

Hva er effektiv ventilasjon?

Begrepet ventilasjonseffektivitet är gitt ett nytt konkret innhold gjennom de mere presise begrepen luftvekslingseffektivitet, gjennomsnittlig ventilasjonseffektivitet og (lokalt) ventilasjonsindeks. Dette er nå et nytt hjelpemiddel ved prosjektering og etterkontroll av ventilasjonsanlegg. Effektiv ventilasjon innebærer at fortrenningsprinsippet benyttes. "Diff"-ventilasjon er et upresist navn på en spesiell løsning. Alle ventilasjonssystemer skal prosjekteres slik at fortrenningsprinsippet blir ivaretatt.



Eimund Skåret

Eimund Skåret är forskare och professor vid Institutt for VVS-Teknikk, Norges Tekniske Høgskole. Han arbetar för närvarande som rådgivande ingenjör i VVS-, energi- og klimateknikk i Oslo.

Det er i utgangspunktet to primære formål med ventilasjonen.

- Erstatning av forbrukt oksygen.
- Bortførelse av genererte forurensninger slik at konsentrasjonene av disse kommer under nærmere spesifiserte grenser.

Dårlig ventilasjon er i alminnelighet ikke forbundet med oksygenmangel. Det er oftest forurensningsbortførelsen som svikter og/eller at temperaturen blir for høy (termisk forurensning).

Ventilasjonsbehovet blir uttrykt som luftvekslinger pr. tidsenhet, luftmengde pr. tid-

senhet og m² gulvareal eller som luftmengde pr. tidsenhet og person. Ingen av disse angivelser har tilknytning til reelle forhold da ventilasjonsbehov må ha utgangspunkt i spesifikerte krav til luftkvalitet i rommenes oppholdssoner.

Luftbehovet for å møte kravene der gis av ventilasjonseffektivitet og mengder forurensning som slippes ut i romluften.

Begrepet ventilasjonseffektivitet har helt til nylig vært lite entydig og konkret. Først og fremst har begrepet ikke vært gitt et fysikalisk konkret og entydig innhold.

Siden det er den resulterende luftkvalitet som skal stå i fokus må ventilasjonseffektivitet defineres med utgangspunkt i ventilasjonsluftens evne til å transportere forurensningene ut av oppholdssonen og rommet på en slik måte at forurensningsbelastningen blir lavest mulig i oppholdssonen. Avhengig av hvor godt forurensningskildene lar seg lokalisere og karakterisere er det behov for både direkte og indirekte metoder til å karakterisere ventilasjonseffektivitet. Forurensningsbildet kan være uhyre komplisert og det er ofte både upraktisk og umulig å måle konsentrasjonene av de aktuelle forurensninger direkte.

Luftvekslingseffektivitet – et indirekte mål på ventilasjonseffektivitet

Da det er en direkte sammenheng mellom ventilationspotensiale og tilgang på luft kan det benyttes indirekte angivelse av ventilasjonseffektivitet med utgangspunkt i luftvekslingskarakteristika. Det dreier seg på den ene siden om og hvor hurtig ventilasjonsluften strømmer fra tilluftsorgan til målsonen (eksempelvis pustesonen), ankomsttid, og på den annen side om hvor hurtig den strømmer fra målsonen og til avtrekksorganet, tømmetid. For et lukket ventilert rom er gjennomsnittlig ankomsttid og tømmetid like store og summen av dem er den gjennomsnittlige utskiftingstiden for luften i rommet. Utskiftingstiden beror helt og holdent på strømningsbildet i rommet og plassering av tillufts- og avtrekksorganene.

En kan nå definere en relativ utskiftingstid som er lik forholdet mellom nominell utskiftingstid og den virkelige utskiftingstiden.

Nordiska ventilasjonsgruppen, NVG (1) har foreslått å kalle denne størrelsen for luftvekslingseffektiviteten, ϵ_a . Størrelsen er da et indirekte mål på ventilasjonseffektiviteten.

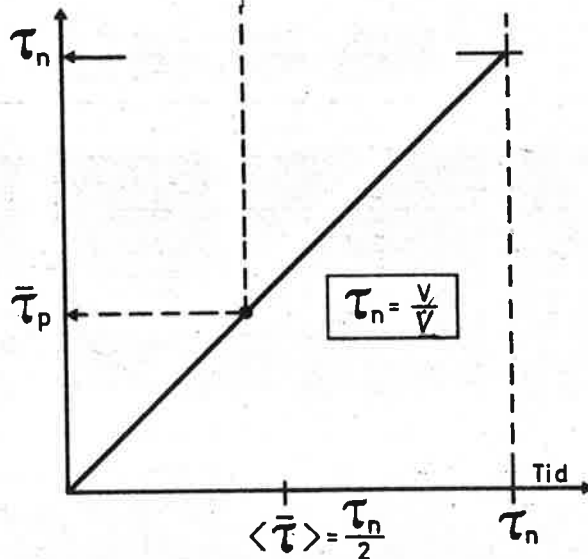
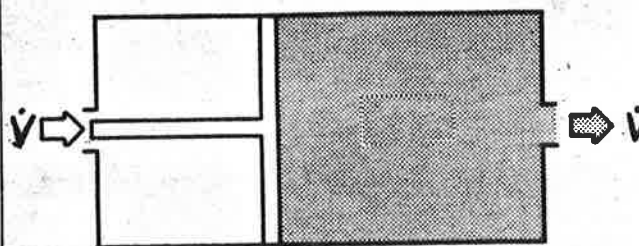
$$\epsilon_a = \frac{\text{nominell utskiftingstid}}{\text{virkelig utskiftingstid}} = \frac{\tau_n}{\tau_r}$$

Nominell utskiftingstid er den gjennomsnittlige tid ventilasjonsluftstrømmen bruker for å strømme fra tilluftsorgan til avtrekksorgan.

Den er:

$$\tau_n = \frac{V}{\dot{V}} = \frac{\text{Romvolum}}{\text{Ventilasjonsluftstrøm}}$$

Stempelstrømning



Figur 1. Stempelstrøm. Alder/utskiftingstid.

Denne tiden er uavhengig av strømningsbildet i rommet. Den er bestemt bare av romvolum, V og ventilasjonsluftstrøm, \dot{V} . Om luften strømmer som en plugg gjennom rommet, er utskiftingstiden for luften i rommet også lik τ_n og luftvekslingseffektiviteten dermed lik 100 %. Dette skulle fremgå av figur 1 som for dette tilfelle grafisk viser ankomsttiden, heretter kalt alderen, for luften i forskjellig avstand fra tilluftsorganet. Gjennomsnittlig alder for romluften blir dermed $\tau_n/2$. Utskiftingstiden er åpenbart 2 ganger den gjennomsnittlige ankomsttiden, d.v.s. 2 ganger gjennomsnittsalderen $\langle \bar{\tau} \rangle$ og følgelig lik τ_n .

For alle andre strømningsformer blir utskiftingstiden større. Den er imidlertid alltid 2 ganger gjennomsnittsalderen for luften i rom-

met. Tid regnes alltid fra det øyeblikk luften strømmer inn gjennom tilluftsorganet.

Skapes det fullstendig omrøring i rommet blir gjennomsnittlig alder for romluften lik τ_n . Altså det dobbelte av alderen for luften i rommet ved pluggstrøm som vi også kan kalle stempelstrøm eller parallellstrøm. Utskiftingstiden blir dermed $2\tau_n$ og luftvekslingseffektiviteten blir bare 50 %.

Det gjennomsnittlige ventilasjonspotensiale er derfor dobbelt så stort ved pluggstrøm som ved fullstendig omrøring.

Det er imidlertid ikke nok å se bare på det gjennomsnittlige ventilasjonspotensiale. Det er først og fremst oppholdssonen som interesserer. Jo raskere ventilasjonsluften kommer til oppholdssonen jo større ventilasjonspotensiale blir det der, både fordi luften passerer raskere og fordi sannsynligheten for at luften allerede er forurenset når den kommer der er mindre.

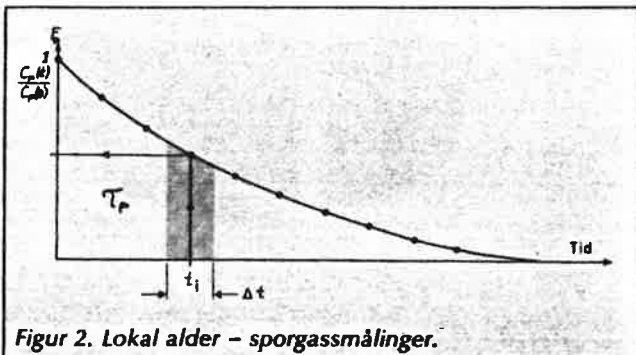
Dersom lokal ankomsttid, heretter kalt lokal alder, sammenlignes med gjennomsnittlig alder for hele rommet oppstår begrepet lokal luftvekslingsindikator, ϵ_o .

$$\epsilon_o = \frac{\bar{\tau}_o}{\tau_p}$$

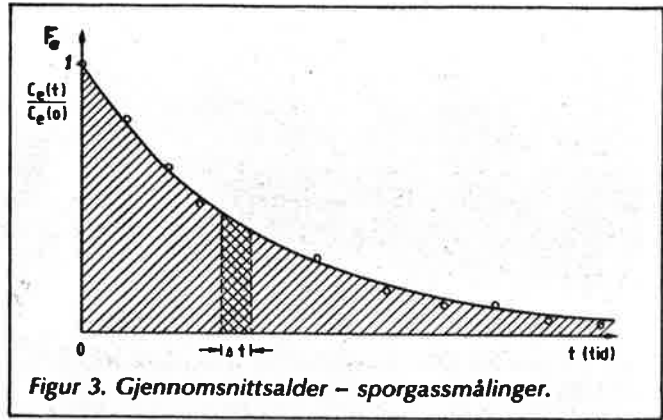
Dette er en størrelse som i prinsippet varierer mellom 0 og uendelig. Høy verdi indikerer at luften er relativt ny og frisk på aktuelt sted. Lav verdi indikerer at den er relativt gammel og forurenset.

Ved pluggstrøm (stempelstrøm) blir ϵ_o uendelig der luften tilføres og 0,5 der den bortføres. Ved fullstendig omrøring blir verdien 1 overalt. Multipliseres ϵ_o og ϵ_a får vi verdien 100 % ved avtrekket både for pluggstrøm og fullstendig omrøring. Fullstendig omrøring er med andre ord ekvivalent med å ha oppholdssonen i avtrekkskanalen. Tas pluggstrøm som modell er det mulig å etablere målsoner med betydelig friskere (yngre) luft enn i avtrekket.

Lokal alder bestemmes med sporgass ved å injisere en passende mengde til rommet og røre godt om. Deretter stoppes omrøringen og sporgasskonsentrasjonen måles i ønskede punkter som funksjon av tiden. Ved å dividere alle målte konsentrasjoner med startkonsentrasjoner fås en dimensjonsløs uttynningskurve, figur 2. Alderen er arealet under kurven.



Figur 2. Lokal alder - sporgassmålinger.



Figur 3. Gjennomsnittsalder - sporgassmålinger.

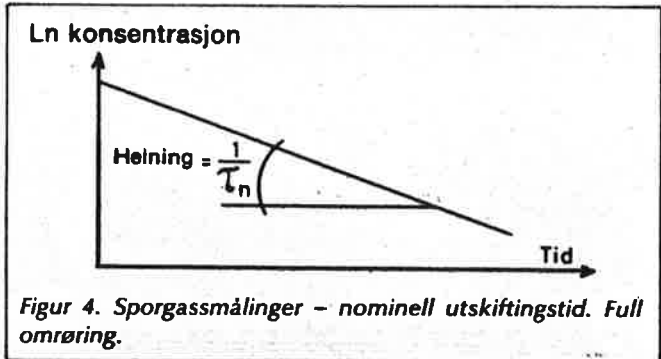
$$\bar{\tau}_p = \sum_1^{\infty} (F_p \Delta t)$$

Ved å måle tilstrekkelig mange punkter kan gjennomsnittet for rommet bestemmes. En enklere metode for å bestemme gjennomsnittsalderen er å benytte målingene i avtrekksorganet, figur 3. Gjennomsnittsalderen for rommet bestemmes da som momentarmen om konsentrasjonsaksen for den skraverete flaten:

$$\langle \bar{\tau}_i \rangle = \frac{\sum_1^{\infty} ((F_e \Delta t)t)}{\sum_1^{\infty} (F_e \Delta t)}$$

$$\sum_1^{\infty} (F_e \Delta t) = \tau_n$$

τ_n = kan også bestemmes av helningen på uttynningskurven i et semi-logaritmisk diagram, figur 4, ved full omrøring.

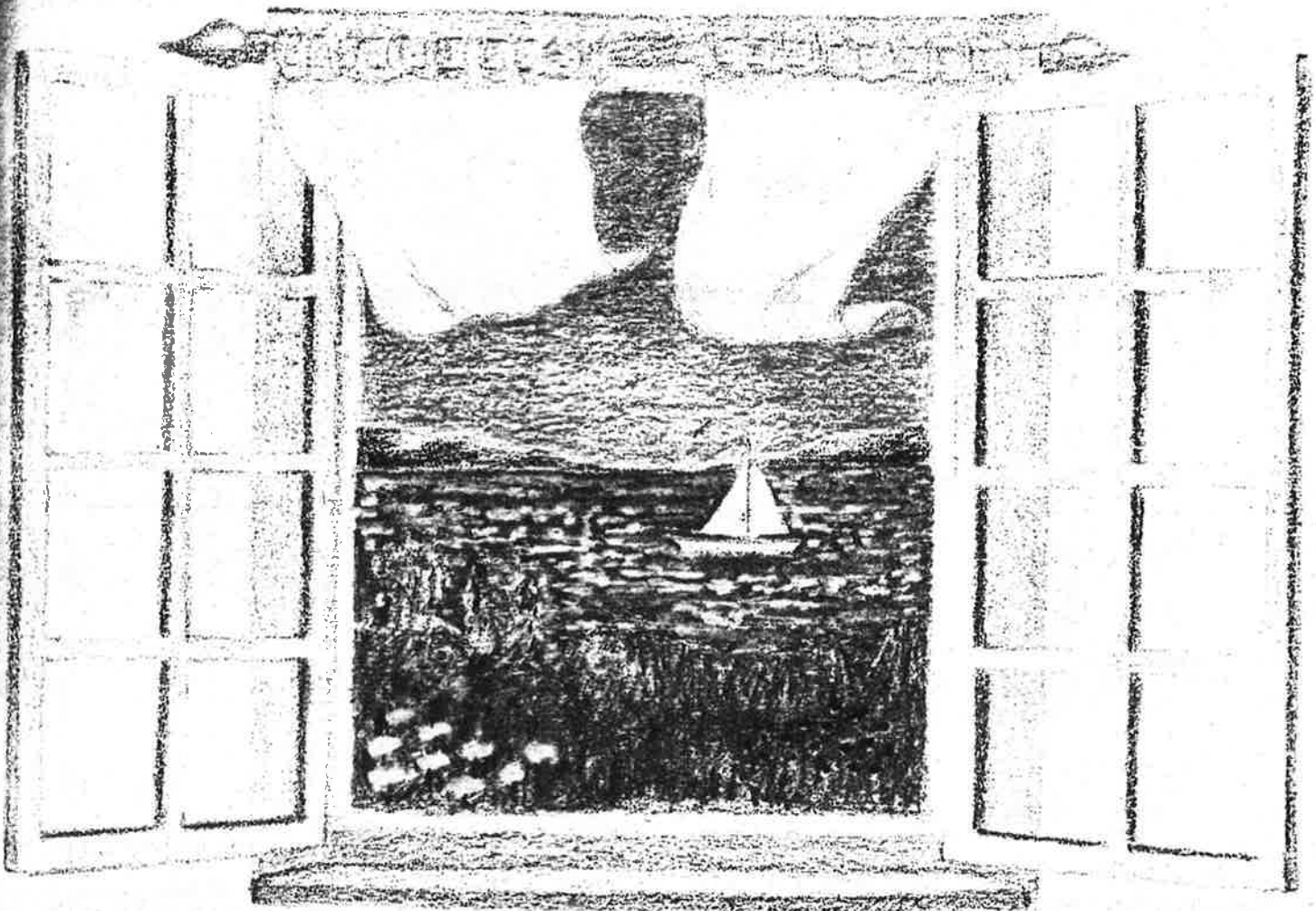


Figur 4. Sporgassmålinger - nominell utskiftingstid. Full omrøring.

Uansett forurensningsbildet blir resultatet av ventilasjonen best om ventilasjonssystemet planlegges slik at e_a og e_o får høyest mulige verdier.

Ventilasjonsindeks - direkte angivelse av ventilasjonseffektivitet

Den direkte angivelse av ventilasjonseffektivitet er knyttet til konsentrasjonene av aktuelle forurensninger og er et viktig supplement til den indirekte ventilasjonseffektiviteten når konsentrasjonene av de aktuelle forurensninger lar seg måle. (Lokalt) ventilasjonsindeks bestemmes som forholdet mellom konsentrasjonen i avtrekket og konsentrasjo-



NU ÖPPNAR VI FÖNSTRET OCH SLÄPPER UT VÅRA ERFARENHETER OCH KUNSKAPER TILL DIG

För oss är det en självklarhet att använda rätt typ av don vid rätt tillfälle. Vi har så lång erfarenhet inom luftbehandling så vi påverkas ej av branschens mode-nycker.

Vi eftersträvar ett enkelt och effektivt sätt att använda luft, där människor vistas, för bästa **total ekonomi**, med möjlighet till individuell reglering av **temperatur** och **luftmängd**.

VARFÖR? VARFÖR NI? VARFÖR VI?

Därför att...

Ventilation är ofta ett stort problem med många frågetecken. Gränsdragningarna idag är för markerade mellan beställare, byggare, konsult, kontrollant, installatör samt den slutliga användaren.

Det ställs så många meningslösa och diffusa krav på vägen till slutmålet så ingen vill eller vågar ta ansvar över gränserna "totalansvar" (krav som inte gagnar nyttjaren ekonomiskt eller funktionsmässigt är **maktmissbruk**).

Den hårda specialistuppdelningen med oklart

slutmål ger dåligt utrymme för enkelhetssyn och bra total lösning samt driftmässigt.

De lösningar och produkter som Vi entreprenörer blir lästa att arbeta med är ofta onödigt komplicerade och har dålig service och ålderbeständighet.

Som beställare, konsult, och kontrollant, lägg ner mera arbete på uppföljning av anläggning i drift, det är där utvecklingen framåt finns för bättre ventilation.

Ställ större krav på oss entreprenörer, men ge oss mera förtroende och frihet att utveckla våra slumrande kunskaper och erfarenheter. Bind oss inte till givna fabrikat och fasta lösningar, utan låt oss arbeta med vida ramar med sikte på bättre **total ekonomi** för beställare, nyttjare och entreprenörer. Låt inte ventilation förbli ett nödvändigt ont, gör den till nytta och glädje för oss alla.

För att enklast uppnå vår målsättning arbetar vi helst med **totalentreprenader** för kontor, hotell och lätt industri där samarbete skall bygga på förtroende och vilja att tillsammans finna optimala, enkla lösningar som Vi alla tjänar på.

ANVÄND: "SYSTEM BÄTTRE LUFT!"



OXELGRENSVÄGEN 33
151 42 SÖDERTÄLJE
0755-845 70

KONTAKTPERSON: ANN-BRITT KARLSSON

FRÅN IDÉ TILL NÖJDA NYTTJARE
KUNDANPASSAD VENTILATION

Friska andetag. Varenda arbetsdag.

Inair tilluftsdon, ökar välbefinnandet, arbetsglädjen och effektiviteten på alla slags arbetsplatser.

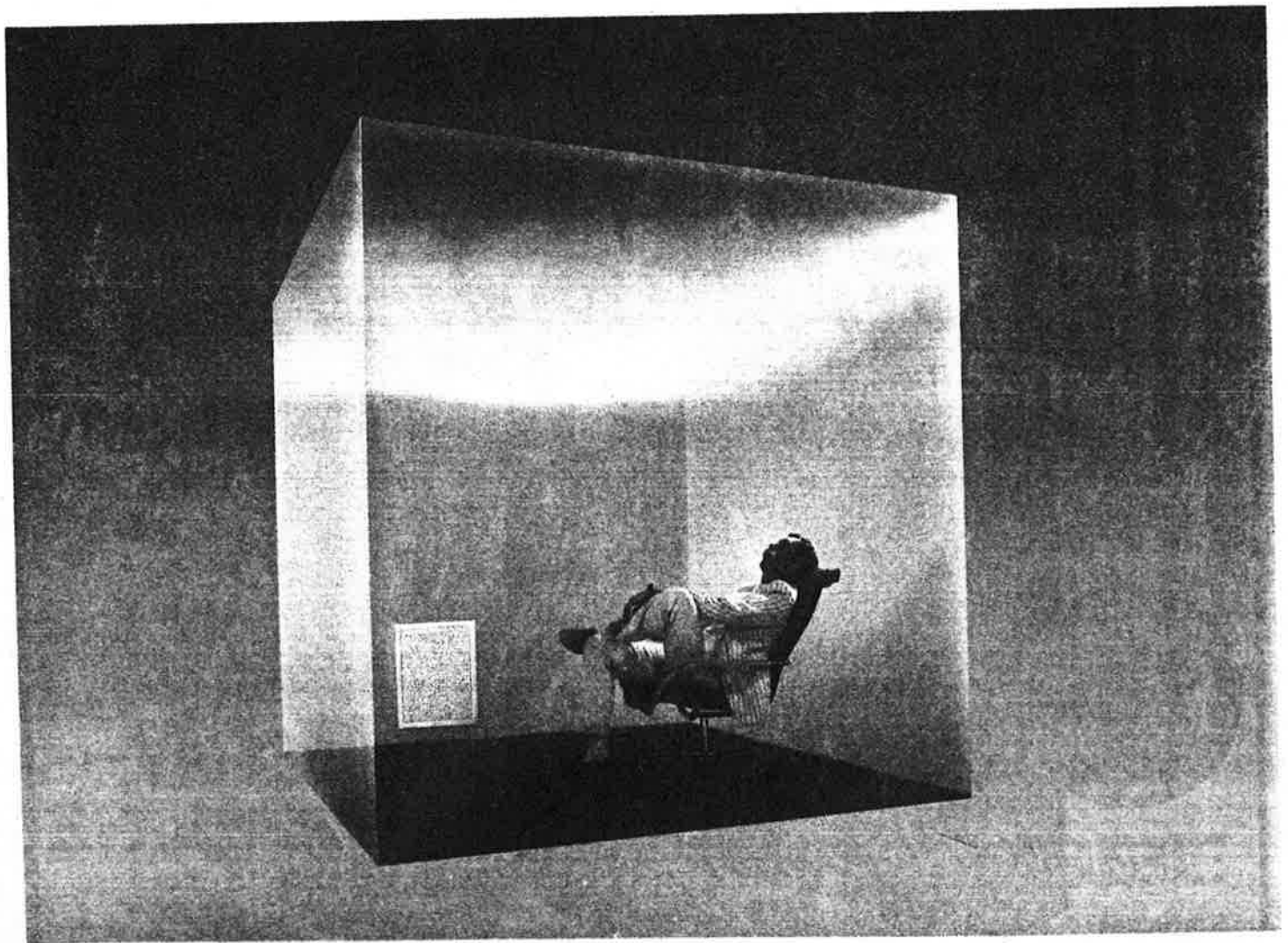
Förklaringen är att naturkrafterna samverkar med ventilationen, så att fräsch och behagligt tempererad luft tillförs rummets vistelsezon.

En förutsättning är att tilluften tillförs på en låg nivå. I stället för uppifrån.

Härigenom följer föroreningar med den uppåtstigande värmen. Varefter evakuering sker genom högt placerade frånluftsdon.

Positivt för arbetsmiljön är också att inget drag uppkommer.

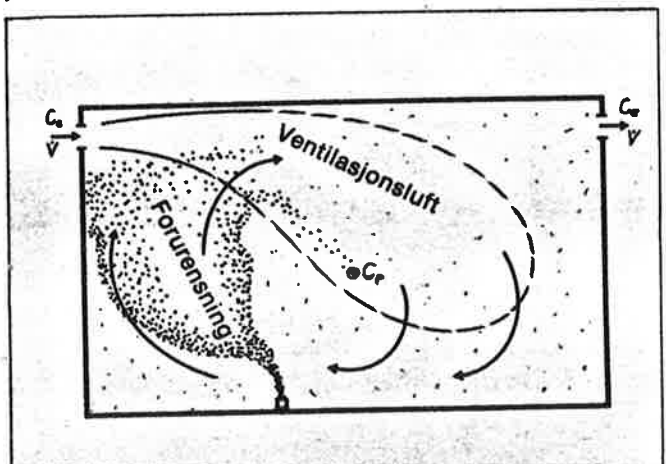
Inair tilluftsdon – ger frisk luft i rätt zon!



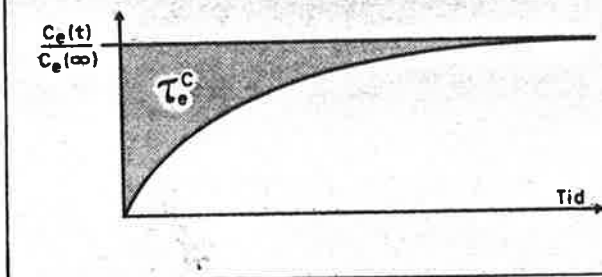
GAVLE VERKEN AB

BOX 967, 801 33 GÄVLE

OBS! NYTT TEL.NR I GÄVLE 026/17 25 00



Figur 5. Ventilasjonseffektivitet.



nen i målsonen, begge fratrukket konsentrasjonene i tulluften av den aktuelle forurensningen:

$$\epsilon_p = \frac{C_e - C_s}{C_p - C_s}$$

Dette er et tall som kan variere mellom 0 og uendelig. Verdier mellom 0 og 1 er resultatet av "innelåsning" av forurensningene (stagnasjon) og verdier mellom 1 og uendelig indikerer at forurensningene "styres" mot avtrekket.

Den gjennomsnittlige direkte ventilasjonseffektiviteten får en ved å måle ankomsttiden eller alderen på forurensningsstrømmen i avtrekket.

Fremgangsmåten for å måle denne størrelsen er den samme som for måling av alderen på luften. Forurensningskilden "skrues på" ved tiden $t=0$ og konsentrasjonene måles i avtrekket som funksjon av tiden. Alderen på forurensningen i avtrekket blir da arealet under kurven fremkommet som, figur 5:

$$F_e^c = 1 - \frac{(C_e - C_s)(t)}{(C_e - C_s)(\infty)}$$

Er denne tiden mindre enn τ_n er gjennomsnittskonsentrasjonen i rommet mindre enn i avtrekket. Altså er forurensningsstrømmen "dirigert" mot avtrekket. Er tiden større er det stagnasjon. Gjennomsnittlig ventilasjonseffektivitet:

$$\frac{(C_e - C_s)(\infty)}{(\langle C_i \rangle - C_s)\infty} = \frac{\tau_n}{\tau_e} = \langle \epsilon^c \rangle$$

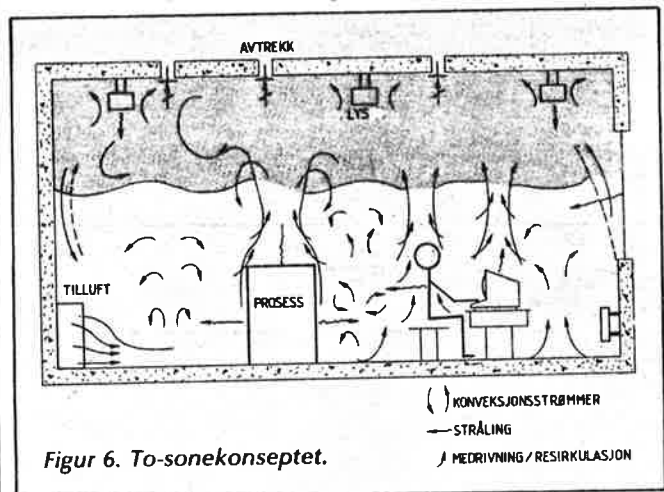
Denne størrelsen er tidligere benyttet av Rydberg (2) for å bedømme ventilasjonseffektivitet.

Overskuddsvarme kan betraktes på samme måte som forurensning og ventilasjonsindekset transformert til temperatur blir da:

$$\epsilon_p^t = \frac{T_e - T_s}{T_p - T_s}$$

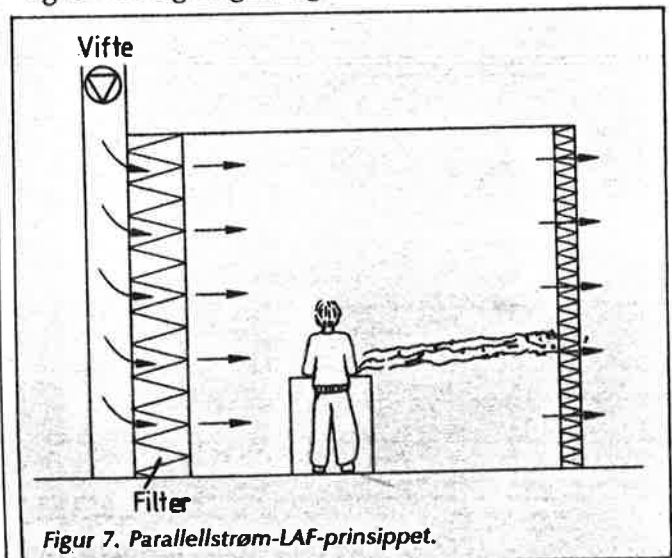
Prosjekteringsretningslinjer

Det er ingen konflikt mellom det å oppnå høy luftvekslingseffektivitet og høy ventilasjonseffektivitet. Det er heller ingen konflikt mellom å oppnå høy lokal luftvekslingsindikator og høyt lokalt ventilasjonsindeks. Best resultat vil en i alminnelighet oppnå ved først å



Figur 6. To-sonekonseptet.

"tenke i" luftvekslingseffektivitet. Ventilasjonsettelegget planlegges slik at ϵ_a og ϵ_o får høyest mulige verdier. Under en hver omstendighet skall disse verdiene være over henholdsvis 50 % og 1. Den beste kjente systematiske prosjekteringsstrategi er å anvende to-soneprinsippet både som teoretisk konsept og for beregninger, figur 6.

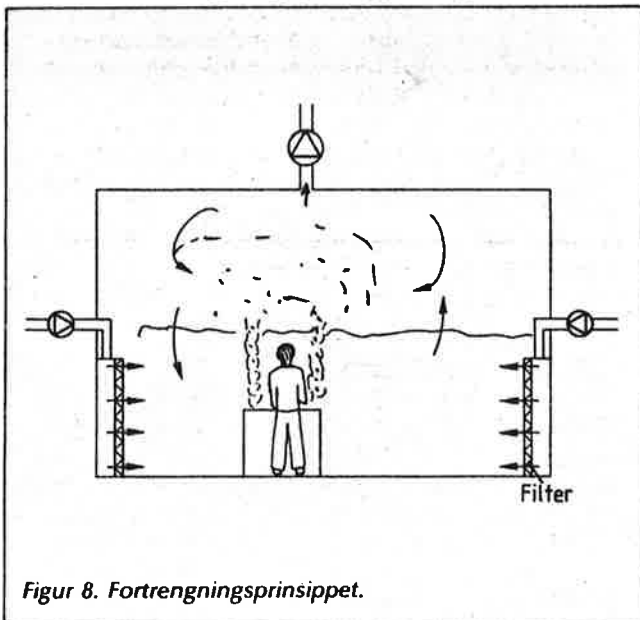


Figur 7. Parallelstrøm-LAF-prinsippet.

Det vil føre for langt å gå inn i dette i detalj her, det henvises til (3) og (4).

Parallellstrøm (stempelstrøm, pluggstrøm) gir teoretisk både høyest luftvekslingseffektivitet og ventilasjonseffektivitet når luftføringen planlegges slik at forurensningsstrømmen fra f.eks. punktkilder går direkte ut av målsonen. Slik ventilasjon er realiserbar kun i spesialtilfeller som f.eks. i rene rom, figur 7 (LAF-prinsippet).

Dette er en kostbar ventilasjonsmetode på grunn av de høye luftmengder som skall til. Stempelhastigheten må være 0,2 m/s og høyere avhengig av hvor godt resultat en vil oppnå. Det vil altså si at luftmengden blir 720 m³/h og m² romtverrsnitt og større. Det andre prinsippet som sikrer høy luftvekslingseffektivitet er fortrenningsprinsippet, figur 8. I to-



Figur 8. Fortrenningsprinsippet.

sonetermer vil det si å tilføre luften i den ene sonen og trekke den av i den andre. I prinsippet kan alle typer ventilasjonssystemer behandles med to sonekonseptet. De to soner er primærsonen (tilluftssonen) og sekundærsonen (resten av rommet).

Hovedregelen skal da være at pustesonen befinner seg i primærsonen. Det er lett å finne ventilasjonssystemer som bryter radikalt med denne hovedregel og der det også er erfart at målsonen har meget lav ventilasjonseffektivitet. Et typisk eksempel er ventilasjonssystemer kombinert med luftbåren varme der både tilluftsorganer og avtrekksorganer er plassert under taket.

Termisk sjiktning

Det er svært alminnelig å benytte termikken i rommet for å skape fortrenningsventilasjon. Prinsippet er å "spille på lag" med naturkrefte istedenfor å kjempe mot dem.

Nedenfra-opp fortrenningsretning avstedkommes ved å tilføre luft til gulvsonen med

lav hastighet og med lik eller lavere temperatur enn denne sonen. Luften trekkes av fra taksonen. Ovenfra-ned fortrenningsretning genereres på motsatt vis men her kan høyimpulstilførsel også anvendes slik at temperaturen på tilførselsluften kan være både høyere og lavere enn taksonens temperatur.

Med nedenfra-opp fortrenning fylles rommet opp med frisk luft nedenfra (som å fylle vann i et kar). Den gamle og varmere luften fortrennes oppover. Enhver varmekilde i oppholdssonen transporterer også luften oppover i den konveksjonsstrømmen som skapes. Det dannes på denne måten en termisk sjiktning eller temperatursjiktning i luftmassene og det oppstår i prinsippet to soner. Friskluften spres av seg selv til hele oppholdssonen, figur 6.

Den beste sjiktningseffekt oppnås når alle varme konveksjonsstrømmer mates med friskluften (tilførselsluften) opp til en høyde over oppholdssonen. Kalde konveksjonsstrømmer fra den øvre sonen, som dannes på flater som er kaldere enn luften i oppholdssonen, vil forårsake infiltrasjon i oppholdssonen av brukt, forurenset luft for den øvre sonen.

På den annen side vil denne luften delta i matingen av konveksjonsstrømmene slik at nødvendig luftmengde for å holde en bestemt sjikthøyde er mindre om vinteren enn om sommeren. En konsekvens av dette er at ventilasjonseffektiviteten blir lavere.

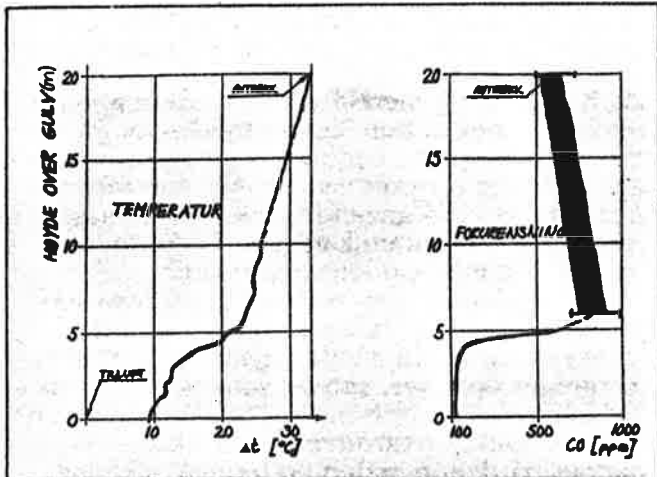
Ventilasjonseffektiviteten er imidlertid høyest når forurensningsstrømmene går loddrett opp til den øvre sonen og videre mer eller mindre direkte til avtrekket. Rommets temperaturkontroll skjer med separate oppvarmingsanordninger. Her kan benyttes konvektorer, radiatorer, gulvvarme, strålevarme i tak etc. Gulvvarme og takvarme er nok de gunstigste oppvarmingsmetoder.

Det er fullt mulig å benytte kjøletak og beholde god ventilasjonseffektivitet om takets temperatur ikke er vesentlig lavere enn oppholdssonens lufttemperatur.

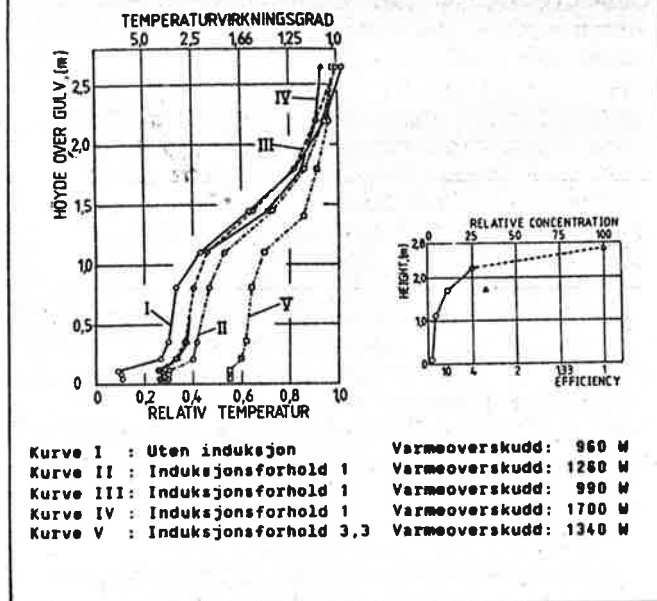
Fortrenningsretning ovenfra og ned er mest fordelaktig om hovedforurensningene er markert tyngre enn romluften og at kildene er lokalisert lavere enn pustesonen. Alle varme konveksjonsstrømmer bidrar til å redusere ventilasjonseffektiviteten. Systemene bør dimensjoneres slik at pustesonen blir i primærsonen (den øvre sonen). Om det er markert overskuddsvarme bør det søkes etter andre varianter.

Utbredelse av fortrenningsventilasjon

Fortrenningsventilasjon er det prinsipp som mest anvendes i industribygg i dag. Prinsippet har også fått en del innpass i kontorbygninger men løsningen er mest kjent som "diff-ventilasjon". Begrepet står for diffus luft-



Fortrengningsventilasjon med termikk. Figur 9. Temperatur- og konsentrasjonsprofil for industrilokale. Figur 10. Forurensningstemperaturprofil for kontorlokale.



Kurve	Induksjonsforhold	Varmeoverskudd
Kurve I	Uten induksjon	960 W
Kurve II	Induksjonsforhold 1	1260 W
Kurve III	Induksjonsforhold 1	990 W
Kurve IV	Induksjonsforhold 1	1700 W
Kurve V	Induksjonsforhold 3,3	1340 W

tilførsel. Det er uheldig at dette snevre begrepet har festet seg og blitt synonymt med fortrenningsventilasjon da prinsippet som ligger til grunn bare er en måte å skape fortrenningsventilasjon på. Imidlertid er diffus lufttilførsel fra siden eller opp gjennom golv ofte et prinsipp som er uovertruffent med hensyn på ventilasjonseffektivitet.

De problemer som kan oppstå er knyttet til termisk komfort (temperaturgradienter). Problemene er ikke knyttet til ventilasjonseffektivitet da denne alltid har vist seg å være høyere enn for omrøringsventilasjon. Fortrenningsprinsippet er mer eller mindre brukt i så og si alle typer bygninger. Problemet med temperaturgradienter oppstår på grunn av at en delvis spiller på termikk, som tidligere nevnt, for å skape fortrenningsvirkning og delvis på at en søker å fjerne store varmeoverskudd med små luftmengder. Hvis en kombinerer fortrenningsventilasjon med kjøletak så elimineres dette problemet.

Tilførselsorganer

I tillegg til de typer tilførselsorgan som eksisterer i dag er det rike muligheter for nye typer utviklet med tanke på effektiv ventilasjon. Spesielt fremheves mulighetene for å integrere tilluftsorganene i bygning, veggkonstruksjoner, møbler og annet inventar.

Ved å anvende lavimpuls tilførsel i oppholdssonen kan trekkproblemene praktisk talt elimineres. En skal imidlertid som allerede nevnt være oppmerksom på temperaturgradientene. Typiske temperaturprofiler i industrilokaler med store takhøyder er vist i figur 9 og for kontorlokaler i figur 10, kurve 1. Bakgrunnen for begge disse figur er at sluttelementet i tilluftsorganet har vært en filterduk. Profilene er praktisk talt likedannede.

I industrilokaler vil praktisk talt hele oppholdssonen befinne seg i det som i et kontor blir kalt "kaldluftkilen". Kaldluftkilen kan elimineres enten ved hjelp av induksjonsapparater med omvendt strømningsretning eller at romluft fra den nedre sonen trekkes av i ca. 1 m høye over golv og blandes med tilluften.

Kurve 2 figur 10 representerer et blandingsforhold på en del friskluft og en del sirkulasjonsluft. Økes andelen sirkulasjonsluft reduseres ventilasjonseffektiviteten.

Krav til dokumentasjon

For konvensjonelle tilluftsorganer foreligger ISO-normen ISO 5219-1984 (E) som grunnlag for dokumentasjon. Prøvemethodene beskrevet der, passer ikke for lavimpulsorganer for fortrenningsventilasjon. Dette betyr at for tiden er grunnlaget for å velge tilluftsorgan for bl a diffus lufttilførsel helt tilfeldig. Følgende egenskaper foreslås oppgitt som funksjon av størrelse og luftmengde:

- Maksimal hastighet i nærsonen som funksjon av temperaturdifferansen mellom tilluften i kanalen foran organet og romluften 1,1 m over gulvnivå. Nærsonen strekker seg til ca. 1 m fra tilluftsorganet.
- Nærsoneens størrelse inkludert isovelkart.
- Temperaturendringen i nærsonen.
- Trykkfall- og støydata.

Referanser:

- (1) M. SANDBERG og E. SKÅRET. Luftvekslings- og ventilasjonseffektivitet – Nytt hjelpemiddel for ventilasjonsbransjen. Norsk VVS nr. 7 1985.
- (2) J. RYDBERG og E. KULMAR, Ventilationens effektivitet vid olika placering av inblåsnings- och utsugningsöppningarna. Svensk VVS no. 3 1947.
- (3) E. SKÅRET, Effective Ventilating Systems – Characterization and Design Implications. Clima 2000 Copenhagen 1985.
- (4) E. SKÅRET, Ventilation by Displacement – Characterization and Design Implications. Ventilation '85. Toronto Oct. 1985.