



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Aalborg Universitet

Boligventilationssystemer

Teori og erfaringer

Olufsen, P.

Publication date:
1984

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):
Olufsen, P. (1984). *Boligventilationssystemer: Teori og erfaringer*. SBI forlag. SBI-rapport Nr. 161

General rights

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

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

Take down policy

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

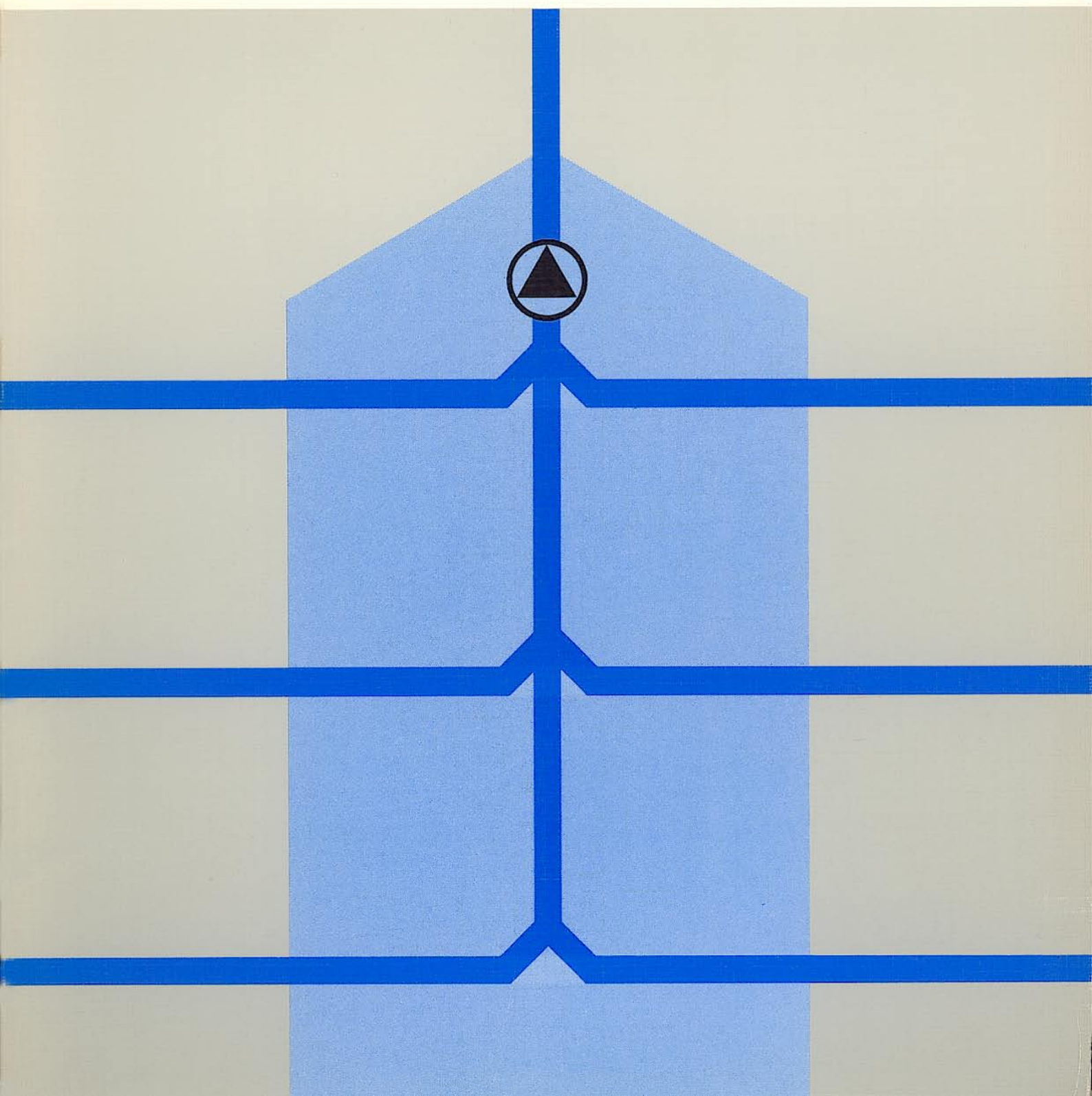
Udgivet oktober 1984

Boligventilationssystemer

Teori og erfaringer



SBI-RAPPORT 161 · STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT 1984



Udgivet oktober 1984

Udgivet oktober 1984

BOLIGVENTILATIONSSYSTEMER

Teori og erfaringer

Peter Olufsen



SBI-rapporter

er beretninger om afsluttede forskningsprojekter og afsluttede faser i fasedelte projekter samt beretninger fra visse konferencer og symposier.

SBI-publikationer

Statens Byggeforskningsinstituts publikationer udgives i følgende serier: Anvisninger, Rapporter, Meddelelser, Landbrugsbyggeri, Byplanlægning, Pjecer, Ydeevnebeskrivelser, Særtryk og Nomogrammer. Salg sker gennem boghandelen eller direkte fra SBI. Instituttets årsberetning og publikationsliste er gratis og kan rekvireres fra SBI.

SBI-abonnement

Instituttets publikationer kan også fås ved at tegne et abonnement. Det sikrer samtidig løbende orientering om alle nye udgivelser. Information om abonnementernes omfang og vilkår fås hos SBI.

ISBN 87-563-0571-0.

ISSN 0573-9985.

Pris: Kr. 90,00 inkl. 22 pct. moms.

Oplag: 1500.

Tryk: Bjørvig Offset, Hvidovre.

Tegninger: Bente Pedersen.

Omslag: Henning Holmsted.

Statens Byggeforskningsinstitut:

Postboks 119, 2970 Hørsholm. Telefon 02- 86 55 33.

Eftertryk i uddrag tilladt, men kun med kildeangivelsen:

SBI-rapport 161: Boligventilationssystemer. 1984.

Indholdsfortegnelse

| | |
|---|----|
| Forord | 5 |
| Grundlæggende begreber | 7 |
| Basisventilationens størrelse | 13 |
| Udeluftbehov for ikke rygende personer | 13 |
| Udeluftbehov ved tobaksrygning | 16 |
| Udeluftbehov for boligenheder | 19 |
| Udeluftbehov uden for brugstiden | 21 |
| Udeluftbehov ved afgasning fra byggematerialer | 22 |
| Udeluftbehov ved fugtbelastning | 24 |
| Supplerende ventilation | 30 |
| Ventilationsbestemmelser i dansk byggelovgivning | 32 |
| Lufttransport gennem bygninger | 37 |
| Beregningsmodeller for lufttransport | 37 |
| Vindpåvirkninger | 38 |
| Termisk opdrift | 43 |
| Resulterende luftstrømme | 44 |
| Karakteristiske ventilationseffekter i bygninger uden ventilationsindretninger | 46 |
| Karakteristiske ventilationseffekter i bygninger med ventilationsindretninger | 51 |

| | |
|--|-----|
| Klimaskærmens tæthed | 54 |
| Åbningers strømningskarakteristik | 54 |
| Måling af klimaskærmens tæthed | 58 |
| Effektivt lækageareal og udeluftventiler | 59 |
| Måling og beregning af infiltration | 63 |
| Luftstrømninger og blandingsprocesser i rum | 67 |
| Fortynding og ventilationseffektivitet | 67 |
| Lufttilførsel og trækgener | 73 |
| Undersøgelser af ventilationen i etageboliger | 77 |
| Undersøgelser af ventilationen i enfamiliehuse | 87 |
| Sammenfattende diskussion | 95 |
| Ventilationsbehov og energiforbrug | 95 |
| Ventilationssystemernes egenskaber | 98 |
| Områder for forskning og udvikling | 103 |
| Summary | 106 |

Forord

Problemet om, hvorledes man sikrer en hygiejnisk tilfredsstillende ventilation af boliger, uden at energiforbruget kommer ud af kontrol, har været livligt debatteret i de senere år. Nogle betragtninger og forslag afspejler tillid til, at problemet bedst løses ved en større indsats af tekniske midler i form af mere avancerede ventilationsanlæg. Andre argumenter går ud på, at simple systemer uden for megen mekanik, men brugt med omtanke, er tilstrækkelige og fritager brugerne for uoverskuelige vedligeholdelsesproblemer.

I denne rapport opstilles en oversigt baseret på litteraturstudier over den nuværende viden om boligventilationens teori og virkelighed. Fremstillingen er bygget op omkring det synspunkt, at de forskellige former for boligventilation kan indordnes under nogle få hovedtyper. Den tekniske litteratur om boligventilation er så omfattende, at en fuldstændig litteraturgennemgang ville blive uoverskuelig. Ved udvælgelsen af den litteratur, som refereres i rapporten, er der især taget hensyn til, om den belyser karakteristiske egenskaber ved én eller flere af de hovedtyper, som er af interesse for dansk byggeri.

Samtidigt refereres argumentationen, der ligger til grund for fastsættelse af den ventilation, som efter nutidig opfattelse er nødvendig af hygiejniske og komfortmæssige hensyn.

Rapporten er centreret om den såkaldte komfortventilation, dvs. den ventilation, der styrer det atmosfæ-

riske indeklime. Rapporten går ikke nærmere ind på lufttransportfunktionen ved luftkrævende udstyr, som kan forekomme i boliger, fx fyringsanlæg og tørretumblere. Rapporten behandler heller ikke sammenkoblingen af ventilationsfunktion med opvarmningsfunktion, som forekommer i luftvarmeanlæg.

Det har ikke været hensigten med rapporten at give et entydigt svar på, hvorledes ventilationen skal indrettes i nye og renoverede boliger, eller at give anvisninger på dimensionering og udførelse af ventilationsanlæg. Formålet er snarere at skabe et bedre grundlag for vurderingen af behov for ny forskningsindsats og produktudvikling. De dele af rapporten, som vedrører baggrunden for ventilationsbestemmelser i normer og byggeforskrifter, kan måske være til støtte for overvejelser om revisioner af bestemmelserne. Rapporten henvender sig iøvrigt til teknikere, der skal rådgive eller træffe beslutning vedrørende boligventilation, og som har behov for at kende forudsætningerne for den praksis, som er almindelig i dag.

Statens Byggeforskningsinstitut
Afdelingen for indeklimateknik, oktober 1984
Erik Christophersen

Grundlæggende begreber

Ventilationens
formål

Boliger skal ventileres for at opfylde menneskers hygiejniske og komfortmæssige behov for rumluft af acceptabel kvalitet og for at kontrollere fugtforholdene i rummene. Samtidigt skal boligventilationssystemet medvirke til at opretholde et acceptabelt termisk rumklima på en energioekonomisk måde.

Basis-
ventilation

Det er indlysende, at ventilationsbehovet i en bolig varierer afhængigt af personbelastning, belastning fra husholdningsprocesser som vask og madlavning samt termisk belastning under sommerforhold. Denne erkendelse leder til opstilling af begrebet basisventilation, der kan defineres som et hygiejnisk-komfortmæssigt, mindste ventilationsbehov ved en forudsat normal anvendelse af boligen under vinterforhold. Der opereres mere eller mindre klart med dette begreb i mange ventilationsforskrifter. Klarest kommer det til udtryk i DS 447: Dansk Ingeniørforenings norm for ventilationsanlæg (1981) og i de af Nordisk Komité for Bygningsbestemmelser udgivne retningslinjer for bygningsbestemmelser vedrørende luftkvalitet (indeholdt i NKB-rapport nr. 40: Inomhusklimat, 1981). Disse forskrifter benævnes kort DS 447 og NKB-luftkvalitet i det følgende.

Supplerende
ventilation

Det ekstra ventilationsbehov, som er til stede, når belastningen fra personer, processer eller solindfald overstiger, hvad der svarer til normalforholdene, kan benævnes supplerende ventilation.

Oplukkelige
vinduer

Den grundlæggende filosofi bag udformningen af boligventilationssystemer har sædvanligvis været, at de e-

gentlige ventilationsinstallationer skal kunne yde basisventilationen, medens muligheden for at supplere ventilationen sikres ved, at boligen udstyres med oplukkelige vinduer.

I nyere byggeri ligger ofte et modificeret princip til grund. Ventilationsinstallationerne har her ikke alene til opgave at yde basisventilationen men skal også kunne opfylde visse behov for supplerende ventilation fx ved, at dele af systemet har regulerbar ydelse eller er beregnet til periodisk drift. Muligheden for vinduesoplukning indskrænkes dog ikke heraf.

Kravet om, at beboelsesrum skal have oplukkelige vinduer til det fri, er formuleret i de skiftende offentlige byggeforskrifter og kan følges tilbage i tiden i hvert fald så langt som til Københavns byggelov af 1889. Vinduesventilationens brugbarhed har været begunstiget af, at ensidige lejligheder, dvs. lejligheder, som kun har vinduer i én facade, har haft forholdsvis lille udbredelse i Danmark.

Central
udsugning

Til sikring af basisventilationen har hidtil næsten udelukkende været anvendt ventilationssystemer, hvis karakteristiske træk er den centrale udsugning. Luften fjernes fra boligens mest fugt- og forureningsbelastede rum: køkken, bade- og wc-rum. Den udsugede luft erstattes af udeluft, som tilføres gennem dertil indrettede eller mere tilfældige åbninger i facaden og overføres mellem boligens rum i retning fra beboelsesrum til hygiejnerum og køkken.

Ventilations-
system af
type S og F

Udsugningssystemerne deles i to klasser, der traditionelt benævnes naturlig ventilation og mekanisk udsugning. Ved naturlig ventilation er de drivkræfter, der fremkalder lufttransporten, termisk opdrift og vindpåvirkning. Ved mekanisk udsugning transporteres luften af elektrisk drevne ventilatorer sluttet til udsugningskanaler. I svensk byggeforskriftsterminologi benyttes for de to klasser symbolerne S og F, hvor S hentyder til självdraft og F til fläktstyrd fränluft. Disse betegnelser vil blive anvendt i det følgende.

Det bemærkes, at traditionelle aftrækskanaler fra køkken og bad her opfattes som et egentligt udsugnings-

system, idet skorstensvirkningen under vinterforhold udgør en pålidelig drivkraft, der kan transportere væsentlige luftmængder. Under sommerforhold kan boligen uden større gener ventileres ved tværventilation gennem åbnede vinduer, og det har da ikke afgørende betydning, at skorstensvirkningen ophører, når temperaturen inde og ude er nær den samme.

Kravet om, at boliger skal have et udsugningssystem, har ligeledes en lang tradition bag sig. I byggeforskrifter for København er kravet udviklet gradvis fra de første antydninger i Københavns byggelov af 1871 til det fremtræder klart formuleret i Københavns byggelov af 1939. I det første landsgældende bygningsreglement fra 1961 fik kravet den udformning, som med små ændringer har været gældende siden. Udsugningssystemet er anvendt både i højt og lavt byggeri, men det kan mangle i ældre boliger uden for København.

Ventilations-
system af
type FT og FTX

Mere avancerede mekaniske ventilationssystemer, der omfatter både kontrolleret indblæsning og udsugning af luft, har hidtil ikke opnået nogen nævneværdig udbredelse i den danske boligsektor, men de indebærer interessante muligheder for konsekvente løsninger af boligventilationsproblemet, som diskuteres i dag. Fra svensk litteratur kendes betegnelserne FT og FTX for sådanne anlægstyper, hvor FT hentyder til fläktstyrd frånluft-tilluft og X symboliserer varmegenvinding.

Infiltration
og exfiltration

Ventilationsproblematikken kompliceres af de fænomener, som kaldes infiltration og exfiltration. De defineres sædvanligvis som indtrængning, henholdsvis udsivning af luft gennem utætheder i bygningens klimaskærm, jf. DS 447. En del af de senere års internationale litteratur om boligventilation handler om, hvorledes infiltrationen og exfiltrationen kan måles og beregnes, og om hvorledes de kan elimineres eller kontrolleres. Begrebsdannelsen synes dog ikke at være helt entydig, hvilket måske skyldes, at kravet om, at basisventilation sikres i det mindste ved et udsugningssystem, ikke er internationalt accepteret.

Frivillig og
ufrivillig
ventilation

Ventilationen betragtes ofte som værende sammensat af en kontrolleret del og en ukontrolleret del. Den kontrollerede del er den frivillige, tilsigtede ventilation. Det postuleres, at ventilationen generelt bliver større end tilsigtet, fordi det er vanskeligt eller umuligt at opretholde en ønsket ventilation inden for snævre tolerancer, og overskridelsen betegnes som den ukontrollerede eller ufrivillige eller utilsigtede ventilation. Der er i litteraturen tilbøjelighed til at sidestille ufrivillig ventilation med infiltration og/eller naturlig ventilation. Denne tilbøjelighed hænger formodentlig sammen med, at hovedproblemet på forhånd antages at være, at boligventilationen skal begrænses for at spare energi, og at denne begrænsning kun kan opnås ved en vidtgående mekaniseret, vejruafhængig løsning. Udviklingen bevæger sig måske i retning af øget anvendelse af sådanne løsninger, men så længe de enklere løsninger også forekommer, er det nødvendigt at skelne nøjere mellem begreberne.

Ønsket og uønsket
infiltration

Betragtes det efter danske forhold noget teoretiske tilfælde, at boligens eneste ventilationsindretninger er oplukkelige vinduer, bliver infiltrationen med lukkede vinduer identisk med boligens mindsteventilation. Studiet af de fysiske lovmæssigheder for infiltrationen giver svar på, hvorledes boligventilationen fungerer, så længe der ikke ventileres forceret. Hvis denne infiltration generelt er større end den nødvendige basisventilation, kan der spares energi ved at tætte klimaskærmen, men infiltrationen kan i princippet ikke betragtes som uønsket, når boligen skal kunne fungere med lukkede vinduer under normal belastning.

Forudsættes det derimod, at boligen ventileres med et anlæg af type FT eller FTX, er infiltrationen en forstyrrende faktor, og det er motiveret at tilstræbe en høj grad af tæthed af klimaskærmen. Når infiltrationen ikke længere bidrager væsentligt til den resulterende ventilation, er studiet af infiltrationens fysik af mindre praktisk interesse.

I det almindeligste tilfælde, hvor boligen udstyres

med anlæg af type S eller F, er forholdene ikke så enkle. Udeluften tilføres dels gennem ventiler eller lignende i facaderne, dels ved infiltration gennem tilfældige utætheder i klimaskærmen. Der argumenteres undertiden for, at infiltrationen så vidt muligt bør elimineres, således at udelufttilførslen beherskes af ventilerne. Da det er usikkert, om brugernes holdning til ventilerne er så positiv, at de benyttes rigtigt, er infiltrationen næppe generelt uønsket. Klimaskærmen bør naturligvis ikke være så utæt, at der ved siden af udsugningen optræder en dominerende exfiltration, men iøvrigt har klimaskærmens tæthed formodentlig begrænset betydning for den samlede ventilation af boliger med anlæg af type F. Tætheden må antages at betyde mere for funktionen af anlæg af type S. Det er dog på forhånd usikkert, hvilken samlet virkning tætheden har på ventilationen og energiforbruget, da brugerne kan kompensere for større tæthed ved mere udstrakt brug af ventiler og vinduer.

Ventilation
med udeluft og
overføringsluft

Med ventilation menes her luftfornyelse i rum. Det forudsættes, at den tilførte luft er udeluft. Det kan tænkes, at der i specielle anlægstyper også forekommer returluft, men dette tilfælde vil ikke blive nærmere behandlet. Et rum kan være helt eller delvis ventileret med overføringsluft, dvs. udeluft, som ikke er tilført direkte til rummet, men har passeret et andet rum på vejen. Overføringsluftens værdi som luftfornyelse kan være nedsat afhængig af fugt- og forureningsbelastningens fordeling på boligens rum, men de komplikationer, der følger deraf, må nok anses for at være ret overskuelige, da transportafstandene inden for en bolig normalt er små, og boligen i forureningsmæssig henseende udgør et hele. En fundamental regel er, at luftoverføring bør ske fra mindre til mere forurenede rum, hvor der er systematiske forskelle mellem rummenes forureningsbelastning.

Naturlig
ventilation

Med naturlig ventilation menes her som allerede nævnt ventilation ved hjælp af udsugningssystemer af type S. I litteraturen anvendes udtrykket ofte i en bredere be-

tydning om den ventilation, der styres af vindkræfter og termisk opdrift uden hensyn til, hvilke ventilationsindretninger der forefindes. Begreberne naturlig ventilation og infiltration holdes heller ikke altid ude fra hinanden. Undertiden bruges udtrykket naturlig ventilation specielt om den ventilation, som er til stede i en bolig med anlæg af type F eller FT, når den mekaniske ventilation er afbrudt.

Beboet og
ubeboet bolig

I nogle sammenhænge skelnes mellem den ventilation, som er til stede i en ubeboet bolig, hvor ventilationsindretningerne fungerer normalt, og den ventilation, som faktisk optræder i den beboede bolig. Sidstnævnte er naturligvis større end førstnævnte, såfremt beboerne i perioder anvender supplerende ventilation, herunder vinduesoplukninger. Anvendelsen af supplerende ventilation er formodentlig i høj grad vanebestemt og subjektivt betinget af beboernes hygiejnebevidsthed, men delvis må den nok også betragtes som ufrivillig og tilfældig, fx fremtvunget af nødvendige døroplukninger. Den faktiske ventilation i en beboet bolig kan også tænkes at blive mindre end "normalventilationen", hvis beboerne har valgmuligheder og undlader at indkoble ventilationsindretningerne på den forudsete måde. Afhængigheden af beboeradfærden er en hovedårsag til vanskelighederne ved at beskrive ventilationseffekterne og vurdere energiforbruget realistisk. Når kravene til boligventilation skal søges formuleret, må hovedvægten imidlertid lægges på den definerbare basisventilation.

Litteratur

G. Christensen: Ventilation af boliger
SBI-anvisning 74, 1970

P. Becher: Varme og ventilation 3
København 1972

Nordisk komité for bygningsbestemmelser: Inomhusklimat
NKB-rapport 40, 1981

Dansk Ingeniørforenings norm for ventilationsanlæg
DS 447, 1. udgave 1981

Basisventilationens størrelse

Udeluftbehov for ikke-rygende personer

Ved fastsættelse af den basisventilation, som må anses for nødvendig i boliger, må der tages hensyn til luftforureningen fra personer, fra husholdningsprocesser og fra omgivende bygningsdele.

Kuldioxid i
rumluft

En væsentlig bestanddel af den forurening, som udgår direkte fra personer, er CO_2 -afgivelsen på grund af de menneskelige stofskifteprocesser. Et ofte anvendt ventilationskriterium er, at luftens CO_2 -indhold skal holdes under en vis grænse, hvilket indebærer, at udelufttilførslen relateres til antallet af tilstedeværende personer og deres aktivitet. Der optræder i litteraturen to lidt forskellige argumentationer for valg af grænseværdi.

Hygiejnisk
grænseværdi
for CO_2

Udeluften indeholder omkring 0,03 volumenprocent CO_2 . Forøgelse af CO_2 -koncentrationen påvirker i første række åndedrætsfrekvensen. Koncentrationer på nogle få procent kan give hovedpine og svimmelhed. En alment accepteret hygiejnisk grænseværdi for luftens CO_2 -indhold på arbejdspladser er 0,5 pct. For boliger synes det rimeligt at sætte en sikkerhedsfaktor på mindst 2 i forhold hertil, således at grænseværdien sættes til fx 0,25 pct. Går man dernæst ud fra en gennemsnitlig CO_2 -afgivelse på 20 l/h pr. person svarende til let, siddende arbejde, se tabel 1, bliver den nødvendige udelufttilførsel $20/36(0,25-0,03) = 2,5$ l/s pr. person. I den amerikanske ventilationsstandard ASHRAE 62-1981 er

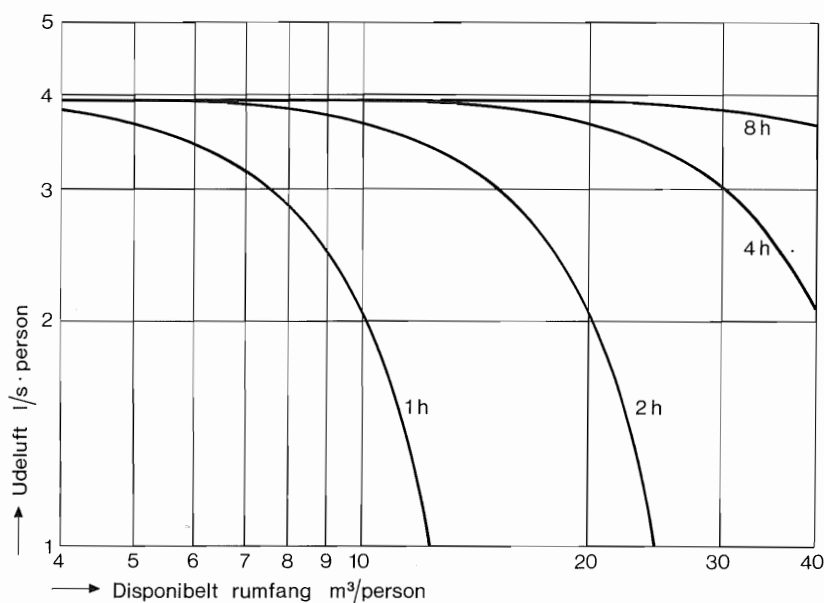
den nedre grænse for udelufttilførsel opstillet på denne måde. I NKB-luftkvalitet argumenteres for valg af en noget højere sikkerhedsfaktor, hvorved man når frem til en nødvendig udelufttilførsel på 4 l/s pr. person.

CO₂ som indikator
for kropslugt

Allerede i 1858 fremsatte Pettenkofer den tanke, at CO₂ ikke direkte er en skadelig bestanddel af rumluften, men at CO₂-indholdet er en indikator for luftens forurening med organiske stoffer afgivet fra personer. Ved tilstrækkelig høje koncentrationer er disse stoffer årsag til ubehagelig eller generende lugt, og formålet med ventilationen er at holde lugtintensiteten på et tåleligt niveau. Pettenkofer mente, at dette var opnået, når CO₂-indholdet lå under 0,1 pct. Senere undersøgelser har bekræftet, at der er korrelation mellem lugtintensitet og CO₂-koncentration, men at der optræder ret store individuelle variationer bl.a. på grund af forskelle i levevis og forskelle i følsomhed for kropslugt. Grænsen for acceptabel lugtintensitet synes i gennemsnit at blive nået ved et CO₂-indhold på 0,15 pct. eller rettere ved en stigning i CO₂-indhold på 0,12 pct. i forhold til udeluft, når lugtintensiteten bedømmes af personer, der udefra træder ind i det eksponerede rum (Huber og Wanner, 1982). Personer, som opholder sig i rummet, opnår ret hurtigt en tilvænnning, således at deres lugtopfattelse svækkes, men hvis de forlader rummet og efter en kort tid vender tilbage, bedømmer de lugtintensiteten som nyttilkomne med friske sanser.

| Aktivitet | Stofskifte | CO ₂ | H ₂ O | Fri varme |
|----------------------|------------|-----------------|------------------|-----------|
| søvn | 70 W | 12 l/h | 23 g/h | 54 W |
| siddende hvile | 100 W | 17 l/h | 45 g/h | 69 W |
| let siddende arbejde | 120 W | 20 l/h | 59 g/h | 80 W |
| let stående arbejde | 200 W | 33 l/h | 116 g/h | 121 W |
| gang 1,5 m/s | 300 W | 50 l/h | 187 g/h | 173 W |

Tabel 1. Afgivelse af varme, vanddamp og kuldioxid fra en voksen person ved forskelligt aktivitetsniveau. Varmeproduktionen afgives dels som fri varme, dels bundet i vanddamp (udarbejdet på grundlag af data i Fanger: Thermal Comfort, 1970, under forudsætning af, at personen er i termisk neutralitet).



Figur 1. Nødvendig udelufttilførsel i l/s til personbelastet rum afhængigt af opholdstid og disponibelt rumvolumen. Det forudsættes, at en person afgiver 17 l CO₂ pr. time, og at det tillades, at rumluftens CO₂-indhold stiger med 0,12 pct. fra opholdstidens begyndelse til dens slutning.

Personers luftbehov

Figur 1 viser den beregnede udelufttilførsel, som er nødvendig for at differensen mellem inde- og udeluftens CO₂-indhold ikke overstiger 0,12 pct. efter henholdsvis 1, 2, 4 og 8 timer afhængigt af det disponible rumvolumen pr. person. Det forudsættes, at rumluften er fuldstændig opblandet, at luften er ren ved periodens begyndelse, og at CO₂-afgivelsen er 17 l/h pr. person (siddende hvile ifølge tabel 1). Figuren indikerer, at mindste udelufttilførsel bør sættes til 4 l/s pr. person uanset rumstørrelsen, da beboelsesrum må forudsættes at kunne være i permanent brug. Samme grænseværdi angives i NKB-luftkvalitet for soverum samt i DS 447 for rum med lav personbelastning.

Persontæthed

De ofte citerede forsøgsresultater, som blev offentliggjort af Yaglou og medarbejdere i 1936, syntes at vise, at det stationære ventilationsbehov bestemt ud fra kropslugtkriterier ikke alene er knyttet til personantallet men også til persontætheden, således at ventilationsbehovet for et givet rum vokser næsten kva-

dratisk med antallet af personer i rummet. Yaglou forklarede dette med, at lugtstofferne er kemisk ustabile og hurtigt dekomponeres ved oxydering. Når persontætheden og ventilationen nedsættes i samme forhold, stiger luftpartiklernes middellopholdstid i rummet, og dermed falder lugtintensiteten, fordi en større del af lugtstofferne når at dekomponeres. Yaglous resultater var baseret på et begrænset statistisk materiale, og der er i den senere tid rejst tvivl om rigtigheden af konklusionerne. De fleste af Yaglous forsøg vedrørte persontætheder, der ligger væsentligt over det normale for boliger. I området 10-15 m³ rumvolumen pr. person er udeluftbehovet efter Yaglou nær ved 4 l/s pr. person.

De seneste forsøgsresultater (Cain og Leaderer, 1982, Fanger og Berg-Munch, 1983) har ikke bekræftet, at der findes en afhængighed af persontætheden. Resultaterne antyder, at Pettenkofers oprindelige grænseværdi på 0,1 pct. CO₂ netop svarer til acceptabel luftkvalitet, når det forudsættes, at 80 pct. af udefra kommende personer skal finde luftkvaliteten tilfredsstillende med hensyn til lugtkvalitet. Dette kriterium modsvarer et udeluftbehov på ca. 7 l/s pr. person. Cain og Leaderer mener, at lugtintensiteten ved 4 l/s udeluft pr. person har tilstrækkelig høj accept men tilføjer, at det er meget vanskeligt at tilfredsstille de mest følsomme personer.

Udeluftbehov ved tobaksrygning

CO som indikator
for røggener

Ovennævnte udeluftbehov gælder under forudsætning af, at der ikke ryges i rummene. Tobaksrygning giver anledning dels til lugtgener fra røgens gasformige bestanddele, dels til partikelforurening, som virker irriterende på øjne, næse og hals både hos ikke-rygere og hos rygere. Det har vist sig, at intensiteten af generne vokser med rumluftens CO-indhold, eller mere nøjagtigt med den stigning i CO-indholdet, som skyldes forbrænding af tobak, idet der kan være CO fra andre kilder til stede. CO kan altså benyttes som ventilationsindikator i forbindelse med rygning. Erfaringen viser, at tobaksrøgen maskerer kropslugten, således at tobaksrygningen alene er dimensionsgivende for ventilationen.

Som grænse for acceptabel luftkvalitet er foreslået 1,5-2,0 ppm CO. Dette niveau synes at falde sammen med bedømmelsen hos et stort flertal af ikke-rygerne, som opholder sig i rum, hvori der ryges (Weber, 1983, Thayer, 1982). Rygerne synes at acceptere et ca. 40 pct. højere niveau. Det bemærkes, at CO kun er en indikator, idet CO ikke direkte forårsager mærkbare gener ved disse koncentrationer, som endda ligger væsentligt under, hvad der sædvanligvis accepteres for udeluft. Derimod vil rumluftens partikelkoncentration hidrørende fra tobaksrygning ofte ligge over den hygiejniske grænseværdi for svævestøv i udeluft, som er på 60 eller 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Cain og Leaderer (1982) har således under rygeforsøg i klimarum målt partikelkoncentrationer i området 100-1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

I tabel 2 er angivet skøn for rygeres cigaretforbrug i Schweiz efter Weber og i USA efter Thayer. Med udgangspunkt heri er udeluftbehovet beregnet under forudsætning af, at grænsen for acceptabel CO-koncentration er 1,75 ppm for ikke-rygere og 2,5 ppm for rygere, og at stationære forhold er indtrådt. Det er endvidere forudsat, at CO-afgivelsen udgør 70 ml pr. cigaret.

| Rygning og ventilation | Weber/Schweiz | Thayer/USA |
|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Rygere i den voksne befolkning | 38 pct. | 33 pct. |
| Rygeres cigaretforbrug | 17 pr. dag 1,3 pr. time | 33 pr. dag 2,2 pr. time |
| Rygeres CO-produktion | 0,09 l/h | 0,15 l/h |
| Udeluftbehov pr. person i rum med | | |
| a. ikke rygere + rygere | 5 l/s | 8 l/s |
| b. rygere alene | 10 l/s | 17 l/s |
| c. rygere + enkelte ikke-rygere | 14 l/s | 24 l/s |

Tabel 2. Nødvendig ventilation ved rygning af henholdsvis 1,3 og 2,2 cigaret pr. time. Der ventileres til CO-koncentration 1,75 ppm i rum med ikke-rygere og 2,5 ppm i rum uden ikke-rygere, idet CO-afgivelsen pr. cigaret sættes til 70 ml.

Denne opgives til 62 ml hos Weber, 66 ml hos Thayer og omkring 90 ml hos Cain og Leaderer.

Personers
luftbehov

Der skelnes mellem tre tilfælde: a) rum, som benyttes af rygere og ikke-rygere i et forhold, der svarer til gennemsnittet i den voksne befolkning, b) rum, som alene benyttes af rygere og ventileres efter deres behov, c) rum, hvori praktisk talt alle er rygere, men som skal ventileres af hensyn til enkelte ikke-rygere. Udeluftbehovet angives i l/s pr. tilstedeværende person (rygere og ikke-rygere).

Det ses, at udeluftbehovet er højere end beregnet efter kropslugtkriteriet, så længe rygning finder sted. Dertil kommer, at der formodentlig er en forskel i ventilationsbehov ved periodisk brug af rum. Når et rum, som har været belastet med rygere, forlades, aftager lugtintensiteten langsommere, end når det alene har været belastet med ikke-rygende personer (Yaglou, 1937).

Rygerkvotient

Det ses også af tabel 2, at udeluftbehovet afhænger stærkt af rygerkvotienten (den del af rummets brugere, som er rygere), idet udeluftbehovet stiger med en faktor 3, når rygerkvotienten går fra gennemsnittet på omkring 0,35 til nær maksimum på 1. Hvis rygere og ikke-rygere antages at være tilfældigt fordelt, vil sandsynligheden for, at rygerkvotienten i et rum, hvor der ikke er rygeforbud, afviger stærkt fra gennemsnittet, være desto større, jo mindre personantallet er. Dette forhold øger vanskelighederne ved at fastsætte udeluftbehovet for rum, hvori rygning kan forekomme.

I DS 447 sættes udeluftbehovet summarisk til 10 l/s pr. person for rum med tobaksrygning. ASHRAE 62-1981 sætter tallet til mellem 10 og 25 l/s pr. person afhængigt af rummets anvendelse.

Cain og Leaderer har vist, at udeluftbehovet bliver meget stort, antageligt omkring 50 l/s pr. ryger, hvis luftkvaliteten bedømmes ligesom i rum med ikke-rygere på grundlag af nytilkomnes lugtindtryk. Det er dog et spørgsmål, om dette kriterium er rimeligt. Tobakslugten forventes vel at være mærkbar i rum, hvor rygning vides

at finde sted, og tobakslugt er måske i højere grad socialt accepteret end kropslugt. Derimod er det klart, at akutte irritationer i øjne og slimhinder ikke kan tolereres.

Udeluftbehov for boligenheder

Boligers
luftskifte

Ovenfor er diskuteret det personrelaterede udeluftbehov. I forbindelse med boligventilation er det imidlertid mere praktisk at henføre udeluftbehovet til boligen, da personantallet er en ret udefineret størrelse på projekteringsstadiet. Et ofte angivet mål på boligens basisventilation er 0,35 l/s pr. m² af nettoetagearealet. Denne ventilation svarer til, at den pr. time tilførte udeluftmængde udgør meget nær ved halvdelen af boligens nettorumfang, når rumhøjden er normal, eller kortere udtrykt, at luftskiftet er 0,5 h⁻¹. Denne traditionelle udtryksmåde vil blive benyttet her, selv om betegnelsen kan synes mindre god, og enheden ikke passer til SI-systemet.

Udsugning ved
anlæg af type F

Kravet om en basisventilation på 0,35 l/s m² eller et basisluftskifte på 0,5 h⁻¹ optræder i svenske og danske byggeforskrifter. I BR-82 angives basisventilationen imidlertid også på anden måde, idet der kræves en udsugning på 20 l/s fra køkkener, 15 l/s fra baderum og 10 l/s fra separate wc-rum, hvor udsugningen modsvares af en lige så stor udelufttilførsel fordelt over boligens rum. Den samlede udelufttilførsel er beregnet for nogle boligstørrelser i tabel 3. Det ses, at sidstnævnte krav som oftest resulterer i større udelufttilførsel end førstnævnte. Kun for meget store boliger er det muligt, at den foreskrevne udsugning fra køkken, bad og wc bliver mindre end svarende til et luftskifte for hele boligen på 0,5 h⁻¹.

I den amerikanske ventilationsstandard ASHRAE 62-1981 angives basisventilationen til 5 l/s pr. rum, hvilket ligger på et lavere niveau end det dansk-svenske krav, med mindre ASHRAE 62 skal forstås således, at alle sekundære rum, der ikke har karakter af opholdsrum, skal tælles med ved opgørelsen.

| Bolityp areal | Bolityp beboere | | Luftsk. $0,5 \text{ h}^{-1}$ | Udsugning | | Person- behov | Tobaks- rygning | Fugt- kontrol | |
|--------------------|--------------------|-------|---------------------------------|-----------|------|------------------|--------------------|------------------|-----|
| | (1) | (2) | | normal | min. | | | | |
| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) |
| 40 m ² | 1 | K+B | 14 | 35 | 6 | 4 | | 7 | |
| 50 m ² | 2 | K+B | 18 | 35 | 6 | 8 | 22 | 14 | |
| 70 m ² | 3 | K+B+T | 24 | 45 | 10 | 12 | 44 | 22 | |
| 100 m ² | 4 | K+B+T | 35 | 45 | 10 | 16 | 67 | 29 | |
| 140 m ² | 5 | K+B+B | 49 | 50 | 12 | 20 | 89 | 36 | |

Tabel 3. Udeluftbehov i l/s for udvalgte boligstørrelser og -typer.

- (1) boligens nettoetageareal
 (2) forudsat antal beboere pr. bolig
 (3) forudsat udstyr, K=køkken, B=baderum, T=separat wc
 (4) udeluftbehov som følge af kravet $0,35 \text{ l/s m}^2 = \text{luftskifte } 0,5 \text{ h}^{-1}$
 (5) udeluftbehov som følge af kravet om udsugning fra køkken, bad og wc
 (6) mindste tilladte udsugning efter BR-82
 (7) mindste personrelaterede udeluftbehov for ikke rygere
 (8) udeluftbehov, når 1 beboer er ikke ryger og de øvrige ryger 2 cigaretter pr. time hver, forudsat CO-koncentration $1,75 \text{ ppm}$
 (9) udeluftbehov ved fugttilførsel $2,5 \text{ kg/døgn}$ pr. beboer, forudsat opfugtning af rumluft 4 g/m^3

Luftbehov for
boliger og
personer

Byggeforskrifternes basisventilation ligger væsentligt over de førnævnte personrelaterede udeluftbehov ved typiske personbelastninger med ikke-rygere, jf. tabel 3. Dette er imidlertid også nødvendigt af flere grunde. For det første kan personernes opholdssted i boligen skifte, medens udelufttilførslen normalt ikke kan dirigeres selektivt til opholdsstedet. Der bør derfor være en passende sikkerhed for, at basisventilationen svarer til personbehovet ikke alene for boligen som helhed, men også for begrænsede dele af boligen. For det andet skal basisventilationen også sikre, at luftforureninger fra andre kilder end personer holdes nede. For det tredje skal basisventilationen begrænse luftfugtigheden, således at der ikke opstår fugtgener eller fugtskader.

Derimod er basisventilationen efter tabel 3 ikke klart på den sikre side i forhold til det personrelaterede udeluftbehov, såfremt der ryges i boligen. Ved et højt tobaksforbrug må det påregnes, at der ikke kan opnås acceptabel luftkvalitet uden forceret ventilation. En medvirkende grund til, at basisventilationens opgave

ikke omfatter sikring mod tobaksrøg i fuldt omfang, er, at belastningen fra tobaksrygning sjældent er jævnt fordelt over tid og sted, således at en ventilering efter det øjeblikkelige og stedlige behov er langt mere effektiv end konstant ventilation.

Udeluftbehov uden for brugstiden

Nedsat
basisventilation

Et spørgsmål, som ventilationsforskrifter ikke altid tager klar stilling til, er, om basisventilationen skal opretholdes til stadighed, eller om den må afbrydes helt eller delvis. I denne forbindelse må bemærkes, at boliger i modsætning til de fleste arbejdsrum og rum, hvori mange mennesker samles, normalt er i brug i alle eller næsten alle døgnets timer. Byggeforskrifternes generelle energisparekrav om begrænsning af udelufttilførsel i perioder, hvor rummene ikke benyttes, må antages at være beregnet på tilfælde, hvor der forekommer planmæssige og klart adskilte brugsperioder og ikke-brugsperioder, derimod næppe på tilfælde, hvor ikke-brugsperioderne er uforudsigelige og overvejende af kort varighed.

Nordiske
forslag

I det kommenterende afsnit i NKB-luftkvalitet anføres, at basisventilationen på $0,35 \text{ l/s m}^2$ (dog mindst 4 l/s pr. person i soverum) gælder i boligens brugstid, men samtidigt nævnes, at denne ventilation også bør opretholdes uden for brugstiden, og at den i det højeste kan reduceres, hvis boligen i længere tid, fx i ferieperioder, står ubenyttet. Begrundelsen herfor er dels, at der er fare for, at beboerne undlader at indkoble basisventilationen, når den er afbrydelig, dels at der også uden for brugstiden er behov for at bortventilere forureninger og fugt, som ikke udgår fra personer og ikke ophører, når boligen forlades.

Svenske regler

Efter de svenske byggeforskrifter SBN 1980 må ventilationsinstallationer i etageboliger ikke udføres således, at basisventilationen kan afbrydes eller mindskes under $0,35 \text{ l/s m}^2$. Hvis et mekanisk ventilationsystem i et enfamilieshus udføres således, at udelufttilførslen kan reduceres til mindre end $0,35 \text{ l/s m}^2$,

skal det markeres, at den reducerede ventilation er beregnet til anvendelse i perioder, hvor beboerne ikke opholder sig i boligen.

Danske regler

De danske forskrifter BR-82 anfører tværtimod, at basisventilationen i almindelighed skal kunne nedreguleres, dog må den ikke kunne afbrydes helt. I en mekanisk ventileret bolig med fx et køkken og et baderum er det tilladt at reducere udelufttilførslen fra 35 l/s til 6 l/s, jf. tabel 3. Denne bestemmelse synes ikke at harmonere med de overvejelser, som NKB-luftkvalitet hviler på.

Udeluftbehov ved afgangning fra byggematerialer

Afgasning

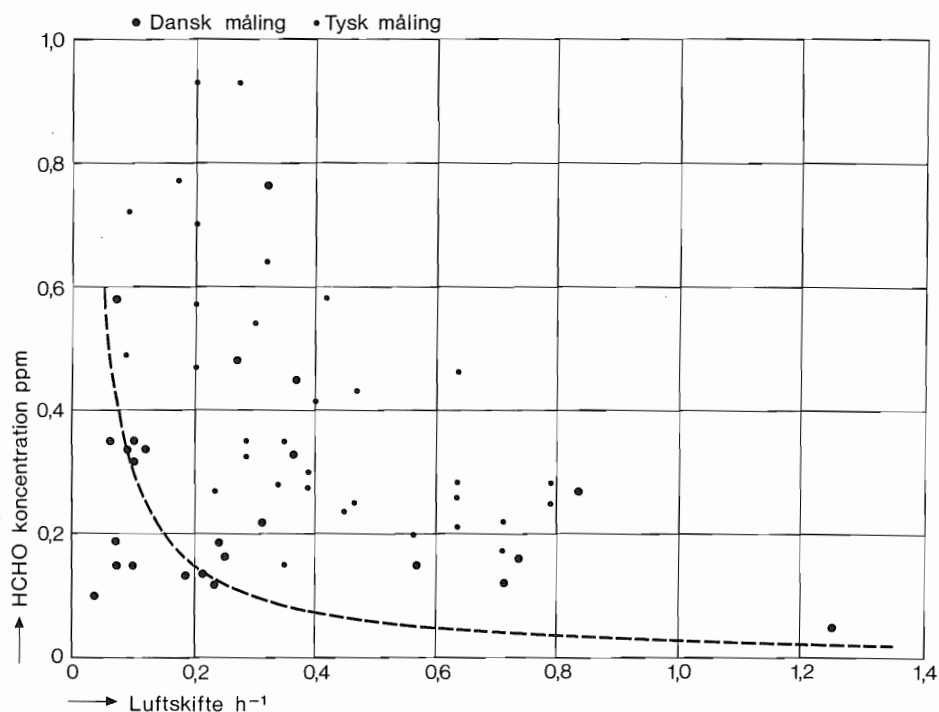
I de senere år har man været opmærksom på, at byggematerialer kan afgive gasser, som enkeltvis eller i kombinationer kan give lugtgener, øjen- eller slimhindeirritation og muligvis risiko for andre helbredsskader. Den kvantitative viden om problemet er endnu ret begrænset. De bedst kendte eksempler er formaldehydafspaltning fra spånplader og isoleringsmateriale fremstillet af ureaformaldehyd.

Naturlig radioaktivitet

Et beslægtet problem, som især har været diskuteret i Sverige, er, om afgivelse af den radioaktive gas radon fra jordbunden under bygninger og fra radiumholdige byggematerialer kan give en radiologisk belastning på mennesker, der ved langtidspåvirkning har helbredsmæssige konsekvenser. Problemet antages at være mindre i Danmark, hvor forekomsten af radioaktive stenmaterialer synes begrænset.

Forholdsregler

I første række bør disse påvirkninger naturligvis søges kontrolleret gennem anvendelse af byggematerialer med lav afgasningsrate og lavt radiumindhold, men da afgivelsen af gasser næppe kan elimineres helt, må boliger ventileres for at sikre mod for høje gaskoncentrationer. I NKB-luftkvalitet fremføres som et hovedargument for at sætte basisventilationen i brugstiden til $0,35 \text{ l/s m}^2$, at en lufttilførsel af denne størrelse skønnes rimelig og ønskelig på baggrund af den nuværende viden om afgangning og den usikkerhed, som iøvrigt råder på området.



Figur 2. 25 danske og 32 tyske målinger af HCHO-koncentrationen i rumluft i huse, hvor der er anvendt væsentlige mængder af spånplader af traditionel kvalitet. De danske målinger vedrører en hustype med ca. $1,7 \text{ m}^2$ spånplade pr. m^3 rumvolumen. Den punkterede kurve svarer til den grænse, som bygningsreglementets nye krav til spånplader hviler på.

Formaldehyd fra spånplader

Den hygiejniske grænseværdi for koncentrationen af HCHO (formaldehyd) på arbejdspladser er i Danmark 1 ppm for eksisterende anlæg og 0,3 ppm for nye anlæg. For boliger anbefales en grænse på 0,12 ppm i Danmark og 0,10 ppm i Tyskland og Holland. Figur 2 viser danske og tyske målinger af HCHO-koncentrationen i nogle boliger, hvor de rumafgrænsende bygningsdele i stor udstrækning bestod af spånplader af traditionel kvalitet. Der målttes HCHO-koncentrationer på op til ca. 1 ppm ved et luftskifte på $0,25 \text{ h}^{-1}$ og op til ca. 0,5 ppm ved luftskiftet $0,5 \text{ h}^{-1}$. For med sikkerhed at holde koncentrationen under 0,12 ppm må luftskiftet formodentlig hæves til 2 h^{-1} , hvilket er vanskeligt at acceptere. Boligministeriet indførte derfor i 1980 krav om prøvning og kontrol af spånplader til byggeriet, der tilsigtede at sænke afgasningsraten så meget, at HCHO-koncentrationen kom under den punkterede kurve i figur 2 ved anvendelse

af indtil $1,8 \text{ m}^2$ spånplade pr. m^3 rumvolumen. Der foreligger endnu ingen undersøgelser, som viser, om dette mål er nået i praksis.

Udeluftbehov ved fugtbelastning

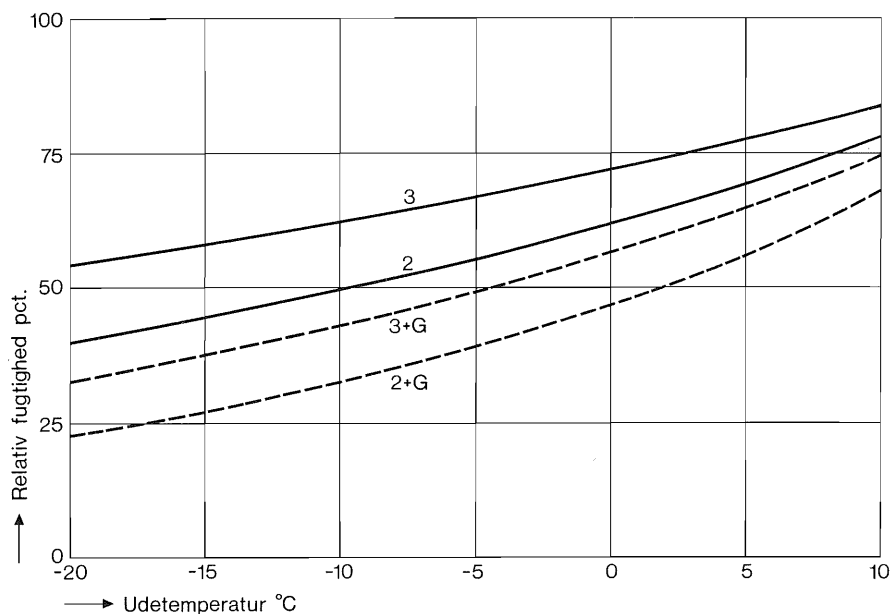
Fugtgrænser

Basisventilationen har som allerede nævnt også til formål at begrænse luftens vanddampindhold. Luftens fugtighedsgrad har inden for området af normale rumtemperaturer ringe direkte indvirkning på komfortopfattelsen. En øvre begrænsning af luftfugtigheden er først og fremmest nødvendig for at hindre kondensation på bygningsdele, idet kondensation forårsager bygnings-skader eller for hurtig nedbrydning af byggematerialer. Samtidigt rummer det fugtige miljø i kondensationsområder betingelser for svampevækst, der kan fremkalde lugtgener og allergitilfælde. Der sættes sædvanligvis ikke nedre grænser for luftfugtigheden, fordi de lave fugtigheder, som kan forekomme i boliger, ikke regnes for særlig kritiske, i hvert fald ikke for raske personer.

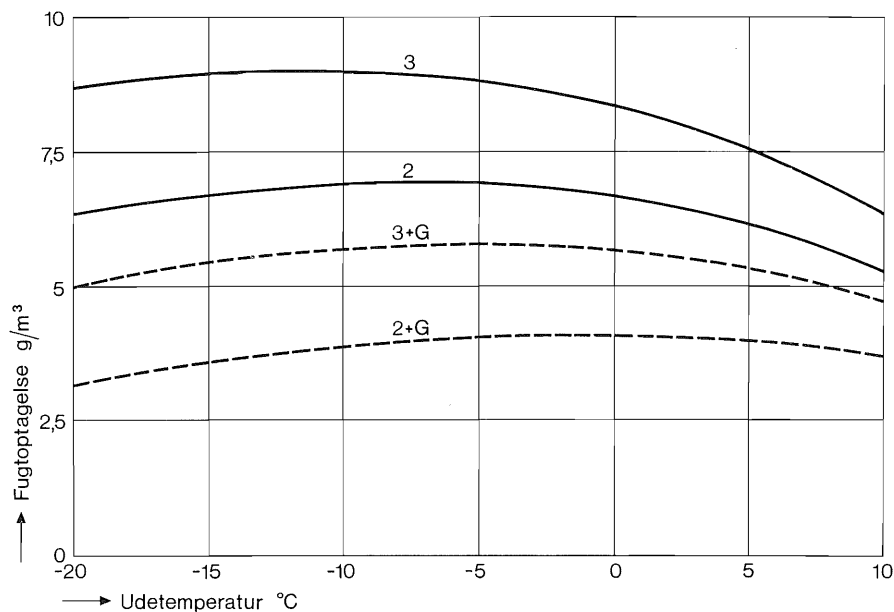
Svampesporer og husstøvmider kan forårsage allergiske symptomer hos overfølsomme personer. Forekomsten af svampe og husstøvmider har en sammenhæng med luftfugtigheden, men forholdene er næppe så afklarede, at der kan opstilles andre dimensioneringskriterier end det nævnte hensyn til at undgå kondensation. Det anbefales dog ofte, at der også sættes en øvre grænse for luftens relative fugtighed ved fx 65 pct. for at hæmme svampevækst, samt at fugtigheden holdes under 45 pct. i den koldeste årstid for at bekæmpe husstøvmider.

Kondensation på vinduer

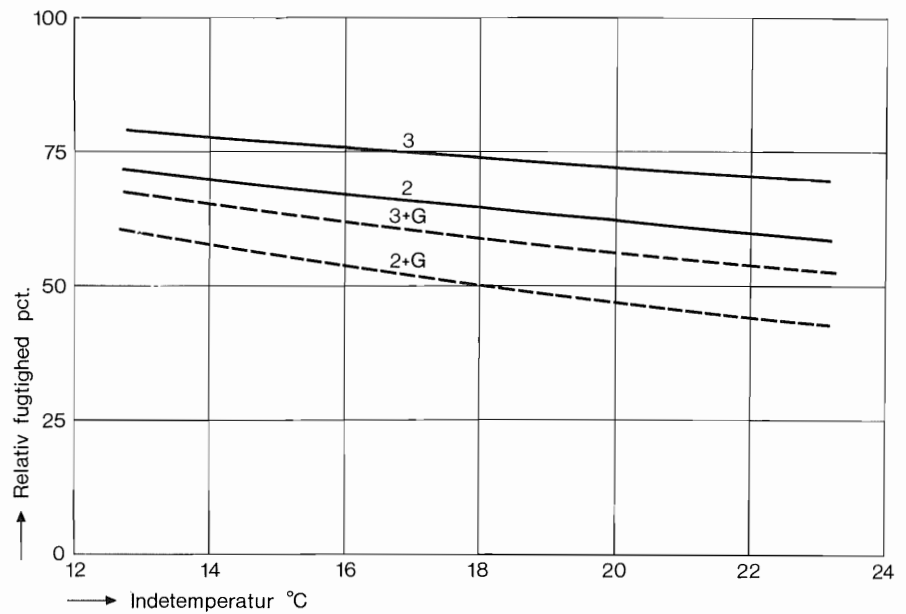
De områder, som er mest udsat for kondensation, er vinduerne. På figur 3-6 er anskueliggjort de grænsetilstande, hvor kondensationen netop begynder på termoruder med 2 og 3 lag glas med 12 mm luftmelletrum. Figurerne er baseret på en beregning af varmetransmissionen gennem glaspartiet af et 1 m højt vindue, idet strålingen og konvektionen er beregnet hver for sig under forudsætning af, at overfladerne er tørre, og at der ikke optræder direkte eller diffus solstråling. Beregningen gælder gennemsnittet af glasfladen. I et lokalt område



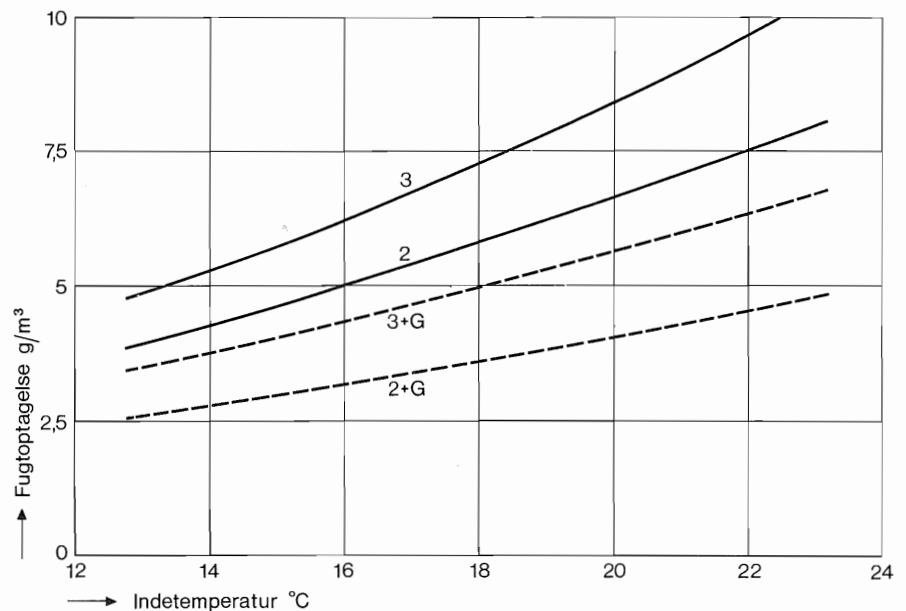
Figur 3. Relativ fugtighed af indeluft, som netop giver kondensation på vinduer, afhængigt af udetemperaturen ved fastholdt indetemperatur på 20 °C. Denne og følgende tre figurer er beregnet for 1 m høje termoruder med 12 mm glasafstand. Kurverne mærket 2 og 3 gælder for henholdsvis to og tre glaslag. Kurverne mærket 2+G og 3+G gælder for vinduer med henholdsvis to og tre glaslag samt et tætsluttende, ikke fugtstandsede gardin.



Figur 4. Forøgelse af indelufts fugtindhold, som netop giver kondensation på vinduer, afhængigt af udetemperaturen ved fastholdt indetemperatur på 20 °C. Udeluftens fugtighed forudsættes at være 90 pct.



Figur 5. Relativ fugtighed af indeluft, som netop giver kondensation på vinduer, afhængigt af indetemperatur ved fastholdt udetemperatur på 0 °C. Se også tekst til figur 3.



Figur 6. Forøgelse af indelufts fugtindhold, som netop giver kondensation på vinduer, afhængigt af indetemperaturen ved fastholdt udetemperatur på 0 °C og udefugtighed på 90 pct. Hvis 2 glaslag + virkeligt gardin placeres midtvejs mellem kurverne 2 og 2+G, bliver den kritiske fugtoptagelse ved en indetemperatur på 17 °C:

| udetemperatur | -10 | -5 | 0 | +5 | +10 | 0 °C |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|------------------|
| fugtoptagelse | 4,6 | 4,6 | 4,4 | 4,0 | 3,3 | g/m ³ |

langs den nederste kant kommer kondensationen lidt tidligere.

I praksis trækkes ofte gardiner for vinduerne, hvilket øger kondensationsrisikoen. Der er derfor også vist kurver for 2- og 3-lags termoruder med et idealt gardin, som er forudsat at være konvektionstæt men diffusionsåbent. Kurven for et vindue med virkeligt gardin, der ikke slutter tæt, vil ligge et sted imellem kurverne for vindue uden gardin og vindue med idealt gardin.

Tilladelig
opfugtning

Figur 3 viser den relative luftfugtighed, ved hvilken kondensationen begynder, i afhængighed af udetemperaturen ved en fast indetemperatur på 20 °C. Figur 4 viser den tilsvarende forskel mellem indeluftens og udeluftens fugtindhold målt i g/m^3 under forudsætning af, at udeluftens relative fugtighed er 90 pct. Denne forskel udgør det fugttilskud til ventilationsluften fra fugtkilder i boligen, som netop fremkalder kondensation på ruden. Det bemærkes, at kurverne forløber ret fladt, hvilket betyder, at kondensationsrisikoen ved iøvrigt uændrede forhold i boligen er nogenlunde uafhængig af årstiden. Forholdene kan synes at være lidt mere kritiske ved relativt høje udetemperaturer omkring 10 °C. Denne tendens vil forsvinde, hvis der tages hensyn til, at den gennemsnitlige udeluftfugtighed er mindre end 90 pct. i milde perioder. På den anden side vil et ønske om at holde indeluftfugtigheden under 65 pct. i disse perioder trække i modsat retning.

Figur 5 og 6 viser tilsvarende kurver, når det forudsættes, at udetemperaturen holdes på 0 °C, medens indetemperaturen varierer. Det ses, at kondensationsrisikoen øges, når indetemperaturen sænkes.

Sammenfattende kan siges, at et fugttilskud på 3 g/m^3 normalt ikke vil give kondensation, men at man må vente, at der opstår problemer ved et fugttilskud på 4 á 5 g/m^3 i boliger med 2-lags vinduer, når rumtemperaturen sænkes og gardiner trækkes for.

Fugtproduktion

Den direkte fugtafgivelse fra en person udgør ca. 1 kg pr. døgn, jf. tabel 1. Den samlede fugtproduktion

fra personer og processer i en normal husholdning er betydeligt større. En del heraf bortventileres muligvis ved punktudsugning og forceret ventilation som fx vinduesoplukning i forbindelse med bad og tøjttørring. Det må imidlertid anses for rimeligt, at basisventilationen dimensioneres til at kunne fjerne en fugtproduktion på 2 til 3 kg pr. person og døgn, jf. SBI-anvisning 139: Bygningers fugtisolering, der nævner tallet 10 kg/døgn for en husstand på 4 personer. Med et tilladeligt fugttilskud på 4 g/m^3 bliver den nødvendige udelufttilførsel ca. 7 l/s pr. person, hvilket ifølge tabel 3 for typiske boligstørrelser svarer omtrent til $0,35 \text{ l/s m}^2$ eller et luftskifte på $0,5 \text{ h}^{-1}$.

Luftbehov

Der er således også i fugthensynet en begrundelse for at sætte mindste tilladelige udelufttilførsel til boliger til $0,35 \text{ l/s m}^2$. Den primære fugtproduktion i boliger er ujævnt fordelt, men på grund af buffervirkning fra tekstiler og bygningsoverflader, der skiftevis optager og afgiver fugt, opstår der en udjævning og dermed også en sekundær fugtproduktion uden for boligens brugstid. Dette forhold taler for, at basisventilationen opretholdes uden for brugstiden.

Kondens som indikator

Det har ofte været nævnt, at forekomsten af kondensation på 2-lags termoruder kan tages som en indikator for, at boligventilationen er utilstrækkelig. Dette er naturligvis rigtigt, for så vidt man ser det som et hovedformål med ventilationen at forebygge fugtproblemer. Vinduerne og deres nærmeste omgivelser er mest udsat for fugtskader, og samtidigt er kondensationen let at observere.

Betragtes imidlertid et rum, hvor fugttilførslen alene kommer direkte fra personer (dette kunne tilnærmelsesvis gælde for et soveværelse), vil begyndende kondensation på vinduer svare til en udelufttilførsel på ca. 2,5 l/s pr. person, hvilket er klart mindre end det alment accepterede hygiejniske mindstemål på 4 l/s pr. person. Kondensation kan således også være en indikator for, at luftkvaliteten er for ringe i situationer, hvor fugtbelastningen hovedsageligt skyldes vanddampafgivelse fra personer.

Litteratur

- M. Pettenkofer: Über den Luftwechsel in Wohngebäuden
München 1858
- C. Yaglou, E. Riley, D. Coggins: Ventilation requirements
ASHVE Transactions vol. 42, 1936 og vol. 43, 1937
- C. Yaglou: Ventilation requirements for cigarette smoke
ASHVE Transactions vol. 61, 1955
- Svensk Bygg Norm, SBN 1980
Statens planverks författningssamling
- Ventilation for acceptable indoor air quality
ASHRAE Standard 62-1981
- Bygningsreglement 1982
Byggestyrelsen
- Afgasning fra byggematerialer
SBI-rapport 137, 1982
- Formaldehyd som indeklimaproblem i bebyggelsen Åhaven,
Odense
Teknologisk Institut 1982
- W. Cain, B. Leaderer: Ventilation requirements in
occupied spaces during smoking and non-smoking occu-
pancy
Environment International vol. 8, 1982
- W. Thayer: Tobacco smoke dilution recommendations for
comfortable ventilation
ASHRAE Transactions vol. 88, 1982
- G. Huber, H. Wanner: Raumluftqualität und minimale
Lüftningsraten
Gesundheits-Ingenieur vol. 103, 1982
- P. Fanger, B. Berg-Munch: Ventilation strategies for
the control of body odour
4. International Symposium on the Use of Computers for
Environmental Engineering Related to Buildings, Tokyo
1983
- J. Wegner: Untersuchungen des natürlichen Luftwechsels
in ausgeführten Wohnungen, die mit sehr fugendichten
Fenstern ausgestattet sind
Gesundheits-Ingenieur vol. 104, 1983
- Indeklimaets påvirkninger
SBI-rapport 110, 2. udgave, 1983
- Bygningers fugtisolering
SBI-anvisning 139, 1984

Supplerende ventilation

Oplukkelige
vinduer

Det fundamentale middel til at skabe supplerende ventilation er boligens oplukkelige vinduer og døre. I ventilationsforskrifter findes dog også bestemmelser om egentlige ventilationsinstallationer beregnet til en begrænset, periodisk forcering af ventilationen i køkkener, badeværelser og eventuelle andre hygiejnerum.

Periodisk
udsugning

Således skal der ifølge NKB-luftkvalitet være mulighed for tidsbegrænset udsugning på 30 l/s fra indeliggende badeværelser uden oplukkelige vinduer. Desuden skal der i køkkener være en styrbar indretning, fx en emhætte med indbygget eller tilsluttet ventilator, som kan opfange 80 pct. af de forureninger, som opstår under madtilberedning ved komfuret, inden de spredes i rummet. Det nævnes i det kommenterende afsnit til NKB-luftkvalitet, at den luftstrøm, som er nødvendig for at sikre opfangningsevnen på 80 pct, kan variere fra 25 til 100 l/s afhængigt af emhættens udformning. I SBI-særtryk 184 fra 1969 er vist, at opfangningsevnen især afhænger af den frie højde mellem komfuret og emhætten, og at det praktiske problem ved at mindske højden for at spare luft og energi uden at besværliggøre arbejdet ved komfuret eventuelt kan løses ved hjælp af en forskydelig skærm.

De svenske byggeforskrifter SBN 1980 har næsten de samme bestemmelser som NKB-luftkvalitet med den vigtige tilføjelse, at de sædvanlige krav om begrænsning af støjniveaueet fra installationer ikke gælder under for-

cering af ventilationen. Brugere kan tolerere et højere støjniveau, når støjen fremkommer ved en frivillig, tilsigtet anvendelse af et afbrydeligt ventilationsaggregat. En moderat støjgenerering kan måske endda garantere, at driftstiden ikke bliver længere end nødvendigt.

Den amerikanske standard ASHRAE 62-1981 anfører, at der intermittent skal kunne udsuges 50 l/s fra køkkener og 25 l/s fra badeværelser.

De danske byggeforskrifter stiller ingen bestemte krav om forceringsmuligheder ud over oplukkelige vinduer.

Litteratur

Indeliggende køkkener - brug og ventilation
SBI-særtryk 184, 1969

G. Westerlund, H. Ubisch: Prov med köksfläktar och spiskåper
VVS (svensk), 1974

Ventilationsbestemmelser i dansk byggelovgivning

Historisk
udvikling

De bestemmelser i dansk byggelovgivning, som skal sikre, at boliger har tilstrækkelige ventilationsmuligheder, har siden midten af forrige århundrede gennemløbet en udvikling, der vel afspejler en voksende hygiejnisk forståelse, men som især er knyttet til forandringer i boligens opvarmningsinstallationer, kogeinstallationer og sanitære installationer. Bestemmelserne er centreret om oplukkelige vinduer og om aftræk fra køkkener og hygiejnerum. En almindelig tendens er, at kravene til aftræk bliver mere omfattende i takt med, at der indføres flere sanitære installationer, og i takt med, at de skorstenstilsluttede ildsteder forbedres og helt eller delvis afskaffes. Tidligere ventileredes boligen i det mindste med den luft, som skorstenene fjernede fra rummene.

Københavns byggelov af 1856 kender kun åbne, murede køkkenildsteder samt separate latrinhuse, der skal have et rør i taget til afledning af uddunstningerne. Jernkomfurerne dukker op i Københavns byggelov af 1871. Det anføres i loven, at der foruden komfurets skorsten skal anbringes et emrør, hvor omstændighederne tillader det.

Aftræk fra
klosetter

De første bestemmelser om etageklosetter kommer i 1875, og fra 1889 bliver de mere detaljerede. Som hovedregel skal klosetrum forsynes med aftræksrør ført op over tag, men der kan opnås fritagelse for dette krav for rum med vandkloset (til forskel fra luftkloset), når rummet har oplukkeligt vindue og tætsluttende dør.

I forbindelse med regler for tilslutning af flere klosetrum til fælles aftræksrør nævnes i 1898, kun 6 år efter, at Københavns første elværk var taget i drift, muligheden af at anvende udsugning med elektrisk ventilator.

Køkkenaftræk

Københavns sundhedsvedtægt af 1918 kræver, at der skal være aftræk fra ethvert køkken (også i eksisterende bygninger), hvor der benyttes fritstående gasapparater. Faste gasildsteder kræves allerede i 1906 sluttet til aftræksrør, men trækafbryderen beskrives først i 1927.

1939-byggelov

Københavns byggelov af 1939 kræver generelt aftræk fra køkken, vaskerum og tørrerum. Nødtørrerum og baderum kan enten udføres med aftrækskanal samt 100 cm^2 spalte under dør eller uden aftrækskanal men med oplukkeligt vindue, dog gælder særlige regler for baderum med ildsteder. Aftrækskanaler skal have 150 cm^2 lysning, og hver kanal må kun ventilere ét rum. Kanalen må ikke benyttes som skorsten men skal så vidt muligt føres lodret op langs skorstensrør og skal afsluttes 0,3-0,5 m over tag.

NKB-regler og bygningsreglement

I årene 1958-62 udarbejdes under NKB et sæt nordiske retningslinier for bestemmelser vedrørende boligventilation. Dette arbejde viderefører linien fra Københavns byggelov af 1939 og præger på afgørende måde kapitel 11 i bygningsreglementet, der efterhånden indføres i alle kommuner. I reglementets 1961-udgave fastslås, at ventilationssystemet enten skal være af type S eller af type F. Ved type S kræves en aftrækskanal med lysning 200 cm^2 fra køkken, 150 cm^2 fra baderum og 100 cm^2 fra særskilt wc-rum. Ved type F kræves en udsugning på 17 l/s fra køkken, 14 l/s fra baderum og 11 l/s fra særskilt wc-rum. Ved begge typer skal lufttilførslen til beboelsesrum og køkkener ske ved oplukkeligt vindue, lem eller dør til det fri forsynet med reguleringsbeslag eller ved regulerbar ventil til det fri med 30 cm^2 lysning. Bade- og wc-rum skal enten have oplukkeligt vindue på 2000 cm^2 eller ventil på 100 cm^2 til det fri eller en åbning på 200 cm^2 i eller ved døren

til det tilstødende rum. Hver ventilationskanal må ved type S kun ventilere ét rum. Ved type F kan der på visse betingelser tilsluttes en lejlighed pr. etage til samme kanal. De vigtigste betingelser er, at der anvendes udsugningsventiler i rummene, og at trykfaldet over en ventil ikke er for lille. Siden 1966 kræves et trykfald på mindst 100 Pa.

Systemvalg

Disse principper fastholdes stort set i de senere udgaver af bygningsreglementet. Valgfriheden mellem type S og type F bevares i lavt byggeri men indskrænkes i højt boligbyggeri. Fra 1977 er ventilationssystemet type F obligatorisk i etageboliger med indeliggende bade- og wc-rum og fra 1982 i alle etageboliger. Herved har reglementet formodentlig blot indhentet en udvikling, der var løbet forud for reglementet. Antydninger af, at boligventilation kan udføres efter andre systemer end type S og F dukker op i 1972. Bestemmelserne herom forbliver dog ret generelle. Det mest konkrete er en henvisning til DS 447 i 1982 reglementet.

Udsugning

Udsugningen ved systemet type F ændres i 1966 til 22 l/s fra køkkener, 17 l/s fra baderum og 8 l/s fra særskilte wc-rum. I 1977 foretages i forbindelse med overgangen til SI-enhedssystemet en afrunding til 20 l/s fra køkkener, 15 l/s fra baderum og 10 l/s fra særskilte wc-rum.

Lufttilførsel

Med hensyn til lufttilførslen indskrænkes bestemmelsen om reguleringsbeslag på vinduer m.m. i 1966 til at gælde soverum og køkkener og i 1972 til køkkener alene. Åbningen i eller ved døren til bade- og wc-rum formindskes i 1966 til 100 cm^2 . Til gengæld gøres regulerbar udeluftventil med fri åbning på 30 cm^2 obligatorisk i beboelsesrum fra 1982. Begreberne regulerbar ventil og fri åbning defineres ikke nøjere i bygningsreglementet. Det har været diskuteret, om et regulerbart vindue kan gøre det ud for en ventil. Den almindelige opfattelse synes at være, at vinduer med kvalitetsbeslag, der tillader finregulering og fastlåsning i ventilationsstilling ikke adskiller sig funktionelt fra andre anvendelige udeluftåbninger.

Luftskifte

Samme år indføres den tidligere omtalte almindelige regel om, at luftskiftet skal være mindst $0,5 \text{ h}^{-1}$ i en boligenhed. For mindre boliger svarer de eksisterende bestemmelser om udsugning dog til et større luftskifte. Endvidere ændrer luftskiftereglen ikke ved de eksisterende bestemmelser om mulighed for nedregulering af udsugningen. I en normalbolig med køkken og badeværelse kan udsugningen nedreguleres fra 31 til 6 l/s efter BR-61, fra 39 til 8 l/s efter BR-66 og BR-72 og fra 35 til 6 l/s efter BR-77 og BR-82. I forhold til systemer af type S synes luftskiftereglen kun at have teoretisk betydning, da aftrækskanaler i praksis næppe kan dimensioneres til en bestemt luftydelse. Iøvrigt indrømmes der ved type S også en nedreguleringsmulighed, idet aftrækskanalerne kan udstyres med ventiler, der varierer det fri gennemstrømningsareal fra 100 til 20 pct. af kanalens lysning.

Kanalers højde over tag

En detalje som aftrækskanalers højde over tag ved system S har været ændret flere gange. Der skelnes mellem tage med lav rejsning (herunder flade tage) og tage med høj rejsning. Grænsen sættes ved en taghældning på 27° i BR-61 og 30° i BR-66 og senere udgaver. Ved lav rejsning er den krævede højde 0,5 m over tagfladen efter BR-61 og 0,3 m over tagfladen efter BR-66 og senere udgaver. Ved høj tagrejsning kræves, at aftrækskanalen føres 0,3 m op over tagryggen efter BR-61, BR-66 og BR-72, medens der efter BR-77 og BR-82 kræves en højde på 0,75 m over tagfladen. Aftrækskanalen kan dog efter BR-66 og senere udgaver afsluttes i højde med tagryggen, hvis kanalen er anbragt inden for en vis vandret afstand fra tagryggen. Det synes tvivlsomt, om den lempelse for tage med høj rejsning, som er indført i 1977, er velbegrundet. Vindtrykket over tage er i hovedsagen negativt, men netop ved stejle tage kan trykket blive positivt på den nederste del af tagfladen i vindsiden.

Emhætter i enfamiliehuse

I den sidste snes år har det været almindeligt at ventilere køkkener i enfamiliehuse med en emhætte med indbygget ventilator, som afkaster luften til det fri gennem en kanal, der normalt er lodret men kan være

ført vandret ud. I sit princip synes denne løsning ikke at være ganske klar. Emhætten er kun beregnet til intermitterent brug, og dermed ligner løsningen ikke et sædvanligt system af type F. Samtidigt må det anses for tvivlsomt, om emhætten med afkastningskanal i stillandsperioderne kan fungere som en type S aftrækskanal. Løsningen nævnes imidlertid udtrykkeligt i BR-66 som en tilladelig afvigelse fra de sædvanligt accepterede systemer af type S og F. I de senere udgaver af bygningsreglementet omtales emhætteløsningen ikke. Årsagen hertil er muligvis, at løsningen ikke formelt strider mod bestemmelserne for type F anlæg, idet reglementet ikke kræver, at udsugningen fra køkkener skal være uafbrydelig. Forudsætningen for at opfatte emhætten som et anlæg af type F er imidlertid, at reglementet tolkes derhen, at det er lovligt at anvende en blanding af type S og type F systemer på den samme bolig, idet udsugningen fra bad og wc hyppigst sker ved simple aftrækskanaler i enfamiliehuse.

Litteratur

Københavns byggelove af 1856, 1871, 1889 og 1939

Københavns Sundhedskommissions bekendtgørelser af 19.3.1875, 15.6.1898, 1.6.1902, 1.11.1905 og 18.8.1906

Sundhedsvedtægt af 4.11.1918 for København med tillæg af 25.11.1927

Til Københavns byggelov af 1939 hører regulativer vedrørende

- indretning af nødtørftsrum (1943, 1948, 1956)
- indretning af baderum (1940, 1947, 1952)
- udførelse af aftrækskanaler og ventilationsanlæg (1948, 1954, 1963, 1969)
- anbringelse af gasildsteder (1943, 1950, 1956)

Retningslinier for bestemmelser vedrørende ventilation i boligbyggeri

Nordisk komité for bygningsbestemmelser 1962

Bygningsreglementer af 1961, 1966, 1972, 1977 og 1982
Boligministeriet, byggestyrelsen

J. Engelmark: Københavnsk etageboligbyggeri 1850-1900
SBI-rapport 142, 1983

Lufttransport gennem bygninger

Lufttransport

To ret adskilte problemområder med relation til boligventilation kan gøres til genstand for teoretisk behandling. Det første vedrører lufttransporten gennem bygninger. Målet med den teoretiske analyse er at opstille metoder til beregning af luftstrømme, som passerer bygningens rum, med udgangspunkt i parametre, der beskriver bygningen og dens installationer samt de ydre vejrpåvirkninger. Nedenfor refereres nogle hovedtræk af denne teori. En særlig betydning i sammenhængen har de parametre, der karakteriserer tætheden af bygningens klimaskærm. Spørgsmålet om, hvorledes klimaskærmens lækage måles og beskrives, behandles i det følgende kapitel.

Luftblanding

Det andet problemområde vedrører de interne luftstrømninger og luftblandeprocesser i ventilerede rum. En kortfattet diskussion af dette spørgsmål følger i et senere kapitel.

Beregningsmodeller for lufttransport

Matematiske
modeller

Der findes en ret fyldig litteratur om beregningsmodeller for lufttransporten gennem bygninger. En beregningsmodel må i almindelighed omfatte såvel ventilationssystemet som den vejrbedingede infiltration/exfiltration. De resulterende luftbevægelser er komplicerede at beregne nøjagtigt, fordi der er involveret et stort antal parametre, hvoraf nogle er vanskelige eller umulige at specificere i praksis, og fordi der optræder

vekselvirkninger mellem parametrene. Man kan således ikke i almindelighed foretage uafhængige beregninger af ventilationssystemets ydelse og af infiltrationen og derefter addere disse.

Da de beregningsmodeller, som har været forsøgt anvendt, bygger på mere eller mindre forenklede forudsætninger, kan det ikke forventes, at man ved modellernes hjælp kan forudsige særlig nøjagtigt, hvad luftbevægelserne bliver i givne situationer. Værdien af beregningsmodellerne består snarere i, at de giver mulighed for at vurdere de generelle konsekvenser af fx valg af ventilationssystem eller foranstaltninger til tætning af klimaskærmen. Den hidtidige litteratur om emnet synes dog i højere grad at handle om udvikling og gennemprøvning af beregningsmodeller end om anvendelse af modellerne på problemstillinger af generel interesse.

Enkeltcelle- og flercellemodeller

Simple modeltyper er baseret på, at bygningens indre betragtes som en enkeltcelle, hvori der overalt i samme vandrette plan hersker samme tryk. Der ses herved bort fra strømningsmodstand mellem rum. Dette kan være nogenlunde rigtigt for småhuse, hvor inderdørene i reglen er forholdsvis utætte og i praksis ofte står åbne. Til bygninger, hvor nogle inderdøre kan være forholdsvis tætte, fx entredøre til etageboliger, må anvendes flercellemodeller, der er mere besværlige at håndtere.

Drivkræfter

De drivkræfter, som fremkalder luftbevægelserne, er mekaniske drivkræfter fra ventilatorer, vindkræfter og termiske drivkræfter. Trykforskelle, der skyldes ventilatorer, er veldefinerede, når anlæggenes data, herunder især ventilatorkarakteristikken, foreligger. Ventilatorers virkemåde skal iøvrigt ikke analyseres nærmere her. Trykforskelle hidrørende fra vindpåvirkninger og termisk opdrift er vanskeligere at definere.

Vindpåvirkninger

Vindtryk

Når vinden blæser på tværs af en bygning, opstår der overtryk på vindsiden og undertryk på de tre øvrige sider og på taget, dog opstår der ved høj tagrejsning overtryk på den nederste del af tagfladen i vindsiden.

Blæser vinden diagonalt mod bygningen, bliver der overtryk på to vægge og undertryk på de to øvrige. Størrelsen af trykforskellen kan skrives

$$\Delta p = C \frac{1}{2} \rho v^2 \approx 0,65 C v^2$$

Δp trykafvigelse i forhold til det statiske tryk i den uforstyrrede vind i taghøjde, Pa

C dimensionsløs formfaktor

ρ luftens densitet, kg/m^3

v vindhastighed, m/s

Størrelsesordenen af C-faktoren kan anskueliggøres ved de eksempler, som er vist i tabel 4, og som vedrører de ydre flader på en bygning, hvis længde er den dobbelte af bredden. Tabelværdierne refererer til middeltrykket på den pågældende flade fundet ved modelforsøg i vindtunneller. På de enkelte flader optræder desuden betydelige lokale variationer. Figur 7, som gengives efter SBI-anvisning 128: Vindmiljø omkring bygninger, 1981, viser et eksempel herpå.

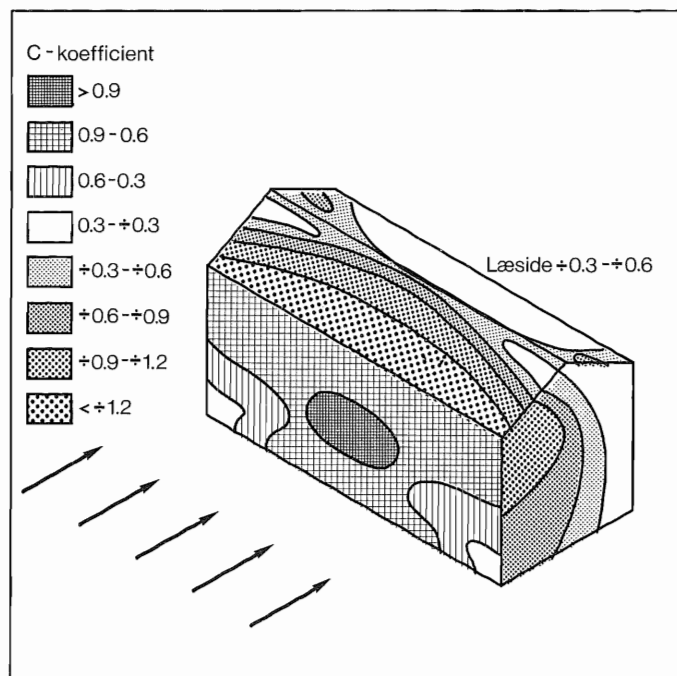
Sugning i
kanaler

Trykket for enden af ventilationskanaler, som udmunder i tagfladen, følger i hovedsagen vindtrykket på taget, men er også påvirket af vindens ejektorvirkning omkring munden. Denne afhænger på kompliceret måde af ventilationshættens udformning og højde over tagfladen samt af forholdet mellem lufthastighed i ventilationskanalen og vindhastighed. Omkring udmundinger på tage med hældning under 30° samt udmundinger tæt ved tagryggen på tage med større hældning opstår normalt et undertryk, der kan være af størrelse som vindens dynamiske tryk, men hyppigst er noget mindre. Undertrykket vokser svagt, når munden hæves over tagfladen.

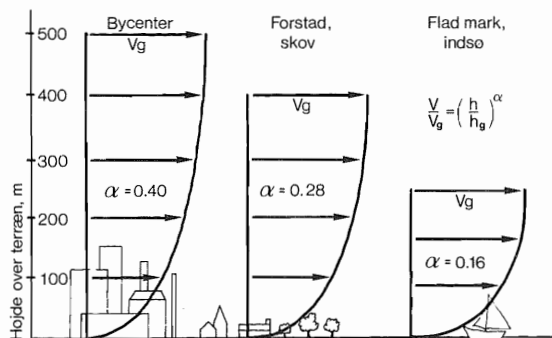
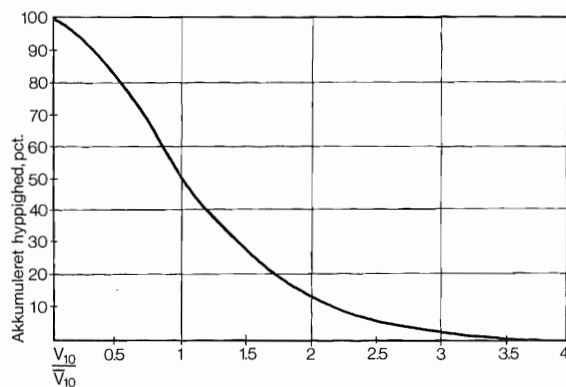
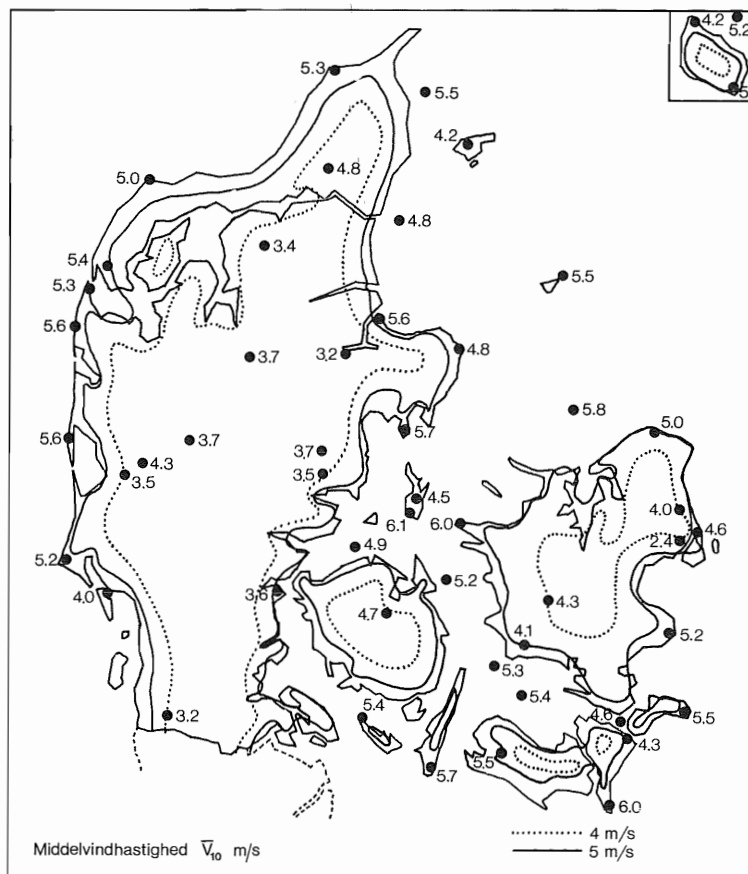
Detaljeret beskrivelse af trykfordelingen på en bygning i afhængighed af vindstyrke og -retning kræver en næsten uoverkommelig stor datamængde. I beregningsmodeller, som har til formål at belyse generelle træk, foretages derfor kraftige forenklinger. Ofte betragtes kun symmetriske bygninger og én eller to vindretninger, og i reglen ses bort fra lokale variationer af C-faktoren.

| Vindretning | Bygningsflade | 20° taghældning | 45° taghældning |
|-------------------------|---------------------|-----------------|-----------------|
| vind i normalretning | facade i vindside | + 0,6 | + 0,7 |
| | facade i læside | - 0,3 | - 0,5 |
| | gavl | - 0,7 | - 0,8 |
| | tagflade i vindside | - 0,7 | + 0,2 |
| | tagflade i læside | - 0,4 | - 0,5 |
| vind under 45° | facade i vindside | + 0,4 | + 0,4 |
| | facade i læside | - 0,5 | - 0,5 |
| | gavl i vindside | + 0,3 | + 0,4 |
| | gavl i læside | - 0,4 | - 0,4 |
| | tagflade i vindside | - 0,5 | 0 |
| | tagflade i læside | - 0,5 | - 0,5 |
| parallel vind | facade | - 0,4 | - 0,4 |
| | gavl i vindside | + 0,7 | + 0,7 |
| | gavl i læside | - 0,1 | - 0,1 |
| | tagflade | - 0,4 | - 0,4 |

Tabel 4. Eksempler på middelvindtryk på bygningsflader udtrykt ved C-faktor. Tabelværdierne er baseret på målinger i vindtunnel på bygningsmodel, hvis længde er den dobbelte af bredden. Vindtrykkene ændres ikke væsentligt, når bygningen gøres længere. Forkortes bygningen, bliver sugningen på facade og tagflade i læsiden mindre (efter Irminger, Nøkkentved, Jensen).



Figur 7. Eksempel på vindtrykkfordeling på en bygning med vindretningen vinkelret på facaden (efter SBI-anvisning 128).



Figur 8. Vindkort over middelvindhastighed i 10 m højde samt summeret hyppighed af vindhastighed i forhold til middelhastighed og vindhastighedsprofiler over forskelligt terræn (efter SBI-anvisning 128).

Meteorologisk
vind og
effektiv vind

Skal beregningen gælde gennemsnitsforhold, må der indsættes en effektiv middelvindhastighed. Den meteorologiske vindhastighed måles normalt i 10 m højde over åbent terræn. Dens middelværdi er i Danmark ca. 5 m/s ved kysten og 4 m/s inde i landet, se figur 8. De fleste bygninger ligger imidlertid i byområder. Vinden møder i bebygget terræn friktion, som bremser vinden i de nederste luftlag. Ved at anvende de formler for vindens gennemsnitlige højdeprofil over forskellige terrænklasser, som angives i figur 8, fås, at 4 m/s over åbent terræn svarer til 2,4 m/s i forstadsbyggelse og 1,4 m/s i tæt bebyggelse. For lavt byggeri skal disse hastigheder, der refererer til højden 10 m, måske yderligere reduceres, og i hvert fald kan de lokale læbetingelser påvirke bygningens vindeksponering.

Vindens
turbulens

Det skal tilføjes, at når vindtryk i beregningsmodellerne betragtes som statiske, er dette naturligvis også en forenkling. Den naturlige vind er i virkeligheden turbulent og vindtrykkene fluktuerende. Turbulensen indvirker på ventilationen på en meget kompleks måde, som endnu ikke er fuldt opklaret. De foreliggende undersøgelser tyder på, at turbulensen kan forårsage en ikke uvæsentlig forøgelse af ventilationen i forhold til den ventilation, som frembringes af en statisk vindpåvirkning med samme vindhastighed og -retning. At denne effekt kan opstå, forstås kvalitativt ved at betragte et hult legeme, fx en kasse, med definerede åbninger i en turbulent luftstrøm.

Har kassen en åbning i hver af to modstående sider, som er parallelle med vindretningen, vil der for en statisk betragtning ikke opstå en lufttransport gennem kassen, fordi vindtrykkene er ens på de to sider. I virkeligheden varierer trykkene tilfældigt på grund af turbulensen. Mellem de to sider optræder en trykdifferens, hvis middelværdi er nul, men som vil pumpe luft i skiftende retninger gennem åbningerne.

Har kassen kun én åbning, vil der for en statisk betragtning ikke strømme luft gennem åbningen, uanset hvor den er placeret. I virkeligheden vil turbulensen

skabe en tilfældigt pulserende ventilation i kassen, fordi der i perioder med trykstigning ud for åbningen sker en adiabatisk sammentrykning af luften i kassen, og ved trykfald en udvidelse af luften. Formodentlig har lavfrekvent turbulens størst betydning for fænomenet. Turbulensen må betyde forholdsvis mest, når trykvariationerne er af en størrelsesorden, der er sammenlignelig med de statiske drivtryk.

Termisk opdrift

Termik

De trykforskelle, som skyldes temperaturforskelle mellem inde og ude, kan skrives

$$\Delta p = \rho_o g \left(\frac{273}{T_u} - \frac{273}{T_i} \right) h \approx 0,043 (T_i - T_u) h$$

Δp trykforskel mellem ude og inde i højden h over det neutrale plan, Pa

ρ_o luftens densitet ved 273 K og 1013 mbar, kg/m^3

g tyngdeaccelerationen, m/s^2

T_u udetemperatur, K

T_i indetemperatur, K

h højde over det neutrale plan, m

Det forudsættes her, at temperaturen inde i bygningen overalt er den samme. Trykforskellen varierer lineært med højden, og i et vist niveau, der kaldes det neutrale plan, er det statiske tryk ude og inde ens.

Indsættes i formlerne fx $T_i - T_u = 20$ K, $h = 3$ m, $V = 2,4$ m/s og $C = 0,7$ ses, at de termiske drivkræfter og vindkræfterne vil være af samme størrelsesorden, ca.

2,5 Pa, for lavt byggeri under gennemsnitlige forhold i de koldeste måneder af året. Vinden dominerer over termikken, når vindstyrken er over middel, eller når temperaturdifferensen mellem inde og ude er lille. Termikken dominerer i koldt vejr med svag vind. I høje bygninger med gennemgående trappeskakter er termikken ofte mere betydende, selv om der tages hensyn til, at høje bygninger udsættes for større vindhastigheder.

Resulterende luftstrømme

Ulinearitet

Trykforskellene driver luftstrømme dels gennem de egentlige ventilationsåbninger, dels gennem klimaskærmens utætheder. Sammenhængen mellem luftstrøm og trykdifferens er ikke lineær. Man kan derfor ikke beregne luftstrømme svarende til de forskellige drivkræfter og derefter summere luftstrømmene. Man må i stedet summere drivkræfterne og bruge summen til at beregne luftstrømmen. Beregningen må i princippet gennemføres for hver ventilationsåbning eller fuge for sig, fordi trykkene varierer fra sted til sted, og fordi åbningerne kan have forskellig strømningskarakteristik. For at opnå forenkling søger man dog at sammenfatte åbninger med nogenlunde ensartede trykbetingelser og strømningskarakteristik under ét. For hver åbning eller gruppe af åbninger er luftstrømmen q_x en funktion af trykforskellen mellem ude og inde,

$$q_x = f(p_u - p_i)$$

For den betragtede boligenhed kan opskrives et antal ligninger af denne form, når man har det fornødne kendskab til åbningernes art og størrelse. Spørgsmålet om fremskaffelse af data herfor behandles i næste kapitel.

Indvendigt tryk

På forhånd kender man ikke trykniveauet indvendigt i bygningen eller beliggenheden af det neutrale plan. Det må betragtes som en ubekendt, der bestemmes ved hjælp af kontinuitetsligningen

$$\sum q_x = 0$$

Ligningen udtrykker, at den indstrømmende luftmængde er lig med den udstrømmende, idet q_x regnes med fortegn. Opgaven kan kun i meget enkle tilfælde løses analytisk. I almindelighed må beregningen udføres numerisk ved iteration. Nogle forfattere har anvendt grafiske hjælpemidler ved iterationen, andre har brugt analoge eller digitale regnemaskiner til løsningen. Når trykket eller trykfordelingen i bygningen er kendt, findes den

resulterende ventilation ved summation af alle positive (eller alle negative) q_x .

Mere nøjagtigt lyder kontinuitetsligningen

$$\sum \rho_x q_x = 0$$

idet der bør tages hensyn til, at det er massestrømmene og ikke volumenstrømmene, som skal balancere, når der optræder densitetsforskelle.

Store åbninger

Et specialtilfælde er et rum, der har en stor åbning til det fri frembragt ved oplukning af en dør eller et vindue. I åbningen vil der kunne opstå tvungne strømninger af betydelig størrelse dels på grund af turbulens, dels på grund af statisk trykforskel hidrørende fra vindpåvirkning eller mekanisk ventilation. Men selv i vindstille vejr vil der fremkomme en konvektionsstrømning, såfremt der er forskel på lufttemperaturen på de to sider.

Antages det, at rumtemperaturen er højere end udetemperaturen, og at åbningen er rektangulær og så stor, at den praktisk talt kortslutter rummet til det fri, vil det neutrale plan indstille sig i åbningens halve højde. Luften strømmer ind i rummet i åbningens nederste halvdel og ud af rummet i den øverste halvdel. Hvis strømningen er friktionsfri, fås ved anvendelse af Bernoulli's ligning, at den indadgående (eller udadgående) luftstrøm q m³/s er

$$q = \frac{1}{3} A \sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho}} g h \approx 0,062 A \sqrt{\Delta T h}$$

A åbningens areal, m²

h åbningens højde, m

g tyngdeaccelerationen, m/s²

ΔT temperaturforskelle mellem inde og ude, K

$\Delta \rho$ densitetsforskelle mellem udeluft og indeluft, kg/m³

ρ luftens middeldensitet, kg/m³

Engelske målinger på døråbninger ved temperaturdifferenser mellem 1 og 10 K antyder, at friktionstab nedsætter luftstrømmen til ca. 80 pct. af den teoretiske (Shaw, Whyte, 1974).

Karakteristiske ventilationseffekter i bygninger uden ventilationsindretninger

Ved anvendelse af de beregningsprincipper, som er skitseret i det foregående, suppleret med empiriske data, kan man danne sig et billede af nogle karakteristiske trykfordelinger og luftbevægelsesmønstre i bygninger under givne påvirkninger.

Ren vind-
påvirkning

I en bygning, som ikke er udstyret med ventilationsanlæg, og som alene er påvirket af en tværgående vind, vil der indvendigt indstille sig et undertryk i forhold til det statiske tryk i den uforstyrrede vind, såfremt utæthederne er nogenlunde ligeligt fordelt over klimaskærmen. Det skyldes, at kun facaden i vindsiden er udsat for overtryk. De øvrige tre ydervægge samt taget er alle udsat for undertryk, og da de arealmæssigt er størst, exfiltrerer de ved en lille trykdifferens lige så meget som facaden i vindsiden infiltrerer ved en stor trykdifferens. Resultatet er at trykdifferensen over facaden i vindsiden bliver nær vindens dynamiske tryk $\frac{1}{2}\rho v^2$, medens trykdifferensen over facaden i læsiden bliver af størrelsesordenen 1/10 heraf.

Hvis lejlighederne i en større etageejendom udgør indbyrdes adskilte celler, der er gennemgående fra facade til facade, er cellernes ydervægsarealer i vindsiden og i læsiden normalt nogenlunde ens. Trykdifferenserne over de to facader er da nærmere ved at være lige store.

Ren termik

Betragtes en lav bygning i vindstille, men med en temperaturdifferens mellem inde og ude, vil det neutrale plan indstille sig midt i bygningen, såfremt gulv og loft er tætte. Luften vil strømme ind gennem utætheder i ydervæggens nederste halvdel og ud gennem utætheder i den øverste halvdel. Er loftet meget utæt, eller er bygningen forsynet med aftrækskanaler, vil det neutrale plan indstille sig nær loftet eller eventuelt over loftet, således at der overalt er indadgående strømning gennem fuger i ydervæggene.

Høje bygninger

Er bygningen på flere etager, som indbyrdes står i åben forbindelse via trapperum, vil det termiske driv-

tryk fremkalde undertryk i de nedre etager og overtryk i de øvre. Der fremkommer således luftoverføring fra de nedre til de øvre etager, og kun de nedre etager udsættes for infiltration. Omvendt vil der ved vindpåvirkning af høje bygninger være tendens til, at de øvre etager får kraftigere infiltration end de nedre på grund af de øvre etagers mere udsatte beliggenhed.

Forudsætningen om den helt åbne forbindelse mellem etagerne repræsenterer et grænsetilfælde. I det modsatte grænsetilfælde, hvor etagerne er indbyrdes lufttæt adskilt, fungerer hver etage som en selvstændig enhed ligesom et etplanshus. Beboelsesbygninger på flere etager indtager i virkeligheden en mellemstilling, idet der må antages at være en strømningsmodstand af endelig størrelse i adskillelsen mellem den enkelte etage og trappeskakten. Til en realistisk beregning heraf må anvendes flercellemodeller, der bygger på netværksmetoder (anvendelse af Kirchhoffs love).

Sammenligning af
beregnings-
modeller

I 1983 er under ledelse af Air Infiltration Center, England, blevet gennemført en international sammenligning mellem 10 nyere beregningsmodeller, hvoraf halvdelen er flercellemodeller og halvdelen enkeltcellemodeller. Modellerne er udviklet i USA, Canada, England, Holland og Norge. Sammenligningen skulle udføres på den måde, at 3 eksisterende bygninger uden egentlige ventilationsinstallationer gennemregnedes med alle beregningsmodeller, men af de 30 kombinationer er ca. 1/3 ikke gennemført.

De 3 bygninger omfattede 1) et enfamiliehus med kælder og 2 etager opført 1979 i Schweiz i åbent terræn, 2) et serie-enfamiliehus med kælder og 2 etager opført 1977 i Canada i et ret tæt bebygget område, 3) et mellemrækkehus på 3 etager opført i 1977 i England i et vindbeskyttet område. Der forelå oplysninger om orientering, mål og konstruktioner, om klimaskærmens utæthed samt i begrænset omfang om utæthedernes fordeling. På grundlag af disse data skulle det totale luftskifte beregnes ved hjælp af de forskellige modeller for givne værdisæt af ude- og indetemperatur samt vindstyrke og

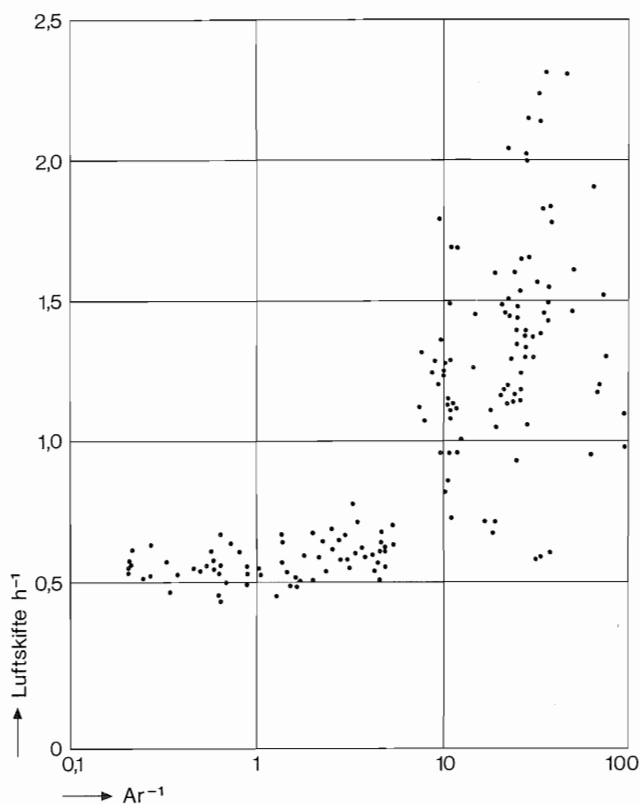
-retning. Der var på forhånd udført luftskiftemålinger ved disse klimaparameterværdier, og målingerne lå hovedsageligt mellem 0,15 og 0,4 h⁻¹.

Usikkerhed ved beregning af vindpåvirkning

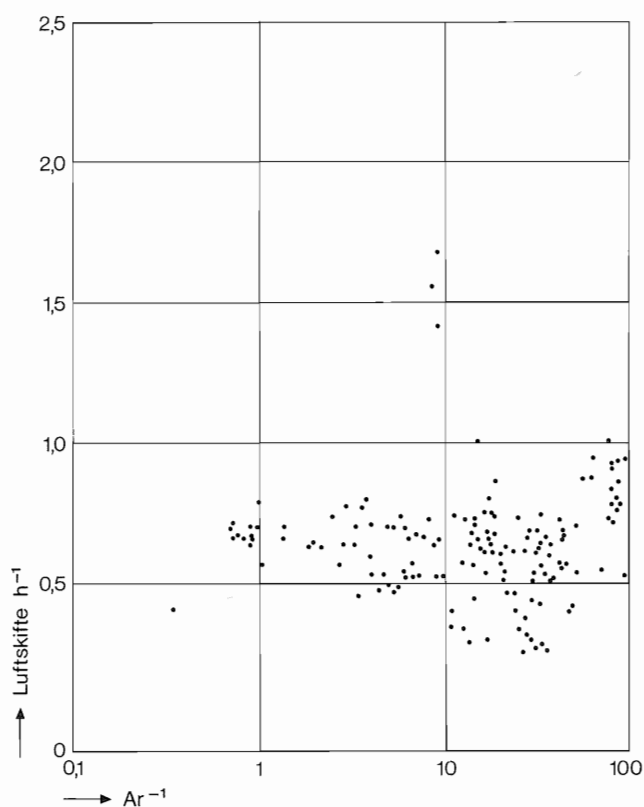
Resultatet af sammenligningen er, at de mere komplicerede beregningsmodeller ikke synes at give meget bedre resultater end de simple. Gennemsnitlig 3/4 af de beregnede luftskifter afviger mindre end 25 pct. fra de målte, men resultaterne synes at være afhængige af den måde, hvorpå indgangsdata specificeres. Overensstemmelsen mellem beregnet og målt luftskifte synes at være bedst for det schweiziske hus, hvilket tolkes således, at usikkerheden især er knyttet til beregning af vindpåvirkningen på bygninger, der ligger vindbeskyttet.

Måling af vindfølsomhed

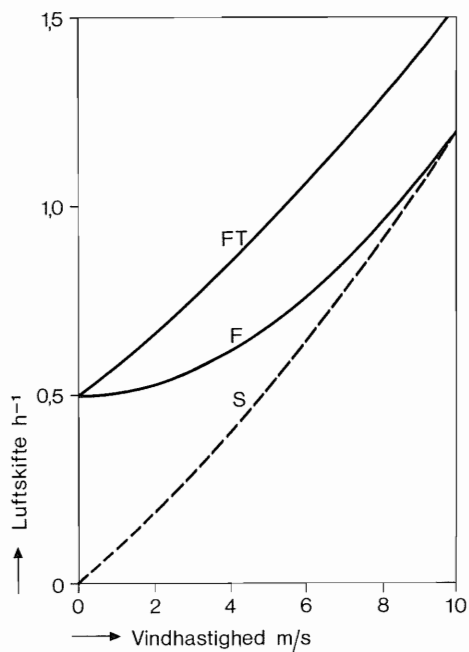
Dette problem belyses også af en amerikansk feltundersøgelse af et toetagers rækkehus uden egentlige ventilationsinstallationer, men med aftræk fra et gasfyret ildsted i kælderen (Mattingly, Harrje, Heisler, 1979). Resultatet af målinger i perioder, hvor vindretningen er tværgående i forhold til husrækken, gengives i diagrammet figur 9. Abscissen er en dimensionsløs parameter $v^2_T/gh\Delta T$, der udtrykker forholdet mellem vindkræfter og termiske kræfter. Målepunkterne udviser en del spredning, men falder klart i to områder, der tolkes som henholdsvis området, hvor de termiske kræfter dominerer, og området, hvor vindkræfterne dominerer. Grænsen mellem områderne ligger ved en værdi af den dimensionsløse parameter på 7. Denne er ikke en universel grænseværdi. Den er formodentlig afhængig af husets form og af definitionen på den karakteristiske højde h , og i hvert fald afhænger den af vindretningen og måden, hvorpå vindhastigheden v bestemmes. I det undersøgte tilfælde forsvinder det stærkt vindfølsomme område, når vinden er langsgående. Det samme sker ved tværgående vind, når der anbringes en læskærm af store nåletræer i vindsiden samtidigt med, at vindhastigheden bestemmes i et fjerntliggende referencepunkt, hvor vinden ikke påvirkes af læskærmen, se figur 10.



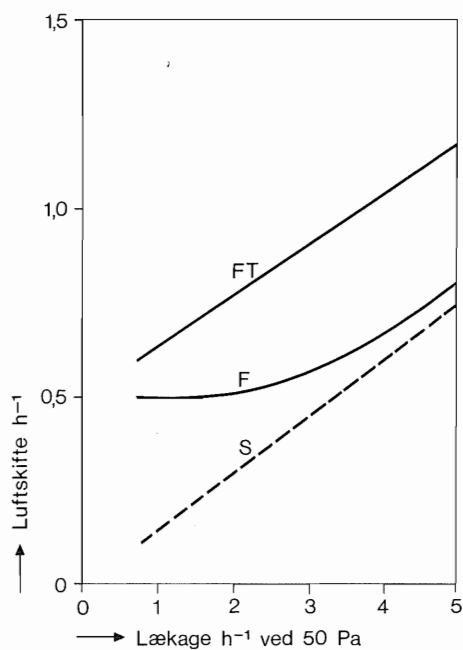
Figur 9. Måling af luftskifte i toetagers rækkehus i Twin Rivers, New York. Abscissen er det reciprokke af Archimedes' tal. $Ar = gh\Delta T/v^2T$ er forholdet mellem termiske drivkræfter og vindkræfter. Diagrammet omfatter luftskifter, som er målt på tidspunkter, hvor vinden har været i facadens normalretning med en afvigelse på højst 30° .



Figur 10. Luftskiftemålinger i samme hus og ved samme vindretninger som figur 9, men efter at der er opstillet ti 8 m høje grantræer som en læskærm i vindsiden. Ar er baseret på vindhastigheden målt 50 m fra huset (efter Mattingly, Harrje, Heisler).



Figur 11. Beregnet luftskifte i etplanshus afhængigt af vindhastighed. Det forudsættes, at klimaskærmens tæthed svarer til $n_{50} = 3 \text{ h}^{-1}$, og at udetemperaturen er lig indetemperaturen. Kurvernes betegnelser refererer til anlægstypen (efter Nylund).



Figur 12. Beregnet luftskifte i etplanshus afhængigt af klimaskærmens utæthed målt ved n_{50} . Det forudsættes, at vindhastigheden er 4 m/s, og at udetemperaturen er 2 °C. Kurvernes betegnelser refererer til anlægstypen (efter Nylund).

Karakteristiske ventilationseffekter i bygninger med ventilationsindretninger

Infiltration og mekanisk ventilation

I en bygning med mekanisk ventilation vil en væsentlig del af luftbevægelsen foregå gennem anlægget. Samspelet mellem infiltration/exfiltration og anlæg afhænger af bygningens tæthed og anlægstypen. Et idealt balanceret anlæg af type FT eller FTX påvirker ikke trykfordelingen i bygningen og infiltrationen/exfiltrationen bliver principielt den samme, som hvis bygningen intet ventilationssystem havde.

Anlæg af type F bevirker, at det neutrale plan løftes, eller at undertrykket i bygningen øges, hvorved exfiltrationen helt eller delvis ophører. Skelnes i sammenhængen ikke mellem tilsigtede og tilfældige åbninger i klimaskærmen, sker hele lufttilførslen ved infiltration, men denne er mindre følsom for ændringer i vejrforholdene, fordi den relative variationsbredde af trykdifferensen over klimaskærmen mindskes i forhold til en bygning uden ventilationsanlæg.

Afhængighed af vind og tæthed

Nylund har i publikationen Tjyvdrag och ventilation, 1979, fremlagt nogle skematiske beregninger ved hjælp af en enkeltcellemodel af den resulterende lufttransport i afhængighed af vindhastighed og klimaskærmens tæthed for et etplanshus. Nogle hovedresultater gengives i figur 11 og 12. Figur 11 viser udelufttilførslen målt som luftskifte ved varierende vindhastighed men samme tæthed af klimaskærmen. Figur 12 viser udelufttilførslen ved varierende tæthed, men med vindhastighed og udetemperatur fastholdt på 4 m/s og 2 °C. Der anvendes et mål n_{50} for klimaskærmens utæthed, som forklares nærmere i det følgende kapitel.

Anlægstype F og FT

I figurerne vises kurver for type F ventilation og for idealt balanceret type FT ventilation. Det forudsættes, at anlægget yder et luftskifte på $0,5 \text{ h}^{-1}$ i vindstille vejr ved samme temperatur ude og inde. Nylands resultater antyder, at ved en given tæthed af klimaskærmen er anlæg af type F mere stabile end anlæg af type FT. For at opnå en given vejruafhængighed skal klimaskærmen være betydeligt mere tæt ved anlæg af type

F'T end ved anlæg af type F.

Anlægstype S

Nylund viser også kurver for et bestemt ventilationsanlæg af type S på den samme bygning. Et type S ventilationssystem kan principielt indrettes således, at det for en given tæthed af klimaskærmen yder en bestemt ventilation, fx luftskifte $0,5 \text{ h}^{-1}$, under typiske vinterforhold, men systemet er vejrfølsomt, og der er ikke som ved type F og F'T en nedre begrænsning af luftydel- sen. Når vindhastigheden og temperaturdifferensen mellem inde og ude nærmer sig nul, ophører virkningen af type S ventilation. Det samme er tilfældet, hvis klima- skærmens tæthed forøges, uden at der træffes kompense- rende foranstaltninger. Teoretisk vil type F ventila- tion naturligvis også gå i stå, når man nærmer sig her- metisk tæthed, men virkningen er næppe mærkbar inden for området af praktisk opnåelige tætheder.

Diagrammer af den type, som Nylund har fremstillet, har værdi for forståelsen af ventilationssystemernes virkemåde, men de er næppe tilstrækkelige til at vur- dere systemernes brugbarhed og energiøkonomi. I en kvantitativ vurdering må også indgå størrelsen og hyp- pigheden af klimaparametrenes afvigelser fra gennem- snittet, og denne side af problematikken synes at være sparsomt belyst i litteraturen. Desuden må brugeradfær- den og måske navnlig brugervanernes vejrafhængighed formodes at spille en rolle.

Litteratur

J. Irminger, C. Nøkkentved: Wind-pressure on buildings
Ingeniørvidenskabelige Skrifter A23, 1930 og A42, 1936

J. Dick: The fundamentals of natural ventilation of
houses

J. Institution of Heating and Ventilating Engineers
vol. 18, 1950

M. Jensen: Aerodynamik i den naturlige vind
København 1959

B. Shaw, W. Whyte: Air movements through doorways
Building Services Engineer vol. 42, 1974

G. Hausladen: Luftwechsel in Wohnungen
Heizung Lüftung Haustechnik vol. 29, 1978

K. Handa, G. Kärrholm, T. Lindquist: Mikroklimat och luftväxling
Statens råd för byggnadsforskning T3:1979

P. Nylund: Tjyvdrag och ventilation
Statens råd för byggnadsforskning T4:1979

G. Mattingly, D. Harrje, G. Heisler: The effectiveness of an evergreen windbreak for reducing residential energy consumption
ASHRAE Transaction vol. 85, 1979

E. Bjerregaard, F. Nielsen: Vindmiljø omkring bygninger
SBI-anvisning 128, 1981

M. Liddament, C. Thompsen: Mathematical models of air infiltration
Air Infiltration Center, Technical Note AIC 9, 1982

M. Liddament, C. Allen: The validation and comparison of mathematical models of air infiltration
Air Infiltration Center, Technical Note AIC 11, 1983

C. Allen: Wind Pressure data requirements for air infiltration calculations
Air Infiltration Center, Technical Note AIC 13, 1984

 Klimaskærmens tæthed

Ventilations-
 åbninger

Åbningers strømningskarakteristik

Et væsentligt element i ventilationsmekanismen er de strømningsformler, som udtrykker sammenhængen mellem trykforskel og luftstrøm gennem åbninger i klimaskærmen. For de egentlige ventilationsåbningers og kanalers vedkommende er denne sammenhæng veldefineret, når der foreligger geometriske data eller en empirisk tryk-hastighedskarakteristik. Strømningen er normalt turbulent og sammenhængen kvadratisk eller næsten kvadratisk.

For ligedannede åbninger er luftstrømmen endvidere proportional med lysningsarealet. Heraf følger, at to åbninger med lysningsareal A_1 og A_2 er ækvivalente med én åbning, hvis areal er

$A = A_1 + A_2$ for paralleltforbundne åbninger

$$A = \frac{A_1 A_2}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2}} \quad \text{for serieforbundne åbninger}$$

I sidstnævnte tilfælde ligger A altid mellem 70 og 100 pct. af det mindste af arealerne A_1 og A_2 .

Spalter

Klimaskærmens tilfældige utætheder består hovedsageligt af snævre spalter af forskellig form. Strømningen i definerede spalter har været undersøgt systematisk. Figur 13 viser eksempelvis resultater fra en finsk undersøgelse af en 100 mm dyb, lige spalte mellem to stykker savskåret træ. Karakteristisk for snævre spalter er, at der ved lave hastigheder hersker laminar strøm-

ningstilstand, hvor tryktabet Δp og luftstrømmen q er proportionale i overensstemmelse med Poiseuilles formel for spalter

$$\Delta p = \frac{12 \eta x}{l s^3} q$$

s spaltebredde, m

x spaltedybde (i strømningsretning), m

l spaltelængde (vinkelret på strømningsretning), m

η luftens dynamiske viskositet, Pa s

Ved større hastigheder bliver strømmingen turbulent, hvor

$$\Delta p = \frac{\lambda \rho x}{4 l^2 s^3} q^2$$

λ hydraulisk friktionskoefficient

ρ luftens densitet, kg/m³

Ved fuldt udviklet turbulens i en ru spalte er friktionskoefficienten konstant. I overgangsområdet er den svagt afhængig af Reynolds tal. Man må derfor vente, at kurvernes hældning i den logaritmiske afbildning i figur 13 ændrer sig gradvis fra 1 til 0,5 ved stigende trykdifferens, og at overgangen mellem kurvernes to grene forskyder sig mod venstre ved stigende spaltebredde.

Fugers strømning
ningsligning

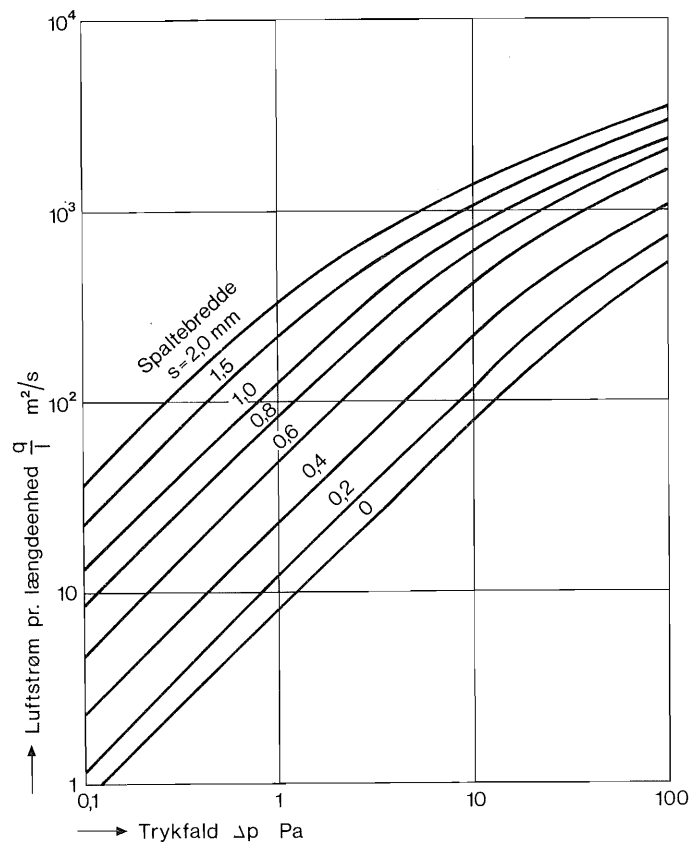
For en given spalte kan hele området beskrives ved en ligning af formen

$$\Delta p = a q + b q^2$$

hvor a og b er konstanter. Regneteknisk er det dog mere bekvemt at anvende en potensformel

$$\Delta p = c q^\beta$$

hvor c er en konstant og eksponenten β ligger mellem 1 og 2. Konstanten c bestemmes af den enkelte fuges længde og form. Størrelsen



Figur 13. Sammenhæng mellem luftstrøm, trykfald og spaltebredde for 100 mm dyb spalte mellem to stykker savskåret træ (efter Statens tekniska Forskningscentral).

$$f = l^{-1} c^{-1/\beta}$$

er fugens luftgennemtrængelighed, dvs. den luftstrøm i m³/s, som passerer gennem 1 m fuge ved en trykdifferens på 1 Pa. Fugens strømningsligning kan da også skrives

$$\frac{q}{l} = f \Delta p^{1/\beta}$$

Fugedata

I princippet kan fugelængden opmåles og f og β bestemmes ved målinger på stedet eller i laboratoriet. I praksis er det dog sjældent muligt at skaffe detaljerede oplysninger om alle fugerne i en bygning. De enkle beregningsmodeller baseres i stedet på en summarisk op-

lysning om klimaskærmens totale lækage og en hypotese om utæthedernes fordeling på bygningsfladerne. Den antagne fordeling kan være ligelig, eller den kan være vægtet begrundet i et kendskab til kvaliteten af de forskellige konstruktioner.

Vindueslækage og baggrundslækage

Undertiden foreligger der særlige oplysninger om vinduesfugerne, fx fordi der er anvendt afprøvede eller klassificerede vinduer. En del af lækagen kan da henføres til vinduerne, medens resten, der kan benævnes baggrundslækage, fordeles over de øvrige flader. Eksempelvis har Nylund ved beregningen af figur 11 og 12 sat vindueslækagen ved 50 Pa til $2 \text{ m}^3/\text{h}$ pr. m^2 vindue og fordelt baggrundslækagen således, at utætheden pr. m^2 er halvt så stor i loftet som i ydervæggene.

Når der ikke foreligger særlige oplysninger om eksponenten β , sættes den i reglen til 1,5, da denne værdi synes at stemme godt med forsøgsresultater for praktisk forekommende, sammensatte spalter fx i vindueskonstruktioner inden for et aktuelt trykområde. Værdien synes også at være i rimelig overensstemmelse med erfaringer fra lækagemålinger på større enheder, der rummer en samling af utætheder af meget forskellig form.

Undersøgelser udført i Sverige af Honma (1975) antyder dog, at talværdien bør være lavere for spalter med stor strømningsmodstand, og Honma foreslår en generalisering af potensformlen ved, at eksponenten betragtes som en variabel, der afhænger dels af f og dels af Δp .

Diffus lækage

Der kan iøvrigt også optræde en diffus luftstrømning gennem vægge af porøst materiale, men normalt er denne porestrømning flere størrelsesordener mindre end fugelækagen. Porestrømningen følger Darcys formel

$$\Delta p = \frac{\eta \cdot x}{B \cdot A} q$$

hvor x er vægtykkelsen og A er vægfladens areal. B er materialets specifikke permeabilitet, der kan være omkring 10^{-13} m^2 for letbeton. Gennem 100 m^2 af en 10 cm letbetonvæg strømmer således 0,06 l/s ved en trykforskel på 10 Pa.

Måling af klimaskærmens tæthed

Trykmetode

En kendt metode til bestemmelse af den totale lækage gennem klimaskærmens tilfældige utætheder, som især benyttes i Sverige, består i, at der monteres et kalibreret ventilationsaggregat i en døråbning til bygningen, hvorefter man måler den luftstrøm, som skal tilføres eller fjernes for at opretholde et indvendigt overtryk eller undertryk på 50 Pa med afblændede ventilationsåbninger. Lækagestrømmen målt i m^3/h sættes i forhold til bygningens volumen, hvorved resultatet, der benævnes n_{50} , udtrykker et luftskifte i h^{-1} .

Målt lækage

I skandinaviske boliger er med denne metode målt lækager mellem 1 og 10 h^{-1} , se tabel 5. Ved en dansk undersøgelse (Collet med flere, 1976) er fundet lækager mellem 4 og 10 h^{-1} , i middel $7,5 \text{ h}^{-1}$, for 11 eksisterende enfamiliehuse af forskellig alder, medens et 12. hus lå helt uden for området. I Sverige er især foretaget mange målinger i forbindelse med kontrol af nybyggeriet, hvis tæthed synes stigende, men enkelte observationer antyder, at tætheden af ældre boliger er på et lidt højere niveau end i den danske undersøgelse (Kronvall, 1979, Backmark, Blomqvist, 1983). I Norge er foretaget en stikprøveundersøgelse af boliger opført i perioden 1975-80 (Brunsell, Uvsløkk, 1980). Fra England rapporteres om en væsentlig ringere tæthed end i Skandinavien (Warren, 1983).

Tæthedskrav

I de svenske byggeforskrifter SBN 1980 er indført et krav til tætheden af nybyggeriet. Lækagen ved 50 Pa må højst være 3 h^{-1} for enfamiliehuse og lignende, 2 h^{-1} for beboelsesbygninger i 2 etager og 1 h^{-1} for beboelsesbygninger i 3 eller flere etager. Der findes ingen tilsvarende danske bestemmelser.

Forsøgsbyggeri

Det er konstateret i svenske forsøgsbyggerier, at det er muligt at opnå en tæthed af enfamiliehuse svarende til $n_{50} = 1 \text{ h}^{-1}$, når der foretages tætningsforanstaltninger, som er mere omfattende end ved normal udførelse, men som anses at være teknisk-økonomisk realistiske (Lindh, Lindskoug, Nylund, 1979). Merudgiften ved disse

| Land/kilde | Byggeår | Småhus | Rækkehus | Etagebolig |
|-------------------------------|----------|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Danmark Collet, 1976 | før 1974 | 7,5 h ⁻¹ (11 boliger) | | |
| Sverige Kronvall, 1979 | før 1976 | 5,1 h ⁻¹ (35 boliger) | | 2,4 h ⁻¹ (15 boliger) |
| | 1976-78 | 3,4 h ⁻¹ (297 boliger) | | 1,0 h ⁻¹ (23 boliger) |
| Sverige Backmark + B, 1983 | 1979-82 | 2,7 h ⁻¹ (168 boliger) | 1,1 h ⁻¹ (27 boliger) | 1,0 h ⁻¹ (156 boliger) |
| Norge Brunsell + U, 1980 | 1975-80 | 4,7 h ⁻¹ (61 boliger) | | 1,3 h ⁻¹ (34 boliger) |
| England Warren, 1983 | 1963-83 | 13,9 h ⁻¹ (19 boliger) | | |

Tabel 5. Målinger af klimaskærmens tæthed med trykmetoden. Talangivelserne er lækagen målt som luftskifte i h⁻¹ ved et over- eller undertryk på 50 Pa. Resultaterne er middelværdier af de angivne antal målinger. Backmark og Blomqvist's materiale omfatter 168 enfamiliehuse, som alle er træstolpekonstruktioner, samt 27 rækkehuse og 156 etagelejligheder, som alle er betonkonstruktioner. Øvrige rubrikker rummer blandede konstruktioner.

foranstaltninger opgives til ca. 4000 svenske kroner pr. hus i 1977-priser.

I et dansk forsøgsbyggeri, der omfatter 6 lavenergi-enfamiliehuse (Hjortekærhusene opført 1977) er målt værdier for n₅₀ mellem 0,2 og 1,6 h⁻¹ for 5 huses vedkommende og ca. 3,5 h⁻¹ i det 6. hus.

Effektivt lækageareal og udeluftventiler

Sammenhæng mellem tæthedsmål

I amerikansk litteratur anvendes ofte det såkaldte effektive lækageareal som tæthedsmål. Dette lækageareal A_e defineres ved

$$q = A_e \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}}$$

hvor q er lækagen ved trykdifferensen Δp, når hele bygningen (eller den betragtede bygningssektion) udsættes for over- eller undertryk. Da sammenhængen mellem q og Δp i virkeligheden ikke er kvadratisk, må A_e defineres

ved et bestemt referencetryk. Dette har traditionelt været 75 Pa men er i den nyeste litteratur sat til 4 Pa. Derved bliver

$$A_e \approx 0,4 q_4$$

når A_e måles i m^2 og q_4 i m^3/s . Antages det, at q er proportional med Δp i potensen $2/3$, fås endvidere

$$q_4 = \frac{n_{50}}{3600} V \left(\frac{4}{50}\right)^{0,67}$$

hvor V er bygningens volumen i m^3 . Herved fås følgende omtrentlige sammenhæng mellem det svenske og det amerikanske tæthedsmål

$$\frac{A_e}{V} \approx 20 \cdot 10^{-6} n_{50}$$

Tæthedskrav

Tæthedskravet til etageboliger i SBN 1980 svarer således til, at der for hver $100 m^3$ bygningsvolumen må være et effektivt lækageareal på $20 cm^2$. For enfamiliehuse svarer det svenske tæthedskrav til et effektivt lækageareal på $60 cm^2$ pr. $100 m^3$ volumen. Forholdet mellem bygningens volumen $V m^3$ og klimaskærmens overflade $F m^2$ er i middel for svenske enfamiliehuse ca. 1,3, lidt lavere for etplanshuse og lidt højere for toplanshuse. Overslagsmæssigt kan det tilladelige lækageareal da sættes til $80 cm^2$ pr. $100 m^2$ klimaskærm.

Det effektive lækageareal er ikke eksakt lig med lysningsarealet af en ventilationsåbning, der er ækvivalent med summen af de tilfældige utætheder, men størrelsesordenen er den samme.

Ventilareal

Er en ventilationsåbning formet som et skarpkantet hul i en plade, vil den lufthastighed, der beregnes af Bernoulli's ligning, $\sqrt{2\Delta p/\rho}$, ikke opnås i selve hullet men i et indsnævret snit i luftstrålen bag hullet. Tværsnitarealet i indsnævringen er 60-70 pct. af hullet, dvs. at ventilationsåbningens effektive areal er ca. $2/3$ af lysningsarealet. Afrundes hulkanten, nærmer det effektive areal sig hurtigt til lysningsarea-

let. Omvendt vil forholdet mellem effektivt areal og lysningeareal kunne mindskes, hvis ventilationsåbningen får mere sammensatte former, der medfører supplerende tryktab ved friktion. Eksempelvis kan en tallerkenventil have et effektivt areal på 0,7 gange lysningen af den cylindriske spalte.

Tæthed af hus
med ventiler

Antages det, at et typisk enfamiliehus har et volumen på 300 m^3 bliver det effektive lækageareal 180 cm^2 , når $n_{50} = 3 \text{ h}^{-1}$. I henhold til BR-82 skal huset udstyres med udeluftventiler med en fri åbning på mindst 30 cm^2 pr. beboelsesrum. Anvendes 6 ventiler, hvis effektive areal er lig med det krævede lysningsareal, tæller ventilerne lige så meget som klimaskærmens utætheder. Det må altså anslås, at ca. halvdelen af ventilationsluften passerer ventilerne, når ventilationssystemet er af type S eller F. Husets resulterende utæthed med åbne ventiler ved trykdifferenser over klimaskærmen på nogle få Pa svarer til, at $n_{50} = 6 \text{ h}^{-1}$. Måles lækagen med åbne ventiler ved en trykdifferens på 50 Pa, vil man dog sandsynligvis finde, at $n_{50} = 5 \text{ h}^{-1}$, fordi luftstrømmen gennem ventilerne vokser lidt langsommere med trykdifferensen end luftstrømmen gennem fugerne.

Anvendes færre end 6 ventiler, eller har disse en udformning, der bevirker, at det effektive areal er mindre end 30 cm^2 pr. ventil, reduceres ventilernes andel i ventilationen.

Konsekvenser
af tæthed

Man kunne spørge, om man ikke lige så godt kunne undvære ventilerne og udføre klimaskærmen med en ringere tæthed, således at de tilfældige utætheder svarer til $n_{50} = 6 \text{ h}^{-1}$. Hertil må nok siges, at den første løsning i højere grad sikrer god fordeling af udeluften og mulighed for regulering, således at energiforbruget ikke bliver større end nødvendigt. Når omkring halvdelen af klimaskærmens totale åbningsareal består af stilbare ventiler, må disse have en ret væsentlig indflydelse på luftbevægelserne. En forudsætning for at opnå disse fordele er dog, at brugeren formår at udnytte ventilerne. Står de permanent åbne, kommer der ingen energibesparelse ud af at investere i en forbedring af klima-

skærmstæthed fra $n_{50} = 6 \text{ h}^{-1}$ til 3 h^{-1} . Holdes ventilerne til stadighed lukkede, kan den nødvendige basisventilation næppe opretholdes i et hus med ventilation af type S, og i et hus med ventilation af type F bliver muligheden for at fordele lufttilførslen efter rummenes belastning ikke udnyttet. Derfor må brugeradfærden og mulighederne for at påvirke den gennem information indgå i bedømmelsen.

Det må fremhæves, at mulighederne for at regulere lufttilførslen ved hjælp af udeluftventiler af omtrent den størrelse, som bygningsreglementet foreskriver, afhænger af klimaskærmens tæthed. Ventiler gør ingen særlig nytte i utætte boliger eller under vinduesoplukninger. Omvendt vil en kraftig forøgelse af klimaskærmens tæthed, således at det ækvivalente lækageareal bliver væsentligt mindre end ventilarealet, forbedre reguleringsmuligheden men også forøge risikoen for, at ventilationen bliver utilstrækkelig ved anlæg af type S. Ved anlæg af type F opnås kun en lille forbedring af energiøkonomien, jf. figur 10, og samtidigt kan undertrykket i bygningen eventuelt blive så stort, at det føles generende i forbindelse med døroplukninger, med mindre udeluftventilerne til stadighed holdes åbne. Meget tætte huse er derimod velegnede til anlæg af type FT og må i det hele anses for at være en forudsætning for, at der kan opnås en god funktion og energiøkonomi ved balanceret ventilation.

Praktisk udførelse

Et forhold, som imidlertid også spiller ind, er, at det synes vanskeligt at definere en udførelsesstandard for almindelig husbygning, som fører til en bestemt tæthed af klimaskærmen. Diskussionen om, hvorvidt man bør tilstræbe $n_{50} = 6, 3$ eller 1 h^{-1} er ret teoretisk, så længe der ikke foreligger undersøgelser af sammenhængen mellem dansk udførelsespraksis og tæthed. De svenske erfaringer tyder på, at man ved anvendelse af forholdsvis traditionelle midler og rimelig omhu opnår at få $n_{50} = 3 \text{ h}^{-1}$ i småhuse, og at etageboliger er væsentlig mere tætte. Såvel højt som lavt betonbyggeri synes at være mere tæt end andre konstruktionsformer.

Måling og beregning af infiltration

Sporgasmetode

Undertiden måles luftskiftet med sporgasmetoder i bygninger med afblændede ventilationsåbninger og lukkede vinduer og døre. Resultatet af en sådan måling er dog vanskeligt at tolke. Målingen giver naturligvis slet ikke udtryk for den ventilation, som er til stede, når ventilationssystemet anvendes efter sin hensigt. I almindelighed giver målingen heller ikke udtryk for en formodet forøgelse af den tilsigtede ventilation, som tilskrives infiltration, da begreberne tilsigtet ventilation og infiltration som tidligere nævnt ikke er additive og ikke kan adskilles. Tilbage står den mulighed at opfatte resultatet som et mål på klimaskærmens tæthed, der er forskelligt fra n_{50} .

Referencevejrtilstand

Umiddelbart er et målt luftskifte kun et usikkert tæthedsmål, fordi resultatet er helt afhængigt af vejrforholdene under målingen. For at eliminere eller mindske denne usikkerhed kan målingen henføres til en referencevejrtilstand, fx en bestemt udetemperatur, vindhastighed og vindretning. Det betyder enten, at man må vente med at foretage målingen til vejrforholdene er tilstrækkelig nær ved referencetilstanden, eller at man må udføre gentagne målinger under afvigende vejrforhold og dernæst ved statistiske metoder interpolere sig til resultatet. Det kan imidlertid ikke forventes, at der bliver entydig sammenhæng mellem dette tæthedsmål og lækagemålet n_{50} .

Trykmetodens fordele

Ved bestemmelse af n_{50} har trykgradienten samme retning for alle utætheder, og trykdifferensen er også praktisk talt den samme, da eventuelle forstyrrelser fra udvendige vindtryk er uvæsentlige, når målingen blot ikke udføres i stærk blæst. Utæthedernes placering er derfor uden indflydelse på måleresultatet. Ved luftskiftemåling med sporgas varierer trykdifferensen derimod over klimaskærmen både med hensyn til størrelse og fortegn, og utæthedernes fordeling er afgørende for resultatet. Til praktisk brug synes n_{50} at være det enkleste og klareste definerede tæthedsmål.

Lækagens tryk-
afhængighed

Det kan måske indvendes mod trykmetoden, at referencetrykket 50 Pa er ukarakteristisk for normale driftsforhold. To bygninger med samme n_{50} -værdi kan have forskellig klimaskærmlækage ved normale trykdifferenser på nogle få Pa afhængigt af, om utæthederne består af mange fine eller få grove fuger. Trykprøven kan imidlertid også udnyttes til at give en mere nuanceret karakteristik af klimaskærmen. Ved den praktiske udførelse foretages aflæsninger af lækagen ved flere forskellige over- og undertryk i intervallet 10-100 Pa. Heraf kan udtrages en supplerende oplysning om størrelsen af eksponenten β inden for et trykområde, der nærmer sig normale tryk. Prøven kan desuden afsløre, om der i væsentlig grad optræder usymmetriske fuger, hvis strømningsmodstand varierer med trykgradientens retning.

Svensk formel
for infiltration

Kronvall har benyttet begge metoder til at måle tætheden af 29 svenske enfamiliehuse, som med få undtagelser var opført i årene 1974-77. Der synes i dette materiale at være en ret svag statistisk korrelation mellem tæthedsmålene, og forfatteren angiver følgende empiriske formel for infiltrationen i m^3/s , når alle ventilationsåbninger er lukkede:

$$q = 8 \cdot 10^{-6} V^{2,1} \left(\frac{n_{50}}{F}\right)^{1,1}$$

V er husets rumfang og F dets overflade.

Engelske og amerikanske forfattere har forsøgt at udlede semiempiriske formler for infiltrationen i enfamiliehuse, som er uden ventilationsindretninger og har lukkede vinduer og døre. Baggrunden herfor er formodentlig, at relativt utætte huse uden ventilationssystemer er almindeligt forekommende i England og USA.

Amerikansk formel

Sherman og Grimsrud angiver således, at infiltrationen kan beregnes af et udtryk af formen

$$q = A_e \sqrt{a \Delta T + b v^2}$$

hvor A_e er effektivt lækageareal i m^2 , ΔT er temperaturdifferensen mellem inde og ude i K og v er vindha-

stigheden i m/s. Konstanterne a og b bestemmes af bygningen og dens omgivelser. Forfatterne giver regler for, hvorledes konstanterne fastlægges, når man kender utæthedernes fordeling, bygningens højde samt terrænklassen og de lokale læbetingelser. Det angives, at $a = 0,021$ og $b = 0,015$ for et typisk, normalt beliggende etplanshus.

Engelsk formel

Englænderen Warren udtrykker infiltrationen på formen

$$q = \frac{n_{50}}{3600} v \sqrt{a \Delta T^{2/\beta} + b v^{4/\beta}}$$

Her forudsættes, at tætheden måles ved, at bygningen udsættes for overtryk/undertryk, at β er eksponenten i tryk-lækagepotensformlen, og at n_{50} er lækagen målt som luftskifte i h^{-1} ved 50 Pa. Konstanterne a og b er forskellige fra de tilsvarende i den amerikanske formel men fastlægges ligesom disse ud fra kendskab til bygningen og omgivelserne. Et værdisæt for et normalhus kan være $\beta = 1,5$, $a = 10^{-5}$ og $b = 6 \cdot 10^{-5}$.

Anvendes disse tre formler på et relativt tæt hus på 300 m^3 med fx $n_{50} = 3 \text{ h}^{-1}$, fås, at infiltrationen under vinterforhold med $\Delta T = 20 \text{ K}$ og $v = 4 \text{ m/s}$ bliver omkring 10 l/s . Til en hygiejnisk tilfredsstillende ventilation må omkring 40 l/s anses for nødvendig. Eksemplet illustrerer således betydningen af, at boliger udstyres med et ventilationssystem, når bygningernes tæthed ligger på skandinavisk niveau.

Litteratur

- D. Thomas, J. Dick: Air infiltration through gaps around windows
J. Institution of heating and Ventilating Engineers
vol. 21, 1953
- L. Hopkins, B. Hansford: Air flow through cracks
Building Services Engineer vol. 42, 1974
- H. Honma: Ventilation of dwellings and its disturbances
KTH Inst. Uppv. Vent. Tekniska meddelanden 63, 1975
- Investigation on the leak of untightened joints with laboratory tests
Statens Tekniska Forskningscentral, VVS-tekniska laboratoriet, Espoo

- P. Collet et al: Boligers luftskifte
Teknologisk Institut, Byggeteknik, 1976
- D. Etheridge: Crack flow equations and scale effect
Building and Environment vol. 12, 1977
- J. Kronvall: Testing of houses for air leakage using a
pressure method
ASRAE Transactions 84, 1978
- J. Kronvall: Mätningar och mätmetoder för lufttäthet
Statens råd för byggnadsforskning T6:1979
- A. Lindh, N. Lindsoug, P. Nylund: Byggnaders lufttäthet
Statens råd för byggnadsforskning R38: 1979
- J. Brunsell, S. Uvsløkk: Boligers lufttethet
NBI arbeidsrapport 31, 1980
- P. Warren, B. Webb: The relationship between tracer gas
and pressurisation techniques in dwellings
AIC Conference on Instrumentation and Measurement
Techniques, Windsor 1980
- B. Saxhof, A. Nielsen: Insulation and air tightness of
six low-energy houses
DTH Lab. varmeisolering, meddelelse 121, 1982
- D. Grimsrud, M. Modera, M. Sherman: A predictive air
infiltration model
ASHRAE Transactions vol. 88, 1982
- A. Elmroth, P. Levin: Air infiltration control in
housing, a guide to international practice
Air Infiltration Center/Statens råd för byggnads-
forskning 1983
- M. Sandberg, P. Warren, M. Sherman, D. Grimsrud: Air
control
Building Services vol. 5, 1983
- L. Backmark, S. Blomqvist: Täthetsprovning av lägenhe-
ter och småhus
HSB:s Riksförbund, 1983

 Luftstrømninger og blandingsprocesser i rum

Fortynding og ventilationseffektivitet

 Forurenings-
kilder

Den ventilationsform, der kaldes punktudsugning, har som hovedformål at opfange forureninger ved kilden. Emhætteudsugning over komfurer udgør i hvert fald delvis en sådan lokalt virkende forureningsopsamling. Iøvrigt er boligens forureningskilder af en mere diffus art. De luftbårne forureninger må uskadeliggøres ved fortynding i ventilationsluft tilvejebragt af ventilationssystemer, der har hele boligrummet som virkeområde. Den matematiske behandling af fortyndingsprocessen er simpel, så længe der forudsættes ideal opblanding, men den bliver kompliceret, når denne forudsætning ændres.

 Fortyndings-
formlen

Der søges et udtryk for koncentrationen af en given gas i rumluften. Det antages, at gassen findes i den tilførte luft, og at gassen produceres i små mængder fra kilder i det betragtede rum. Gassen kan være en bestanddel af ventilationsluften, som forekommer under normal drift, eller et kunstigt tilsat stof. Hvis det forudsættes, at rumluften er fuldstændig opblandet, og at den producerede gas momentant fordeles jævnt i rummet, gælder differentiaalligningen

$$V \frac{dc}{dt} = r + c_u q - c q$$

hvis løsning (når der ikke regnes med variationer i tryk og temperatur) er

$$c - c_u = \frac{r}{q} + (c_o - c_u - \frac{r}{q}) \exp(-\frac{q}{V} t)$$

c gaskoncentrationen til tiden t

c_o gaskoncentrationen til tiden 0

c_u gaskoncentrationen i udeluft (konstant)

V rummets volumen

r volumenstrøm af gas fra kilder i rummet (konstant)

q volumenstrøm af ventileret luft (konstant, $q \gg r$)

Udtrykket bliver mere overskueligt, når $c_u = 0$ (eller det instrument, hvormed c måles, nulstilles ved en referencemåling i udeluft), og når man indfører luftskiftet $n = q/V$:

$$c = c_o e^{-nt} + \frac{r}{q} (1 - e^{-nt})$$

Ligevægtskoncentrationen efter meget lang tid bliver

$$c_s = \frac{r}{q} = \frac{r}{n V}$$

Er gassen ikke på forhånd til stede i rummet, og starter produktionen til tiden 0, bortfalder det første led i udtrykket for c . Koncentrationen er stigende og nærmer sig eksponentielt til ligevægtskoncentrationen.

Er omvendt $r = 0$ og $c_o \neq 0$, bortfalder udtrykkets andet led. Koncentrationsforløbet bliver det eksponentielle henfald, der også kan skrives

$$\frac{c}{c_o} = e^{-t/\tau}$$

hvor τ er tidskonstanten $= 1/n = V/q = 1,44$ gange halveringstiden.

Luftskiftemåling med sporgas

Den traditionelle metode til bestemmelse af luftskiftet beror på anvendelse af fortyndingsformlen. Rumluften blandes med en sporgas, som ikke iøvrigt produceres eller absorberes i rummet, hvorefter sammenhørende værdier af t og c måles. Luftskiftet er da hældningen (med modsat fortegn) af det lineære koncentrationsforløb i enkeltlogaritmisk afbildning. Det er principielt ligegyldigt, hvor c måles, da koncentrationen til et vil-

kårligt tidspunkt er den samme i alle punkter i rummet og i udsugningskanalen, når opblandingen forudsættes at være fuldstændig.

Luftskiftet kan naturligvis også bestemmes af ligevægtsudtrykket på grundlag af en måling af ligevægtskoncentrationen af en gas, der kontinuerligt tilføres rummet med kendt rate, eller en måling af den gastilførsel, som er nødvendig for at opretholde en bestemt koncentration. Ved små luftskifter er ligevægten imidlertid længe om at indstille sig.

Ufuldstændig
opblanding og
ventilations-
effektivitet

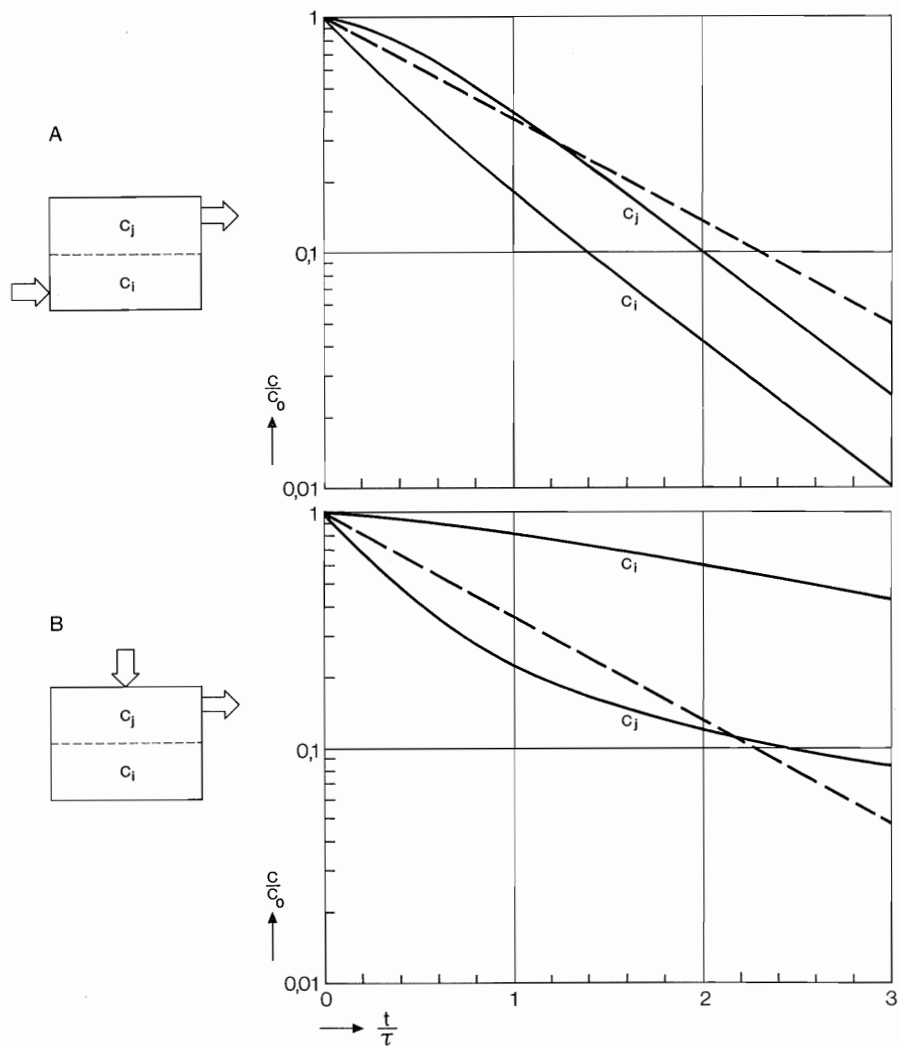
Er opblandingen ikke fuldstændig, vil der ikke længe være den samme gaskoncentration overalt i rummet. Ligevægtsudtrykket $c_s = r/q$ gælder stadig, når c_s henføres til udsugningskanalen. Ligevægtskoncentrationen c_{is} i opholdszonen kan være større eller mindre, og forholdet

$$\varepsilon_i = \frac{c_s}{c_{is}}$$

benævnes ventilationens effektivitet, fordi den udelufttilførsel, som er nødvendig for at holde gaskoncentrationen i opholdszonen under en bestemt grænseværdi, mindskes eller øges i forhold til den af idealblandningsteorien beregnede luftstrøm med faktoren $1/\varepsilon$ (Rydberg, Kulmar, 1947).

Sporgasmåling
ved ufuldstændig
opblanding

Foretages en traditionel luftskiftemåling med sporgas, bliver måleresultatet afhængigt af valget af målested, og koncentrationsforløbet bliver ikke lineært i enkeltlogaritmisk afbildning. Dette kan indses ved at betragte en model, som kan være en bedre tilnærmelse til de virkelige forhold end den simple idealblandingsmodel. Rummet tænkes opdelt i to lige store zoner, opholdszonen i og restzonen j. Ventilationsanlæggets udsugning er placeret i restzonen, medens indblæsningen kan være placeret i opholdszonen, tilfælde A, eller i restzonen, tilfælde B, se figur 14. Hver af zonerne regnes idealt opblandet, medens der antages at være en begrænset luftudveksling mellem zonerne karakteriseret af koblingsfaktoren β . Der kan herefter opstilles to



Figur 14. Beregnet sporgaskoncentration i et rum, der er delt i to zoner, i og j. Til tidspunktet 0 er koncentrationen overalt c_0 , og sporgastilførslen ophører. Zonerne er hver for sig fuldstændig opblandet, men luftudvekslingen mellem zonerne er begrænset. Koncentrationen aftager med forskellig hastighed i zonerne og afhænger af, om luften indblæses i zone i eller j. Ved fuldstændig opblanding i hele rummet og samme lufttilførsel aftager koncentrationen efter den punkterede linie med hældningen $-q/V = -1/\tau$.

Parameterværdierne i regneeksemplet er iøvrigt:

| | | A | B |
|-------------------------|----------------|-------------|-------------|
| koblingsfaktor | $\beta =$ | 0,2 | 0,2 |
| lokal vent.effektivitet | $\epsilon_i =$ | 1,71 | 0,29 |
| middelalder i rummet | $\tau_a =$ | 0,64 τ | 3,14 τ |

sammenhørende differentiaalligninger for koncentrationen i hver af zonerne, og som indeholder parametrene q , V , β og eventuelt r .

Den matematiske udregning viser, at i tilfælde A aftager koncentrationen hurtigere i opholdszonen end i restzonen. I tilfælde B er det omvendt. Koncentrationsforløbene i de to zoner er krumme i enkeltlogaritmisk afbildning men nærmer sig efter nogen tid til at være lineære og parallelle. Den numeriske værdi af hældningen af den næsten-lineære del, som benævnes λ , er forskellig fra q/V .

Luftens alder
og opholdstid

Til brug for den nærmere tolkning af sporgasmålinger har man indført begreberne opholdstid og middelalder for luftdelene (oprindeligt indført af Danckwerts i 1953, senere udbygget især af Sandberg). Ved ideal fortrængningsstrømning eller stempelstrømning er luftdelene tiden V/q om at passere fra indløb til udløb. Middelværdien af alderen regnet fra indstrømningstidspunktet for alle luftdelene i rummet er derfor $V/2q$. Ved andre strømningsformer passerer luftdelene ad forskellige veje og med skiftende hastighed gennem rummet. Strømningsforholdene må da beskrives ved hjælp af statistiske aldersfordelinger og deres middelværdier og varianser.

Det kan vises, at den lokale middelalder τ_i i et punkt i rummet kan bestemmes af

$$\tau_i = \frac{1}{c_0} \int_0^{\infty} c \, dt$$

hvor c_0 er begyndelsesværdien og c den aftagende koncentration målt i punktet ved et sædvanligt sporgasforsøg. Ved ideal opblanding er luftdelenes middelalder samt middellopholdstiden den samme som tidskonstanten $\tau = V/q$, idet

$$\int_0^{\infty} e^{-t/\tau} \, dt = \tau$$

Ved ufuldstændig opblanding findes den lokale middelalder som arealet under kurven for koncentrationsforlø-

bet divideret med begyndelseskoncentrationen, hvor arealet bestemmes grafisk eller numerisk af målingerne. Arealet kan i praksis bestemmes med tilstrækkelig nøjagtighed, selv om måleserien ikke fortsætter i det uendelige.

Lokal ventilationseffektivitet

Hvis det forudsættes, at de forureninger, som ventilationssystemet har til opgave at fjerne, opstår jævnt fordelt i rummet, kan det endvidere vises, at

$$\varepsilon_i = \frac{c_s}{c_{is}} = \frac{\tau}{\tau_i}$$

Den lokale ventilationseffektivitet, som defineredes på grundlag af en stationær betragtning, kan altså bestemmes af en transient sporgasmåling. Forholdene bliver mere komplekse, hvis forureningskilderne ikke er jævnt fordelt i rummet. Det gælder ikke generelt, at $c_s/c_{is} = \tau/\tau_i$. Sandberg har imidlertid foreslået, at man som almindelig definition på lokal ventilationseffektivitet anvender τ/τ_i , hvor τ_i bestemmes ved arealudmåling efter et sporgasforsøg.

Gennemsnitlig ventilationseffektivitet

Sandberg definerer yderligere en tilsvarende gennemsnitlig ventilationseffektivitet, der ikke udgår fra τ_i , men fra middelalderen τ_a af alle luftdelene i rummet. Ved ideal opblanding er $\tau_a = \tau_i = \tau$. Ved ufuldstændig opblanding er τ_a og τ_i forskellige. Det kan vises, at τ_a med tilnærmelse er lig med $1/\lambda$. Det er dog sikrere at bestemme middelalderen af

$$\tau_a = \frac{\int_0^{\infty} c t dt}{\int_0^{\infty} c dt}$$

hvor integralerne udregnes numerisk af resultater af sporgasmåling i udsugningskanalen.

Fortrængningsstrømning

Den teoretiske, nedre grænse for τ_a er $\tau/2$, som optræder ved ren fortrængningsstrømning. Figur 14A, hvor $\tau/2 < \tau_a < \tau$, repræsenterer en mellemform mellem fortrængningsstrømning og ideal opblanding, der giver et gunstigt forhold mellem luftkvalitet i opholdszonen og luftforbruget. En realisering forudsætter, at luften kan indblæses i opholdszonen med lav hastighed, således at der ikke opstår trækgener.

Kortslutnings-
strømning

Figur 14B, hvor $\tau_a > \tau$, er et eksempel på træg ventilation i opholdszonen og kortslutningseffekter mellem indløb og udløb. Målinger har vist, at kortslutning og lav ventilationseffektivitet hovedsageligt forekommer, når indblæsningstemperaturen er højere end rumtemperaturen.

Lufttilførsel og trækgener

Effektivitets-
begreb ved
anlægstype FT

Det begrebsapparat, som er skitseret ovenfor, er udviklet til brug ved undersøgelser og vurderinger af mekaniske ventilationssystemer i almindelighed. Det kan således anvendes i forbindelse med overvejelser over udformning og placering af indblæsnings- og udsugningsarmatur i boligventilationsanlæg af type FT. Ved udregning af ventilationseffektivitet indgår $\tau = V/q$ som reference ($V/2q$ kunne også vælges som reference med den begrundelse, at dette er den teoretiske grænse for τ_a). Anvendelsen af effektivitetsbegrebet forudsætter derfor, at V og q kan bestemmes. Ved anlægstype FT er der ingen principielle hindringer for at måle disse størrelser.

Anlægstype S og F

Ved de enklere systemer af type S og F er de praktiske muligheder for at styre lufttilførslen og rumstrømningen begrænsede bl.a. af hensynet til trækproblemerne. Samtidigt kan det være vanskeligt at måle q direkte, når lufttilførslen skyldes infiltration. Benyttes den traditionelle sporgasmetode til indirekte bestemmelse af q , er måleresultatet behæftet med en systematisk fejl, hvis opblandingen i rummet ikke er fuldstændig. Omrøres rumluften kunstigt under forsøget for at undgå fejlen, påvirker omrøringen muligvis den infiltration, som skulle måles. Det synes tvivlsomt, om ventilations-effektiviteten af et simpelt system i det hele taget kan bestemmes med rimelig nøjagtighed.

Kortslutning på grund af indblæsning med overtemperatur forekommer ikke ved de enkle systemer. Derimod kan der optræde en anden form for kortslutning. Har køkken og bad åbninger til det fri med forholdsvis ringe strømningsmodstand, koncentrerer ventilationen om disse

rum, uden at der opnås effektiv gennemskylning af opholds- og soverum. Ved kortvarig, høj fugtbelastning kan vinduesoplukning i køkken eller bad være hensigtsmæssig som en midlertidig foranstaltning. Under normale driftsforhold bør det imidlertid tilstræbes, at de rum, hvorfra den centrale udsugning foregår, har større strømningsmodstand fra det fri end de perifere rum. I konsekvens heraf bør udeluftventiler anbringes i beboelsesrum, men ikke i køkken og bad, jf. bestemmelserne i BR-82, og inderdøre bør ikke udføres tætte.

Udeluftventiler

Et spørgsmål af umiddelbar interesse er valg af ventiltype til anlæg af type S og F. I Sverige er indstrømningen fra udeluftventiler undersøgt ved fuldskalaforfølg i laboratoriet (Svensson, Blomqvist, 1974, Erikson, Mellin, 1978). Et antal ventiler er afprøvet ved en luftstrøm på 4,2 og 8,3 l/s samt ved en indblæsningstemperatur på + 20°, 0° og - 20° C. På grundlag af opmålinger af strømningsfelter er optegnet grænsekurver i vandret og lodret snit for de områder, hvor lufthastigheden overstiger 0,15 m/s. Det er vurderet, i hvor høj grad disse områder berører opholdszonen, der defineres som rummet fra gulv til 1,8 m over gulv og fra indervæg til et lodret plan 0,2 m fra vinduesvæggen.

Ventiler over og under vindue

De bedste resultater er opnået med en tallerkenventil, som er anbragt over vinduet og udsender luften i en flad stråle, der udbreder sig til alle sider langs væggen og delvis under loftet. Denne ventil har det største trykfald af de undersøgte ventiler, nemlig 23 Pa ved 8,3 l/s. Gode resultater er også opnået med en spalteventil, som er anbragt over vinduet, og som er udformet således, at luften rettes op mod og hen under loftet. Denne ventil, som har et trykfald på 13 Pa ved 8,3 l/s, fungerer tilfredsstillende ved indblæsning med en undertemperatur på 20 K. Der optræder nedfald med hastigheder over 0,15 m/s i opholdszonen ca. 1-3 m fra vinduet, når undertemperaturen er 40 K, men så store undertemperaturer er ikke typiske for danske forhold. Anbringes den samme spalteventil under vinduet, er resultatet kun tilfredsstillende ved isotherm indblæsning.

Tre andre spalteventiler, der ikke retter luftstrålen opad, og som har trykfald på nogle få Pa, har givet dårligere resultater ved anbringelse såvel over som under vindue. En høj og smal ventilationslem anbragt ved siden af vinduet giver nedfald af luft i opholdszonen ved indblæsning med undertemperatur.

Ventiler bag radiator

Der er også afprøvet to specielle ventiler beregnet til at tilføre luften umiddelbart bag en radiator eller konvektor og noget under midten. Disse ventiler fungerer tilfredsstillende under gunstige forhold, men de er meget tilbøjelige til at give træk langs gulvet. Strømningsbilledet afhænger især af radiatortemperaturen. Der opstår trækproblemer, hvis radiatoren er dimensioneret til et lavt temperaturniveau, eller hvis varmen afbrydes fx på grund af termostatstyring.

De svenske undersøgelser er foretaget i et forsøgsrum, hvor vinduet er anbragt i flugt med væggen plane inderside. Undersøgelsen belyser således ikke betydningen af forhindringer som vinduesplader eller gardiner eller ventilplaceringer i nicher. Den belyser heller ikke spørgsmål som støvfigurer eller misfarvninger omkring ventiler, muligheder for filtrering samt lydisolering og lydæmpning.

Det må tages i betragtning, at man for at holde den valgte luftstrøm har måttet indstille trykfaldet meget forskelligt fra ventil til ventil. Forskellene svarer til variationer i effektivt ventilareal fra 13 til 39 cm².

Trækkriterier

Undersøgelsens forudsætninger er et bestemt trækkriterium (lufthastighed 0,15 m/s) og en arbitrært defineret opholdszone. Det kan tænkes, at kriterierne ikke stemmer med brugernes oplevelser af trækgenerne. I en bolig har brugerne alternative opholdsmuligheder, og de kan i nogen grad selv definere deres opholdszone. Brugernes holdning til trækproblemerne er antageligt dikteret af deres prioritering af hensyn til hygiejne, luftkvalitet, termisk komfort, energiforbrug. Undersøgelser af disse bredere sammenhænge synes ikke at være foretaget.

Litteratur

J. Rydberg, E. Kulmar: Ventilationens effektivitet vid olika placering av inblåsnings- og utsugningsåppningarna
VVS (svensk), 1947

P. Danckwerts: Continuous flow systems
Chemical Engineering Science vol. 2, 1953 og vol. 9, 1958

D. Spalding: A note on mean residence-times in steady flows of arbitrary complexity
Chemical Engineering Science vol. 9, 1958

F. Zwietering: The degree of mixing in continuous flow systems
Chemical Engineering Science vol. 11, 1959

M. Chen, L. Fan, C. Hwang, E. Lee: Air flow models in a confined space, a study in age distribution
Building Science vol. 4, 1969

A. Svensson, C. Blomqvist: Avvägd tilluft, inget drag
SIB-informationsblad B13:1974

B. Erikson, A. Mellin: Undersökning av don för F och S-systemm
SIB-meddelande M78:19, 1978

F. Malmstrøm, J. Östrøm: Något om lokal ventilations-effektivitet
KTH Inst. Uppv. Vent. A4-serien nr. 47, 1980

P. Nielsen: Luftstrømning i ventilerede arbejdslokaler
SBI-rapport 128, 1981

Seminarium om spårgasmåtningar og ventilationseffektivitet
SIB-meddelande M81:16, 1981

M. Sandberg: What is ventilation efficiency
Building and Environment vol. 16, 1981

E. Skåret, H. Mathiesen: Ventilation efficiency
Environment International vol. 8, 1982

M. Sandberg, M. Sjöberg: The use of moments for assessing air quality in ventilated rooms
Building and Environment vol. 18, 1983

N. Christensen: Komfortgrænser for lufthastighed
DTH Lab. varme og klimateknik, 1983

Undersøgelser af ventilationen i etageboliger

Feltundersøgelser I årene 1945-60 gennemførtes i de skandinaviske lande en række ret stort anlagte feltundersøgelser af ventilationen i boliger. Undersøgelserne vedrørte helt overvejende etageboliger og havde til formål at give et billede af, hvorledes de dengang anvendte ventilations-systemer af type S og F fungerede i praksis. Nogle hovedresultater vises i skemaform i tabel 6.

Svenske målinger Rydberg og Arnell udførte i 1945 ialt 1800 luftskiftemålinger med sporgas i 300 boliger samt nogle kontorrum og klasseværelser i Stockholmsområdet. Der udførtes luftskiftemålinger i de enkelte rum i boligen. En måling udtrykker således den samlede lufttilførsel til rummet, uanset om luften er udeluft eller overføringsluft fra tilstødende rum, og lufttilførslen har naturligvis samme størrelse som den luftstrøm, der fjernes fra rummet. Af forsøgsmaterialet kan udskilles 131 etagelejligheder med central udsugning fra køkken og bad. Antages det, at den udsugede luftstrøm i disse lejligheder svarer til det målte luftskifte i køkken og bad, bliver middelluftydelsen 31 l/s for lejligheder med ventilation af type S og 35 l/s for lejligheder med ventilation af type F.

Rapportens oplysninger om lejlighedernes rumfang er ufuldstændige, men den fundne luftydelse synes at svare til et middelluftskifte for hele lejligheden på ca. $0,9 \text{ h}^{-1}$. I de egentlige opholdsrum var det målte luftskifte i middel lidt lavere. Mange lejligheder havde spalte-

ventiler ved vinduerne. Luftskeftemålinger i opholdsrum gav gennemsnitlig 70 pct. højere resultat, når spalteventilerne var åbne, end når de var lukkede. Spalteventilernes virkning på boligens samlede ventilation kan ikke aflæses af materialet.

Norske målinger

I 1951-52 undersøgte Hagen 70 lejligheder i en bebyggelse i Oslo. Ventilationssystemet var af type S men med lidt varierende udformning af aftrækskanalerne. Udsugningen fra køkken og bad målt direkte med en specielt konstrueret volumenstrømsmåler. Udsugningen var i middel 30 l/s pr. lejlighed med lukkede vinduer. Åbning af et køkkenvindue resulterede i en forøgelse af udsugningen fra køkkenet på ca. 75 pct.

Danske målinger

Becher og Evensen undersøgte i 1958-59 ventilationen i 48 københavnske ejendomme med ialt 1061 lejligheder. Udsugningen fra køkken og bad bestemtes dels med volumenstrømsmåler, dels ved hastighedsmåling med varme-trådsanemometer i udsugningsåbningen. De fundne middelværdier var 17 l/s i ca. 700 type S lejligheder og 23 l/s i ca. 130 type F lejligheder.

Svenske målinger

Endelig undersøgte Eriksson i 1958-60 ialt 434 lejligheder med ventilation af type F i Stockholm. Udsugningen fra køkken og bad blev målt med kalibreret volu-

| Forskningsprojekt | Type S ventilation | Type F ventilation |
|--|-----------------------------|--|
| Rydberg og Arnell Stockholm 1945-49 | 31 l/s (72 lejligheder) | 35 l/s (59 lejligheder) |
| Hagen Oslo 1951-54 | 30 l/s (70 lejligheder) | |
| Becher og Evensen København 1958-61 | 17 l/s (705 lejligheder) | 23 l/s (132 lejligheder) |
| Eriksson Stockholm 1958-62 | | 24 l/s $0,6 \text{ h}^{-1}$ (423 lejligheder) |

Tabel 6. Resultater af feltmålinger af udsugning fra køkken og bad i etagelejligheder med ventilation af type S og type F. Rydberg og Arnell har bestemt udsugningen ved sporgasmåling, de øvrige med volumenstrømsmåler. Eriksson har kontrolleret, at volumenstrømsmåling stemmer med sporgasmåling.

menstrømsmåler og var i middel 24 l/s svarende til et luftskifte for hele lejligheden på $0,6 \text{ h}^{-1}$. I 400 lejligheder blev udsugningen målt med såvel åbne som lukkede spalteventiler til det fri. Forskellen var i gennemsnit 6 pct.

Anlægstype S og F
i etageboliger

Hovedindtrykket af disse 4 undersøgelser er, at der måske kan være tvivl om, hvorvidt de anvendte målemetoder er helt sammenlignelige, men at der ikke synes at være klare indicier for, at type S ventilation fungerede væsentlig ringere end type F ventilation. Type S ventilation anvendes i dag kun i lavt byggeri, men undersøgelserne belyser ikke, hvorledes ventilationen fungerede i lave bygninger udover, at den danske rapport nævner, at der ikke var nogen entydig sammenhæng mellem udsuget luftstrøm og ejendommens etageantal eller den enkelte lejligheds højdeplacering.

Vejrafhængighed

Det må bemærkes, at målingerne udførtes ved forskellige vindhastigheder og udetemperaturer. I den danske undersøgelse var den meteorologiske middelvindhastighed 5 m/s og middeldifferensen mellem inde- og udetemperatur 15 K. De enkelte målinger af udsugningen ved type S ventilation blev henført til denne referencevejrtilstand ved hjælp af en korrektionsformel, som var udledt ved en stærkt forenklet betragtning. De norske resultater var derimod ukorrigerede målinger udført ved temperaturdifferenser mellem 0 og 30 K, og der kunne ikke ses nogen klar sammenhæng mellem luftydelse og temperaturdifferens. Årsagen formodedes at være, at beboerne lukkede udeluftventilerne i koldt vejr.

Nedadgående strømning
i aftrækskanaler

I den norske og den danske undersøgelse observeredes nogle få tilfælde af nedslag, dvs. nedadgående luftbevægelse i aftrækskanaler for type S ventilation. Det danske projekt omfattede en speciel undersøgelse af taghældningens betydning for nedslagstendensen. Det viste sig, at nedslag var hyppige ved en taghældning på 40° , når aftrækskanalen udmundede i den midterste eller den nederste del af tagfladen i vindsiden. Derimod forekom nedslag ikke ved en taghældning på 27° eller ved udmundning i læsiden af et 40° tag.

Ventilationsanlægs tilstand

Rapporterne over det danske og det sidste svenske projekt indeholder en del oplysninger om ventilationsystemernes tilstand på undersøgelsestidspunktet. I den danske rapport nævnes, at tilstopning af udsugningsåbningerne foretaget af beboerne forekom i 12 pct. af køkkener og 7 pct. af baderum ved type S ventilation samt i 8 pct. af lejligheder i en ejendom med type F ventilation, hvor udsugningsventilerne ikke var regulerbare. Disse tilfælde medtoges ikke ved middelværdiberegningen. Desuden var udsugningsventilerne ved type F ventilation ofte dårligt renholdte. Type S aftrækskanaler fra køkkenen havde tendens til at snavse til, hvorimod aftrækskanaler fra bad/wc holdt sig nogenlunde rene.

Begge rapporter nævner eksempler på uhensigtsmæssig udførelse og mangelfuld tætning af ventilationskanaler samt manglende isolering af kanaler i kolde tagrum, hvilket medførte kondensation og korrosionsskader. Den svenske rapport nævner særligt en ejendom med et anlæg af type F, der først måtte renses, tætnes og indreguleres, før der kunne foretages fornuftige målinger.

Rensning af ventilationsanlæg

Tilsmudsningens betydning er nærmere belyst nogle år senere i en dansk og en svensk undersøgelse. Den danske undersøgelse (SBI-særtryk 285, 1979) vedrørte en bygning i København med 14 etageboliger, der ventileredes med et anlæg af type F. Anlægget havde været i drift i 12 år uden nogensinde at have været rensset. Efter en total rensning af systemet steg luftydelserne med over 100 pct. Den svenske undersøgelse (Wallin, 1978) omfattede nogle bygninger i Norrköping med ialt 407 lejligheder. Ventilationsanlæggene, som ligeledes var af type F, blev rutinemæssigt rensset med tidsintervaller på nogle få år. På undersøgelsestidspunktet var der forløbet gennemsnitligt 2,2 år siden sidste rensning. Der gennemførtes en rensning af kanaler og ventilatorer, men ikke af udsugningsventiler, og luftydelserne steg derved 24 pct. Det ser altså ud til, at tilsmudsningen af mekaniske udsugningsanlæg, der ikke omfatter filtrering af luften, medfører et fald i luftydelserne, som er af størrelsesordenen 8 pct. pr. år.

Udeluftventiler

Observationerne vedrørende udeluftventilernes virkninger i de ældre svenske undersøgelser (Rydberg, 1949, Eriksson, 1962) antyder, at åbning og lukning af udeluftventiler i boliger med type F ventilation har meget lille indflydelse på boligens samlede ventilation, men kan have væsentlig indflydelse på udeluftens fordeling på rummene. Samme resultat ses med større tydelighed i en ny dansk undersøgelse, hvor der er anvendt en luftskiftemåleteknik, der muliggør samtidig bestemmelse af udelufttilførslen til hver enkelt rum (Collet, 1983). Som eksempel vises i tabel 7 resultater fra en lejlighed på 3 beboelsesrum, køkken, entre, bad og wc. Det skal bemærkes, at med denne måleteknik får et rum, der overvejende ventileres med overføringsluft, tilsyneladende en meget ringe ventilation. Det behøver imidlertid ikke at betyde, at rummets ventilation er utilstrækkelig. Overføringsluft er naturligvis også i stand til at fjerne fugt og forureninger.

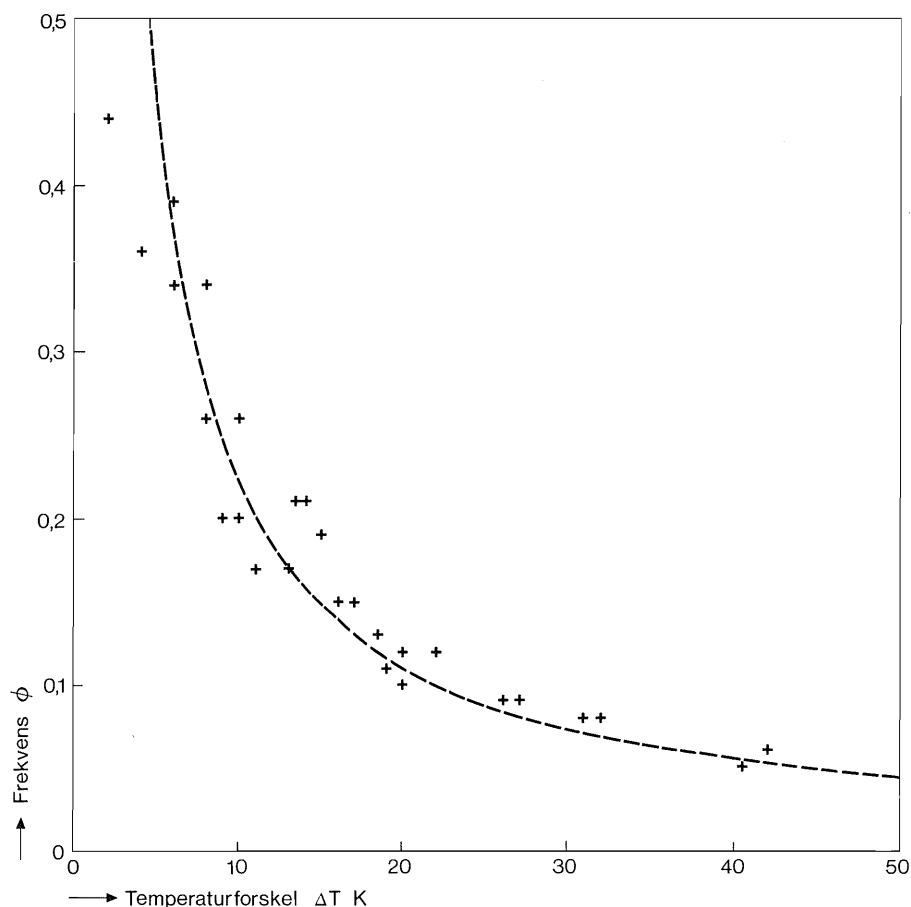
Vinduesoplukning

Brugervanerne har iøvrigt været genstand for nogle interessante undersøgelser i Sverige. Lyrberg (1983) undersøgte hyppigheden af vinduesoplukninger i beboel-

| Udsugning Udeluftventiler | i gang alle åbne | i gang køk. lukket | i gang alle lukkede | standset alle lukkede |
|------------------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------|
| stue | 8 l/s | 11 l/s | 11 l/s | 4 l/s |
| soverum | 11 - | 12 - | 7 - | 0 - |
| soverum | 7 - | 8 - | 4 - | 0 - |
| køkken | 9 - | 7 - | 12 - | 4 - |
| entre | 3 - | 2 - | 5 - | 0 - |
| bad | 0 - | 0 - | 0 - | 0 - |
| wc | 0 - | 0 - | 0 - | 0 - |
| lejlighed | 38 l/s | 40 l/s | 39 l/s | 8 l/s |

Tabel 7. Målinger af samlet udelufttilførsel og fordeling på rum for en etagelejlighed i Brøndby Strand (Collet, 1983). Ventilationssystemet er af type F, og der findes udeluftventiler i stue, køkken og 2 soverum (bad og wc er indeliggende). Målingerne er foretaget med udsugningssystemet i drift og afbrudt samt med udeluftventilerne åbne og lukkede.

sesbygninger med indtil 5 etager, herunder nogle rækkehuse, opført i perioden 1950-75. Undersøgelsen foregik ved visuel observation af facaderne af ret tilfældigt udvalgte bygninger og omfattede ca. 50.000 observerede rum. Samtidigt analyserede Lyrberg nogle ældre undersøgelser af oplukningsfrekvensen, herunder især en større undersøgelse udført i Malmø i 1960, som omfattede gentagne observationer af 200 lejligheder i en nyopført højhusbebyggelse (Holm, Pleijel, Ronge). Der foretoges her 90 visuelle observationer om dagen af alle lejlighedernes vinduer i 50 udvalgte dage fordelt over et år. Lyrberg konkluderer, at frekvensen af vinduesoplukninger, dvs. den brøkdelen af vinduerne i en facade, som til et givet tidspunkt står åbne, først og fremmest afhænger af udetemperaturen. Som en første tilnærmelse kan frekvensen sættes omvendt proportionalt med temperaturdifferensen mellem inde og ude, se figur 15.



Figur 15. Frekvensen ϕ af vinduesoplukninger afhængigt af temperaturdifferensen ΔT mellem inde og ude. Den punkterede kurve repræsenterer hypotesen $\phi = 2,2/\Delta T$ (efter Lyrberg).

Malmøundersøgelsens forfattere mener at kunne påvise en sekundær indflydelse fra andre vejrparametre, især solindstråling og blæst. Lyrberg oplyser, at det er mere almindeligt, at vinduer åbnes på klem, end at de lukkes helt op. En begrænsning ved undersøgelsesmetoden er, at der ikke kan foretages observationer i nattetimerne.

Brugeradfærdens
vejrafhængighed

Iagttagelserne understøtter en formodning om, at brugerne i praksis er tilbøjelige til at indskrænke ventilationen desto mere, jo koldere vejret er. I et tidligere afsnit blev det nævnt i forbindelse med figur 4, at risikoen for fugtproblemer i boligen er ret uafhængig af årstiden, når det forudsættes, at ventilationen holdes konstant. Hvis brugeradfærden i virkeligheden er påvirket af vejrtilstandene på den antydede måde, kan de koldeste perioder blive de mest kritiske med hensyn til fugtforholdene og luftkvaliteten. En mulig videre konsekvens er, at brugeradfærden i nogen grad tilslører de principielle forskelle mellem ventilationssystemerne, og at energiforbruget til ventilation er mindre forudsigeligt end normalt antaget.

Brugeradfærdens
systemafhængighed

Eden og Persson (1978) gennemførte en interviewundersøgelse blandt beboerne i 23 lejligheder fordelt over 8 ejendomme fra perioden 1950-70 i Göteborg. Formålet var at registrere brugervaner og brugerholdninger vedrørende energianvendelsen i etageboliger. Ventilationssystemet var af type S i 5 lejligheder, type F i 12 lejligheder og type FT i 6 lejligheder. Beboerne var overvejende tilfredse med baderumsventilationen, men fandt køkkenventilationen utilstrækkelig under madlavning. Vinduesudluftning foretoges ret ofte, og nogle afgørende forskelle i udluftningsvanerne fandtes ikke. Forskellene betingedes ikke så meget af ventilationssystemerne som af indetemperaturen, rygevaner og ønsker om soveklime. Frisk luft var for de fleste ensbetydende med udeluft fra åbne vinduer. Der forekom spredte klager over træk ved alle ventilationssystemerne. I en bolig med type FT ventilation var en indblæsningsåbning afblændet ved hjælp af tape.

Erfaringer med
anlægstype FTX

Endelig skal nævnes, at energiøkonomien ved varmegenvinding har været undersøgt i to bebyggelser i henholdsvis Söderhamn og Tensta i Sverige (Svensson, 1982). Begge bebyggelser havde fjernvarme og var ved opførelsen i 1970 blevet udstyret med ventilationsanlæg af type FT. I 1980 blev anlæggene ombygget til type FTX på en sådan måde, at varmevekslerne kunne kobles ud. I vinteren 1981-82 blev ventilationen holdt i drift som type FT i hveranden uge og som type FTX i de øvrige uger. Samtidigt målttes de vigtigste temperaturparametre og forbruget af energi. Nogle hovedresultater gengives i tabel 8.

Den i vintermånederne målte energigenvinding på henholdsvis 18 og 12 pct. af energiforbruget til varme og ventilation uden brug af varmevekslere svarer til en besparelse på 9 og 6,5 GJ pr. lejlighed i et normalår. Forfatteren skønner, at man kunne have opnået en besparelse på ca. 10 GJ i begge bebyggelser, hvis anlæggene havde været bedre tætnet og indreguleret. Især i Tensta var der en alvorlig ubalance mellem indblæst og udsuget luftstrøm.

Forsøger man at overføre resultatet til danske forhold, må der tages hensyn til nogle forskelligheder. I

| Etageboligbebyggelse | Söderhamn | Tensta |
|----------------------------------|---------------------|---------------------|
| årsmiddel af udetemperatur | 4,7 °C | 6,5 °C |
| antal undersøgte lejligheder | 59 | 50 |
| etageareal pr. bolig | 69 m ² | 104 m ² |
| indblæsning pr. bolig | 33 l/s | 27 l/s |
| udsugning pr. bolig | 40 l/s | 45 l/s |
| luftskifte henført til udsugning | 0,8 h ⁻¹ | 0,6 h ⁻¹ |
| målt temperaturvirkningsgrad | 55 pct. | 59 pct. |
| besparelse på samlet fjernvarme | 18 pct. | 12 pct. |
| besparelse pr. bolig på årsbasis | 9 GJ | 6,5 GJ |

Tabel 8. Energiøkonomi ved varmegenvinding i 2 svenske etageboligbebyggelser (Svensson, 1982). Der angives målt besparelse ved FTX ventilation i forhold til samlet fjernvarmeforbrug ved FT ventilation. Den målte besparelse er omregnet til en årsbesparelse pr. lejlighed i et lokalt normalår. Årsenergiforbruget til opvarmning af ventilationsluften uden varmegenvinding er ca. 21 GJ pr. lejlighed.

absolut mål må energibesparelsen blive noget mindre, når man tager det mildere klima i betragtning, og når luftomsætningen reduceres til det niveau, som angives i BR-82, nemlig en udsugning på 35 l/s. Sammenlignes med ventilation af type F, må tages i betragtning, at nettoenergibesparelsen fremkommer som differensen mellem et mindreforbrug af energi i rumopvarmningsanlægget og et merforbrug af energi til motorer, til eventuel frostsikrings- eller afrimningsanordning, og til en eftervarmevlade, der hæver indblæsningstemperaturen til et niveau, der ikke medfører trækproblemer. Hertil anvendes normalt en blanding af elektrisk energi og andre energiformer. Ved vurdering af lønsomhed må der således ikke alene tages hensyn til energibesparelser men også til forskydninger fra billigere til dyrere energiformer.

Litteratur

J. Rydberg, Å. Arnell: Ventilationens storlek i bostäder
Statens Kommitté för Byggnadsforskning, meddelanden 15, 1949

H. Hagen: Oppdriftsventilasjon
Norges Byggeforskningsinstitutt, rapport 14, 1954

P. Becher, L. Evensen: Boligventilation
SBI-rapport 44, 1961

B. Eriksson: Bostadsventilation
Statens råd för byggnadsforskning, rapport 77, 1962

L. Holm, G. Pleijel, H. Ronge: Bostad och sol
Statens råd för byggnadsforskning, rapport 100, 1964

O. Wallin: Erfarenheter från rensning av några ventilationssystem i flerfamiljshus, förändringar av frånluftsflöden vid rensning av kanaler
KTH. Inst. Uppv. Vent. Tekniska meddelanden 124 + 126, 1978.

M. Eden, M. Persson: Brukarnas energivanor
Statens råd för byggnadsforskning, rapport R38:1978

O. Nielsen: Effekten af rengøring af ventilationskanaler
SBI-særtryk 285, 1979

A. Svensson: Värmeåtervinning ur ventilationsluft, flerbostadshus i Söderhamn och Tensta
SIB-meddelande M82:15, 1982

P. Collet: Measurements of air infiltrations rates in dwellings with only exhaust ventilation
Energy R+D Programme of the Commission of the European Communities, Energy conservation in buildings - heating, ventilation and insulation, 1983

M. Lyrberg: Residents and windows, airing
SIB-bulletin M83:21, 1983

Undersøgelser af ventilationen i enfamiliehuse

Ventilation af
type S

Til enfamiliehuse og rækkehuse har et ventilationssystem af type S været det mest almindelige. Selv om man har opgivet dette system i nyt etagebyggeri, kan det stadig anvendes til boliger i lavt byggeri i henhold til gældende byggelovgivning i Danmark og de øvrige nordiske lande.

Det må antages, at systemet har dårligere betingelser for at virke effektivt i lavt byggeri, dels fordi der ikke kan opnås så stor højde på aftrækskanalerne, dels fordi boligarealet sædvanligvis er større end for etageboliger. Etplanshuse med fladt tag frembyder i den henseende de ugunstigste betingelser.

Litteraturen indeholder imidlertid næsten ingen relevante oplysninger baseret på måledata for boliger i småhuse med ventilation af type S. De fleste undersøgelser synes foretaget i enfamiliehuse helt uden ventilationssystem, og ofte har de undersøgte huses tæthed været ringere end efter skandinavisk praksis.

Tidlig engelsk
undersøgelse

I England undersøgtes omkring 1950 nogle rækkehuse først i ubeboet og senere i beboet stand (Dick, 1949 og 1951). De beboede huse havde væsentligt højere luftskifte end de ubeboede, men husenes tæthed og deres installationer var meget afvigende fra nutidigt dansk byggeri.

Forbrændingsluft
til ildsted

Enfamiliehuses ventilationsforhold kompliceres af, at der kan være installeret ildsted med skorsten inden for boligen. Den indfyrede effekt for en oliefyret central-

varmekedel er typisk 20 kW. Hertil kræves en forbrændingslufttilførsel på 8 l/s under drift. Et gasfyret ildsted med en såkaldt atmosfærisk brænder udstyres normalt med trækafbryder, hvor røggassen fortyndes med rumluft. Det kan anslås, at der ved en effekt på 20 kW passerer mindst 16 l/s gennem aftrækket, som iøvrigt fungerer som ventilationskanal uden for driftsperioder. Ildsteder for fast brændsel har et større luftforbrug i forhold til effekten. Gennem en pejseskorsten kan der passere en luft-røggasstrøm af størrelsesordenen 100 l/s ved forbrænding af 5 kg træ i timen på grund af det store luftoverskud i et åbent ildsted. Disse tal skal ses i forhold til det normale ventilationsbehov for boliger, som er af størrelsesordenen 40 l/s. Tallene antyder også, at ildsteder i meget tætte huse med mekanisk ventilation næppe kan fungere, med mindre de indkapsles og forsynes med separat lufttilførsel.

Canadisk undersøgelse af gasfyret hus

I Canada (Shaw, Brown, 1982) er foretaget nogle sammenlignende målinger på et enfamiliehus i to etager samt kælder. Huset opvarmedes skiftevis med et gasfyret ildsted i kælderen og med elektrisk varme. Huset var forholdsvis tæt og havde ingen egentlige ventilationsindretninger. De målte luftstrømme ved en temperaturforskel mellem inde og ude på 28 K og uvæsentlig vind vises i tabel 9. I elopvarmningsalternativet med afblændet skorsten er infiltrationen og exfiltrationen begge 21 l/s. I gasfyringsalternativet vokser infiltrationen til 32 l/s, men kun 40 pct. heraf bortgår ved exfiltration, de 60 pct. passerer skorstenen. Den større infiltration fremkommer, fordi opdriften i skorstenen løfter det neutrale plan til nær loftet i øverste etage. Målingerne viser også, at vinden får en mærkbar indflydelse på infiltrationen ved vindhastigheder over 3,5 m/s i elopvarmningsalternativet, men først over 7 m/s i gasfyringsalternativet.

Vinduesventilation

I boliger helt uden eller kun med nødtørftige ventilationsindretninger kan vinduesventilationen spille en afgørende rolle. I Tyskland og Østrig har man været optaget af problemet om, hvorledes periodisk vindues-

| Enfamiliehus i Ontario | elopvarmet | gasopvarmet |
|------------------------|---------------------|---------------------|
| tæthed n_{50} | 3,4 h ⁻¹ | 3,7 h ⁻¹ |
| temp.dif. inde-ude | 28 K | 28 K |
| vindhastighed | < 3,5 m/s | < 3,5 m/s |
| infiltration | 21 l/s | 32 l/s |
| exfiltration | 21 l/s | 13 l/s |
| skorsten | | 19 l/s |

Tabel 9. Måling af lufttransport gennem enfamiliehus, som er alternativt elopvarmet og gasopvarmet (Shaw, Brown, 1982). Gasbrænderen opererer intermitterende styret af en termostat. Der er strømning i skorstenen både under drift og i stilstand, og tallene angiver den resulterende luftstrøm. Bygningstætheden er målt med åben skorsten (gas) og med₃afblændet skorsten (el). Bygningens volumen er 386 m³.

ventilation fungerer i forhold til kontinuert ventilation (Gertis, Hauser, 1979, Gilli, 1983). Det anslås, at der ved ensidig vinduesoplukning opnås luftskifter af størrelsesordenen 10 h⁻¹ og ved oplukning i modstående facader omkring 40 h⁻¹. Udskiftning af luften ved regelmæssigt gentagne, kortvarige vinduesoplukninger kaldes stødventilation. Den er naturligvis i praksis vanskelig at styre, men man kan foretage teoretiske beregninger af forureningsbelastninger, temperaturforløb og energiforbrug, hvis man går ud fra ideale forudsætninger.

Tysk beregning af stødventilation

Stødventilation af et personbelastet rum kan fx sammenlignes med jævn ventilation, idet de summerede luftmængder forudsættes lige store, og luften forudsættes fuldstændig opblandet. Den gennemsnitlige og den maksimale CO₂-koncentration bliver da højere ved stødventilation end ved jævn ventilation. Derimod reduceres energiforbruget et par procent ved anvendelse af stødventilation, hvis det antages, at varmeanlægget ikke reagerer så hurtigt, at det forhindrer et temperaturfald i udluftningsperioderne. For at stødventilationen overhovedet kan accepteres, må man da gå ud fra, at de kortvarige temperaturfald ikke opfattes som en komfortmæssig gene. Praktiske forsøg med stødventilation synes

ikke at være foretaget. En principiel begrænsning er, at stødventilationen forudsætter en manuel indgriben, som brugerne ikke har mulighed for at foretage om natten.

Ventilation
af type F

I den nyere skandinaviske litteratur refereres en del måleresultater vedrørende funktionen af mekaniske ventilationssystemer i enfamiliehuse og rækkehuse.

For huse med ventilation af type F indvirker åbning og lukning af udeluftventiler på luftens fordeling mellem rummene, men kun i ringe grad på den samlede ventilation. Denne virkning, der er konstateret i etageboliger, og som der er anført et eksempel på i tabel 6, er også påvist ved målinger i danske rækkehuse (Collet, 1983, se foregående kapitel).

Svenske målinger
på tætte huse

I en enfamiliehusbebyggelse uden for Stockholm blev der ved opførelsen i 1977 gjort en særlig indsats for at opnå tæthed (Elmroth, 1978 og 1981). Lækagen ved 50 Pa af 7 undersøgte huse var ved færdiggørelsen $n_{50} = 0,8 \text{ h}^{-1}$. Efter at husene havde været beboet i 2 år, målt $n_{50} = 1,3 \text{ h}^{-1}$. Husene ventileredes med et anlæg af type F, der kunne indstilles i 3 trin, og som ved ibrugtagningen havde de i tabel 10 viste ydelser.

Disse er stort set uafhængige af udeluftventilernes stilling. På grund af den høje tæthed opstår et undertryk, som gør ventilationen ufølsom for vejrpåvirkninger, men som ved lukkede udeluftventiler har en størrelse, der må formodes at være til ulempe. Der er ikke

| Udeluft- ventiler | Udsugning l/s | | | Undertryk Pa | | |
|----------------------|---------------|--------|--------|--------------|--------|--------|
| | trin 1 | trin 2 | trin 3 | trin 1 | trin 2 | trin 3 |
| lukkede | 22 | 47 | 77 | 12 | 30 | 50 |
| 40 pct. åbne | 23 | 48 | 79 | | | |
| helt åbne | 23 | 44 | 84 | 3 | 7 | 14 |

Tabel 10. Udsugning og undertryk i svensk enfamiliehus med ventilationsanlæg af type F, der kan indstilles i 3 trin (Elmroth, Lögdberg, 1978 og 1981). Klimaskærmen har en tæthed svarende til $n_{50} = \text{ca. } 1 \text{ h}^{-1}$. Bygningens volumen er 345 m^3 .

Ventilation
af type FTX

givet oplysninger om beboernes daglige brug af ventilationssystemet.

Energiøkonomien ved udnyttelse af afkastluftens varmeindhold til forvarmning af tilført luft blev undersøgt i en rækkehusbebyggelse i Skellefteå i Nordsverige (Svensson, 1981). I bebyggelsen fandtes to hustyper med lidt forskellig tæthed, en etplanstype og en toplanstype. Husene var elektrisk opvarmede og havde ventilationssystem af type FTX. I forsøget indgik 8 etplanshuse og 6 toplanshuse. Disse sammenlignedes med kontrolgrupper på henholdsvis 9 og 7 tilsvarende huse, hvor ventilationsanlæggets indblæsningsdel og varmeveksler var sat ud af funktion. Ventilationen i kontrolgrupperne fungerede som type F, idet der samtidigt var monteret udeluftventiler. I vinteren 1980-81 registreredes temperaturer og energiforbrug, se tabel 11.

| Skellefteå rækkehusbebyggelse | etplan | toplan |
|------------------------------------|---------------------|---------------------|
| årsmiddel af udetemperatur | 2,7 °C | 2,7 °C |
| antal undersøgte huse FTX/F | 8/9 | 6/7 |
| etageareal pr. bolig | 81 m ² | 100 m ² |
| klimaskærms tæthed n ₅₀ | 3,2 h ⁻¹ | 1,0 h ⁻¹ |
| indblæsning pr. bolig (kun FTX) | 23 l/s | 31 l/s |
| udsugning pr. bolig | 27 l/s | 35 l/s |
| luftskifte henført til udsugning | 0,5 h ⁻¹ | 0,5 h ⁻¹ |
| målt temperaturvirkningsgrad | 69 pct. | 69 pct. |
| besparelse på samlet elforbrug | 7 pct. | 7 pct. |
| besparelse pr. bolig på årsbasis | 3,3 GJ | 3,7 GJ |

Tabel 11. Energiøkonomi ved varmegenvinding i elopvarmet svensk rækkehusbebyggelse (Svensson, 1981). To grupper huse med FTX ventilation er sammenlignet med tilsvarende grupper med F ventilation og samme luftydelse. Der angives målt besparelse ved FTX ventilation i forhold til samlet elforbrug i huse med F ventilation. Den målte besparelse er omregnet til en årsbesparelse pr. hus i et lokalt normalår. Årsenergiforbruget til opvarmning af ventilationsluften uden varmegenvinding er ca. 20 GJ pr. hus.

Svenske
måleresultater

De målte energiforbrug er vanskelige at analysere, fordi der optræder forskelle mellem forsøgsgruppernes og kontrolgruppernes elforbrug til husholdning og varmt brugsvand, som er af samme størrelsesorden som forskellen i forbrug til opvarmning og ventilation. Forfatteren mener at kunne påvise en forskel på 7 pct. af det samlede elforbrug, som må tilskrives varmegenvindingen. Forskellen svarer til en besparelse på omkring 3,5 GJ pr. hus i et normalår. Man havde imidlertid ventet at få en besparelse på næsten 10 GJ pr. hus. Differensen mellem forventet og målt besparelse kan ikke forklares ved dårlig funktion af varmeveksleren eller forkert indregulering af anlægget. Det uventede resultat skyldes efter forfatterens mening, at udelufttilførslen i kontrolgrupperne har været lavere end i forsøgsgrupperne, dels fordi brugerne har reduceret ventilationen på grund af trækgener fra udeluftventilerne, dels fordi en overlejtret infiltration-exfiltration har gjort sig mærkbart gældende i gruppen af etplanshuse med FTX ventilation. En gennemsnitlig forskel på udeluftskiftet på kun $0,15 \text{ h}^{-1}$ kan forklare afvigelsen mellem forventet og målt besparelse.

Andre svenske
erfaringer

En anden nordsvensk undersøgelse vedrørte 14 forskellige enfamiliehuse opført 1977 i Umeå (Jonson m.fl., 1980). Husene var ordnet i 7 par, der hver omfattede et hus, som netop opfyldte kravene til energiøkonomi i SBN 75, og et tilsvarende hus, der indeholdt konstruktioner eller installationer til yderligere nedbringelse af energiforbruget. 5 af de forbedrede huse havde ventilation af type FTX.

Forfatterne konkluderer, at besparelserne ved varmegenvinding er af størrelsesordenen 3,5 GJ pr. hus og år. Årsagen til den begrænsede besparelse menes at være, at ventilationen i virkeligheden er mindre end forudset. Forfatterne skønner, at beboerne bruger indstillingsmulighederne på anlæg af type FTX således, at udeluftskiftet i gennemsnit kun er $0,28 \text{ h}^{-1}$.

Endelig skal nævnes, at der i et svensk enfamiliehus med anlæg af type FTX blev foretaget nogle observatio-

ner gennem et par uger, hvor huset var ubeboet men ventileret og opvarmet til 17°C (Lindh, Nylund, 1982). Det viste sig at der næsten ikke blev genvundet energi i anlægget, selv om det var prøvet og typegodkendt.

Årsagen hertil angives at være lækage og varmetab fra kanalsystemet, som er anbragt i et koldt tagrum. Desuden ligger årsagen i styringen af et elektrisk varmelegeme på varmevekslerens tilluftside. Varmelegemet skal hindre indblæsningstemperaturen i at falde under 12°C og skal herved samtidigt virke som beskyttelse mod frysning på varmevekslerens afkastningsside. Ved forholdsvis lav indetemperatur indkobles varmelegemet jævnligt. Den tilførte elenergi bevirker, at varmevekslerens to sider får næsten samme temperaturniveau, hvorved varmeoverføringen går i stå. Denne situation ville også kunne opstå i det beboede hus fx i forbindelse med natsænkning.

Litteratur

- J. Dick: Experimental studies in natural ventilation of houses
J. Institution of Heating and Ventilating Engineers
vol. 17, 1949
- J. Dick, D. Thomas: Ventilation research in occupied houses
J. Institution of Heating and Ventilating Engineers
vol. 19, 1951
- A. Elmroth: Well insulated airtight buildings, design and construction
Statens råd för byggnadsforskning, dokument D10:1978
- K. Gertis, G. Hauser: Energieeinsparung durch Stosslüftung?
Heizung, Lüftung, Haustechnik vol. 30, 1979
- J. Jonsson, M. Gisselberg, R. Hedvall, G. Persson: Villa-80, fjorton energisnåla småhus i Umeå
Statens råd för byggnadsforskning, rapport R98:1980
- A. Elmroth, A. Lögdberg: Airtight houses and energy consumption
KTH Inst. Uppv. Vent. Tekniska meddelanden 136, 1981
- A. Svensson: Värmeåtervinning ur ventilationsluft, Anderstorp, Skellefteå
SIB-meddelande M81:23, 1981

C. Shaw, W. Brown: Effect of a gas furnace chimney on the airleakage characteristic of a two-storey detached house

National Research Council Canada, Division of Building Research no. 192, 1982

A. Lindh, P. Nylund: En granskning av ett FTX-ventilerat småhus

Statens råd för byggnadsforskning, rapport R115:1982

P. Gilli: Dauerlüftung oder Stosslüftung?
Heizung, Lüftung, Haustechnik vol. 34, 1983

Sammenfattende diskussion

Ventilationsbehov og energiforbrug

Alment luftbehov

Behovet for luftfornyelse i boliger er primært en følge af beboernes tilstedeværelse og aktivitet, men af praktiske grunde henføres ventilationsbehovet i formelle sammenhænge til boligen. Den nødvendige tilførsel af udeluft regnes ofte proportional med boligens nettoareal og sættes til $0,35 \text{ l/s m}^2$. Efter den fremherskende opfattelse fører en rimelig afvejning af hensynene til sundhed, lugtkomfort, fugtbelastning og energiforbrug til en ventilation af denne størrelse, når den for de skandinaviske lande typiske levevis og persontæthed i boliger tages i betragtning.

Store og små
boliger

For store boliger med få beboere er denne ventilation efter alt at dømme på den sikre side. For små, mere tætbefolkede boliger er forholdene antageligt mere kritiske. I byggeforskrifter optræder også ventilationsangivelser, som snarere er baseret på betragtninger om en grundbelastning, der er en følge af, at boligen overhovedet er udstyret med køkken og bad. Efter disse angivelser er afhængigheden af boligstørrelsen indirekte, idet luftbehovet vokser med antallet af hygiejnerum. Denne måde at formulere behovet på giver større sikkerhed for de små boliger. De danske byggeforskrifter angiver udeluftbehovet for en normalbolig med køkken og bad til 35 l/s , hvilket overstiger der førnævnte behov på $0,35 \text{ l/s m}^2$, når nettoarealet er under 100 m^2 .

Skiftende behov

Et forhold, som vanskeliggør formuleringen, er, at ventilationsbehovet i virkeligheden ikke er konstant. På den ene side kan der være perioder, hvor boligen ikke benyttes. På den anden side forekommer akutte behov for forstærket ventilation i forbindelse med processer som vask og madlavning. Under sommerforhold med varmeoverskud i boligen er den naturlige brugerreaktion at åbne vinduer og døre uanset hvilke ventilationsinstallationer, der forefindes. En behovsformulering, der på tilfredsstillende måde dækker disse forskellige og delvis modstridende hensyn er næppe fundet endnu. Ventilationsbestemmelserne i de danske byggeforskrifter synes ikke baseret på en klar stillingtagen til tilladeligheden af ydelsesreduktioner og til mindstekrav til forceringsmuligheder.

Krav om ventilationssystem

Boliger skal imidlertid have et ventilationssystem efter de byggeforskrifter, som gælder og har været gældende i en årrække. Litteraturen om boligventilationsproblemer uden for Skandinavien er ofte baseret på forudsætninger om, at boligen ikke har andre ventilationsindretninger end oplukkelige vinduer og eventuelt ildsteder med skorstene. Tilsvarende forudsætninger kan være relevante i den ældre danske boligmasse navnlig uden for København. De vigtigste spørgsmål for nybyggeriet og for hovedparten af den eksisterende bebyggelse må være boligventilationssystemernes evne til at opfylde behovene og luftinfiltrationens indflydelse på systemernes virkemåde. Boligventilationssystemerne inddeles i følgende hovedtyper:

- Type S: naturligt aftræk fra køkken, bad, wc og eventuelt andre rum, udelufttilførsel gennem ventiler og tilfældige utætheder.
- Type F: mekanisk udsugning fra køkken, bad, wc og eventuelt andre rum, udelufttilførsel gennem ventiler og tilfældige utætheder.
- Type FT: mekanisk indblæsning af forvarmet luft og mekanisk udsugning.
- Type FTX: mekanisk indblæsning og udsugning med varmegenvinding.

- Transmissionstab** Energiforbruget til bygningsopvarmning skyldes transmissionstab og ventilationstab. Transmissionstabet kan teoretisk gøres vilkårligt lille ved, at klimaskærmen isoleres tilsvarende kraftigt. I praksis sætter økonomien grænser for, hvor langt man kan gå.
- Ventilationstab** Derimod kan ventilationstabet ikke umiddelbart reduceres, da det er bestemt af den hygiejnisk-komfortmæssige nødvendighed af, at luften udskiftes. Der er dog en teoretisk mulighed for at bruge afkastluftens varmeindhold til at opvarme den tilførte udeluft til rumtemperatur og derved helt undgå ventilationstab. Økonomien sætter også her en grænse for, hvad der kan opnås i praksis. En realisering forudsætter, at ventilationsystemet er af type FTX og den økonomiske vurdering afhænger af, hvilket ventilationssystem, man anvender som sammenligningsgrundlag.
- Energiforbrug** Årsenergiforbruget til opvarmning af ventilationsluften uden varmegenvinding beregnet på grundlag af det traditionelle danske graddøgnsbegreb er 100 MJ pr. m² nettoetageareal, når ventilationen forudsættes at udgøre 0,35 l/s m². Omregnet til brændselsforbrug under hensyntagen til fyringstab svarer det til ca. 3,3 l fyringsgasolie eller 3 m³ N-gas pr. m² og år.
- Sommerforhold** Udregnet efter det traditionelle graddøgnsbegreb har boliger i 39 pct. af årets dage varmeoverskud eller i hvert fald intet varmeunderskud, der skal dækkes af betalingsenergi. I varmeoverskudsperioden er hensynet til at begrænse ventilationen for at spare energi ikke tungtvejende. Ventilationen bestemmes snarere af kølebehovet, og det er i hvert fald ikke nødvendigt at operere så tæt på de hygiejniske grænser. Driftsbetingelserne afviger således fra typiske vinterforhold i en ganske væsentlig del af året, og længden af denne periode vokser antageligt, når boligerne isoleres bedre. Formodentlig er det også et udbredt og delvis ubevidst brugeradfærdsmønster at variere ventilationsintensiteten efter årstiden.

Ventilationssystemernes egenskaber

Fordele og ulemper
ved systemerne

Et hovedspørgsmål er, hvilket ventilationssystem man bør foretrække til ventilering af boliger. Der kan næppe gives enkle svar herpå. Alle systemer har fordele og ulemper. Spørgsmålet kompliceres af, at der foruden hovedtyperne S, F og FT (med varianten FTX) kan forekomme blandingsformer. Nedenfor sammenfattes hovedtypernes karakteristiske egenskaber. En lignende, men mere udførlig diskussion er givet af Nylund i publikationen: Räkna med luftläckningen, 1984.

Type S

Systemer af type S er billige i anlæg og drift. De kræver ingen mekanisk energitilførsel og udsættes ikke for driftsforstyrrelser som følge af mekaniske svigt, men de skal som alle systemer vedligeholdes med rensning. Der er ingen støjproblemer.

Termisk effekt

Virkingen afhænger af opdriftshøjden og af udetemperaturen. Overslagsmæssigt kan ydelsen for en given tæthed af klimaskærmen regnes proportional med højden og temperaturdifferensen mellem inde og ude i potensen $2/3$. For et givet anlæg er højden konstant men temperaturdifferensen variabel. Ved lave bygninger er betingelserne for at få god højde og dermed pålidelig funktion ugunstige, især når taghældningen også er lille. I princippet kan ydelsen reguleres manuelt eller eventuelt automatisk, så den holder sig uafhængig af temperaturen, men de praktiske muligheder er begrænsede. I den varmeste trediedel af året må der suppleres med vinduesventilation.

Vindeffekt

Virkingen afhænger desuden af vinden, og det er nok den almindeligste indvending mod systemet. Forestillingerne om vindfølsomheden synes dog undertiden at være overdrevne. For en bygning med given tæthed, som alene påvirkes af vind i en given retning, kan infiltrationen anslås at være proportional med vindhastigheden i potensen $4/3$. Optræder der samtidigt termiske drivtryk, virker disse stabiliserende på ventilationen. Såvel teoretiske overvejelser som målinger viser, at vindefekten først gør sig gældende ved hastigheder over en vis grænse, som især for bygninger på flere etager og

med beskyttet beliggenhed er ret stor og kun overskrides i forholdsvis få dage om året. Ved stigende vindhastighed vil infiltrationen øges gennem facaden i vindsiden men mindskes omtrent lige så meget gennem vægge i læsiden. Først når trykgradienten skifter retning, så der kommer exfiltration gennem vægge i læsiden, vokser ventilationen mærkbart med vindhastigheden. Udelufttilførselens fordeling på boligens rum vil dog altid være afhængig af vindpåvirkningen.

Bygningstæthed og nedslag i kanaler

Større tæthed af klimaskærmen medfører mindre ventilationsydelse under iøvrigt uændrede forhold. Overslagsmæssigt er ydelsen proportional med det ækvivalente lækageareal. En anden virkning af øget tæthed, som Nylund har gjort opmærksom på, er, at risikoen for nedgående strømning i aftrækskanaler øges. I en bolig med fx to aftrækskanaler kan mindre forstyrrelser som lokale vindtryksvariationer ved kanalmundingerne eller temperaturforskelle mellem rum fremkalde modsat rettede strømninger i kanalerne. De forstyrrelser, som kan udløse en omvendt, viser sig at blive desto mindre, jo større klimaskærmens tæthed er. Nylund mener derfor, at aftræk fra forskellige rum inden for den enkelte bolig bør samles og føres op i en fælles kanal, og at byggeforskrifternes forbud mod denne løsning er ubegrundet.

Omvendt strømningsretning kan imidlertid også skyldes en konstruktionsfejl, som byggeforskrifterne i deres nuværende udformning ikke udelukker, nemlig kanaludmunding nederst i tagflader med stor hældning, hvor der ved nogle vindretninger opstår overtryk.

Type F

Systemer af type F er dyrere i anlæg og kræver tilførsel af mekanisk energi. De forudsætter, at der udføres en indregulering ved idriftsættelsen. Omfanget af nødvendige tilsyns-, renholdelses- og reparationsarbejder er større end ved type S. Støjproblemerne er ikke uvæsentlige.

Rendyrkede type F systemer er på grund af det højere drivtryk ufølsomme for variationer i udetemperatur, vind og klimaskærmens tæthed. Den tilstræbte ydelse kan opretholdes uden store udsving på alle årstider. Tidli-

gere anvendte man betegnelsen kontrolventilation om disse systemer for at markere deres stabilitetsegenskaber.

Bygningstæthed og trykforhold

Øget tæthed resulterer i større undertryk i bygningen i modsætning til forholdene ved type S. I etageejendomme kobles flere boliger sædvanligvis til samme ventilator. Derved bliver boligerne indbyrdes afhængige. Ventilationsydelsen i den enkelte bolig vil dog ikke være stærkt påvirket af andre boliger, når byggeforskrifternes krav om et trykfald på mindst 100 Pa over udsugningsventilerne overholdes (kravet har for øvrigt også en brandteknisk begrundelse). Derimod vil vinduesoplukning i en bolig bevirke, at undertrykket i boligen udlignes til det fri. Den pågældende bolig vil da få et væsentligt overtryk i forhold til naboboliger, hvilket kan resultere i lugtspredning på grund af uundgåelige lækager i lejlighedsskel.

Udelufttilførsel ved type S og F

Ved udsugningssystemerne S og F tilføres udeluften dels gennem ventiler og dels gennem tilfældige utætheder i klimaskærmen. De tilfældige utætheder giver ofte en diffus luftindstrømning, medens ventilerne skaber en mere koncentreret indstrømning med større risiko for trækgener. For udeluftventiler anbragt under vinduer eller bag radiatorer er det erfaringsmæssigt vanskeligt at undgå gener, når opholdszonen nærmest vinduerne ønskes udnyttet. Højtsiddende udeluftventiler, der retter luften mod loftet, kan give en bedre luftfordeling og lavere hastigheder i opholdszonen. En klart retningsstyret lufttilførsel forudsætter imidlertid, at luften indblæses med en vis bevægelsesenergi, som vanskeligt kan opnås med trykssvage anlæg af type S. Ved anlægstype F skal klimaskærmen have passende tæthed for at den nødvendige trykdifferens over ventilen kan opnås.

Tæthed og brugeradfærd ved type S

Hvis ventilationen i en eksisterende bygning med anlæg af type S er for stor, kan tætning af klimaskærmen give en energibesparelse. Øges tætheden ud over det punkt, hvor infiltrationen svarer til den hygiejnisk nødvendige ventilation, må der lukkes op for ventiler eller vinduer, og funktionen bliver da afhængig af men-

neskelig indgriben. Ventilationssystemer af type S må ifølge byggeforskrifterne ikke længere anvendes i nye etageboliger, hvilket på sin vis er paradoksalt, fordi der snarere opnås tilstrækkelig drivkraft i høje end i lave bygninger. Den egentlige begrundelse for forbudet er antageligt, at nye etageboliger skønnes at være meget tætte, og at risikoen for uhensigtsmæssig brugeradfærd her skønnes at være betydelig.

Tæthed ved type F

Tætning af klimaskærmen ved anlægstype F giver ingen eller kun ubetydelig direkte energibesparelse. Den umiddelbare virkning af lukning af nogle åbninger er, at indstrømningen gennem de tiloversblevne åbninger bliver så meget desto kraftigere, og derved kan trækproblemerne endog blive værre. Hvis det imidlertid er muligt at flytte indstrømningen til steder, hvor den generer mindre, kan der opnås fordele. Lukning af fx vinduesfuger, der har givet åbenbare trækgener, som beboerne har kompenseret for ved at hæve rumtemperaturen, kan således tænkes at resultere i indirekte energibesparelser.

Brugeradfærd ved type F

Den samlede ydelse ved anlægstype F påvirkes heller ikke nævneværdigt af udeluftventilers indstilling. Derimod afhænger lufttilførselens fordeling på boligens rum af ventilerne. En rationel brugeradfærd må bestå i at åbne ventilerne i personbelastede rum og lukke dem i ubelastede rum. Forudsætningen for, at en sådan adfærd kan blive almindelig, er nok, at brugerinformationen forbedres. Man bør imidlertid også gøre sig klart, at ventilerne ikke har nævneværdig indflydelse på luftfordelingen, hvis det effektive lækageareal af de tilfældige utætheder langt overstiger ventilarealet, eller hvis et vindue åbnes et sted i boligen.

Type FT

Systemer af type FT er de mest komplekse og de mest bekostelige i anlæg og drift. De forudsætter en omhyggelig dimensionering og indregulering. De kræver tilført mere mekanisk energi, er mere sårbare for driftsforstyrrelser og kræver mere tilsyn end type F systemer. Periodiske filterrensninger er nødvendige. Der må tages hensyn til støjproblemer. For anlæg, der betjener flere boliger, er de brandtekniske hensyn mere omfat-

tende end ved de simplere systemer, og eventuelle brandspjæld eller anden brandautomatik bør efterses med mellemrum.

Anlægget udnyttes ikke eller kun delvis i sommerperioden, når brugerne foretrækker vinduesventilation. Til gengæld er vinterperiodens trækproblemer lettere at løse, når den indblæste luft er opvarmet. Indblæses luften med overtemperatur, kan anlægget betragtes som et luftvarmeanlæg. Der bliver da en række særlige hensyn at tage, som ikke behandles nærmere her.

Bygningstæthed
og balancering

Balanceret FT ventilation påvirker ikke trykket i bygningen. Er klimaskærmen ikke særlig tæt, overlejres den mekaniske ventilation af en infiltration/exfiltration, og den resulterende ventilation bliver i væsentlig grad vejrfølsom. Forudsætningen for at opnå alle FT systemets fordele er, at klimaskærmen gøres meget tæt.

Udføres anlægget således, at der ikke er balance mellem indblæst og udsuget luft, påføres bygningen et overtryk eller et undertryk afhængigt af, om indblæsningen eller udsugningen er størst. Herved mindskes vejrfølsomheden. Overtryksventilation medfører imidlertid fare for omfattende fugtskader på bygningen, med mindre der tages særlige hensyn ved udformningen af konstruktionerne. Undertryksventilation medfører mere eller mindre de samme trækproblemer som type F ventilation.

Type FTX

Når der er truffet bestemmelse om, at en beboelsesbygning skal ventileres med et anlæg af type FT, skal det i konsekvens af byggeforskrifternes energisparebestemmelser overvejes, om anlægget med fordel kan udføres som type FTX. Der foreligger endnu kun ret spredte måleresultater vedrørende effektiviteten af varmegenvinding. Svenske undersøgelser antyder, at der kan opnås energibesparelser på 40 pct. af energiforbruget til opvarmning af ventilationsluften i etageboliger, medens der for undersøgte enfamiliehusenes vedkommende er registreret mindre end 20 pct. besparelse. Udnyttelsen af afkastningsluftens varmeindhold afhænger ikke alene af varmevekslerens temperaturvirkningsgrad, men også af kanalsystemets tæthed og isolering, af frostsikrings-

systemet og af balancen mellem indblæst og udsuget luft. Ved øget ubalance i retning af undertryk bliver temperaturvirkningsgraden større men totalvirkningsgraden for varmegenvinding mindre.

Hybride former

Det skal tilføjes, at der kan forekomme ventilationsløsninger, som ikke så klart lader sig henføre til en af hovedtyperne, men som snarere må betragtes som overgangsformer mellem to hovedtyper. Et eksempel herpå er et udsugningssystem med en ventilator, der er dimensioneret til et forholdsvis lavt tryk. Et sådant system vil være mere følsomt for ændringer i vind, temperatur og tæthed end normale type F systemer men mindre følsomt end type S systemer. Andre hybride former er udsugningssystemer med en ventilator, der er beregnet til periodisk drift, medens anlægget i ventilatorens stilstandsperioder fungerer ved naturlig ventilation, eller systemer, hvor en udsugningsventilator og en aftrækskanal skal fungere parallelt. Emhætteløsningen i enfamiliehuse må nærmest betragtes under denne synsvinkel. Undertryksventilation med et ikke-balanceret anlæg af type FT er egentlig også en mellemform mellem typerne F og FT.

Områder for forskning og udvikling

Afslutningsvis skal det forsøges at udpege nogle områder, hvor den foreliggende viden synes at være ufuldkommen, og hvor en forskningsindsats kunne være til støtte for udvikling af forbedrede systemer og komponenter eller for en sikrere projektering af anlæg.

Ventilation og tæthed i nye boliger

Der foreligger ikke megen dokumenteret viden om ventilationsforholdene i nybyggede eller renoverede, danske boliger, herunder oplysninger om klimaskærmens tæthed i forskellige bygningstyper. Der burde i rimeligt omfang foretages lækagemålinger, registreres systemvalg og indsamles data for de anvendte systemers ydelser og funktion.

Funktion af type S i lavt byggeri

Ventilationssystemer af type S anses undertiden for at være en forældet teknik, der er helt opgivet i højt byggeri og på vej til at blive opgivet i lavt byggeri.

Der foreligger imidlertid næppe afgørende beviser på, at disse systemer er så uhensigtsmæssige, at brugen af dem må frarådes. Et måleprogram vedrørende funktionen af anlæg af type S i lavt byggeri burde opstilles og gennemføres enten i form af feltundersøgelser i normalt producerede boliger eller som undersøgelser i et dertil indrettet forsøgshus. Da klimaforholdene i særlig grad påvirker disse systemer, burde der herunder foretages nøjere analyser af hyppigheden af de klimapåvirkninger, som medfører utilfredsstillende funktion.

Udeluftventilers
egenskaber

For nogle år siden forsøgtes det i Sverige at gennemføre systematiske laboratorieprøvninger af udeluftventiler til systemer af type F og S med hovedvægten på opmåling af luftstrålerne i rummet og bedømmelse af trækgener. Dette arbejde med at analysere, hvorledes udeluftventilers lufttekniske egenskaber afhænger af deres konstruktion, burde genoptages og eventuelt udvides til også at omfatte målinger eller observationer under praktiske forhold. Spørgsmålet har fået aktualitet efter at udeluftventiler i 1982 er gjort obligatoriske ved anlæg af type S og F i nybyggeriet.

Driftsproblemer
og støj

Jo mere mekaniseret og automatiseret ventilationssystemet er, desto bedre er mulighederne for at opfylde ønsket om at gøre ventilationen kontrolleret og trækfri. En væsentlig betænkelighed ved at drive mekaniseringsgraden vidt er dog risikoen for, at systemet bliver sårbart, driften upålidelig og vedligeholdelsen besværlig. For at belyse denne problematik burde man søge at indsamle og analysere driftserfaringer fra eksisterende anlæg af forskellig type. Hertil kunne også henføres vurderinger af effektivitet og økonomi af anlæg af type FTX. Et særligt driftsproblem, som måske burde undersøges, er støjforholdene i de mekaniske anlæg.

Brugerholdning
og brugeradfærd

Ventilationsinstallationerne kan kun give brugerne mulighed for at ventilere hensigtsmæssigt. Afgørende for den faktiske ventilationstilstand i boligerne er brugerholdningerne og brugeradfærden. Selv om holdninger og vaner er vanskelige at kvantificere, burde der gøres forsøg på at registrere og analysere dem. Herunder bur-

de man måske navnlig interessere sig for brugerinformationens betydning for brugeradfærden. De ventilationsproblemer, som er fulgt med de senere års bestræbelser på at sænke rumtemperaturer og tætnede bygninger for at spare energi, er muligvis i højere grad informationsproblemer end tekniske problemer.

Litteratur

P. Nylund: Räkna med luftläckningen
Statens råd för byggnadsforskning, rapport R1:1984

G. Kärrholm et al: Lufttäthet och ventilation
Statens råd för byggnadsforskning, rapport R3:1984

Summary

SBI-report 161. Residential Ventilation Systems

The report is a survey based on comparative studies of literature on the theory and practice of dwelling ventilation. The report primarily deals with three subjects: The formulation of ventilation needs, the theory of air movements in buildings, and the properties of ventilation systems.

Ventilation
requirements

The necessary supply of outdoor air under winter conditions is often rated proportional to the net-floorage of the dwelling and is estimated to be 0.35 l/s m^2 . The prevailing opinion is that a reasonable balance of considerations of health, odour comfort, humidity load and energy consumption leads to a ventilation of this size, when typical life mode and density of residents is taken into account. Sometimes, the ventilation requirements stipulated in building regulations rather rise from reflexions on a basic load resulting from the fact that the dwellings are equipped with kitchen and bath. This way of formulating the needs provide more security to smaller dwellings. The need of outdoor air for a dwelling with kitchen and bath is thus estimated at 35 l/s , which exceeds the above need of 0.35 l/s m^2 , if the net-floorage is less than 100 m^2 .

As a matter of fact, the need of ventilation is no constant factor. There may be periods of time, in which the dwelling is not used, and there may be other periods with an acute need of increased ventilation in connection with household processes like washing and cooking or in connection with an extraordinary load of persons and smoking of tobacco. During summer periods

with a surplus of heat within the dwelling, the natural user reaction is to open the windows. It is difficult to marshal a simple and clear formulation of needs capable of covering these various and to some extent contradictory considerations in a satisfactory way.

Ventilation systems

However, dwellings must have a ventilation system according to building regulations. The ventilation systems are divided into the following main categories:

Type S: Natural ventilation with extract ducts from kitchen, bathroom and toilet, outdoor air supply through air intakes and random leakages

Type F: Mechanical exhaust from kitchen, bathroom and toilet, outdoor air supply through air intakes and random leakages

Type FT: Mechanical supply of pre-heated air and mechanical exhaust

Type FTX: Mechanical supply and exhaust with heat recovery.

The characteristics of the system can be described on the basis of theoretical considerations and calculations as well as experience gained and results measured.

Type S ventilation

From a technical point of view the systems of type S are simple. They require no mechanical supply of energy, and they are not exposed to operational disturbances from mechanical failure, but like all other systems, they have to be maintained and cleaned. There are no noise problems. According to present regulations such systems can only be used in low-rise buildings. The motive power is the buoyancy force under winter conditions. The systems are sensitive to wind, but if the wind pressure acts together with a stack pressure, the latter will have a stabilizing effect on the ventilation. A higher airtightness of the building envelope entails a smaller ventilation output under unchanged conditions.

Type F ventilation

Systems of type F require a supply of mechanical energy, and they imply a regulation to be carried out at commissioning. The extent of the necessary supervision and maintenance is higher than that of type S. The noise problems are not inessential. Due to the higher operational pressure, the systems are insensitive to varia-

tions in outdoor temperature, wind and tightness of the building envelope. If several dwellings are connected to the same fan, extract terminals with a suitable resistance must be used, partly out of fire considerations and partly to make the ventilation of the individual dwelling independent of other dwellings.

Type FT
ventilation

In connection with the type S and F extract systems the outdoor air is supplied untreated through air intakes or random leakages in the envelope, which entails a risk of draught nuisance. The systems of type FT provide better possibilities of avoiding draught. These systems are more complex and dependent on careful dimensioning and line-up than the extract systems. They are more vulnerable to operational disturbances, and they require more maintenance. For plants serving several dwellings the fire considerations are comprehensive. A balanced FT ventilation does not influence the pressure of the building. If the building envelope is leaky, the mechanical ventilation is superimposed by an infiltration/exfiltration, and the resulting ventilation will be rather sensitive to weather. Achieving the advantages of the FT system implies a very tight envelope. If the system is not balanced, the sensitivity to weather decreases, but over-pressure ventilation entails a risk of moisture damage in the constructions, and under-pressure ventilation entails more or less the same draught problems as the type F ventilation.

Type FTX
ventilation

So far only very sparse results of measurements are available about the performance of heat recovery with the FTX ventilation. Swedish investigations have shown that it is possible to obtain energy savings of 40 per cent of the energy consumption for heating of the ventilation air for multi-storey housing, whereas the savings of the investigated single-family houses were less than 20 per cent. The utilization of the enthalpy of the discharge air not only depends on temperature efficiency of the heat exchanger, but also on the tightness and insulation of the ductwork system, on the anti freeze-system, and on the balance between the supply and the exhaust air flow.

Udgivet oktober 1984

Udgivet oktober 1984

Rapporten er en oversigt baseret på litteraturstudier over boligventilationens teori og praksis. Rapporten behandler i hovedsagen tre emner: formuleringen af ventilationsbehovet, teorien for luftstrømninger i bygninger og ventilationssystemernes egenskaber. I denne sammenhæng omtales byggeforskrifternes ventilationsbestemmelser. Rapporten diskuterer ventilationsprincipper uden at angive bestemte løsninger og dimensioneringsmetoder. Rapporten henvender sig til teknikere, der projekterer eller konstruerer ventilationssystemer, til lokale myndigheder og til andre, der har brug for grundlæggende viden om boligventilation.