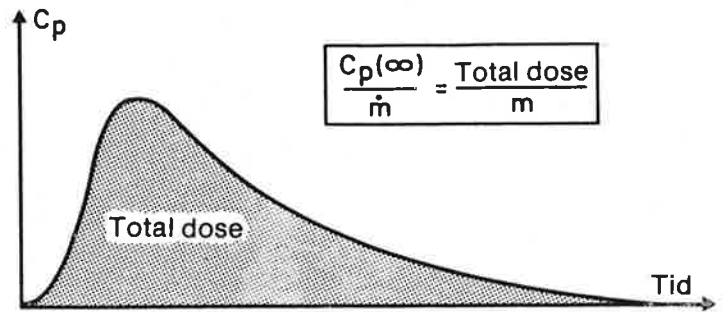


Fig. 13. Sammenhengen mellom stasjonære konsentrasjoner og den totale dosen ved et kortvarig utslipp.

SYMBOLER

| | |
|-----------------------------|---|
| $C(0)$ | Konsentrasjon ved tidspunkt null. |
| $C_e(\infty)$ | Likevektskonsentrasjon i avtrekksluften. |
| $C_p(\infty)$ | Likevektskonsentrasjon i punkt p. |
| $\langle C(\infty) \rangle$ | Gjennomsnittsverdien for rommet av likevektskonsentrasjonen. |
| D_p | Total forurensningsdose i punkt p. |
| m | Utslippet mengde forurensning ved kortvarig utslipp. |
| \dot{m} | Utslippet mengde forurensning pr. tidsenhet ved kontinuerlig utslipp. |
| n | Spesifikk luftmengde $n = q/V$. |
| q | Volummengden av «ren» luft. |
| ΔT | Temperaturforskjellen mellom tilluft og avtrekksluft. |
| V | Nettovolum. |

GRESKE SYMBOLER

| | |
|---------------------------------|--|
| ε_a | Luftvekslingseffektivitet ($\varepsilon_a = \frac{\tau_n}{\tau_r} \times 100$) |
| ε_p | Lokalt ventilasjonsindeks ($\varepsilon_p = \frac{C_p(\infty)}{C_e(\infty)} \times 100$) |
| $\langle \varepsilon \rangle^c$ | Gjennomsnittlig ventilasjonseffektivitet for rommet ($\langle \varepsilon \rangle^c = \frac{C_e(\infty)}{\langle C(\infty) \rangle} \times 100$) |
| τ | Tid. |
| $\Delta \tau$ | Tidsintervall mellom konsentrasjonsmålingene. |
| τ_n | Ventilasjonssystemets nominelle tidskonstant ($\tau_n = \frac{V}{q}$) |
| τ_p | Luftens gjennomsnittsalder i punkt p. |
| τ_r | Utskiftningstiden for romluften. |
| $\langle \tau \rangle$ | Gjennomsnittsverdien for romluftens alder. |
| τ_c^c | Forurensningens gjennomsnittsalder når den forlater rommet. |