



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

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



Rapport

R34:1978

Ofrivillig ventilation

**Förutsättningar och betydelse
för byggnaders värmebalans**

Byggforskningen

**TEKNISKA HOGSKOLAN I LUND
SEKTIONEN FOR VÄG- OCH VATTEN
BIBLIOTEKET**

R34:1978

OFRIVILLIG VENTILATION

Förutsättningar och betydelse
för byggnaders värmebalans

Enno Abel
Lars Andersson
Åke Blomsterberg
Karol Dubinski
Kamal Handa
Tore Hansson
Arne Johnson
Gunnar Kärrholm
Mats Persson

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 750637-8
från Statens råd för byggnadsforskning till Avd. för
byggnadskonstruktion, Chalmers tekniska högskola, Göteborg

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

Nyckelord:

ofrivillig ventilation
vindtryck
vindtäthet
lufttäthet
luftströmning
mätmetoder
värmebalans

UDK 697.1

R34:1978

ISBN 91-540-2838-8

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

FÖRORD

Problemen kring vår energiförsörjning har föranlett en ingående granskning av möjliga nedskärningar i konsumtionen och mål för energibesparing har uppställts. En väsentlig del av den totala energiförbrukningen åtgår för bostadsuppvärmning. Vid analys av en byggnads värmebalans befinns vår kunskap beträffande förlusterna på grund av ofrivillig ventilation idag otillräcklig. Av denna anledning söktes i augusti 1975 anslag från Statens råd för byggnadsforskning för, i första hand, en inventering av dagens kunskapsnivå inom projektet "Naturlig konvektions betydelse för byggnaders värmebalans". Dessutom skulle angelägna forskningsprojekt föreslås inom områden där vår kunskap idag är otillräcklig.

Detta arbete är nu klart och presenteras i efterföljande programskrift. Under arbetet därmed har kontakter tagits med forskare såväl inom landet som inom våra nordiska grannländer. En omfattande litteraturgenomgång har genomförts. Såväl ansökningshandlingar och cirkulärskrivelser som manuskript till skriften har tillsänts forskare inom området för yttrande. För deras värdefulla kommentarer och bidrag framföres vårt varma tack.

Skriften har framtagits av en arbetsgrupp bestående av följande personer:

Karol Dubinski, Kamal Handa och Gunnar Kärrholm, CTH, Byggnadskonstruktion.

Åke Blomsterberg och Tore Hansson, KTH, Konstruktionslära.

Lars Andersson och Mats Persson, Tekn. dr Arne Johnson Ingenjörbyrå.

Värdefull medverkan har lämnats av Enno Abel, CTH, Installationsteknik.

Ett tack riktas också till Aina Estelius, som redigerat och utskrivit konceptet.

Under detta arbetes genomförande har berörda institutioner och företag aktivt bedrivit forskning inom området. Det är därför vår förhoppning att denna skrift skall ge väl underbyggda förslag till forskningsuppgifter och stimulera till ökade forskningsinsatser. Den härigenom förvärvade kunskapstillväxten bör ge oss större möjligheter att möta morgondagens behov av energisnåla byggnader.

Göteborg den 14 september 1976

För arbetsgruppen

Gunnar Kärrholm

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	Sid
1.	INLEDNING 7
2.	INVERKANDE FAKTORER HOS UTMOMHUS- KLIMATET 9
2.1	Vindtryck på byggnadsytor 9
2.1.1	Faktorer som bestämmer vindtrycket på en byggnad 9
2.1.2	Vindens struktur 10
2.1.3	Byggnadens utformning 11
2.1.4	Topografiska förhållanden och närliggande bebyggelse 16
2.1.5	Samband mellan lufttryck inom- och utomhus 18
2.2	Utomhustemperaturen 19
2.3	Angelägna forskningsuppgifter 20
3.	LUFTSTRÖMNING GENOM BYGGNADSDELAR 23
3.1	Luftgenomsläpplighetens fysik 23
3.2	Luftgenomsläpplighet hos vanligen förekommande konstruktioner 29
3.3	Experimentell bestämning av luftgenomsläpplighet 39
3.4	Pågående forskning och angelägna forskningsuppgifter 40
4.	LUFTSTRÖMNING I RUM 43
4.1	Inverkande faktorer 43
4.1.1	Tryckdifferenser mot kringliggande utrymmen. Temperaturgradienter 43
4.1.2	Öppningarnas placering 45
4.1.3	Öppningarnas storlek 47
4.1.4	Reynolds tal 51
4.2	Teoretiska modeller för strömningen 52
4.3	Angelägna forskningsuppgifter 53

5.	LUFTSTRÖMNING I BYGGNADER	55
5.1	Faktorer som påverkar luftutbytet	55
5.2	Inverkan av vindbelastningar och temperaturdifferenser	55
5.3	Inverkan av ventilationssystem, rums- organisation och byggnadsproportioner	58
5.4	Teoretiska modeller	60
5.5	Experimentella studier	63
5.5.1	Metodöversikt	63
5.5.2	Spårgasmätning	65
5.5.3	Provtryckning	68
5.5.4	Termografering	70
5.6	Pågående projekt och angelägna forskningsuppgifter	73
6.	DEN OFRIVILLIGA VENTILATIONENS PRAKTISKA BETYDELSE	77
6.1	Allmänna synpunkter	77
6.2	Energibalans och luftkomfort	77
6.3	Brandventilation	80
6.4	Normering	81
6.5	Pågående forskning och angelägna forskningsuppgifter	83
6.5.1	Pågående forskning	83
6.5.2	Angelägna forskningsuppgifter	84
7.	LITTERATURREFERENSER	87
	Till avsnitt 2	87
	Till avsnitt 3	89
	Till avsnitt 4	93
	Till avsnitt 5	94
	Till avsnitt 6	99

1. INLEDNING

Den ofrivilliga ventilationen, dvs luftutbytet genom rums-skiljande byggnadsdelars otätheter, möjliggör ofta betydande värmetransporter från en byggnad till dess omgivning. Den bör därför ägnas uppmärksamhet vid försök att reducera energiförbrukningen. I och med att åtgärder vidtas för att öka den konventionellt definierade isoleringsförmågan hos golv, väggar och tak och att ventilationssystem utformas mera energisnåla, tenderar den ofrivilliga ventilationens betydelse att öka relativt sett. Dessutom försämrar luftläckage ventilationssystemens funktion och inverkar menligt på luftkomforten.

Föreliggande skrift avser att ge en samlad översikt över det aktuella problemområdet. Därvid beröres kända, i sammanhanget relevanta, byggnadsfysikaliska grundfrågor och frågor avseende beteendet hos gängse konstruktioner och byggnadstyper. Syftet är också att rikta uppmärksamhet på pågående forskning och formulera angelägna forskningsuppgifter. Resultatet av de föreslagna forskningsarbetena förväntas ge möjligheter att säkrare bedöma utbytet av tänkbara förbättringsåtgärder och som konsekvens härav utveckla lämpliga konstruktioner och produktionsmetoder.

Till en början behandlas de olika faktorer som inverkar på den ofrivilliga ventilationen: Temperatur- och vindförhållanden utomhus, otätheter i byggnadens rums- och klimatskiljande enheter, strömningsförhållandena i ett rum med känd lufttillförsel och kända temperatur- och dimensionsförhållanden samt slutligen luftrörelserna i en lägenhet eller hel byggnad. Rapporten avslutas med en diskussion om åtgärder som vid ny- och ombyggnad påverkar en byggnads lufttäthet.

För den som vill tränga djupare in i ämnet finns i slutet en litteraturlista ordnad kapitelvis.

2. INVERKANDE FAKTORER HOS UTOMHUSKLIMATET

2.1 Vindtryck på byggnadsytor

2.1.1 Faktorer som bestämmer vindtrycket på en byggnad

Den ofrivilliga ventilationen förorsakas dels av vindbetingade differenser mellan lufttrycken på byggnaders olika ytor och dels av termiska tryckdifferenser på grund av temperaturskillnader mellan byggnaden och dess omgivning. I detta avsnitt behandlas närmare de vindbetingade differensernas inverkan på den ofrivilliga ventilationen.

Vindkrafternas fördelning bestäms i väsentlig grad av luftströmningen i det ostörda, atmosfäriska gränsskiktet. Den i detta rådande vindhastigheten varierar på olika sätt beroende på bl a markskrovligheten. Dess värde oscillerar oregelbundet kring höjdberoende medelvärden, dvs strömningen är turbulent. Vindtrycket beror emellertid också på byggnadens form och dimensioner. Vid luftströmning runt en byggnad uppstår på byggnadsytorna tryck- eller sugkrafter som kan uttryckas som delar, formfaktorer, av vindens stagnationstryck.

Slutligen beror tryckförhållandena också på markytans form och närliggande växtlighet och bebyggelse.

De vindbetingade tryckdifferenser som påverkar ofrivillig ventilation bör således analyseras med utgångspunkt från följande förutsättningar

- Vindens statiska och dynamiska struktur i det givna, atmosfäriska gränsskiktet
- Byggnadens utformning
- Omgivningens topografi och närliggande bebyggelse.

Den ofrivilliga ventilationen beror på att luften tränger in eller ut genom porösa skikt, springor och sprickor i rumsbegränsande byggnadsdelar. Det är därför differenserna

mellan lufttryck inom- och utomhus, mellan in- och utvändiga formfaktorer är väsentliga.

Inomhustrycket beror på läckornas lägen i relation till tryckfördelningen utomhus. Om en otäthet är placerad på exempelvis lovartsidan, blir inomhustrycket positivt och den utåtriktade lasten på läsidans vägg ökar. Det motsatta förhållandet uppstår när otätheten placeras på läsidan.

I det följande behandlas översiktligt de ovan nämnda faktorernas inverkan på vindtrycket. Utgångspunkt för framställningen är en översikt av aktuell litteratur, däribland svenska och utländska bestämmelser. Användbar metodik vid teoretiska och experimentella studier exemplifieras genom att beskriva utförda forskningsarbeten.

2.1.2 Vindens struktur

Kännedom om medelvindhastighetens höjdberoende är väsentlig för att bestämma vindtryckets fördelning på byggnaders ytor. I olika bestämmelser, t ex SBN 75, anges vindhastigheter som funktion av höjden över markytan.

I flera länders bestämmelser återfinnes kartor om dimensionerande vindlaster för olika delområden. I USA exempelvis har uppgifter om landets 7 vindtryckszoner utarbetats. På en karta anges värden på hastighetstrycket, för byggnadshöjder upp till 366 m.

I SBN 75 anges, för höjder upp till 50 m och för olika lokalisering villkor, momentana hastigheter och medelvindhastigheter. De maximala, momentana värdena är i allmänhet av mindre betydelse för luftläckage. Däremot är maximala medelvärdena gällande flera timmar väsentliga. Speciellt är medelvärdena under extrema utomhustemperaturer intressanta vid bestämning av luftläckage. Det är alltså angeläget att känna till karaktären hos samvariationen mellan höga värden på vindhastighet och temperatur.

Undersökningar i full skala och i vindtunnlar visar att markskrovligheten påverkar storleken på både hastighetsmedelvärdena och luftrörelsernas turbulenta komponenter.

2.1.3 Byggnadens utformning

Vindtryckets beroende av byggnadens form och täthet brukar som nämnts beskrivas genom introduktion av s k formfaktorer,

$$P = C_p \cdot q$$

där P = lufttrycket på en byggnadsyta

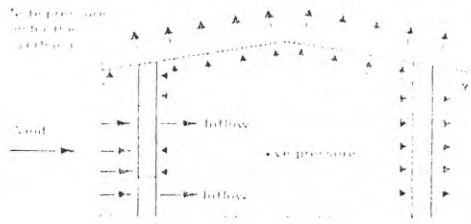
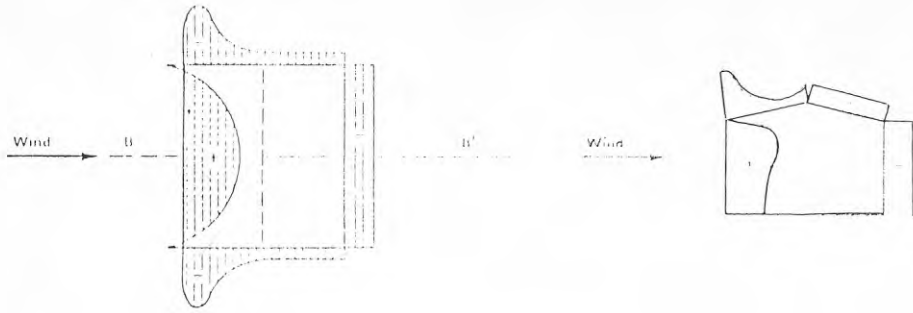
C_p = formfaktor och q = hastighetstrycket = $\rho v^2/2$

med ρ = lufttätheten och v = vindhastigheten i av byggnaden ostört vindfält.

Uppgift om formfaktorer finns dels i förenklad form i SBN och dels i mera detaljerad form som resultat från modellförsök i vindtunnel. Dessa försök visar att formfaktorn för yttre tryck ofta varierar enligt ett komplicerat mönster inom olika vägg- och taktytor. Däremot saknas noggrannare uppgifter om lufttrycket inomhus.

De flesta uppgifterna om formfaktorn härrör från modellförsök. Skalförhållandena och svårigheter att i vindtunnel reproducera vindens struktur gör emellertid att erhållna resultat i många fall starkt avviker från de verkliga förhållandena. För analys av dessa avvikelser är försök i full skala och naturlig vind i dagens läge oundgängliga.

Vill man begränsa luftens passage genom en byggnads ytterhölje, bör åtgärder vidtas för att reducera tryckskillnaderna mellan inner- och ytterytorna till ett minimum. Av FIG. 1 framgår att öppningarnas lokalisering härvid har avgörande betydelse.



Openings in windward wall



Openings in leeward wall

FIG. 1. Tryckfördelningen: a) utomhus, b) inomhus (med öppningar i lovart- och läsidan)

Vissa preliminära uppgifter beträffande vindlasternas fördelning i stort kan erhållas genom att utnyttja tillgängliga data om formfaktorernas storlek. Som exempel härpå återges resultat av en studie gällande småhus. Relationerna mellan byggnadernas dimensioner, FIG. 2, har valts utgående från i Sverige vanliga objekt i en och tvåvåningar.

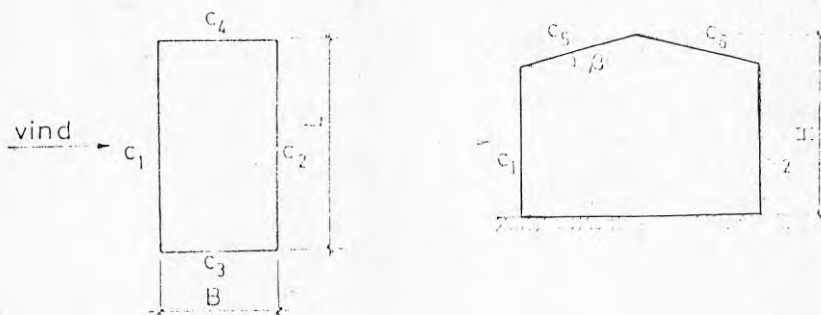


FIG. 2. Byggnadstyp som antagits för undersökning av formfaktorernas storlek. $L = 6-24$ m, $B = 6-12$ m, $H = 3-6$ m, $\beta = 0.50^\circ$

Formfaktorerna har hämtats ur olika länders normer och använts för bestämning av vindlast på de olika byggnadsytorna. Med utgångspunkt från dessa bestämmningar konstateras följande samband:

- a) För ett 1-våningshus sänks suget på husets läsida när byggnadens längd vid bibehållen bredd ökar utöver 6 m, (formfaktorn c_2)
- b) För ett 2-våningshus sänks suget på motsvarande sätt när husets längd ökar över 12 m (c_2)
- c) Vid samma längd sänks suget på ett 1-våningshus (läsida) när bredden B ökar över 9 m (c_2)
- d) För ett 1-våningshus sänks suget på gavlarna när längden vid bibehållen bredd ökar över 9 m.

Vid samma längd sänks suget när husets bredd ökar över 9 m (c_3 och c_4)

- e) Den resulterande kraften på takytan är minst då taklutningen är 30° .

Byggnadens orientering mot den förhärskande vindriktningen visar en optimal orienteringsvinkel på mellan 20° och 60° , se FIG. 3, med avseende på tryckdifferensens minimivärde över samtliga omslutningsytor.

Optimalorientering

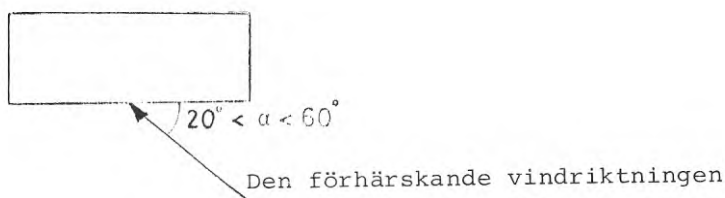


FIG. 3. En byggnads optimala orientering

De enligt olika bestämmelser gällande formfaktorerna har som nämnts i allmänhet bestämts med hjälp av mätningar på modeller i vindtunnel. Ibland har man tagit hänsyn till turbulenta komponenter, Barnaud och Gandemer, men ytterst sällan har de fastställda värdena kontrollerats genom mätningar i naturen.

Enligt olika forskare är formfaktorerna beroende av byggnadsytornas skrovlighet såtillvida att formfaktorernas värde är högre vid större skrovlighet, Gandemer. Experimentella studier har gällt byggnader med cylindrisk form vid högre Reynoldska tal. Vid normala byggnadsdimensioner och större vindhastigheter kan formfaktorerna för byggnader med olika skrovlighet också variera avsevärt. Byggnader med prismatiska former har emellertid hittills inte undersökts närmare i detta avseende.

Turbulenta vindlaster kan karakteriseras med speciella formfaktorer, c_p' . Dessa påverkas också av markskrovligheten. Ett föreslaget uttryck på c_p' är

$$c_p'(t) = \frac{\sqrt{[(p(t) - p_{ref}) - \overline{(p(t) - p_{ref})}]^2}}{\frac{1}{2}\rho\bar{V}_{ref}^2}$$

som varierar mellan gränser, i viss mån beroende av observationstidens längd. I ekvationen ovan är $p(t)$ momentan lufttryck i en punkt, p_{ref} är ett referenstryck och \bar{V}_{ref} en referanshastighet. Undersökningar i vindtunnel, Barnaud och Gandemer, har visat att i ett småhusområde formfaktorerna för medelvärden och turbulenseffekter ökar med markskrovligheten, varvid de turbulenta komponenternas relativa ökning är störst.

Relationen mellan den turbulenta komponenten och medelvärdet kan uppgå till nästan 100 %. I TAB. 1 visas undersökningsresultat för ett rektangulärt 1-våningshus.

TAB. 1. Formfaktorer för vindtryckets medelvärde och turbulenta komponenter, \bar{c}_p och c_p'

	Låg skrovlighet	Medelskrovlighet
Lovartsida	\bar{c}_p +0.45	+0.50
	c_p' (maxvärde) 0.36	0.60
Läsida	\bar{c}_p -0.61	-0.78
	c_p' (maxvärde) 0.21	0.37

Stor betydelse för lokala variationer hos vindtrycket på byggnader har förekomsten av burspråk och balkonger. Men också detaljer av fasad- och takutformningen som taksprång, pilastrar och fönsterlister inverkar.

2.1.4 Topografiska förhållanden och närliggande bebyggelse

En preliminär litteraturundersökning visar att markskrovligheten i viss utsträckning kan användas som kriterium på den närliggande omgivningens inverkan. Detta gäller inte bara vindstrukturen utan också tryckfördelningen på byggnadsytorna. Ett 1-våningshus har undersökts med lokalisering i två olika stadszoner och två olika typer av markskrovlighet i var och en av zonerna, Barnaud. Den första zonen är inte bebyggd och den andra karakteriseras av låg bebyggelse med ett till två våningars höjd. Huset undersöktes i varje zon vid låg och medelhög grad av markskrovlighet. Låg markskrovlighet är karakteristisk för bl a glesbygd, medan medelskrovlighet motsvarar förortszoner men även skogiga trakter. Man kan i allmänhet konstatera att terräng med mindre skrovlighet ger reducerat sug och övertryck. Motsvarande värden på formfaktorer är numeriskt lägre i icke bebyggda zoner än i bebyggda.

Effekter av närliggande byggnader har studerats av bl a Bailey och Noel. När en byggnad ligger i lovart om en annan, reduceras formfaktorerna betydligt. Läeffekten på byggnadens lovartsida beror på avståndet mellan byggnaderna. Penwarden och Wise har bl a undersökt (i vindtunnel) byggnader med höjder på mellan $H = 36$ m och $H = 72$ m och som är skyddade av en 12 m hög byggnad, vid varierande avstånd mellan byggnaderna, FIG. 4. Formfaktorer för lovartväggen 1 och läsidan 2 undersöktes som funktioner av H och L . Formfaktorerna ökar som naturligt är med avståndet L och höjden H .

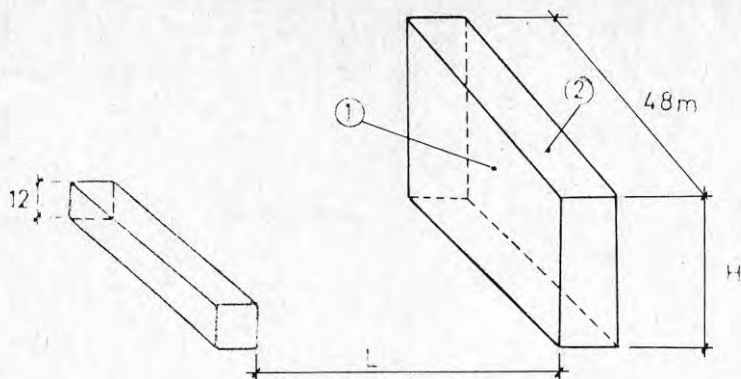


FIG. 4. Modelluppställning vid vindtunnelstudier av en 12 m hög byggnads läeffekter på en högre, i lä belägen byggnad.

Formfaktorerna är funktioner av vindhastigheten u_1 vid byggnadens aktuella yta

$$C = \frac{p_1 - p_0}{\frac{1}{2} \rho u_0^2} = 1 - \frac{u_1^2}{u_0^2}$$

där u_0 är hastigheten i fri strömning, p_0 är statiska trycket där och p_1 är statiska trycket på ytan i fråga. Den lokala hastigheten u_1 beror inte bara på byggnadens och grannbyggnadernas form utan också på bebyggelsens disposition.

Vissa slag av byggnadsgrupperingar kan framkalla avsevärd ökning av den i ostört vindfält förhärskande lufthastigheten. Därvid uppstår sk överhastighetszoner. Dessa är också betydelsefulla för bedömning av komfortnivån i bebyggelse som brukar karakteriseras av en faktor ("överhastigheten"),

$$\psi = \frac{\bar{u} + \sqrt{\langle u \rangle'^2}}{\bar{u}_r + \sqrt{\langle u_r \rangle'^2}}$$

där \bar{u} = den lokala medelhastigheten vid en viss höjd
 och \bar{u}_r = referensastigheten som skulle råda på samma
 höjd utan bebyggelse
 $\sqrt{\langle \bar{u} \rangle^2}$ = RMS-värdet för vindfluktuationerna

Som karakteristiska exempel på uppkomst av överhastighetszoner återges de i FIG. 5 visade fallen:

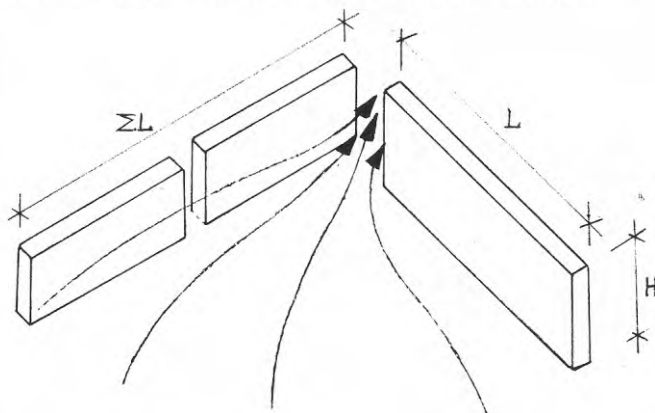


FIG. 5. Venturieffekten: Överhastigheten uppgår på lärsidan till $\psi = 1.3$, vid $H > 15$ m och ΣL (sammanlagd byggnadslängd) > 100 m.

2.1.5 Samband mellan lufttryck inom- och utomhus

De invändiga vindtrycken (de invändiga formfaktorerna) är som tidigare påpekats väsentliga vid studium av ofrivillig ventilation. Där öppningar finns i ytterväggar antas i Svensk byggnorm för invändigt vindtryck formfaktorer med värden på mellan $c = -0,7$ och $c = +0,7$ beroende på öppningarnas läge i förhållande till vindriktningen. Enligt franska normer är de invändiga formfaktorerna lägre och ligger mellan $c = -0,3$ och $c = +0,3$ för lägre byggnader ($H/L < 2.5$). Formfaktorerna kan enligt dessa normer väljas med utgångspunkt från de antagna husdimensionerna och öppningarnas lägen i förhållande till de förhärskande vindriktningarna. De invändiga formfaktorerna och följaktligen luftgenomsläppligheten kan alltså till en viss mån påverkas genom att på planeringsstadiet tilldela byggnaden lämpliga dimensioner och orientering.

Luftgenomsläppligheten har kvantifierats utgående från springors och porers lokala area och de mera betydande otätheternas lägen i förhållande till vindriktningen. Det är ibland fördelaktigt att påverka det invändiga lufttrycket genom en lämplig placering av ventilationsöppningarna, t ex vid takåsar, Newberry och Eaton. Därigenom sänker man lufttrycket inomhus. På detta sätt kan t ex de under vindbyar ökade tryckdifferenserna genom taket reduceras, se FIG. 6.

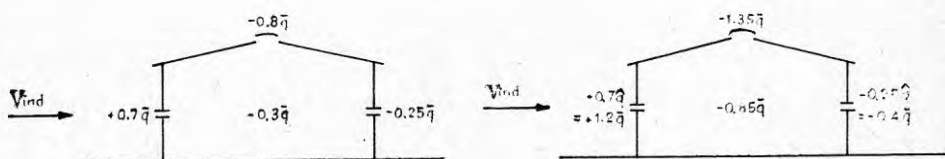


FIG. 6. Utjämning av lufttrycket på takytan under vindbyar (\hat{q} = stagnationstryck under max vindby, \bar{q} = stagnationstryck, medelvärde)

En studie av relationen mellan luftomsättning och vindhastighet för olika vindriktningar och täthetsförhållanden i en byggnads väggar rapporteras av Andersson.

Vissa undersökningar, Newberry, Eaton och Mayne, antyder att en byggnads otätheter inverkar på vindtrycket mot byggnaders yttertytor. Om detta är fallet kan man inte bestämma tryckfallet över byggnadens ytterhölje som skillnaden mellan ett för givet vindfält konstant yttertryck p_y och ett med täthetsförhållandena variabelt innertryck p_i .

2.2 Utomhustemperaturen

Skorstenseffekten medför att tryckskillnaden Δp över en byggnads ytterväggar varierar med byggnadens höjd. Otätheternas lokalisering och genomsläpplighet bestämmer här-

vid en neutral nivå där Δp byter tecken. Jackman anger uttryck för luftdensitetsskillnaden inom- och utomhus

$$\Delta \rho = 1,26 \cdot 273 \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1} \right) \text{ kg/m}^3$$

som bestämmer storleken på tryckskillnaderna.

De termiska faktorerna torde i många fall vara väl så betydelsefulla som effekterna av vind. Speciellt vid kall väderlek och högre hus har de sannolikt en dominerande inverkan på den ofrivilliga ventilationen.

2.3 Angelägna forskningsuppgifter

Följande forskningsuppgifter har efter ovan beskriven litteraturgenomgång befunnits önskvärda:

- Utformning av byggnader.
Klarläggande av byggnadsproportioner som betingar låga tryckdifferenser över väggar och takkonstruktioner. Sammanställning av formfaktorer (ut- och invändiga) för vanligare hustyper.
- Samhällsplanering. Inverkan av bebyggelsens utformning och lokalisering på vindtrycket längs fasader och tak.
Överhastighetszoner vid olika bebyggelseformer samt beroendet av proportioner och inbördes avstånd för de enskilda byggnaderna. Inverkan av byggnadernas orientering mot de förhärskande vindriktningarna. Bestämning av optimala lösningar där överhastigheten är minst och följaktligen tryckförhållandena gynnsammast. Markskrovlighetens betydelse för formfaktorernas storlek.
- Vind på otäta byggnader.
Beräkningsmetod för beaktande av luftläckagets inverkan på vindtrycket utomhus.

- Inverkan av vägg- och takytors textur samt olika byggdetaljer på vindtryckets storlek för byggnader med prismatiska former vid högre Reynolds tal. Undersökningen genomförs på delmodeller i jämförelsevis stor skala i vindtunnel med hög maximihastighet och möjligheter till turbulenssimulering. Resultaten jämföres i viss utsträckning med fullskalemätningar.

- Termiska faktorers inverkan på den ofrivilliga ventilationen.

3. LUFTSTRÖMNING GENOM BYGGNADSEDELAR

3.1 Luftgenomsläpplighetens fysik

Det fysikaliska förloppet vid luftströmning inom och genom rumsbegränsande konstruktion karakteriseras i det allmänna fallet med tredimensionellt luftflöde och med temperaturberoende materialegenskaper av följande fem grundekvationer:

En massbalansekvation

En energibalansekvation

Tre kraftjämviktsekvationer.

En matematisk formulering av dessa ekvationer ges nedan för att illustrera de komplexa samband som råder.

$$(1) \quad \rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} = - \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

$$(2) \quad - \frac{\partial \theta}{\partial t} = u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} - \kappa \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right)$$

$$(3) \quad \rho g - \frac{\partial p}{\partial x} = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$(4) \quad - \frac{\partial p}{\partial y} = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)$$

$$(5) \quad - \frac{\partial p}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

där u, v, w är hastighetskomponenter

θ är temperaturen

p är lufttrycket

ρ är luftens täthet

μ = vindens dynamiska viskositet

t = tidskoordinat

x, y, z = rumkoordinater

I kraftjämviktsekvationerna har pålagda tryckdifferenser beaktats, varigenom fall med påtvingad konvektion kan beskrivas. Om sådan tryckdifferens saknas, beror uppkomna luftströmningar på densitetsdifferenser i luft vid olika temperaturer. Luftströmningar av denna orsak benämns egenkonvektion eller naturlig konvektion.

Förenkling av ekvationssystemet kan ske genom introduktion av en eller två funktioner vanligen kallade strömfunktion (stream function) och virvelfunktion (vorticity function) samt genom omformning av ekvationerna i dimensionslösa enheter.

De dimensionslösa tal som beskriver material- och problemberoende egenskaper är alternativt Prandtls tal (Pr), Rayleighs tal (Ra) eller Grashofs tal ($Gr = Ra/Pr$).

Genom förenklade antaganden söker man i allmänhet ytterligare reducera de matematiska svårigheter som föreligger vid lösandet av ekvationssystemen.

De förenklingar som vanligen görs i byggnadstekniska problem är att antaga att strömningen är laminär och att enbart luftens densitet är temperaturberoende. Värmeledningstalen för ingående material och luft väljs till sin storlek så att de är representativa för en medeltemperatur. Luften antages vidare vid härledningen av kraftjämviktsekvationerna vara en så kallad Newtonsk fluid, vilket medför att luftens visositet kommer att ingå i ekvationerna. För skjuvspänningen τ i en yta parallell med x-z-planet gäller enligt Newtons ansats

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$$

Proportionalitetsfaktorn μ kallas dynamisk viskositet. Storheten μ/ρ benämnes kinematisk viskositet. Även viskositeten ansätts vanligen som ett konstant, temperaturoberoende värde. Vid härledningarna har vidare luftströmningens hastigheten förutsatts vara låg och luften inkompressibel.

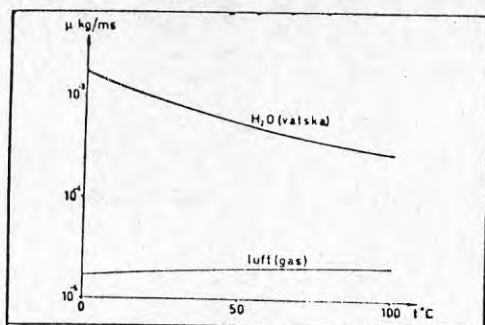


FIG. 7. Dynamiska viskositeten som funktion av temperaturen.

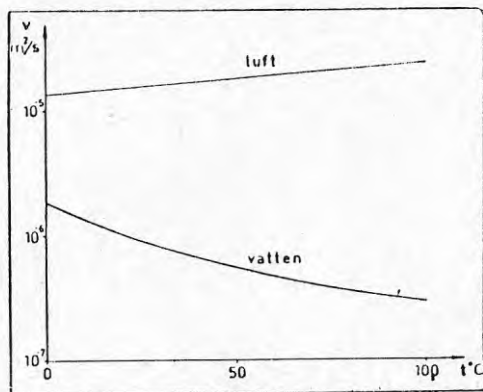


FIG. 8. I figuren visas som exempel hur den kinematiska viskositeten ν för luft och vatten varierar med temperaturen vid trycket 1.0 bar. (Jämför motsvarande kurvor för dynamisk viskositet.)

Vid luftströmning i luftspalter antas oftast luftströmningen vara friktionsfri utom vid beräkningar av randvillkoren. Vid luftströmning i porösa material finns flera teorier beträffande sättet att simulera det porösa materialets strömningshämmande effekt. Bankvall, 1972, har

efter genomgång av dessa teorier valt att utnyttja samband som bygger på Darcys lag, i vilken materialet karakteriseras med en permeabilitetskoefficient

$$B_0 = -u \cdot \mu / \frac{\partial p}{\partial x} \quad \text{alternativt} \quad B_0 = - \frac{Q}{A} \cdot \frac{\mu}{\text{grad } p}$$

där Q är den per tidsenhet genom arean A strömmande gasmängden.

De sätt varpå man valt att beskriva det porösa materialets inverkan på luftströmningen påverkar uppställningen av kraftjämviktsekvationerna. I dessa kommer därför någon form av materialkonstant för det porösa materialet att ingå.

Sedan man på ovan angivet sätt reducerat de grundläggande ekvationerna tillgrips i mera komplicerade fall en numerisk lösningsmetodik. Denna uppdelas vanligen i flera beräkningssteg. De huvudsakliga etapperna i en beräkning vid ett fall med enbart naturlig konvektion är:

- A. Beräkning av temperaturfältet utan hänsyn till luftströmning.
- B. Från erhållna temperaturer beräknas luftströmningshastigheter.
- C. Luftströmningen medför korrigerings av temperaturerna enligt A ovan.

Beräkningen är iterativ och fortgår tills korrigerings av temperaturfördelningen understiger ett valt noggrannhetsvärde.

I fall med påtvingad konvektion med drivande tryck av sådan storlek att den termiskt betingade stigkraften i jämförelse härmed kan försummas, behöver temperaturfältet ej beräknas. I detta fall kan man för varje tidssteg explicit beräkna ström- och virvelfunktionerna samt strömningshastigheter. Med kännedom om dessa storheter kan en temperaturbestämning göras om så önskas.

Vid beräkningar enligt ovan förutsätts att tidsstegets längd vid beräkning av instationära fall valts så att numeriskt stabila beräkningsförlopp erhålls. Det beskrivna problemet är av avsevärd matematisk svårighetsgrad, vilket avspeglar sig i det faktum att då lösningar finns, dessa gäller starkt begränsade specialfall.

Som exempel på datorprogram för fall med naturlig konvektion och med påtvingad konvektion hänvisas till de två rapporterna publicerade av Eftring, 1975, eller till monografien av Gosman et. al. 1969.

I Sverige har på senaste tid två skrifter framlagts inom ämnet luftströmning genom porösa material och genom springor och spalter. Bankvall, 1972, behandlar ingående luftströmning i porösa material och Anderlind, 1972, diskuterar luftströmning i springor och spalter i väggar isolerade med styrencellplast. Båda avhandlingarna ger referenser till ett avsevärt antal publikationer i ämnet.

För att kunna beräkna den del av värmetransporten över en klimatbarriär innehållande luftspalter eller alternativt mineralullsisolering som beror på luftrörelser, använder sig båda författarna av tekniken att först beräkna den andel av värmetransporten som beror av ledning i material och strålning mellan ytor. Resterande del av värmetransporten, vars storlek bestäms experimentellt, tillskrivs konvektiva luftrörelser och de parametrar som styr detta fenomen analyseras. Båda avhandlingarna gäller naturlig konvektion. Anderlind konstaterar att man knappast kan förutsäga konvektionsbidraget till värmeöverföringen i ett fall med isolerad luftspalt med större noggrannhet än, säg $\pm 40\%$. Värmeförlusterna på grund av luftrörelser i ett poröst material kan enligt Bankvall beskrivas med parametrar som specifik permeabilitetskoefficient och höjd- och breddförhållanden. Bankvall avslutar sin avhandling med att konstatera att för att luftrörelserna inne i ett poröst material skall bidra till värmetransporten med storleksordningen 5 % av totala värmeförlusten (i det aktuella fallet med mineralullsisolerad regelvägg) fordras "mycket höga

permeabilitetsvärden" och att förekomsten av springor och spalter i jämförelse härmed kan leda till mycket stora värmeförluster på grund av konvektiv luftströmning, FIG. 9.

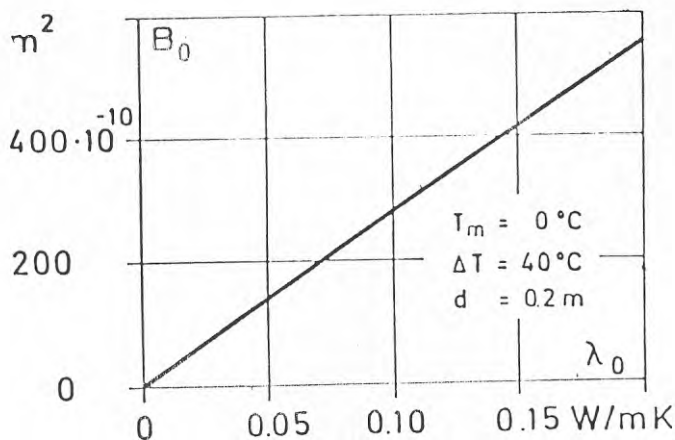


FIG. 9. Minimal specifik permeabilitetskoefficient B_0 för att naturlig konvektion skall bidra med minst 5 % till värmeflödet genom vertikala mineralullsskivor med olika värmeledningstal λ_0 .

Påtvungen konvektion i kylrumsvägg isolerad med 20 cm glasull uppges i en artikel av Lorentzen, 1960, leda till att värmeförlusten genom väggen mer än fyrdubblas vid en tryckdifferens över vägg tjockleken av 10 mm vp (100 Pa). Lorentzen relaterar även mätningar i konstruktioner med korkplattor där påtvungen konvektion uppkommit i springor och spalter, vilket lett till mellan 17 % och 138 % ökning av värmeförlusterna. Försök av detta slag har i Sverige utförts av Höglund, 1963, med likartade resultat, FIG. 10.

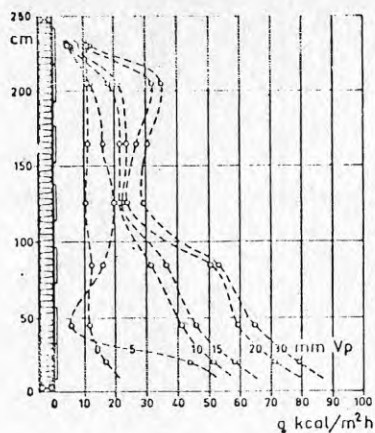


FIG. 10. Värmeflödesfördelningen i höjded på en provväggs varma sida vid varierande statistiskt övertryck. Isolering: 10 cm mineralullsskiva D. (Försök Al-6). Den påtvingade konvektionen ökar värmeflödet och medför en sned värmeflödesfördelning.

Som sammanfattning av hittills gjorda rön kan sägas att den påtvingna luftströmningen genom springor och spalter medför avsevärda energiförluster och att dessa är klart större än förluster förorsakade av luftflöden genom porösa material. Beräkningsmetoder för bestämning av förlusternas storlek saknar erforderlig skärpa vid fall med luftströmning i springor och spalter.

3.2 Luftgenomsläpplighet hos vanligen förekommande konstruktioner

Ventilationen i en byggnad störs av påverkan via otätheter i fasaden. Det har därför funnits ett behov av noggrannare kännedom om luftströmningsförloppet genom olika sprickor för att rätt kunna dimensionera ventilationsanläggningar. Härtill kommer energiaspekten på ventilationsmängden. Det är därför inte förvånande att det finns en mängd artiklar som beskriver försök att bestämma läckaget genom springor och spalter vid olika geometriska utföranden och vid olika storlekar på det drivande trycket. Ett vanligt uttryck för

sambandet mellan läckflöde V och tryckdifferens Δp är ekvationen, se Lyng,

$$V = a \cdot \ell \cdot (\Delta p)^{1/\beta}$$

där ℓ = springans längd i m

a = proportionalitetskonstant i $m^3/m s Pa^{1/\beta}$

Honma, 1975, presenterar på bas av en litteraturgenomgång och efter egna försök en komplettering av ekvationen som anges väl beskriva förhållanden för sprickor med stort strömningsmostånd vid tryckdifferenser upp till 500 Pa. Exponenten $1/\beta$ anges som funktion av vissa parametrar,

$$\beta = 2.0 - e^{-5.0 \cdot a \cdot \Delta p}$$

Exponenten $1/\beta$ kan anta värden i intervallet $0,5 \leq 1/\beta \leq 1$ där gränsvärdena 0,5 och 1 svarar mot turbulent respektive laminär strömning. För värden inne i intervallet är strömningen av labilare karaktär och kvasilaminär. För en given konstruktion kan proportionalitetskonstantens och exponentens värde bestämmas ur mätningar av läckageflödet vid två olika värden på det drivande trycket,

$$\begin{cases} V_1 = a \cdot \ell (\Delta p_1)^{1/\beta} \\ V_2 = a \cdot \ell (\Delta p_2)^{1/\beta} \end{cases} \quad \begin{cases} \beta = \frac{\log \Delta p_1 - \log \Delta p_2}{\log V_1 - \log V_2} \\ a = V_1 / \ell \cdot (\Delta p_1)^{1/\beta} \end{cases}$$

En stor mängd bestämmingar av β -värden finns redovisade i litteraturen, speciellt vad gäller olika typer av fönsterkonstruktioner. Så anger exempelvis Sasaki och Wilson, 1965, för de av dem provade fönstren av amerikansk standard exponentens $1/\beta$ värde till 0,67. Motsvarande värden för holländska fönstertyper anges av van Gunst, 1959, ligga i intervallet 0,58 - 0,73 där högre värden på exponenten svarar mot fönster med tätningslister. Cammerer och Hirschbold, 1938, ger efter omfattande studier av tyska fönstertyper en ekvation för läckflödet där exponenten för tryckdifferensen anges till 0,67 men där även strömnings-

vägens längd ingår som en parameter.

$$V = 2 \cdot 10^5 \cdot s^{9/10} \cdot b^{-8/5} \cdot p^{2/3}$$

$$V = \text{läckflöde } m^3/h$$

$$s = \text{spalttjocklek } m$$

$$b = \text{luftströmningsvägens längd } m$$

$$\Delta p = \text{tryckdifferens } m \text{ m vp}$$

Thomas och Dick, 1953, anger ett experimentellt funnet samband mellan läckageflöde och tryckdifferens för fönster enligt brittisk standard innebärande en exponent för tryckdifferensen av 0,5.

$$\Delta p = \frac{\text{konstant}}{s^2} (V + \text{konstant}/V^2)$$

Förutom ovan angivna parametrar påverkar även förekomsten av sektionssäkringar i luftströmmens väg, bildande så kallade dekompressionskammare, strömningsmotståndet och därmed läckflödet. Honma, 1975, diskuterar detta fenomen.

Beträffande proportionalitetskonstanternas storlek kan några generella slutsatser svårligen dras på bas av de uppgifter som presenteras i litteraturen för olika konstruktioner. I ASHRAE Handbook of fundamentals 1972 p 338, relateras en undersökning i vilken det konstateras att läckflödets storlek beror på lufttemperaturen. Härmed avses att sprickvidden ökas och därmed även proportionalitetskonstanten vid sjunkande yttertemperatur. Den betydelse som temperaturdifferensen mellan luften inomhus och utomhus har i form av skorstenseffekt beaktas genom att detta vindtryck tillsammans med tryckdifferenser på grund av vind ger det drivande trycket för luftströmning genom konstruktionen. Vid fönster och dörrar påverkas springbredden och därmed läckflödets storlek av listens utformning och kontaktrycket i stängt läge. Den ökning av läckflödet som erhålles vid otillräckligt kontaktryck blir mindre vid fall med än utan tätningssremsa på grund av att tät-

ningsremsan kan expandera och fylla ut en uppkommen springa. ASHRAE Handbook of fundamentals anger att otillräckligt kontaktryck ökar läckflödet med 20 % vid fönster med tätningssremsa och med 80 % vid fönster utan tätningssremsa. Då sprickor uppkommer på grund av åldring av material kommer även täthetskaraktäristiken för en konstruktion att vara tidsberoende.

Hittills diskuterade samband har huvudsakligen erhållits ur undersökningar av förhållanden vid fönster och dörrar. Inget hindrar emellertid att man använder sig av de funna sambanden för att beskriva förhållandena vid andra typer av fogar exempelvis vid anslutningar mellan ytterväggselement och husstomme. Nylund, 1966, visar hur man genom kännedom om täthetskaraktäristika för olika fogdetaljer kan beräkna läckflödet för den sammansatta fogen förutsatt att denna kan betraktas som en "seriekoppling" av fogdetaljer, se FIG. 11.

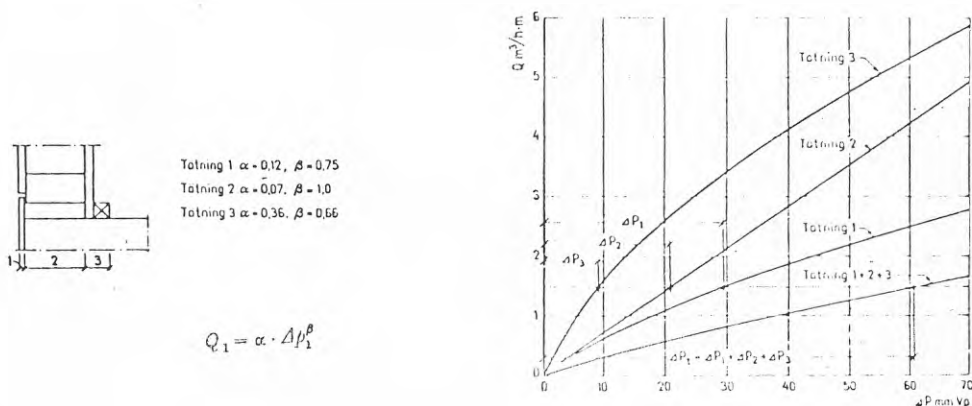


FIG. 11. Beräkning av täthet för sammansatt fog. Delfog 1 = spikad skarv i vindtät beklädnad, delfog 2 = drevad spalt, delfog 3 = anslutning av inre beklädnad inom stomme.

Ett annat sätt att beräkna läckflödet för en sammansatt konstruktion, där exponenten $1/\beta$ förutsättes vara lika

för de två seriekopplade skivorna anges i ASHRAE Handbook of fundamentals. Enligt den angivna formeln beräknas en ekvivalent proportionalitetskonstant för den sammansatta konstruktionen.

Fluktuationer i vindtryck och vindriktning påverkar strömningen genom springor och spalter på ett hittills föga utrett sätt, se Malinowski.

Krav på fogars täthet kan ställas av myndighet eller av byggherre. Ett exempel där byggherren ställt krav och genomfört mätningar för att kontrollera hur kraven uppfyllts är barnkliniken vid Östra Sjukhuset i Göteborg, se Holmquist och Viktorin, 1973.

För väggar och andra byggnadsdelar utan konstruktivt betingade springor används vanligen andra uttryckssätt för att ange konstruktionsdelens täthetskaraktäristika. Nordiska kommittén för byggnadsbestämmelser ger sitt förslag till normkrav genom ett i diagram preciserat högsta värde på luftläckage vid varierande tryckskillnader, se Lindskog, Lind, 1976, FIG. 12.

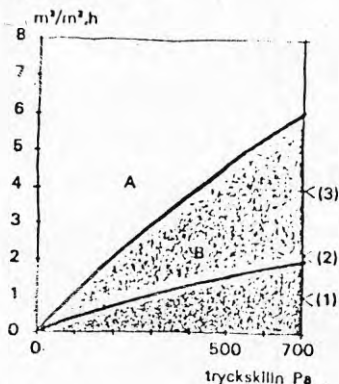


FIG. 12. Normförslag för väggars täthet från Nordiska kommittén för byggnadsbestämmelser. A = Det först publ. värdet (lätta träväggar) B = Högre kravnivå. Exempel på publ. värden på täthet: 1 = Internit spikad samt läktad (Nylund), 2 = Mineralullsdrevning kring ett fönster i en 8.6 m^2 vägg exempel (eft Birkeland), 3 = Trävägg med ett tätt papplager (Birkeland).

Gastransporten genom springor har också fukttekniska konsekvenser. I programskriften Fukt från BFR redovisas en tabell visande fukttransport på grund av diffusion och konvektion genom springor vid en relativ fuktighet inomhus av 50 %, ett drivande invändigt övertryck av 50 Pa och utvändigt ett mellansvenskt vinterklimat. Av TAB. 2 framgår vilken dominerande betydelse den relativa luft rörelsen har på lufttransporten redan vid små springbredder. Tabellen är framräknad med sikte på tillämpningar på skadefall i Skandbanken 1965 i Stockholm.

TAB. 2. Jämförelse mellan fukttransport pga diffusion och konvektion.

Konstruktion (ej ytbehand- lade väggar)	Transporterad kondenserbar fuktmängd ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)	
	Diffusion	Konvektion
1. Homogen gasbetong	$13 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$
2. Murverk av stap- lad gasbetongstav	$13 \cdot 10^{-8}$	$406 \cdot 10^{-8}$
3. 50 cm breda gas- betongelement med sprickor mellan elementen, sprickvidd: 0,2 mm 1 mm	$13 \cdot 10^{-8}$ $13 \cdot 10^{-8}$	$11 \cdot 10^{-8}$ $920 \cdot 10^{-8}$

Som ytterligare exempel på små otätheters betydelse kan nämnas att luftgenomsläpligheten genom ett nyckelhål kan röra sig om $0,17 \text{ m}^3/\text{h mm Vp}$.

I USA finns en fastlagd provningsmetod för bestämning av luftläckage genom väggar, ASTM standard E283-73. Krav ställs sedan av olika branschorgan. Exempelvis föreskriver en sammanslutning av tillverkare av aluminiumprofiler (NAAMM) täthet för väggar klädda med aluminiumprofiler.

Kravet är en maximering av läckflödet till $0.000305 \text{ m}^3/\text{s}$, m^2 vid en tryckdifferens av 75 Pa. Kravnivån korrigeras för inom provningsfältet eventuella fönster eller dörrpartier. Exempel på uppmätta läckflöden vid varierande tryckdifferenser ges av Tamura, 1975, FIG. 13. Av denna redovisning framgår att läckflöden avsevärt överstigande det ovan angivna normkravet erhållits.

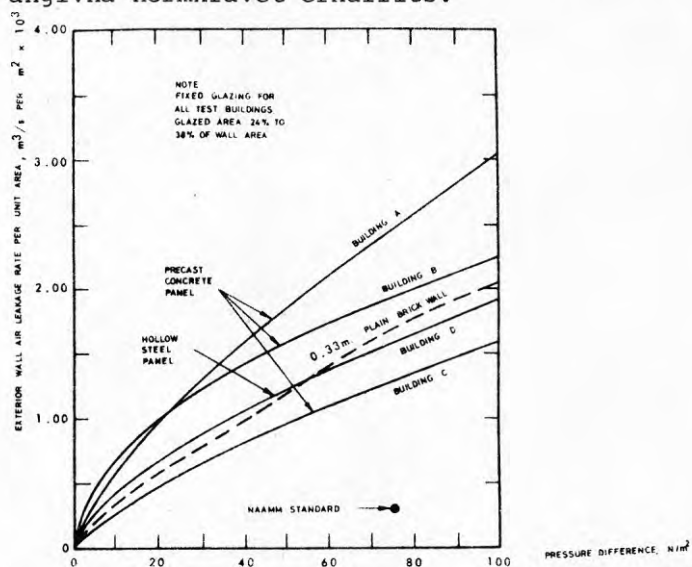
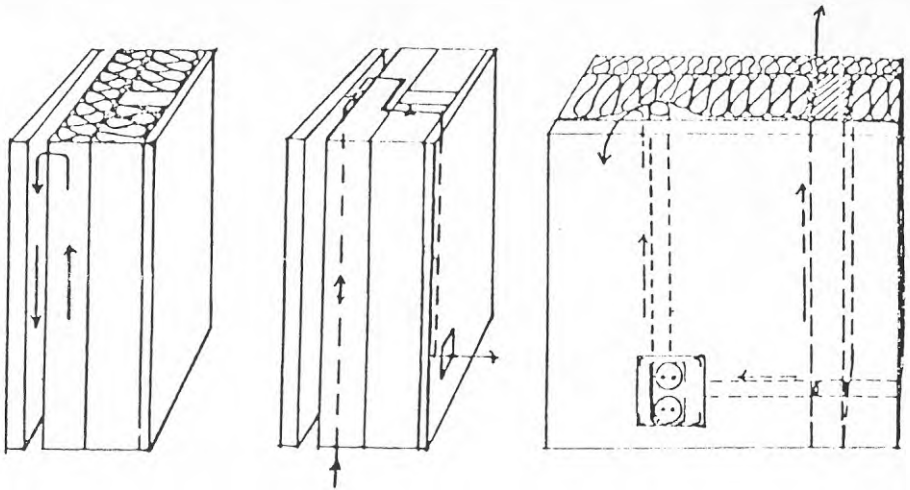


FIG. 13. Exempel på i USA uppmätta läckflöden genom ytterväggar, jämförda med föreskriven standard för Alkonstruktioner. Efter Tamura.

I ASHRAE Handbook of fundamentals kan man finna uppgifter på luftgenomsläplighet hos tegel- och regelväggar med kommentarer att putsning av tegelväggar kan reducera läckflödet genom en slarvigt murad vägg med upp till 96 % och att målning innebär en reduktion av regelväggens läckflöde med mellan 28 % och 50 %. Vidare relateras i handboken en undersökning av tätheten hos en tegelbyggnad i nio våningar där uppskattningsvis 25 % av läckflödet skedde genom otätheter vid fönster och dörrar och återstoden genom väggarna. I svensk praxis har detta beaktats bl a genom putsning av skorstensstocken.

Ur en artikel av Jan Hagstedt, 1976, har nedanstående figur, FIG. 14, hämtats.



a) Konvektion i luftspalt och isoleringsmaterial

b) Genomströmning av kall luft via håligheter i väggkonstruktionen p g a bristfälligt arbete

c) Luftkanaler vid installationer

Ytterväggar utan utvändigt vindskydd kan få försämrad isolering genom

- a) konvektion i isoleringsmaterialet mot luftspalt, se fig a)
- b) direkt luftläckage genom väggen p g a brister i isoleringsutförandet, olämpligt utförda installationer eller dylikt, se fig b) och c).

FIG. 14. Läckagemekanismer enligt Hagstedt.

I den fortsatta framställningen diskuterar Hagstedt betydelsen av ett fullgott vindskydd (man sätter inte ylletröjan utanpå anoraken när det blåser). Speciellt uppmärksammas att existensen av en ångspärr inte utgör någon garanti för förhindrande av genomgående luftströmmar då skiktet ofta punkteras i samband med installationer. Vidare uppmärksammas betydelsen av gott arbetsutförande vid skarvning av vindskyddet. Skarvningen kan ofta vara svår

att utföra vid hörn och anslutningar mellan husdelar, dvs i områden där man ofta erhåller stora tryckdifferenser vid vindanblåsning.

Tätheten hos klimathöljet kan även uttryckas i form av erforderlig energimängd för kompensation av utläckage av varmluft alternativt inläckage av kallluft, se nedanstående TAB. 3.

TAB. 3. Skattad värmeförlust genom luftläckage i en byggnad. De tabellerade faktorerna multiplicerade med rums- eller byggnadsvolymen i ft^3 ger värmeförlusten i Btu/h beroende på ofrivillig ventilation.

Room or Building Type	No. of walls with windows	Temp. difference, F deg			
		25	50	75	100
A	None	0.23	0.45	0.68	0.90
	1	0.34	0.68	1.02	1.36
	2	0.68	1.35	2.02	2.70
	3 or 4	0.90	1.80	2.70	3.60
B	Any	1.35	2.70	4.05	5.40
C	Any	0.90-1.35	1.80-2.70	2.70-4.05	3.60-5.40
D	Any	0.45-0.68	0.90-1.35	1.35-2.02	1.80-2.70
E	Any	0.68-1.35	1.35-2.70	2.03-4.05	2.70-5.40

A -- Offices, apartments, hotels, multistory buildings in general.
 B -- Entrance halls or vestibules.
 C -- Industrial buildings.
 D -- Houses, all types, all rooms except vestibules.
 E -- Public or institutional buildings.

I konstruktioner inneslutna luftspalter påverkar konstruktionens värmegenomgångstal. Hur stor påverkan är beror på luftspaltens orientering, dimensioner och anslutningar inåt och utåt samt på värmeflödets riktning. Kvantitativa uppgifter på luftspaltens inverkan återfinns i flera handböcker eller normer.

Om en luftspalt befinner sig i kontakt med ytterluften medger inte SBN 67 att man tillgödöräknar sig den värmeisolerande förmågan hos luftspalten "såvida inte det sammanlagda värmemotståndet hos luftskiktet och konstruktionsdelen utanför detta särskilt har klarlagts".

Gertis 1972 och Bertier, 1963, redogör för studier och försök med ventilerade luftspalter i väggar och i franska normer av 1971 finns i paragraf 1.213 regler intagna, tillämpbara även för ventilerade yttertak. Reglerna innebär i korthet att en koefficient anges som uttrycker hur stor del av värmemotståndet i luftspalt och utanförbyggande konstruktion får tillgodoräknas. Koefficienten beror på ventilationsareans relation till konstruktionshöjden (längden) samt förhållandet mellan yttre och inre konstruktionsdelars värmemotstånd, FIG. 15. Då ventilationsarean i förhållande till vägghöjden (husbredden) är mindre än $20 \text{ cm}^2/\text{m}$ ($3 \text{ cm}^2/\text{m}$) får hela luftspaltens värmeisolerande förmåga tillgodoräknas.

$$K = K_1 + \alpha (K_2 - K_1)$$

R_e/R_i	$s/L \text{ (cm}^2/\text{m)}$	
	$20 \leq s < 200$	$200 \leq s < 500$
$R_e/R_i < 0,1$	0,1	0,25
$0,1 \leq R_e/R_i < 0,3$	0,2	0,45
$0,6 \leq R_e/R_i < 1,2$	0,3	0,6

K = "K-värde"

α = Ur bifogad tabell

s = Öppningsarea cm^2

L = Vägghöjd m

$K_1 = m_{i+u} + m_{\text{luftspalt}} + \sum_2^d$

(alla
fasta
skikt)

$K_2 = m_{i+u} + \sum_2^d$

(fasta skikt
innanför
luftspalt)

FIG. 15. Regler för hur värmemotstånd i ventilerade luftspalter med utanförbyggande skikt får tillgodoräknas enligt franska normer.

Tätheten hos hela byggnadsdelar kan bestämmas genom spår-gasmätning eller genom mätning av in- och utströmmande luftmängd vid pålagd tryckdifferens. Redogörelse för dessa tekniker sker under efterföljande avsnitt. Bland uppnådda resultat skall endast återges ett citat ur en rapport av Höglund, Elmroth, 1973, vilken redogör för bestämning av den ofrivilliga ventilationens storlek i småhus med hjälp av spårgasteknik:

"Undersökningar av antalet luftomsättningar i småhus visar också entydigt att huvuddelen av luftläckningen sker genom skorstenar, ventiler och springor vid fönster och

dörrar. Genom golv-, vägg- och takkonstruktionerna är luftläckningen - vid rätt utförda konstruktioner - relativt liten - luftomsättning ca 0,1 - 0,2 ggr/h."

3.3 Experimentell bestämning av luftgenomsläpplighet

Bestämningen av en konstruktions luftgenomsläpplighet sker lämpligen med tryckkammare. Metoden har främst använts i laboratorium för undersökning av luftläckage i fönster, fogar och väggelement av Wigen, Granum och Lundby (NBI), av Höglund, Elmroth och Mattson (Byggnadsteknik, KTH), men även på fältet av Holmqvist-Victorin, Höglund, Elmroth och Mattson m m.

Provningarna resulterar i en siffra på genomläckt luftmängd per ytenhet, tid och tryckskillnad.

Mot en del av en fasadkonstruktion, som skall undersökas, placeras på insidan en "låda", mätlådan, med en sida öppen mot det aktuella fasadpartiets inneryta. Tätningen mellan denna och mätlådan utförs mycket noggrant. Lådan är uppbyggd av ett regelverk på vilket satts kryssfänér på insidan, som tätats med en plastduk. Byggnadsteknik, KTH, har vidareutvecklat metoden. Lådan består då av ett regelverk på vilket spänts en plastduk. Dessutom anbringas en skyddslåda utanför mätlådan.

I lådorna skapas med hjälp av fläktar ett luftövertryck i förhållande till fasadkonstruktionens utsida. Detta luftövertryck regleras så att det blir lika stort i båda lådorna. Därigenom erhålls teoretiskt ingen luftströmning från den ena lådan till den andra eftersom drivkraften är noll. I praktiken blir denna luftströmning försumbar om tryckregleringen utförs noggrant. Med enlådesystem har man däremot vissa tätningsproblem, speciellt vid fältmätningar.

På grund av övertrycket i mätlådan strömmar luft ut genom otätheter i fasadkonstruktionen. Den utströmmande luft-

mängdens storlek registreras med hjälp av en flödesmätare placerad i luftkanalen till mätlådan. På detta sätt bestäms luftströmningen genom fasadkonstruktionen vid olika luftövertryck i mätlådan, Övertrycket i lådan mätes lämpligen med en differentialmanometer. Flera mätpunkter bör utnyttjas för att försäkra sig om jämn tryckfördelning. Den utströmmande luftmängdens storlek erhålles som funktion av luftövertrycket i mätlådan. De olika punkterna i ett diagram ger en för fasadkonstruktionens luftgenomströmningsegenskaper karakteristisk kurva.

Tryckkammaremetodens för- och nackdelar kan sammanfattas på följande sätt:

Fördelar: - enkelt att utföra mätning
 - relativt okänslig för yttre omständigheter
 - viss gradering av otätheterna
 - reproducerbar
 - ofarlig

Nackdelar: - tidskrävande
 - ev inverkan av tvärströmning
 - skrymmande provningsutrustning
 - ev störande
 - begränsat användningsområde (fönster, fogar, väggelement)

3.4 Pågående forskning och angelägna forskningsprojekt

Problem beträffande konstruktioners täthetsförhållanden behandlas av ett flertal svenska forskare. Vid institutionen för Byggnadsteknik I vid Tekniska Högskolan i Lund pågår under ledning av professor Lars-Erik Nevander sedan 1966 studier av konvektionsförlopp i rumsbegränsande element. Inledningsvis studerades egenkonvektionens betydelse i sluten värmeisolerad konstruktion, och ett nu snart avslutat projekt behandlar den påtvingade konvektionens betydelse.

Fortsatta anslag har sökts för projekten "Värmeisoleringsförmåga och vindtäthet" och för studier av hur tilläggsisolering bäst utföres. Luft- och vattentäthet hos tak av överläggsplattor med eller utan undertäckning behandlas i ett projekt med titeln "Branta tak".

I samarbete mellan Sven Tyrén AB och Institutionen för Byggnadsteknik vid Tekniska Högskolan i Stockholm bedrivs litteratur- och fältstudier av läckage genom ytterväggar.

Vid jämförelse med läget utomlands ligger svensk forskning väl framme.

Det diskuterade problemområdet synes vara väl intäckt angående forskning inom de väsentligaste delfrågekomplexen, beräkning av påtvingade konvektionsförlopp och bestämning av normalt förekommande otätheter. Här skall därför endast anges några angelägna frågeställningar, vars behandling den pågående eller planerade forskningen inte utan vidare kan antas ta upp till behandling:

- Metoder för praktisk beräkning av konvektiva värmeförluster i porösa skikt och spalter ingående i vägg-, tak- och golvkonstruktioner.
- Inverkan av åldringsfenomen såsom slitage, sprickbildning, krympning etc på otätheters luftgenomsläpplighet.
- Luftläckagets inverkan på inre och yttre värmeövergångstal bl a genom effekter på uttorkningsförlopp.

4. LUFTSTRÖMNING I RUM

4.1 Inverkande faktorer

4.1.1 Tryckdifferenser mot kringliggande utrymmen. Temperaturgradienter

Luftströmningen i ett rum utgör tillsammans med temperaturen och luftfuktigheten tre huvudvariabler som bestämmer inomhusklimatet, se Fanger. Den ofrivilliga ventilationen kan därför inte avvägas enbart med hänsyn till energibalansen utan måste också regleras så att man når en acceptabel luftkomfort. Rörelserna i luften kan exempelvis utnyttjas för att påverka förhållandena i gynnsam riktning. Därvid är de studier som utförts angående fysiologiska komfortkrav av utslagsgivande betydelse, se t ex Löfstedt.

Luftströmningen i ett rum betingas av temperaturskillnader och påtvingna tryckdifferenser. Ojämn uppvärmning resulterar i egenkonvektion och luft som pressas ut eller in genom springor och öppningar ger upphov till varierande slag av luftrörelser.

I normalt täta byggnader är luftomsättningen på grund av ofrivillig ventilation av storleksordningen 0,1 - 0,6 ggr/timme och således de luftflöden, som på grund härav strömmar in i det enskilda rummet, relativt små. Då det vanligen är fråga om ett flertal öppningar, oftast springor, som utgör inströmningsvägen, blir det fråga om en diffus lufttillförsel med låg impuls. Normalt torde därför den ofrivilliga ventilationen endast marginellt påverka luftrörelserna i rummet i stort. Är det fråga om större inströmningsöppningar och starka drivkrafter såsom hård vind eller stora av temperaturskillnader orsakade tryckdifferenser, kan emellertid den ostyrda ventilationen givetvis helt bestämma rummets strömningsbild. Det kan därför vara motiverat att något beröra tillhörande frågor.

Det är sannolikt att den ofrivilliga ventilationen i stort påverkas av huruvida byggnaden har ett fläktstyrt ventila-

tionssystem i drift. Av den styrda ventilationen orsakade luftströmningar i det enskilda rummet har dock, med hänsyn till de mycket små dynamiska tryck det normalt är fråga om, knappast någon inverkan på den ofrivilliga ventilationens storlek. Av styrd luftinblåsning orsakade strömningar i rum behandlas därför inte här.

Strömning betingad av tryckdifferenser i förhållande till rummets omgivning sker inte alltid direkt från högtrycks- till lågtrycksöppningar, FIG. 16. Luftens massa och viskositet kan framkalla betydande avböjningar i strömningen. En detaljerad bestämning av rörelsemönstret blir komplicerad och starkt bunden till speciella förhållanden, jämför avsnitt 4.2.

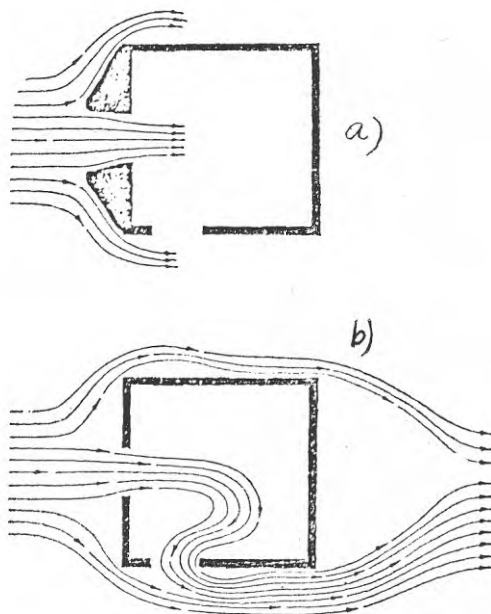


FIG. 16. Lufttrögheten påverkar strömningen.

Vissa utsagor om förhållandena kan dock göras med viss allmängiltighet.

4.1.2 Öppningarnas placering

När en öppning ligger symmetriskt på en väggyta, FIG. 17.a, är tryckfördelningen symmetrisk med avseende på öppningens båda sidor och luften strömmar rakt in i rummet. I annat fall blir trycket olika fördelat på öppningens båda halvor och luften strömmar in snett i förhållande till väggytan, FIG. 17.b.

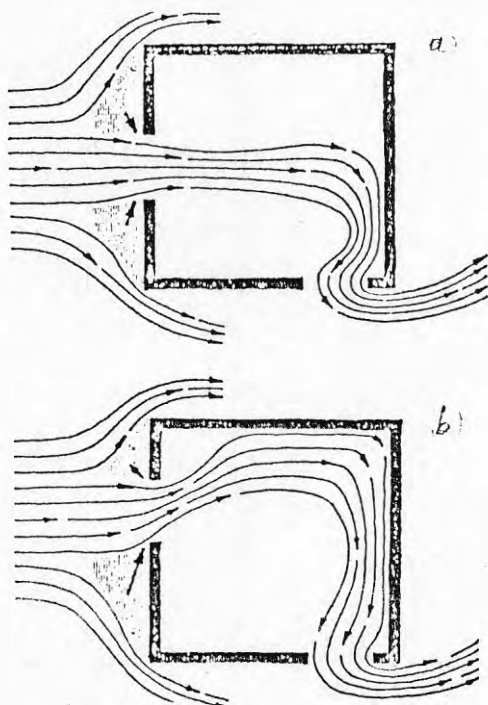


FIG. 17. Inverkan av öppningars lokalisering på luftströmningen i ett rum. a) Symmetrisk placering. b) Osymmetrisk placering.

Luftmängden genom ett luftuttag påverkas inte vid en förflyttning i höjddled eller vid en uppdelning på två separata delar, se FIG. 18.

Strömningen från ett högt beläget intag flyter på grund av tröghetseffekter längs innertaket mot utsläppet - oavsett

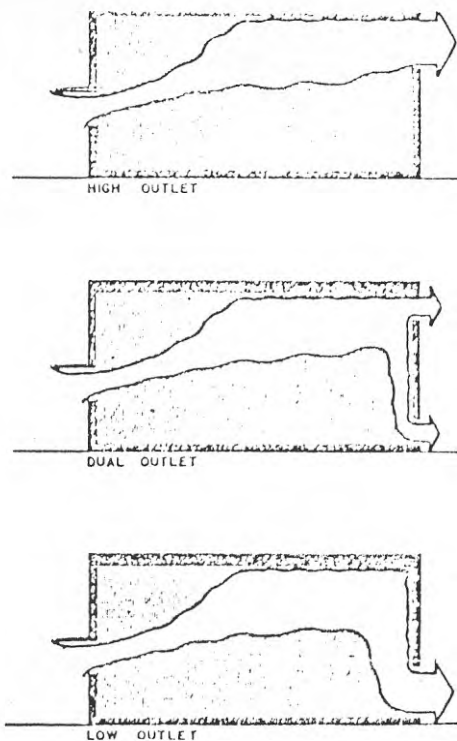


FIG. 18. Strömningens förlopp i ett rum vid olika placering av luftutsläppet.

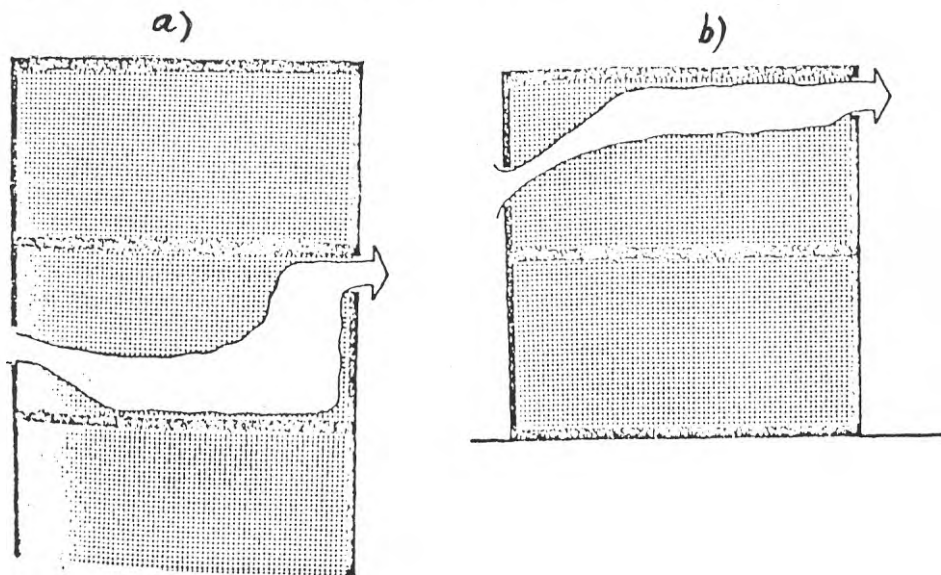


FIG. 19. Inverkan av ett rums höjdläge på luftströmningen i en byggnad

placeringen av det senare, se Evans. Enligt samma källa beror strömningsbilden däremot av rummets höjdläge i byggnaden. När öppningen var placerad mitt på en fasadyta, FIG. 19, strömmade luften in i rummets nedre del där människor vistades. I fall då luftintaget var placerat i byggnadens övre del, FIG. 19, försköts luftströmningen från rummets vistelsezon mot innertaket.

Befintliga ventilationsöppningar förmedlar normalt den dominerande delen av luftutbytet. I praktiken kan de till ventilationssystemet hörande luftintagens och utsläppens lokalisering variera inom vida gränser. Den inverkar på strömningen i rummet och därmed i princip på den ofrivilliga ventilationens funktion. Eftersom lufthastigheterna är låga, torde effekten emellertid bli av underordnad betydelse.

4.1.3 Öppningarnas storlek

Luftomsättningen i rummet är proportionellt mot öppningarnas storlek och blir intensivast när båda öppningarna vid given totalarea har samma storlek. Lufthastigheten kan däremot vid direkt genomblåsning i en byggnad lokalt blir störst om utsläppet är större än intaget, FIG. 20, något som i viss mån bekräftats vid vindtunnelexperiment, se FIG. 21.

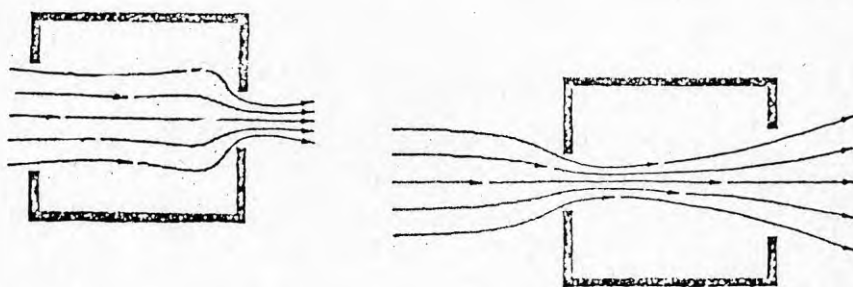


FIG. 20. Lufthastighetens beroende av relationen mellan intagets och utsläppets storlek. a) Stort intag, b) Stort uttag.

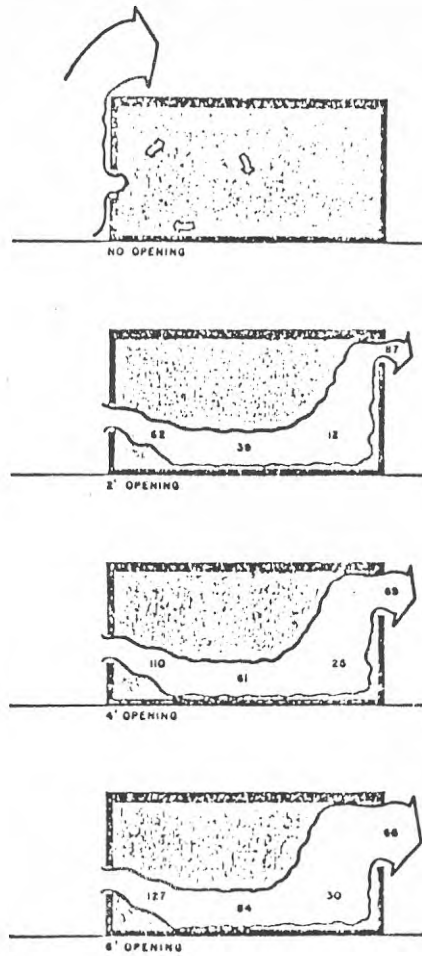


FIG. 21. Inverkan av öppningars storlek enligt vindtunnelprov. Lufthastigheten före intaget har satts lika med - 100 .

De i figuren visade resultaten strider mot observationer enligt Holmberg, Larsson och Sundkvist, enligt vilka utsläppets storlek har försumbar inverkan på strömningsfältet. Diskrepansen kan delvis bero på att värdena i FIG. 21 relateras till "fri hastighet" utanför modellen. Inloppshastigheten i de olika fallen skiljer sig förmodligen från varandra. Om hastigheterna i stället relateras till inloppshastigheten, blir resultaten i FIG. 21 troligen i bättre överensstämmelse med observationerna enligt ovannämnda författare, dvs samma inloppshastigheter ger i stort sett

samma hastighetsfördelning vid ganska kraftiga variationer av utsläppets storlek.

Liksom öppningarnas placering i höjled inverkar också lokalisering i plan. Problemet belyses av en studie av Bilborrow och Fricke, som undersökt lufttryckets inverkan vid olika lokalisering av öppningar i en tre våningars husmodell. Innertrycket mättes och beräknades teoretiskt vid olika placerade fasadöppningar (springor kring fönster), FIG. 22.

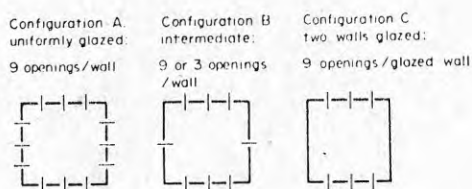


FIG. 22. Olika lokalisering av fasadöppningar.

De uppmätta och beräknade värdenas variationer undersöktes som funktion av vindrörelsernas infallsvinkel och av öppningarnas olika lokalisering i rummet, FIG. 23 - 25.

Tryckvariationerna mellan modellens olika våningar var förhållandevis små (under 0.05 av stagnationstrycket).

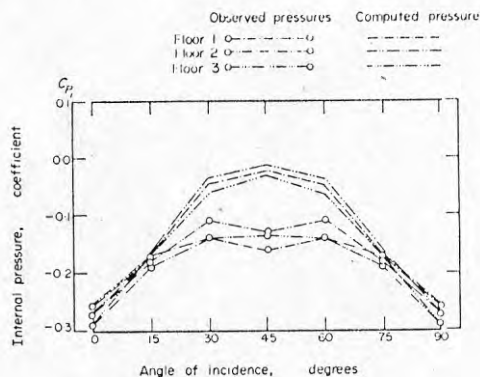


FIG. 23. Innertryck vid olika vindriktning och lokalisering av öppningarna enligt A i FIG. 22.

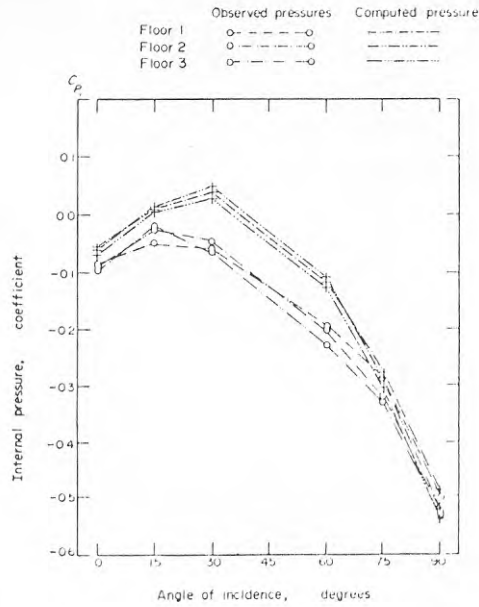


FIG. 24. Innertryck vid olika vindriktning och lokalisering av öppningarna enligt B i FIG. 22.

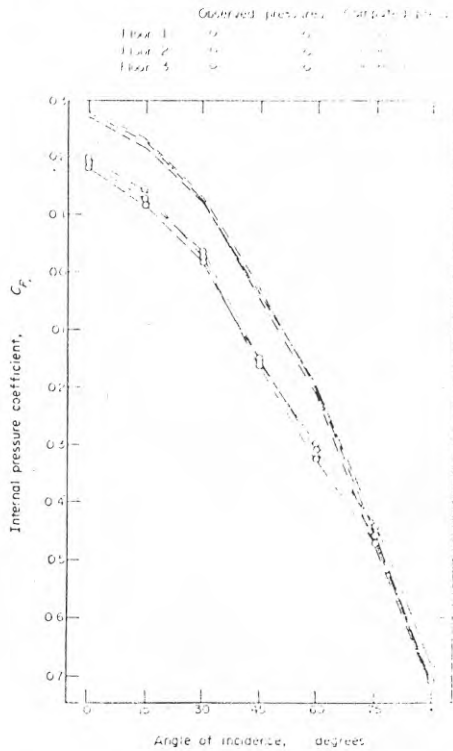


FIG. 25. Innertryck vid olika vindriktning och lokalisering av öppningarna enligt C i FIG. 22.

De beräknade värdena var högre än de experimentellt bestämda. Skillnaderna ökade vid användning av större öppningar och vid högre turbulens hos strömningen. Både de teoretiska och de experimentella resultaten antydde att infiltreringen var mera beroende av den infallande strömningens hastighet än dess riktning.

4.1.4 Reynolds_tal

Inverkan av Reynolds tal belyses av en av Holmberg och Larsson rapporterad undersökning.

Hastighetsfördelningen uppmättes i ett försöksrum med dimensionerna $L = 4$ m, $B = 2$ m, $H = 2$ m, FIG. 26.

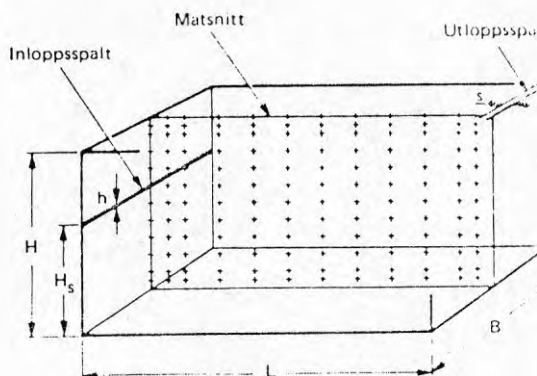


FIG. 26. Försökslokal med markering av mätpunkter.

Lufthastigheten och lufttemperaturen uppmättes i $11 \times 11 = 121$ punkter - 20 mätvärden registrerades i varje mätpunkt med tidsintervaller på 10 sek.

Inloppsspaltens höjd valdes så att normala luftbelastningar för industrilokaler ($0,003 - 0,006 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ sek}$) erhöles vid inloppshastigheter $U_0 = 3,0$ m/s. Reynolds tal var

$$Re = U_0 \cdot h/\nu = 1180$$

Av den kartlagda hastighetsfördelningen i lokalen, FIG. 27, framgår att hastigheten i den nedersta delen av fältet (vistelsezonen) var $v = 0,27$ m/s, alltså 9 % av inloppshastigheten.

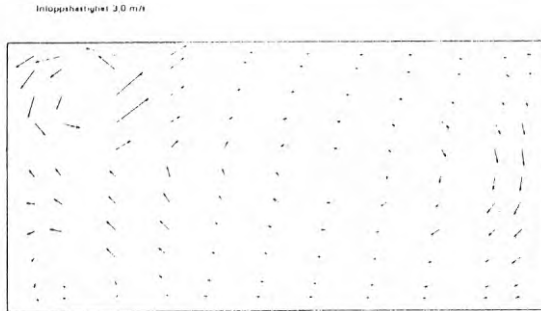


FIG. 27. Uppmätt hastighetsfördelning i försökslokalen för $Re = 1180$.

En teoretisk undersökning av förhållandena visade att strömningen i lokalen vid $Re = 5900$ (inloppshastighet $U_0 = 15$ m/s) var oförändrad i förhållande till strömningen vid $Re = 1180$. Inom det studerade intervallet synes Reynolds tal därför inte ha någon större inverkan på luft-rörelserna.

Försök har gjorts att studera strömningsförhållanden i ett rum genom modellförsök, se Malinowski samt Frick och Bilborrow.

4.2 Teoretiska modeller för strömningen

Den Ouden har uppställt en teoretisk modell, se Honma, för strömningsbalans i ett rum, varvid lufttransport genom ventilationsdon och otätheter beaktas, FIG. 28,

$$\frac{1}{R_C} (|P_O - P_i|)^{1/\beta_w} \pm \frac{1}{R_D} (|P_C - P_i|)^{1/\beta_d} \pm \frac{1}{R_S} (|P_S - P_i|)^{1/2} \pm \frac{1}{R_r} (|P_r - P_i|)^{1/2} =$$

(se FIG. 28)

där R_c , R_d , R_s , R_r = strömningsresistans för fönster, dörrar, tillufts- och utloppsregister

P_o , P_i , P_c , P_s , P_r = utomhustryck, medeltryck i rummet, lufttryck i korridor samt i tillluftens och frånluftens delningspunkter.

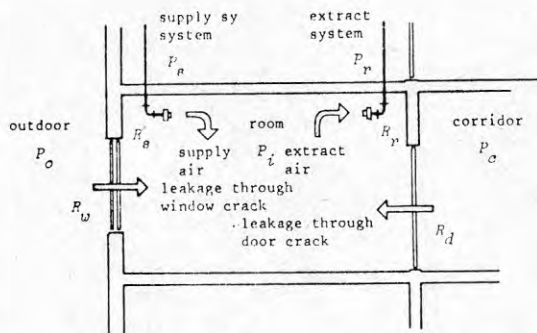


FIG. 28. Strömningsbalans i ett rum

Modellen beaktar inte inverkan av rummets egenskaper, öppningars och otätheters lägen eller förhållanden inom rumsvolymen. Endast ett referenstryck, P_i , erhålles med vars hjälp tryckdifferenser och luftmängder kan beräknas.

En beräkningsmetod grundad på Navier - Stokes strömnings-ekvationer och gällande termiska samband har utvecklats av Holmberg, se Holmberg et al. Den har programmerats för dator och tillämpats på det i avsnitt 4.1 beskrivna fallet.

4.3 Angelägna forskningsuppgifter

Kännedom om strömningsförhållandena i ett rum möjliggör en ändamålsenlig ventilering av rumsceller beroende på luftintagens och luftutloppens placering, rummets höjdmässiga placering i byggnaden samt eventuella otätheters omfattning och lokalisering. Därmed kan också en anpassning ske till kravet på energisparande åtgärder.

Strömningsförhållanden i enstaka rum under olika randbetingelser har experimentellt studerats i jämförelsevis stor omfattning.

Frågor som i detta sammanhang bör beaktas speciellt är:

- Strömningsbalans i ett rum m h t kompletterande betingelser såsom strömningshinder i olika rumsinteriorer, otätheters lokalisering och temperaturgradienter. Fullskaleprov kan kompletteras med systematiskt genomförda datorberäkningar. Önskvärt är att utveckla befintliga program för tvådimensionell strömning så att de kan tillämpas på tredimensionella problem.
- Klimatkomfortens beroende av den ofrivilliga ventilationen och därav föranledda restriktioner på otätheters lägen och omfattning. Studien kan bygga på resultat erhållna vid behandling av ovan angivna problem.

5. LUFTSTRÖMNING I BYGGNADER

5.1 Faktorer som påverkar luftutbytet

Luftströmningen i och mellan en byggnads olika utrymmen betingas av ett stort antal faktorer såsom ventilationssystemets egenskaper, temperaturförhållandena, de rumsbegränsande byggnadsdelarnas täthetsförhållanden, antalet fönster och dörrar och deras öppningstider samt vindförhållandena. De flesta av hithörande frågor har berörts tidigare. Problematiken blir emellertid vid granskning av luftutbytet mellan de olika rummen i en byggnad mera komplicerad eftersom de olika enheternas randvillkor påverkar varandra. Den i 4.2 angivna ekvationen för ett rums strömningsbalans kommer exempelvis att innehålla flera obekanta eftersom inte bara rummets eget lufttryck P_i är obekant utan också närliggande utrymmens tryck, P_c .

5.2 Inverkan av vindbelastningar och temperaturdifferenser

Vindförhållandenas betydelse för tryckdifferenserna över rumsbegränsande byggnadsdelar och därmed för luftströmningen mellan en byggnads olika rum har berörts i kap. 2. Här påminns endast om betydelsen av otätheternas lokalisering. Om springor och öppningar är någorlunda jämnt fördelade runt huset, kan trycket variera mellan $\pm 0,2$ av yttre vindtrycket P_v . Om däremot öppningarna på vindsidan dominerar, blir inomhustrycket avsevärt större - upp till $0,8 P_v$. Om öppningarna huvudsakligen är belägna på läsidan, kan ett undertryck av $0,2 - 0,4 P_v$ eller större uppkomma, se Elmroth-Höglund, 1970.

Om lufttemperaturen i ett hus avviker från utetemperaturen uppstår en tryckskillnad. Denna beror av skillnaden i luftens densitet och betingar den tidigare nämnda "skorstensverkan". När temperaturen inne är högre än ute, uppstår det på lägre nivåer ett undertryck och luft sugas in. Högre upp, ovan en neutral zon, uppstår ett övertryck, vilket har till följd att luft pressas ut.

Neutrala zonen höjdläge beror på fördelningen av öppningar och springor i höjddled och på otätheternas motstånd mot luftläckage. Finns det t ex endast en öppning och denna är stor i förhållande till övriga läckagevägar så kommer den neutrala zonen att ligga nära denna öppning. Vid jämn fördelning i höjddled av otätheterna kommer neutrala zonen att ligga nära husets halva höjd. Om varje otäthet mynnar i ett från andra rum skilt utrymme, vilket i och för sig är osannolikt, får varje otäthet sin egen skorstensverkan och en neutral zon vars läge är oberoende av förhållandena i de delar av huset som kommunicerar med andra öppningar.

Bestämning av den neutrala zonen läge har utförts i Kanada, se Tamura. Konventionella hus har därvid befunnits ha en neutral zon på ungefär 0,7 gånger husets höjd, medan ett modernt hus kan ha den på 0,3 gånger husets höjd.

Tamura rapporterar också teoretiska och praktiska analyser av uppkommande tryckskillnader i ytterväggarna på en nio våningsbyggnad, FIG. 29.

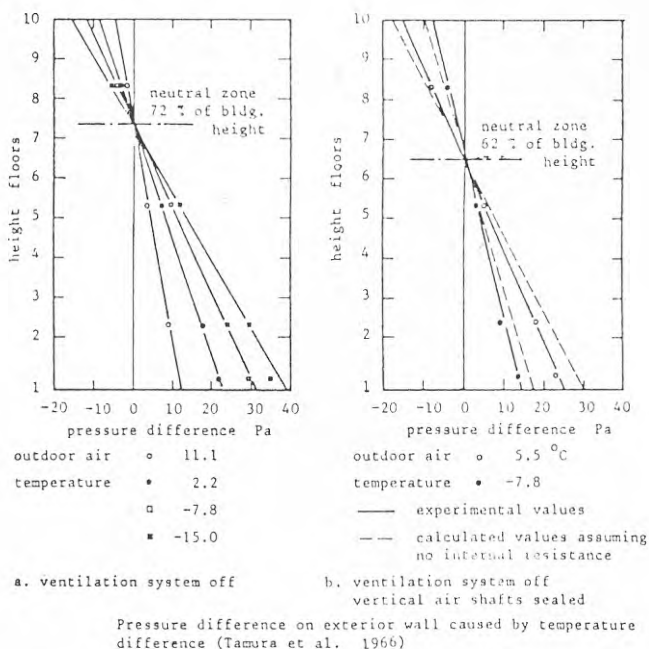


FIG. 29. Tryckförhållanden i en nio våningsbyggnad enligt Tamura.

Under den kalla årstiden samverkar vanligen vinden och temperaturen till en tryckdifferens mellan in- och utsidan, se FIG. 30. Dock måste påpekas att effekten på ventilationen av samverkan mellan vind och temperaturskillnaden ej är lika med summan av varderas verkan var för sig. Inverkan av temperaturskillnad och vind kan vintertid vara av samma storleksordning.

För småhus har man vid bestämningar av ofrivillig ventilation använt sig av följande linjära samband, se Elmroth, Höglund, 1970,

$$n = a + b\Delta v + cv$$

n = antal luftomsättningar per timme

Δv = lufttemperaturskillnaden inne-ute °C

v = vindhastigheten m/s

a , b och c är konstruktionsberoende konstanter.

Sambandet har begränsad tillämpning. Det visar emellertid att luftomsättningen varierar i hög grad med vind och temperatur. Som exempel tas ett småhus med regelstomme, varvid ekvationen får utseende

$$n = 0.15 + 0.012\Delta v + 0.077v$$

I detta sammanhang måste påpekas att ventilationen även påverkas av faktorer såsom öppnandet och stängandet av ytterdörrar och fönster. I högre byggnader kan luftströmningen vid ytterdörren i bottenvåningen förorsaka ett starkt luftflöde i ett trapp- eller hisschakt, under förutsättning att det finns en stor temperaturdifferens inne-ute.

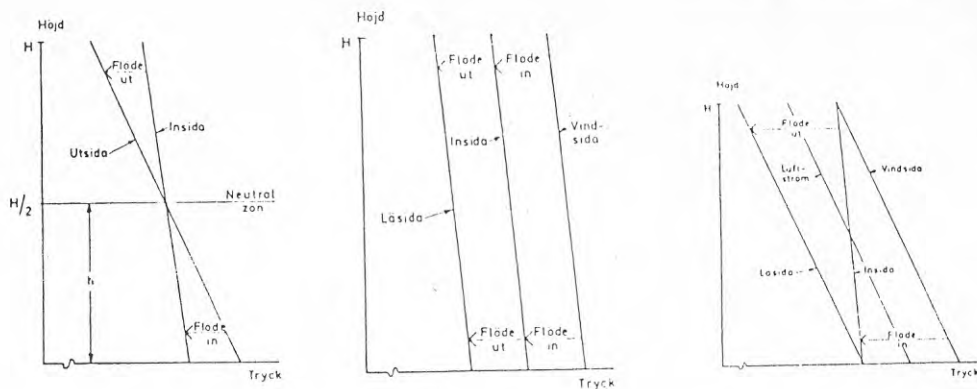


FIG. 30. Fördelning av höjddled av lufttrycket på in- och utsidan av ett hus. Figuren t v visar enbart skorstensverkan, varvid neutrala zonen antas ligga på halva hushöjden. I mitten visas inverkan av enbart vind som ger i princip samma tryck på alla nivåer. Till höger visas trycken vid samtidig påverkan av temperaturskillnader och vind.

5.3 Inverkan av ventilationssystem, rumsorganisation och byggnadsproportioner

Byggnader ventileras genom självdrag eller maskinellt, s k mekanisk ventilation.

Självdragsventilation bygger på "skorstensverkan". Systemet är beroende av att huset är tillräckligt otätt och att det finns en temperaturdifferens inne-ute. På sommaren blir funktionen följaktligen dålig. Utöver temperaturen påverkas självdragsventilationen av vind. Självdragsventilationen blir därmed svårreglerad och energikrävande.

Mekanisk ventilation finns av olika typer. Systemen kan vara balanserade eller arbeta med under- eller övertryck i förhållande till uteluften. Undertryck användes framför allt i bostadshus, där utsugningen sker medelst till en gemensam fläkt anslutna kanaler, under det att tillförsel av ersättningsluft till varje rum sker direkt utifrån med hjälp av det undertryck, som utsugningen ger. Systemet är ett frånluftssystem och benämnes vanligen med bokstaven F.

Anordningen medför att varje otäthet mot uteluften tjänstgör som intag för ouppvärmad uteluft, vilket ofta ger obehag i form av kalldrag. Systemet är stabilare än ett självdragssystem men funktionen påverkas liksom detta i hög grad av vind och temperatur.

Vid mera utbyggda ventilationssystem tillförs byggnaden luft via ett speciellt tilluftssystem. Systemet kallas från- och tilluftssystem, vanligen förkortat FT. Luften brukar pressas in i större mängd än den sugts ut, varför ett invändigt övertryck uppkommer. Övertrycket motverkar inströmning av kall uteluft genom förefintliga otätheter. I anläggningar, där befuktning av luften förekommer, måste man beakta de olägenheter, som vid övertryck kan uppstå genom en ökad kondensering av fuktighet i fönster, ytterväggar och tak. Kravet på täthet för sådana byggnader är alltså högt.

Luftströmningen i en byggnad påverkas även av faktorer såsom byggnadsproportioner och den inre rumsorganisationen. Planformen hos en byggnad kan ha stor betydelse för luftomsättningen. Som exempel jämförs en kontorsbyggnad med rektangulär planform med en kvadratisk, se Jackman, 1970. I den rektangulära byggnaden med slutna gavlar är kontorsutrymmena lokaliserade längs en central korridor. Ett centralt schakt går från källaren till vinden. Kontorsutrymmena i den kvadratiske byggnaden ligger på alla fyra sidorna runt en central kärna med korridorer och trappschakt. Volymen av kontorsutrymmena på varje våning är lika i den kvadratiske och den rektangulära byggnaden. Vid en jämförelse baserad på samma fönsteryta, samma vindhastigheter och fönsterläckage får man som resultat att den maximala ofrivilliga ventilationen är ungefär 25 % lägre i den kvadratiske än i den rektangulära byggnaden.

Byggnadshöjden påverkar ventilationsgraden. En fördubbling av höjden kan ge en ökning av ventilationen med faktorn 2.7, se Jackman, 1970.

I det följande visas ett försök till uppskattning av läckagets beroende av den inre rumsorganisationen och fönstertypen i höghus, se Jackman, 1970. Beroendet anges med en korrektionsfaktor, varmed den enligt Jackmans dimensioneringsmall, "Natural ventilation chart", uträknade ventilationsgraden skall korrigeras. Mallen grundar sig på att fönsterväggen har större luftmotstånd än inre rumsbegränsningar. I TAB. 4 återges värden på denna faktor i några olika fall.

TAB. 4. Korrektionsfaktor enligt Jackman för bestämning av ventilationsgraden

Fönstertyp	Inre struktur	Faktor
Alla typer	Öppen plan (inga mellanväggar)	1.0
Dålig tätning	Enkel korridor med många sidodörrar	1.0
Dålig tätning	Några mellanväggar	1.0
God tätning	Få mellanväggar	0.8
Dålig tätning	Enkel korridor	0.8
Dålig tätning	Få mellanväggar	0.65
Mycket dålig tätning	Enkel korridor	0.65
Mycket dålig tätning	Få mellanväggar	0.4

5.4 Teoretiska modeller

Försök att teoretiskt bestämma tryckfördelning och luftströmning inom en byggnad genomfördes till en början med bortseende från eventuellt ventilationssystemets inverkan. Dick samt Dick och Thomas har studerat problemet under antagandet att luftströmningen genom otätheter är proportionell mot kvadratroten ur tryckdifferensen. Newbery och Eaton tillämpar samma förfarande vid bestämning av formfaktorer för lufttryck inomhus. De sökta trycken bestäms genom att för varje rum formulera villkoret att in- och utströmmande luftmängder skall vara lika stora, se balans-

ekvationen i kap. 4.2. På så sätt erhålls lika många, icke linjära ekvationer som antalet obekanta interntryck P_i . Beräkningsmodellen kan kompletteras med de genom ventiler in- och utförda luftmängderna samt organiseras med avseende på sambanden mellan luftmängden q och tryckdifferensen ΔP . Honma arbetar med sambanden

$$\Delta P = (\text{konstant}) q^\beta \quad (1 < \beta < 2)$$

$$\Delta P = (\text{konstant}) q^2$$

för strömning, i förra fallet genom otätheter och i senare fallet för kanaler.

En något annan formulering av strömningsvillkoren har angivits av Shaw, 1973, och medger ett beaktande av lufttäthetens temperaturberoende.

Betrakta ett idealiserat skal, FIG. 31. Skalet består i princip av tre delar, väggar tillhörande våningarna ett till och med n , vind och källare. Vid stationärt tillstånd är luftflödet in i byggnaden lika med luftflödet ut ur byggnaden, Shaw, 1973:

$$A_w \left| \sum_{j=1}^n (\rho \Delta P_w)^{X_w} \right| + A_b (\rho \Delta P_b)^{X_b} + A_t (\rho \Delta P_t)^{X_t} = 0$$

där X = flödesexponent

A = flödeskoefficient

ΔP = tryckdifferens

ρ = luftens täthet

n = antalet våningar

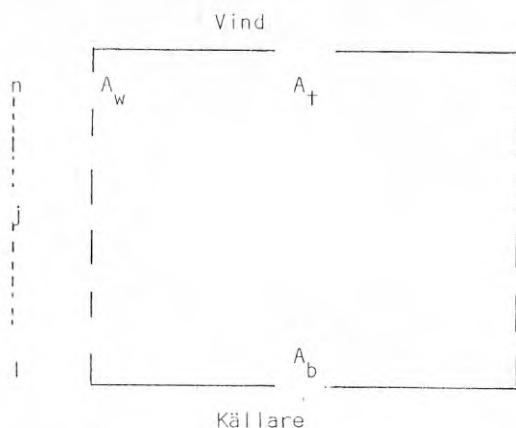


FIG. 31. Byggnad som idealiserad beräkningsmodell

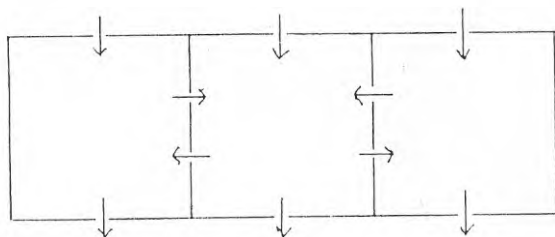


FIG. 32. Beräkningsmodell med flera rumsenheter

Samma betraktelsesätt kan användas på en lägenhet. Som exempel betraktas tre rum i fil, FIG. 32. För varje rum gäller att mängden luft som strömmar in per tidsenhet = mängden luft som strömmar ut per tidsenhet. Därmed kan ett antal ekvationer efter modell av Shaw, 1973, uppställas. Systemet är enkelt till sin uppbyggnad mer tidskrävande att lösa.

En förenklad modell av luftströmningen är en sk analogi-modell. Luftströmningen genom en byggnad är analog med en elektrisk ströms passage genom ett antal resistanser i

serie och parallellt. Genom att använda elektriska motstånd, som ger ett förhållande mellan ström och potential enligt nedan, se Jackman, 1970:

$$i = C_1 (E)^{1/n}$$

där C_1 = parameter för elektriskt motstånd

E = potentialdifferensen

i = elektrisk strömstyrka

n = exponent mellan 1 och 2

transformeras systemet till en elektrisk krets av motstånd i vilken strömmarna motsvarar luftflödena och potentialdifferenserna tryckdifferenserna. Detta betraktelsesätt innebär en förenkling av de fullständiga sambanden.

Lösningen av problemet förutsätter god kännedom om två grundläggande ingående parametrar, nämligen ytornas lufttäthet och tryckskillnaderna. Kunskapen om dessa grundläggande parametrar är idag dock otillräcklig.

5.5 Experimentella studier

5.5.1 Metodöversikt

Fullskalemätningar av luftströmning mellan olika rum i en byggnad stöter på svårigheter på grund av de ofta obetydliga tryckfallen mellan ingående utrymmen och otätheternas komplicerade form. Spårgasteknik kan emellertid tillämpas också vid studier av luftströmning i flera till varandra knutna celler, t ex de olika rummen i en bostadslägenhet. Luftutbytet mellan olika celler kan beräknas sedan cellernas koncentration av spårgas uppmätts vid olika tidpunkter och mängden producerad spårgas är känd. Honma har vid sina mätningar använt intermittent gasproduktion som växelvis igångsätts i de aktuella rumsenheter. De relativt komplicerade ekvationssystemen som relaterar koncentrationer till luftströmmar löses med dator.

En experimentell eller semiexperimentell skattning av den ofrivilliga ventilationens inverkan på luftrörelserna i en byggnad med FT-system kan åstadkommas om spårgasmätningar enligt ovan kompletteras med en mätning då otätheterna mot ytterluften är tilltäppta. Förfarandet är praktiskt genomförbart endast om väsentliga otätheter kan lokaliseras och elimineras med rimliga åtgärder. Alternativt erhålles en bedömning genom att i lämplig omfattning strypa tillluftsflödet och därefter genomföra en ny mätning.

Bedömningar av den ofrivilliga ventilationens inverkan har också skett genom mätning av luftströmning vid till- och frånluftsdon med och utan fläktar påkopplade.

Undersökningar av den ofrivilliga ventilationens storlek kan också utföras genom att utsätta byggnaden för ett över- eller undertryck. Metoden som utvecklats av Jenny Cronvall vid institutionen för Byggnadsteknik I vid LTH, se FIG. 33, innebär att tryckskillnaden mellan ute och inne mäts tillsammans med den genom en fläkt in- eller utsugna luftmängden.

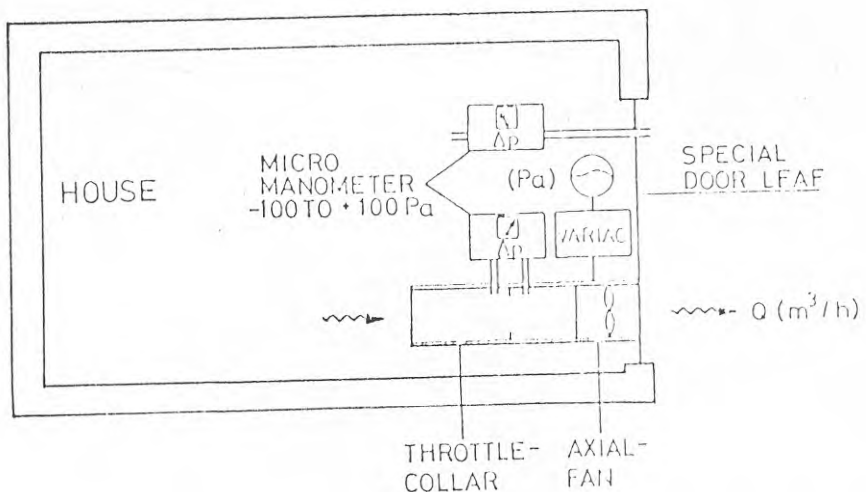


FIG. 33. Täthetsbestämning med över- eller undertryck.

Erhållna resultat relateras till klimatförhållandena utomhus eventuellt beskrivna med något "vind-temperaturltal". De kan också relateras till naturliga infiltrationsförhållanden genom en i tiden närliggande spårgasundersökning. Metoden förutsätter att interna tryckskillnaders inverkan på resultaten är oväsentlig, något som kan gälla bl a för småhus.

En indirekt metod för studier av strömningsförhållandena kan tillämpas med utgångspunkt från termografering.

En metod för luftläckage i byggnader bör vara snabb, enkel att tillämpa och billig. Den bör vidare vara okänslig för yttre omständigheter och kunna genomföras med bärbar provningsutrustning. Provingen bör inte vara störande och kunna tillämpas på alla vanliga konstruktioner. Slutligen bör dess användning vara ofarlig.

5.5.2 Spårgasmätning

Metoden har tillämpats för fältmässiga bestämningar av luftomsättningen i färdiga byggnader, antingen omfattande hela byggnader (storlek småhus) eller enstaka rum. Den har i Sverige använts av institutionerna för Byggnadsteknik och Uppvärmnings- och ventilationsteknik KTH, Byggnadskonstruktionslära LTH, Statens provningsanstalt, IHVE, ASHRAE m m. Mätningarna resulterar i en siffra på luftomsättningen som ställs i relation till temperaturen, vindhastigheten, vindriktningen etc. Flera mätningar bör utföras för att täthetsegenskaperna skall bli säkrare kända.

Mätningarna tillgår som följer. Först sprides spårgasen jämnt inom mätobjektet med t ex en fläkt. Därefter mäter man hur spårgaskoncentrationen avtar med tiden. Kontinuerlig eller snabbt upprepad mätning av variationerna i koncentration är nödvändig. Vanligtvis används värmelednings- eller värmeabsorptionsförmågan hos gasen för mätning av koncentrationen. Dessa egenskaper är karakteristiska för varje gas.

Minskningen i spårgaskoncentration i ett rum efter det att produktionen slutat uttrycks med ekvationen $C_{\tau} = C_0 \cdot e^{-n \cdot \tau}$
 där C_0 = spårgaskoncentrationen vid $\tau = 0$
 C_{τ} = " " " " " " $\tau = \tau$
 n = luftomsättningar per timme.

På spårgasen måste man ställa vissa krav för att den skall vara användbar, Honma, 1975,

- a) Gasen får bara förekomma i små halter i vanlig luft och det får inte finnas någon källa för den i den aktuella byggnaden.
- b) Det måste vara möjligt att uppskatta och mäta låga koncentrationer av gasen i fråga.
- c) Gasens volymvikt måste ligga så nära luftens som möjligt för att diffusionsegenskaperna skall bli desamma.
- d) Gasen får inte reagera med någonting i luften.
- e) Gasen får inte reagera med, adsorberas på eller absorberas i väggar, möbler, kläder etc.
- f) Gasen får inte vara farlig för människan.
- g) Gasen får inte vara eldfarlig.
- h) Gasen måste vara lätt att handskas med, lätt att anskaffa och billig.

Exempel på ofta använda spårgaser är Helium (0.555), vattenånga (0.62), väte (0.695), propan (1.56), koldioxid (1.529), lustgas (1.530), svavelvioxid (2.180), freon 12 (3.931). Siffrorna inom parenteserna visar gasens volymvikt/luftens volymvikt. Radioaktiva gaser kan även hänföras till spårgaser, men de anses mindre lämpliga att använda i bostäder p g a strålningsrisken.

Vid användning av radioaktiva spårgaser brukas GM-rör. Urvalet av radioaktiva spårgaser är emellertid begränsat. Gasen måste nämligen ha en passande halveringstid och får inte ha farliga, radioaktiva rester. De mest passande är argon och krypton, som, vid de små koncentrationer som be-

hövs vid ventilationsmätningar, är under toleransdosen för kontinuerlig exponering. Argon har vid mätningar funnits ha en försumbar absorption på väggar och möbler.

Både argon och krypton har en diffusionsförmåga, som är mycket närmre luftens än både väte och helium.

Det finns flera felkällor vid bestämningen av koncentrationen. För det första finns det en bakgrundsnivå av radioaktiv strålning. För det andra är radioaktiviteten en serie av slumpmässiga händelser, vars förlopp alltså inte kan förutsägas exakt.

Användningen av radioaktiva spårgaser anses kunna erbjuda en praktisk och effektiv metod, där väte och koldioxid inte passar på grund av den studerade volymens storlek eller ingående byggnadsmaterials porositet.

Luftutbytet vid flera sammanhängande rum t ex i ett småhus är svårmatbart. Detta är ett intressant användningsområde för spårgastekniken. Tillvägagångssättet är då att spårgas produceras i varje rum. Koncentrationens minskning med tiden mätes likaså i varje rum. Tillämpning av kontinuitets-ekvationen resulterar i en serie ekvationer. För att separera de konstanta termerna i ekvationssystemet kan man antingen variera gasproduktionen i varje rum eller, som nämnts tidigare, ha tidsdifferenser mellan igångsättningen av gasproduktion i de olika rummen. Ekvationssystemet som beskriver variationen i koncentration i en serie rum är invecklat, men lösningar med tillräcklig noggrannhet för ingenjörsmässigt bruk kan erhållas genom numerisk lösning med hjälp av dator. För närvarande pågår även försök med ventilationsmätningar i en svit av rum med utgångspunkt från samtidig produktion av olika slags gaser.

En spårgasmätningens resultat är starkt bundna till de vid provningen aktuella förhållandena. För att få rättvisande värden bör man göra mätningar under en längre tid och under olika klimatbetingelser.

Spärgasmätningens för- och nackdelar kan sammanfattas på följande sätt:

- Fördelar: - apparatur och erfarenhet finnes
 - de verkliga förhållandena uppmätes
 - bärbar provningsutrustning
 - icke störande
 - tillämpbar på alla vanliga konstruktioner
- Nackdelar: - tiden för mätningen är beroende av omsättningstiden. Metoden kan därför vara tidskrävande
 - resultatet gäller för tillfälligt rådande inne- och utetemperaturen och för aktuella vindförhållanden
 - ingen gradering av otätheterna
 - ej helt ofarlig vid användning av radioaktiva gaser.

5.5.3 Provtryckning

Metoden med provtryckning har hittills främst tillämpats på ventilationskanaler. Den har dock på försök använts på lägenheter och småhus i Canada och England samt av Byggnadsteknik LTH och Konstruktionslära KTH.

Metoden är tänkt att användas för att testa hela byggnaders lufttäthet. Med en fläkt, som är monterad i ytterdörren, tillför eller bortför man luft från bostaden. Övertrycket eller undertrycket, dvs tryckdifferensen över fasaden, mätes med exempelvis en mikromanometer. Luftflödet genom fläkten registreras. Denna mätning kan ske genom att bestämma tryckfallet över en strypfläns. Man erhåller på detta sätt ett mått på luftläckaget vid en given tryckskillnad, se FIG. 33.

Tätas husets ventilationskanaler erhålls ett värde, som avspeglar husets ofrivilliga ventilation. Värdet får inte förväxlas med värdet på den ofrivilliga ventilationen vid en viss vind och temperatur. Vid vindangrepp är det vanli-

gen endast en av byggnadens sex begränsningsytor, som utsätts för övertryck. Det är genom denna yta, som praktiskt taget hela läckaget sker. Vid en provtryckning sker däremot läckaget i samma riktning dvs ut eller in genom byggnadens alla begränsningsytor. Detta bör ge upphov till betydligt större läckageflöden.

Betydelsen av olika läckvägar kan analyseras t ex genom att byggnaden tätas successivt under provtryckningens gång.

Ett alternativt tillvägagångssätt vid provtryckningen har använts i Canada, Shaw, 1973. Den aktuella byggnaden, ett höghus, sattes under övertryck med hjälp av tilluftssystemet, medan frånluftssystemet var avstängt. Hela huset provades alltså på en gång. Tilluftsflödena kunde mätas direkt. För att kunna få en rättvisande bild av luftläckaget genom ytterväggarna, måste inverkan från fläktvåningen och källaren avskiljas t ex genom att tillsluta öppningarna till dessa utrymmen. Detta är i praktiken svårt pga de aktuella öppningarnas antal, storlek och läge. Som förenkling får man i kontinuitetsekvationen i en separat term uppskatta luftflödet genom källare och vind. Ett stort problem är också att mäta och definiera tryckdifferenserna vid dessa utrymmen.

Provtryckningsmetoden är väl ägnad för testning av hela småhus eller lägenheter. Den är snabb och resultaten torde gå att jämföra med de normer som föreslås av SBN.

Provtryckningens för- och nackdelar kan sammanfattas på följande sätt:

- Fördelar:
- alla otätheter inverkar på mätresultatet
 - måttligt känslig för yttre omständigheter
 - "bärbar" provningsutrustning
 - icke störande
 - tillämpbar på alla vanliga konstruktioner
 - reproducerbar
 - ofarlig

- Nackdelar: - kan ej direkt utläsa var det läcker
- mättekniska problem
- tryckbilden vid provning ej lik verkliga tryckbilden

5.5.4 Termografering

Metoden har tillämpats för lokalisering av värmeisoleringsfel och luftläckage. Den har tillämpats av Statens provningsanstalt, Svenska riksbyggen m fl.

Lokaliseringen sker genom uppmätning av temperaturfördelningen hos väggytor. Ojämnheter i värmeläckage hos ytterväggar resulterar nämligen i en temperaturvariation utefter väggytan. Således kan en kvalitativ bild av värmeinflödesfördelningen i en vägg fås genom en bestämning av yttemperaturfördelningen. Även otätheter som det strömmar luft igenom påverkar väggytans temperatur genom en lokal sänkning eller höjning av temperaturen i närheten av läckstället. Termografering med värmekamera (infrarödkamera) ger en skattning av yttemperaturen. En värmekamera omvandlar i princip värmestrålningen (infrarödstrålningen) som utsänds från mätobjektet till elektriska signaler som överförs till en gråtonsbild på oscilloskopskärm.

Termografering har följande fördelar framför andra temperaturmätmetoder:

1. Mätning sker momentant över stora ytor.
2. Mätning sker utan störande kontakt mellan föremål och mätinstrument.
3. Mätning kan utföras på stora avstånd från mätobjektet varigenom svåråtkomliga mätställen kan nås.
4. Snabb undersökning av stora mätytor kan utföras genom panorering från en mätposition.

Infrarödtekniken är användbar för temperaturmätningar tack vare det faktum att all materia pga sitt värmeinnehåll ut-

sänder energi i form av elektromagnetisk strålning. Energi-flödet från ett föremål är en funktion av ytans temperatur. Det beror även på ytans emissionstal och strålningens våglängdsområde.

Tack vare infrarödkameran har det blivit möjligt att mäta strålning från ytor med t ex temperaturen $+ 20^{\circ}\text{C}$, vars våglängd ej ligger inom det synliga området. Man kan nu uppmäta strålning från ytor med temperaturer $< + 530^{\circ}\text{C}$, vilket tidigare inte var möjligt.

De moderna infrarödkamerorna är försedda med ett bildavsökningssystem som möjliggör uppmätning av den individuella energiutstrålningen från ett stort antal delelement av en yta och kameran kan därigenom bygga upp en "strålningsbild" av ytan.

I närheten av $+ 30^{\circ}\text{C}$ mäter kameran med en upplösning som är bättre än $0,2^{\circ}\text{C}$. För att underlätta uppskattningen av temperaturskillnader inom värmebilden har IR-kameran försetts med en sk isotermfunktion. Denna innebär att ytpartier inom värmebilden med samma temperatur kan fås att framträda starkare - isotermer uppstår i bildfältet och man får en isoterm-bild. Isotermer kan förläggas på valfri temperatur och omspänna variabellet temperaturområde inom bilden. Det går även att framställa färgtermogram där varje färgton motsvarar ett visst temperaturintervall.

Det bör observeras att IR-kameran endast mäter relativa temperaturskillnader. Som tidigare nämnts kan även isolerfel i form av otätheter upptäckas genom yttemperaturmätning. Om byggnaden sätts under undertryck genom t ex avstängning av tilluften så strömmar uteluft in. Uteluftströmmar genom smala öppningar avkyler angränsande väggpartier. Följden blir att kalla väggpartier med karakteristisk form uppstår. Vid termograferingen kan de kalla väggpartierna lätt kartläggas och eventuell luftströmning konstateras medelst anemometer. På motsvarande sätt erhålls vid övertryck i den undersökta byggnaden uppvärmda väggpartier där rumsluften strömmar ut.

Termografering av otätheter är lättare än termografering av värmeisolerfel. Värmeisolerfel kräver nämligen en ganska stor temperaturskillnad inne - ute för att upptäckas. Otäthetsfel är däremot lättare att spåra särskilt vid undertryck i rummet. Eftersom i detta fall ytterluften kommer i direkt kontakt med väggens varma yta och kyler denna är det tillräckligt med endast någon grads temperaturskillnad inne - ute för att en tydlig indikation i form av lägre yttemperatur skall kunna erhållas.

Vid noggrannare mätningar av isolerfel bör utelufttemperaturen ej variera mer än $\pm 6^{\circ}\text{C}$ under mättiden och 3 - 4 dagar före mätning. Mulet väder ägnar sig bäst för termografering. Temperaturfallet bör vara mer än 10°C över väggen, men vid sökning av luftläckaget går det även med lägre temperaturfall och en inom vidare gränser varierande utomhustemperatur. Noggrannare mätningar bör utföras inomhus dvs på väggens varmare sida pga högre värmeövergångsmotstånd på insidan än på utsidan. Risken att luftläckagefel inte upptäcks vid en termografering måste sägas vara mycket liten.

Enligt undersökningar gjorda av Svenska Riksbyggen (ca 4000 termogram av bostadshus har tagits) har det visat sig att ca 85 % av förekommande byggfel utgöres av besvärande otätheter och att i samtliga fall där byggfel har misstänkts på termogrammen, fel också har konstaterats vid upprivning av väggarna.

Misstänkta byggfel av typen luftläckage genom otäta fogar och fel av typen kombination av luftläckage och "rent" isolerfel kan alltså med tillräcklig säkerhet verifieras, särskilt när undertryck åstadkommes i rummet.

Termograferingsmetodens för- och nackdelar kan sammanfattas på följande sätt:

- Fördelar:
- snabb
 - enkelt att utföra mätningen
 - luftläckage kan verifieras med godtagbar säkerhet

- lokalisering av luftläckagefel kan även ske vid instationära klimatförhållanden
- bärbar provningsutrustning
- icke störande
- kan användas på olika typer av byggnader
- reproducerbar
- ofarlig
- mätning sker momentant över stora ytor
- man får en dokumentation av mätresultaten i form av en färdig bild och kan utläsa var det läcker
- man kan även lokalisera värmeisoleringsfel

- Nackdelar:
- relativa mätningar, ej uppskattning av absolut täthet
 - metoden i huvudsak endast användbar under eldningssäsongen
 - dyrbar apparatur

5.6 Pågående projekt och angelägna forskningsuppgifter

Projekt med anknytning till de i detta kapitel berörda problemen pågår framför allt på den experimentella sidan. Sålunda utvecklas och tillämpas provtryckningsmetoden vid Byggnadsteknik LTH och Konstruktionslära KTH. Täthetsprovningar av fasader bedrivs av Sven Tyrén AB. Luftomsättningsmätningar med spårgasteknik användes vid projekt som pågår vid Byggnadskonstruktion CTH, Byggnadsteknik LTH, m fl institutioner.

Praktiska och ekonomiska svårigheter vid experimentell bestämning av luftläckagens betydelse för olika ventilationsystems funktion och ekonomi talar för en fortsatt utveckling av teoretiska modeller. Dessas tillämpbarhet beror på möjligheten att tilldela ingående parametrar rimliga värden. Därutöver bör undersökas om beskrivningen av de olika rummens luftbalans behöver kompletteras med uppgifter om de olika luftvägarnas lokalisering, temperaturgradienter och de personer och föremål som vistas i rummet. Dessa frågor

behöver analyseras också experimentellt, varför följande uppgifter framstår som angelägna.

- Undersökning av hur en mera detaljerad beskrivning av de i en byggnad ingående rummens egenskaper påverkar resultatet av teoretiska strömningsberäkningar. Enklare beräkningsmetoder testas mot mera noggranna som bl a beaktar rummens dimensioner samt otätheters och öppningars fördelning och läge.
- Teoretisk beräkning av inre luftströmmar för ett antal byggnadstyper med olika standardiserade ventilations-system och rimligt varierande antaganden beträffande vindförhållanden, utetemperatur, otätheter i olika byggnadsdelar och rumsutnyttjande inklusive rimligt frekvent fönster- och dörröppnande.
- Systematiska, experimentella bestämningar av luftströmning mellan rum i olika byggnadstyper. Undersökningarna inriktas på inverkan av ventilationsdonens placering, rummens temperaturgradienter och användning. Dessutom uppmärksammas luftläckage i kanaler och slitsar vars täthetsförhållanden inte kan beräknas eller struktureras med detaljmätning.
- Undersökning av möjligheter att genomföra modellförsök för bestämning av intern luftströmning med olika yttre vindfält.
- Vidareutveckling av spårgasmetoden för analys av rumsgrupper.
- Studier av ofrivillig ventilation genom analys av byggnader under över- eller undertryck (provtryckning). Analys av resultatets beroende av interna tryckdifferenser. Provtryckningsmetoden behöver utvecklas varvid följande frågor är intressanta:

Provtryckning ger ett siffervärde på täthet.
Vad motsvarar dessa siffror i t ex ofrivillig ventilation?

Vilket över- eller undertryck bör påläggas?

Flödenas storlek.

Apparaturens lämpliga utformning.

Lämpliga metoder för lokalisering av läckagevägar?

För- och nackdelar av successiv tätning av begränsningsytorna?

Överbetonas vissa läckagevägar jämfört med naturliga förhållanden?

I många fall är det intressant att mäta tryckskillnader över begränsningsytorna t ex vid provtryckning. Denna form av tryckmätning behöver utvecklas:

Var bör tryckdifferenserna mätas?

Vilken apparatur bör användas?

- Hur samverkar folks vanor, beträffande stängande och öppnande av dörrar och fönster, med den ofrivilliga ventilationen?

6. DEN OFRIVILLIGA VENTILATIONENS PRAKTISKA BETYDELSE

6.1. Allmänna synpunkter

De teorier och konstruktiva lösningar som framkommer vid arbete inom områden som behandlats i tidigare kapitel skall genom tillämpningar i form av försök, teknisk-ekonomiska kalkyler och konstruktionsutveckling komma till nytta inom ombyggnads- och nybyggnadsområdet.

Redan gjorda undersökningar visar att den ofrivilliga ventilationen måste begränsas i småhus och flerfamiljshus. Detta kan ske på flera sätt. De åtgärder som sätts in i energisparande syfte måste bedömas ur lönsamhetssynpunkt för husägaren men även ur samhällsekonomisk synpunkt. De "lönsamma" åtgärderna kan direkt föreslås genom konstruktionsförslag medan de samhällsekonomiskt motiverade åtgärderna kan bilda underlag för normer och bestämmelser.

Inom övriga byggnadssektorer finns dels byggnader, som har liknande konstruktionsmetoder och material som inom bostadssektorn, dels byggnader som uppförs med andra material och metoder, främst inom industrisektorn. Inom den senare kategorin är ej några projekt kända som undersöker den ofrivilliga ventilationens inverkan på byggnaders värmebalans.

6.2 Energibalans och luftkomfort

Trots den mekaniska ventilationens ökande användning utgör byggnaders ventilation fortfarande till stor del av ofrivillig ventilation. Denna bör genom projektering och produktion avvägas så att ekonomiska och funktionella krav tillmötesgås på ett optimalt sätt. Med hänsyn till energibalansen inom byggnaden bör luftomsättningen vara låg. Varje luftväxling utöver den mängd som krävs ur komfortsynpunkt ökar omedelbart uppvärmningskostnaden, se t ex Wilson.

Ur KBS anvisningar nr 27, 1974, citeras ett beräknings-exempel:

"Den s k ofrivilliga ventilationen av bostäder är stor. Professor Ingemar Höglunds undersökningar av provhus har bland annat visat att luften i ett obebott hus byts 0,4 - 0,8 gånger per timme på grund av ofrivillig ventilation.

Luftens specifika värme vid rumstemperatur är ca 1.0 J/g, grad, tätheten 1.29 kg/m³. Sålunda blir luftens värmeinnehåll 1,29 kJ per grad och m³.

För ett småhus med total volym av 300 m³ fås värmeförlusten genom ventilation under hela året till

$$1.29 \cdot 300 \cdot 4500 \cdot 24 \cdot n = 42000 \cdot n \text{ MJ} = 11,6 \cdot n \text{ MWh}$$

n är antalet luftomsättningar per timme och 4500 är antalet graddagar i Stockholm. Det framräknade värdet torde dock vara för högt räknat på hela bostadsbeståndet varför ventilationsförlusten för en lägenhet antas vara 10 · n MWh

Genom att minska antalet luftomsättningar med 0,3 gånger per timme i lägenheterna genom en omsorgsfull tätning av läckor etc fås en besparing enligt följande för hela bostadsbeståndet år 1975 (antal lägenheter antages till 3,7 miljoner):

$$3,7 \cdot 10^6 \cdot 10 \cdot 0,3 \text{ MWh} = 11 \text{ TWh}$$

Minskad ventilation spelar således stor roll för energibehovet inom uppvärmningssektorn."

Åtgärder av ovan nämnda typ torde dock ofta möta stora svårigheter i befintlig bebyggelse.

Som bakgrund till ovanstående beräknade möjlighet till energibesparing skall omnämnas att, i samma källa energibesparingen vid en sänkning av k-värdet för samtliga byggnader i Sverige till 0,3 W/m² C anges till 7 TWh per år och att ett utbyte av alla tvåglasfönster mot treglasfön-

ter skulle innebära en energibesparing i storleksordningen 1,8 MWh per lägenhet och år ($1,8 \cdot 10^{-6}$ TWh/år) vilket med 1985 års bostadsbestånd beräknas innebära en årlig besparing av ca 7 TWh. Ur artikel av Lindskoug och Lindh, 1975, citeras uppgiften att om man genom införandet av tätningskrav och genom ny tätningsteknik lyckas sänka den ostyrda luftomsättningen med 0,1 gånger per timme, detta år 1985 skulle innebära en energibesparing i storleksordningen 8 TWh/år.

De givna siffrorna har erhållits ur överslagsberäkningar men visar ändå på storleksordningen av de besparingar som kan erhållas om den ostryda ventilationen kan reduceras.

Luftströmningar genom konstruktioner på grund av tryckdifferenser medverkar som tidigare visats till energiförluster. Tryckdifferenser kan erhållas på grund av skillnader i lufttemperatur, den tidigare nämnda skorstenseffekten, eller på grund av vind. Vidare påverkas tryckförhållandena av ventilationssystemets uppbyggnad och drift samt byggnadens "egen funktion". Andersson, 1973, redovisar uppmätta tryckdifferenser i ett 28 våningars kontorshus som varierar i storleksordningen mellan -70 Pa och + 70 Pa.

Springor vid fönster och dörrar står ofta för väsentliga delar av luftläckaget. Därför uppnås avsevärda energibesparingar genom ökning av dessa elements lufttäthet. I vissa fall kan emellertid också annorstädes belägna otätheter såsom fogar kring lätta utfackningsväggar kräva översyn. Härvidlag inverkar bl a eventuella sättningar i grunden och permanenta deformationer i byggnadsstommen. Luftrörelserna i närheten av springor kan medverka till smutsavsättningar genom termodiffusion, se Petersson.

Komfortkraven ger som nämnts undre gräns för en acceptabel ventilation i fall då inte ett mekaniskt ventilationssystem garanterar såväl in- som utblåsning. Ett omfattande erfarenhetsmaterial föreligger beträffande fysiologiskt betingade restriktioner på inomhusluften och nya bestämmelser är under utarbetande. Fastläggande av en undre gräns

kan också betingas av krav på begränsning av kondens vid temporärt ökad fukttilförsel, eventuell radonhalt i luften m m.

De konsekvenser sådana regler bör ha för den ofrivilliga ventilationens storlek i byggnader med olika ventilations-system är dock otillräckligt klarlagt. Speciellt viktigt är ökade kunskaper härom i lokaler där höga krav ställs på kontroll av luftkvaliteten, exempelvis där farliga föroreningar förekommer eller där speciellt känsliga personer vistas, se Petersson. Mera allmänt ger en bättre kännedom om den ofrivilliga ventilationens beroende av olika konstruktiva lösningar och av olika ventilationssystem större möjligheter till ett mera ekonomiskt och med hänsyn till de praktiska förhållandena nyanserat val av byggnaders lufttäthet.

6.3. Brandventilation

Brandventilationen är av stor betydelse för brandsäkerheten, se t ex undersökningar genomförda av CSTB i Frankrike. Utveckling av rök och heta gaser påskyndar utbredningen av elden och förhindrar räddningsaktioner.

Olika krav har formulerats beträffande brandventilationen. Dessa gäller inte minst byggnadernas arkitektoniska utformning. Det finns t ex en direkt inverkan av fönsteröppningarnas utformning på de heta gasernas strömning, FIG. 34.

Vid en lämplig utformning kan de heta gaserna avlägsnas snabbare från den brandhotade byggnaden genom att rök från den brinnande lokalen förhindras att nå de högre våningarna, FIG. 34. Man betonar betydelsen av ventilering genom öppna fönster. Rökvolymerna är rätt stora. Förbränning av 1 m^3 trä kan ge $5,5 \text{ m}^3$ rök (brandbealstningen är ungefär 20 kp trä per 1 m^2 av bjälklag). Rök och brandgaser kan också fortplantas till angränsande utrymmen.

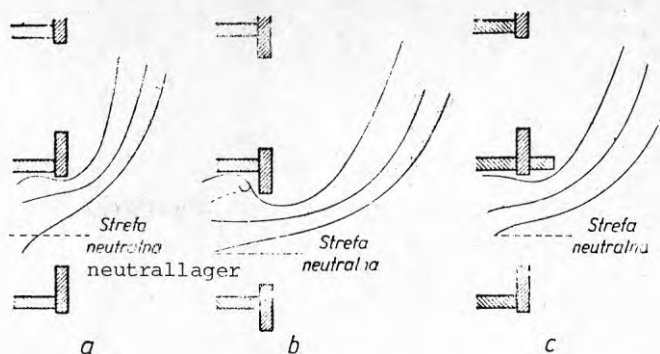


FIG. 34. Inverkan av fönsterbalk på lågors strömning ut ur rum där brand uppkommit.

I detta sammanhang kan springor mellan olika rumsceller ha en viss betydelse. Inverkan av extrema temperaturer i en brandcell studeras teoretiskt med hjälp av beräkningsmodeller liknande dem som beskrivits under 4.2. Kompletteringar måste emellertid ske när det gäller de upphettade utrymmena. Deras tryckändringar kommer väsentligen att bestämmas av den förändring av luftens temperatur och sammansättning som åtföljer brandförloppet.

Exempel på beräkning av rökkoncentration i ett höghus under brand redovisas av Tamura 1974.

6.4 Normering

Som utgångspunkt för en diskussion om lämpliga normkrav inom området frivillig ventilation anföres några uppgifter om utländska förhållanden.

Norge: Ytterväggen skall vara så vindtät att vind inte kan förorsaka märkbara luftrörelser på insidan.

Danmark: Inga normerade krav på vindtätethet.

- Finland: Ifall konstruktionen inte är tillräckligt vindtät i sig själv, skall den förses med vindskydd som förhindrar såväl direkt luftgenomgång (t ex genom springor) som sådan luftströmning inne i konstruktionen, som väsentligt nedsätter värmeisoleringsförmågan.
- Västtyskland: För att begränsa ventilationsvärmeförlusterna, får fönsters foggenomsläpplighetskoefficient - beroende av byggnadsläge och -höjd - inte överskrida följande värden
- Vid elementbyggeri med genomgående fogar mellan element och den bärande stommen skall man sörja för att dessa fogar har varaktigt tätningsmaterial och stor lufttäthet.
- England: För ofrivillig ventilation finns formel för beräkning av luftutbytet genom springor till följd av vindtrycks- och temperaturdifferenser.
- USA: Yttre skarvar runt fönster och dörrposter, öppningar mellan väggar och grunder, mellan väggar och tak och mellan väggelement, öppningar vid håltagningar genom väggar, golv och tak, skall tätas, packas eller förses med tätningslister för att begränsa luftutbytet. Alla ytterdörrar och -fönster skall konstrueras för att begränsa luftläckage in eller ut från byggnaders begränsningsytor och skall ha en luftinfiltration som inte är större än de i tabell
- Canada: Delarna i ett hus skall vara så konstruerade att de begränsar graden av luftläckage genom fogarna.

Frankrike: Vid kalkylering av värmeförlusterna skall medräknas förluster p g a friskluftstillförsel. Förlusterna p g a friskluftstillförseln beräknas med hänsyn tagen till ventilations-systemet, kompletterad med den eventuella tillförseln p g a fasadens permeabilitet och vindexponering. Det skall dock minst räknas med en luftomsättning per timme.

Som framgår av sammanställningen ovan finns i flera normer kvantitativa uppgifter om tillåten grad av ofrivillig ventilation. En ökad kännedom om de praktiska förutsättningarna för åstadkommande av olika grader av lufttäthet är därför angelägen. Tillsammans med klarläggandet av den ofrivilliga ventilationens inverkan på luftkomforten, värmeekonomin och ventilationssystemens funktion ger en sådan kunskap underlag för en rimlig och nyanserad formulering av bestämmelser.

6.5. Pågående forskning och angelägna forskningsuppgifter

6.5.1 Pågående forskning

Praktiska fullskaleförsök med syfte att på bästa sätt tillvarataga tillförd energi pågår på flera håll. Exempel på sådana är:

DTH-0-energihus	Danmark
Eurohuset	Malmö
Lättbetonghus i Hällabrottet	Örebro
Miljöhus (Wohlgast)	Uppsala
Naturhus (Allt i Hemmet)	Båstad
STR-hus	Vetlanda
Solenergihus (Östgötabyggen)	Linköping
Ombyggnadsprojekt	Ulvsunda
Modulenthuss	Hässleholm

Dessa projekt behandlar bland annat val av isolering och tätskikt, byggnadens täthet, förbättrade fönsterkonstruktioner, reglerad ventilation och soluppvärmning genom lämp-

lig orientering av byggnaden och av fönster.

Målet är att minska energiförbrukningen genom konstruktiva lösningar, byggnadsutförande och byggnadsmetoder.

Projekten följes kontinuerligt med avseende på de olika åtgärdernas inverkan på driftskostnaderna för huset. Jämförelser görs med hus av nuvarande standard. Projektens utvärdering kan väntas ge exempel på den ofrivilliga ventilationens inverkan.

6.5.2 Angelägna forskningsuppgifter

Forskningsinsatserna bör koncentreras till de områden där de största energivinsterna kan göras. Härvid bör också hänsyn tas till vilken resurssats som erfordras för att göra energivinsten. En stor del av den totala energiförbrukningen åtgår till bostadsuppvärmning. Enfamiljshusen har en i förhållande till sin volym större omslutningsyta än flerfamiljshusen. De forskningsprojekt som diskuteras i det följande tar därför till stor del sikte på att reducera den ofrivilliga ventilationen i småhus. Flera av projekten är dock av så allmän karaktär att de förväntade resultaten också är tillämpbara på andra byggnadskategorier. Resurssatsen minskar för de byggnader som har ett renodlat byggsystem med stomme och beklädnad skild och med stora obrutna begränsningsytor.

Klimatförhållanden utomhus och byggnadsutformning

Fältstudier på befintliga bostadsbestånd och tillämpning av resultat av studier föreslagna i kap. 2 kan ge en bättre förståelse av de yttre klimatförhållandenas inverkan på den ofrivilliga ventilationen i olika hustyper. Exempel på angelägna frågeställningar är:

- Hur inverkar placering av dörrar och fönster på den ofrivilliga ventilationen vid olika vindexponering? Vad betyder eventuella fönsterluckor med hänsyn till luftutbytet?

- Vilken effekt har ett vindfång vid ytterdörrar och portar på luftutbytet?
- Vilken luftomsättning och vilka fukt- och temperaturförhållanden råder i vindsutrymmen? Vilken är den lägsta acceptabla luftväxlingen och vilken grad av otäthet hos angränsande byggdelar svarar den mot?

Åtgärder för kontroll av luftläckage genom byggnadsdelar

Jämförande undersökningar mellan olika byggnadskonstruktioners täthet och isoleringsförmåga beroende på detaljutförande avses leda till projekterings- och arbetsanvisningar. De konstruktioner som bör ägnas speciell uppmärksamhet i detta avseende är listade nedan:

- Utformning av yttervägg vid radiatorupphängning.
- Utformning av tätskikt med hänsyn till deras funktion som vindtätning och fuktspärr.
- Utformning av tilläggsisolering och vindskydd vid ombyggnadsobjekt.
- Vilka isoleringsmaterial måste vindskyddas för god funktion och vilka material- och utförandekrav ställs i så fall på vindskyddet?
- Genomgång av AMA-regler för att utmönstra speciellt energikrävande lösningar.

Luftströmning i rum och mellan rumsceller

- Bestämning av den ofrivilliga ventilationens relativa betydelse för energiförlusterna i olika typer av hus med olika ventilationssystem.
- Gränsvärden för komfortkrav vid vilka den ofrivilliga ventilationen får betydelse.

- Inverkan av den ofrivilliga ventilationen på olika ventilationssystemers funktion och ekonomi. Problemet är betydelsefullt bl a för anordning av värmeväxlare vid FT-system.

- Hur kan olika planlösningar påverka det av ofrivillig ventilation betingade energibehovet?

7. LITTERATURREFERENSER

LITTERATURREFERENSER TILL AVSNITT 2

- Andersson L.O., Vindens inverkan på en byggnadskropp från ventilationsteknisk synpunkt, inst. för uppvärmnings- och ventilationsteknik, KTH, Stockholm.
- Bailey A., Noel D., Wind-pressure on buildings, institution of Civil Engineers, paper 5367 1944, London.
- Barnaud G., Gandemer J., Détermination en soufflerie des coefficients de pression sur les structures basses, CSTB, cahier 158 1974, Paris.
- Jackman P., A study of the natural ventilation of tall office buildings. Heating a ventilating engineer, 41, 1970, London.
- Newberry C., Eaton K., Wind loading handbook, BRE 1974, Garston.
- Penwarden A., Wise A., Wind environment around buildings, BRE 1975, Garston.
- PN-70/B-02011, Polska normer, 1970 Warszawa.
- Règles N.V. 65 révisées 1974, januari 1975 Editions Eyrolles, Paris.
- Svensk Byggnorm, 1975, Statens Planverk, Stockholm.
- Uniform building Code, 1961, Standards Institute, USA.

Litteratur utan hänvisning i texten

- Dubinski, M.K., Vindstudier vid franska fälstationer, 1976, Avd för byggnadskonstruktion, CTH, Göteborg.

- Duchêne-Marullaz Ph., Climatologie CSTB, cahier 158, 1974, Paris.
- Gandemer J., Incomfort du au vent aux abords des bâtiments, CSTB 1975, Nantes.
- Gandemer J., La similitude aérodynamique, CSTB Adym - 11.74, 1974, Nantes.
- Granum H., Achehoug Ø., Byggningsfysik, Universitetsförlag 1969, Oslo.
- Meckler M., How to determine building infiltration rates at low Reynolds numbers, Heating, Piping & Air Conditioning, March 1967, Chicago.
- Tamura F., Wilson A., Pressure differences caused by wind. ASHRAE-Transactions, 74, 1968, New York.

LITTERATURREFERENSER TILL AVSNITT 3

- Anderlind G., Inverkan av springor och spalter på värmeisoleringen hos väggar med skivor av styrencellplast. Avd för Byggnadsteknik, CTH, 1972, rapport nr 199, Göteborg.
- Bankvall C., Natural convective heat transfer in insulated structures, Byggnadsteknik, LTH, 1972, rapport 38, Lund.
- Berthier J., Influence de la ventilation de la lame d'air sur l'isolation thermique d'une paroi creuse. (Cahiers du centre scientifique et technique du bâtiment) no 63, août 1963, cahier 520, Paris.
- Cammerer J.S., Hirschbold. F.X., Der Einfluss der Fensterbauart auf den Luftdurchgang. (Gesundheits-Ingenieur) 61, Heft 29, p.393 - 399.
- Eftring B., Dokumentation av ett datorprogram gällande icke-stationär fri konvektion skrivet av dr R.W. Thomas. (LTH), 1975, Byggnadskonstruktionslära arbetsrapport 1975:1, Lund.
- Eftring B., Dokumentation av ett datorprogram gällande icke stationär påtvingad konvektion skrivet av prof. E Krause (LTH), 1975, Byggnadskonstruktionslära, arbetsrapport 1975:3, Lund.
- Elmroth A., Höglund I., Värmebalans i småhus (Statens råd för byggnadsforskning), 1973, Rapport R7, Stockholm.
- Gerties K., Belüftete Wandkonstruktionen, Inst für Bauphysik der Framhofer Gesellschaft, 1972, Berlin.
- Gosman et. al, Heat and mass transfer in recirculating flows, 1969 (Academic Press) London.
- Granum H., Lundby S., Bygningsfysikk, Universitetsförlag, 1969, Oslo.

- Van Gunst E., Heat raamin onze woning in verband med gezondheid en economie, (De ingenieur G. Gezondheids-technik) 1959, 3 no 11, 13 maart, p. G21 - G31, continued.
- Hagstedt J., Skiljande träkonstruktioner - översikt och orientering (Nordiskt träsymposium 19 - 21 maj) 1976 Helsingfors.
- Holmquist L., Viktorin G., Luftläckage genom fogar (Byggmästaren nr 9 p 13-14 1973) Stockholm.
- Honma H., Ventilation of dwellings and its disturbances. (KTH) inst för uppvärmnings- och ventilationsteknik, 1975, Tekniskt meddelande nr 63, Stockholm.
- Höglund I., Högisolerande ytterväggars värmemotstånd. (Statens råd för byggforskning), 1963, handlingar nr 41, Stockholm.
- Lindsoug N-E., Lindh A., Hur täta hus?, 1976, Byggmästaren nr 4 p 24 - 26, Stockholm.
- Lorentzon G., Konveksjon i köleromsisolasjon. Noen undersøkelser av varmelekkasjer i praksis, 1959, Kylteknisk tidskrift, vol. 19, nr 1 feb. 1960, p. 1 - 8, Stockholm.
- Nylund, P-O, Vindtäthet hos flerskiktstväggar (Statens råd för byggforskning) 1966, rapport R 3/67, Stockholm.
- Sasaki J.R., Wilson A.G., Air leakage valvues for residential windows, 1965, ASHRAE Trans, vol 71, part II, p 81 - 88.
- Shaw, Sander, Tamura, Natural convection in a rectangular cavity. Transient behavior and two phase systems in laminar flow. Int. J Heat and mass transfer, 1973, vol 14, p 467 - 482.

- Standards of NAAMM (USA): Metal curtain wall, window, store front and Entrance Guide Specifications Manual.
- Tamura G.T., Predicting air leakage for building design, 1975, conference report p 368 - 374.
- Thomas D.A., Dick J.B., Air infiltration through gaps and around windows, 1953, Journ IHVE, june p 85 - 97.
- Wigen R., Vindner (Varmetap ved luftgjenomgang) (NBI, 1963).
- ASHRAE Handbook of fundamentals, 1972, chapter 19. Infiltration and natural ventilation, p 338 - 339, New York.

Litteratur utan hänvisning i texten.

- Adamson et. al, Fukt, Byggnadstekniska fuktproblem, 1970, (Statens råd för byggforskning), programskrift 12, Stockholm.
- Andersson L-O., Begränsning av fuktskador i yttervägg genom reglering av lufttrycksdifferensen mellan väggars in- och ytterväggar, 1973, (Statens institut för byggforskning) rapport R28:1973, Stockholm.
- Appelquist B., Loyd D., Grundläggande teknisk strömningslära, 1972, (Ingenjör förlaget), Stockholm.
- ASHRAE Handbook of fundamentals, 1967, chapter 25, Infiltration and ventilation, p 405 - 418, New York.
- ASHRAE Handbook of fundamentals 1967, chapter 26, Design heat transmission coefficients, p 419 - 456, New York.
- Byggnadsenergigruppen, Energianvändning i byggnader, 1964, (Statens råd för byggforskning) rapport R10:1974.

- Ingenjörsvetenskapsakademien, Effektivare energianvändning, 1974, Meddelande 181, Stockholm.
- Kungliga Byggnadsstyrelsen anvisning nr 27 aug 1974, Anvisningar för energiekonomi.
- Matilainen V., Det effektiva k-värdet, 1976, (Nordiskt träsymposium 19-21 maj), Helsingfors.
- Munther K-E., Energiförbrukning i småhus, 1974, (Statens råd för byggforskning) rapport R58, Stockholm.
- Persson M., Konvektion i porösa material, speciellt mineralull, 1971. En bibliografi, (CTH) Byggnadskonstruktion rapport 1971:29, Göteborg.
- Règles de calcul des caractéristiques thermiques utiles des parois de construction et des déperditions de base des bâtiments. Centre Scientifique et Technique du bâtiment, cahier 1053, 1971, Paris.

LITTERATURREFERENSER TILL KAPITEL 4

- Bilsborrow R.E., Fricke F.R., Model verification of analogue infiltration predictions, 1975, Building Science, vol. 10, Pergamon Press, London.
- Evans B.H., Natural air flow around buildings, 1972, Building Climatology, Vo. 1, Statens institut för byggnadsforskning, Stockholm.
- Honma H., Ventilation of dwellings and its disturbances, 1975, Avhandling vid KTH, Stockholm.
- Holmberg R., Larsson M., Sundkvist S.G., Beräkning av hastighetsfördelningen i en ventilerad lokal, 1975, VVS nr 10, 1975, Stockholm.

Litteratur utan hänvisning i texten

- Svensson A., Full-scale tests of air movements in rooms, The Swedish Institut for Building Research, Stockholm, CIB, 6th Congress 1974, vol. I/1, Budapest.

LITTERATURREFERENSER AVSNITT 5

- Dick J.B., Ventilation Research in occupied houses, IHVE, 1951.
- Dick J.B., Thomas D.A., Air infiltration through gaps and around windows, 1953, Journ. IHVE, june p. 85 - 97.
- Elmroth A., Höglund I., Värmebalans i småhus (Byggforskningen, R7:1973).
- Honma H., Metod för bestämning av luftströmningen inom byggnader (VVS 7, 1972).
- Honma H., Ventilation of dwellings and its disturbances (KTH, Stockholm, 1975).
- Jackman P., A study of the natural ventilation of tall office buildings, 1970, JIHVE Aug. 1970.
- Kronvall J., Nevander L., Air tightness of whole building (LTH, 1976).
- Newberry C., Eaton K., Wind loading Handbook, BRE 1974, Garston.
- Shaw C.Y., Air leakage measurements (ASHRAE Trans. 2280, 1973).
- Tamura G.T., Pressure differences for a ninestory building as a result of chimney effect (ASHRAE Transactions No 1973, 1966).
- Tamura G.T., Pressure differences caused by wind on two tall buildings (ASHRAE Transactions No 2085, 1968).

Litteratur utan hänvisning i texten

- Ahlström k., Några metoder för mätning av luftomsättningar i lokaler, 1973, KTH, Stockholm.
- Andersson L.O., Begränsning av fuktskador i yttervägg genom reglering av lufttrycksdifferensen mellan väggens in- och utsida, 1973, Byggforskningen R28, Stockholm.
- Anderlind C., Inverkan av springor och spalter på värmeisoleringen hos väggar isolerade med skivor av styren-cellplast, CTH 1972.
- Bankvall C., Vind, LTH 1972.
- Byggnadsenergigruppen, Energianvändning i byggnader, Byggforskningen, R10:1974.
- Chien N., Wind-tunnel studies of pressure distribution on elementary building forms. University of Iowa, 1951.
- Collins B.G., The measurement of ventilation rates using a radioactive tracer, JIHVE, 1955.
- Elmroth A., Analys av ofrivillig ventilation i småhus.
- Elmroth A., Undersökning av en fasadkonstruktion, KTH 1971, VVS 2, 1970.
- Eriksson B.E., Bostadsventilation. Byggforskningen R77:1962.
- Esdorn H., Luftdurchlässigkeit der Fenster u. Druckverteilung im Gebäude, 1958.
- Gabrielsson J., Calculation of infiltration and transmission heat loss in residential buildings by digital computer. JIHVE, March, 1968.

- Gjelsvik T., Uteklimatets inflytelse på fasadmateriale og konstr. Byggmestaren 49, 1975.
- Granum H., Bygningsfysikk, Universitetsforlag, 1969, Oslo.
- Göstring B., Kalibrering av instrument för lufttekniska mätningar, VVS nr 10, 1972.
- Van Gunst E., Het raam in onze wonning in verband met gezondheid en economie. De Ingenieur, 1959.
- Hellers G., Vindbelastning på huskroppar av allmän form-modelprov. Byggorskningen, R22, 1974.
- Hollstedt K., Instrumenter för mätning av lufthastighet og luftmengde i ventilasjonsanlegg. NBI, 1975.
- Holmqvist L., Luftläckage genom fogar, Byggmästaren 9, 1973.
- Honma H., Luftinfiltration vid fönster, KTH, 1973.
- Hopkins L.P., Air flow through cracks, BSE, Sept. 1974.
- Hunt C.M., Air infiltration measurements in a four-bedroom town house using sulfur hexafluoride as a tracer gas. ASHRAE Transactions, No 2338.
- Höglund I., Fönsterteknik (Dragtätning). Byggförlaget, 1973.
- Klimatgruppen, byggnadsaerodynamik, Statens institut för byggforskning, 1968.
- Laschober R., Statistical analyses of air leakage in splot-level residences. ASHRAE-Trans. No 1900, 1964.
- Lindgren T., Funktionsprovning av luftbehandlingsanläggningar.

- Lindsoug N.E., Hur täta hus? Byggmästaren 4, 1976.
- Lundby S., Vindusomramningar i trehus, NBI, R18, 1956.
- Ljung O., Värmetransport genom fönster, Byggeforskningen, R15:1965.
- Meckler M., How to determine building infiltration rates at low Reynolds numbers, HPAC, March 1967.
- Naumburg C., Kan vi enas om hur vi skall mäta?.
- Nylund P.O., Vindtäthet hos flerskiktstvaggar. Byggmastaren 11, 1966.
- Olsson H.A., Vindtryck inuti byggnader, KTH 1974.
- Paljak I., Termografering av byggnader, Byggeforskningen T14, 1972.
- Peterson F., Ofrivillig ventilation - stort problem i speciella industrier, Byggnadsingenjoren Team 4, 1971.
- Peterson F., Metod for bestamning av raka installationsstrackor for fasta flodesmatare i ventilationssystem, inst. for uppvarmnings- och ventilationsteknik, KTH, 1975.
- Preussker H., Ermittlung des Luftungswarmebedarfes, HLH Nr 8, 1971.
- Rydberg J., Ventilationsteknik (inblasning och utsugning), KTH, 1964.
- Rydberg J., Om ventilationssystemens funktion, VVS 2, 1968.
- Rogelein W., Ermittlung des windbetingten Luftungswarmebedarfes bei Hochhusern, Heiz.-Luff.-Haustechn. 18, 1967.
- Svensson A., Gemensamma nordiska metoder for matning av luftfloden i ventilationsanlaggingar, Byggeforskningen R51:1974.

- Svensson A., Metoder för luftflödesmätning.
- Svensson A., Instrument för mätning av lufthastigheter, VVS nr 1, 1972.
- Syrén B., Mätning av luftflöden i kanaler, inst. för uppvärmnings- och ventilationsteknik, KTH, 1973.
- Tamura G.T., Air leakage and pressure measurements on two occupied houses. ASHRAE-Trans. No 1869, 1964.
- Wahling B., Luftdistribution, fläktar och inblåsning, VVS-handboken, 1963.
- Wancke F., Luftflödesmätning.
- Wiggen R., Vinduer (Varmetap ved luftgjennomgang), NBI, 1963.
- Wirén B., Modellstudie i vindtunnel av vindströmningen nära marken kring schematiska huskropper, KTH, 1972.

LITTERATURREFERENSER TILL AVSNITT 6

- CSTB:s Cahier Technique No 144, 1973, L'influence des revêtements sur le développement de l'incendie, Paris.
- Fanger P.O., Thermal comfort, Danish Technical Press, Copenhagen.
- Lindner J., Strus W., Bezpieczenstwo pozarowe budynkow, 1965, SOSP, Warszawa.
- Lindsoug N.E., Hur tätta hus? Byggmästaren 4, 1976.
- Löfstedt B., Klimathygien, Statens institut för byggforskning, 1976.
- Peterson F., Ofrivilliga ventilation - stort problem ..., 1971, Bygg-Ingenjören Team.
- Petersson F., Svarta streck, 1976, T9:1976, ISBN 91-540-2544-3, Statens råd för byggforskningen.
- Wilson A., Air leakage in buildings, 1961, Canadian Building Digest, report CDB 23, Ottawa.

Litteratur utan hänvisning i texten

- Abel E., Föreläsningskoncept, 1976, Göteborg.
- Adamsson, Ahlgren, Bergström, Fukt i golv och väggar, 1973, Rll, Stockholm.
- Aittomäki A., Thermal behaviour and characterization of indoor spaces, 1974, State Research Centre, publ. 7, Helsinki.

- Agri, Holmlund, Fogar i ytterväggar, 1973, B12, Stockholm.
- Anderlind, Inverkan av springor och spalter på värmesisoleringen .., 1973, T21, Stockholm.
- Andersson L.O., Begränsning av fuktskador i yttervägg genom reglering av lufttrycksdifferensen mellan väggens in- och utsida, 1973, R28, Stockholm.
- Besiktningar, byggfel. Sv. Byggn.ing. Riksförbund, Komp. 15:1968, Stockholm.
- Brown F., Solvärme genom fönster och solskydd, 1966, SIB handling 36, Stockholm.
- Coblentz, Aschenbach, Field measurements of air infiltration in electrically heated houses, 1963.
- Dalakers M., Tettelister for vinduer, 1961, Oslo.
- Elmroth A., Fukt- och temperaturförhållanden i kryprum, 1966, Lättbetong, Stockholm.
- Elmroth A., Höglund I., Analys av ofrivillig ventilation i småhus, 1970. VVS nr 2, Stockholm.
- Elmroth A., Höglund I., Småhusgrundläggning med kryprum, 1972, B13, Stockholm.
- Eriksson B.E., Bostadsventilation, 1962. BFR-rapport 77, Stockholm.
- Ferencowicz J., Wentylacja i klimatyzacja, 1964, Arkady, Warszawa.
- Gabrielsson, Matalainen, Värmetekniska egenskaper hos ett frånluftsfönster med 3 glas, 1969. VVS 5, Helsingfors.

- Glas, Levegård, Levin, Den konvektiva värmeangivningen ..., 1972, R26, Stockholm.
- Hagman F., Isolerande fasader. Funktion, konstruktion, ekonomi, 1969. SIB rapport 35, Stockholm.
- Höglund I., Ahlgren B., Fönsterteknik, 1973, Byggförlaget, Stockholm.
- Höglund I., Hansson T., Inre konvektion i byggnadskonstruktioner, 1964, BFR rapport 106, Stockholm.
- Isaksen T., Slagregn og utformning av fuger i og mellom betongelement, 1966. NBFI, Særtrykk 131, Oslo.
- Klimatforskning. Yttre parametrars inverkan på inneklimat. SITRA, Byggnaders värmeeconomiforskning, Helsingfors 1973.
- Levecque M., Conductivité, convection naturelle, et perméabilité. Revue générale de Thermique, 1963, oct-dec, Paris.
- Munther K.E., Energiförbrukning i småhus, 1974, rapport R58, Stockholm.
- Nylund P.O., Kondens i väggar. Fältundersökning, 1963.
- Ronge H., Löfstedt B., Luftfuktighetens värmeverkan och "effektiv temperatur", VVS 1957:2, Stockholm.
- Rosenblad-Wallin E., Kärrholm M., Utveckling av ändamålsenliga arbetskläder, 1976, STU-utredning nr 49-1976, Stockholm.
- SIB, Ytterväggar, värmeisoleringsförmåga och sprickförekomster hos sju väggtyper inom två klimatormdåen, 1969, rapport 28, Stockholm.

**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 750637-8 från
Statens råd för byggnadsforskning till Avd. för byggnads-
konstruktion, Chalmers tekniska högskola, Göteborg**

R34:1978

ISBN 91-540-2838-8

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

**Art.nr: 6600734
Abonnemangsgrupp:
W. Installationer**

**Distribution:
Svensk Byggtjänst, Box 1403
111 84 Stockholm**

Cirka pris: 35 kr exkl moms