



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

R1:1984

Räkna med luftläckningen

Samspel byggnad — ventilation

Per Olof Nylund

R.
AW

INSTITUTET FÖR BYGGDOKUMENTATION	
Accnr	Plac <i>ser</i>

BYGGDOK

Sankt Eriksgatan 46
112 34 Stockholm
tel: 08-617 74 50
fax: 08-617 74 60



Bygghälsningsrådet

R1:1984

RÄKNA MED LUFTLÄCKNINGEN
Samspel byggnad - ventilation

Per Olof Nylund

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
770841-1 från Statens råd för byggnadsforskning
till Tyréns Företagsgrupp AB, Stockholm.

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

R1:1984

ISBN 91-540-4052-3

Statens råd för bygnadsforskning, Stockholm

FÖRORD

Den föreliggande skriften "Räkna med luftläckningen" är ett koncentrat i lättgripbar form av ett flerårigt arbete. Behandlingen av byggnaden som ett system och inriktningen mot den praktiske ingenjören utgör en bärande linje i arbetet.

Av de ca 150 TWh/år värme som byggnaderna i Sverige kräver för sin värmning åtgår ca 100 TWh/år för bostadssektorn. Det är inom denna sektor, där det inte finns vare sig värmetekniskt dominerande luftbehandlingssystem eller energitekniskt tunga processer, som luftläckningen in i och ut ur byggnaden är av verklig energiteknisk betydelse. Vid nybyggnad kan man med dagens tekniska kunnande, tekniskt förnuft och fackmässigt byggande åstadkomma acceptabel ventilationsstandard i bostadshus med rimlig energiuppföring. I den väldiga mängden befintliga hus emellertid är det däremot förbundet med stora svårigheter att, till rimlig kostnad och med bibehållande av acceptabel rumsventilation, åstadkomma en påtaglig sänkning av bostadshusens värmebehov för ventilation. I "Räkna med luftläckningen" har författaren på ett välgörande sätt framhävt de befintliga byggnaderna och även anvisat vägar för dessas behandling. Diskussionen kring tätning av hus med självdragsventilation förtjänar härvid att framhållas speciellt.

Som redan antytts är det här fråga om ett teoretiskt och praktiskt svårt problemkomplex. Läsaren kan lätt bibringas uppfattningen att problematiken egentligen är ganska enkel och att man nu behärskar området till fullo. Detta är dock i så fall ett resultat av P O Nylunds förmåga att framställa även svåra frågor så att läsaren lätt kan följa honom. I verkligheten återstår ännu krävande arbetsuppgifter, bland annat i form av ytterligare fältstudier av byggnader och dessas lufttekniska beteende. Det är betydelsefullt för svensk byggt teknik att man systematiskt arbetar vidare med såväl underbyggnad som vidareutveckling av kunnandet inom det här området.

Enno Abel
Professor
Installationsteknik, CTH

FÖRFATTARENS FÖRORD

Arbetet bakom denna skrift har gått ut på att komma underfund om hur byggnader fungerar när det gäller energiavgivning av ventilation och luftläckning. Det har påkallats av behovet att förse den praktiska energisparverksamheten med utveckling av teoribildning och beräkningsmetoder samt med att ta fram mätmetoder för fältundersökningar.

Arbetet har främjats av en stimulerande arbetsmiljö med erfarna, tekniskt skickliga och kreativa medarbetare. Många och ingående är de diskussioner som förts med Arne Lindh och med Stig Bergström och där iakttagelser och idéer "rådbråkats" och lett till ökad kunskap.

Jan Mesch har i det experimentella fältarbetet förmått urskilja oväntade beteenden hos byggnader, vilket gett anledning till att söka förklaringar.

De för ett arbete av denna art nödvändiga impulserna har kommit från många projekt. Som exempel kan nämnas Sundbybergsprojektet och inte minst våra undersökningar av kontorshus, som genom Hans Olof Hedberg inneburit värdefulla bidrag.

Stockholm i september 1983

P O Nylund

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

<u>INLEDNING</u>	5
TILLBAKABLICK	5
HUVUDDRAGEN I BERÄKNINGSMODELLEN	6
LUFTLÄCKNING - ETT PROBLEM ÖVER SKRÅGRÄNSEN	8
BAKOMLIGGANDE ARBETE	9
ERFARENHETER	9
TYPINDELNING AV SYSTEM BYGGNAD/VENTILATION	10
<u>PRESENTATION</u>	12
<u>GRUNDLÄGGANDE BEGREPP</u>	14
LÄCKFUNKTION FÖR EN OTÄTHET	14
TVÅ "PARALLELLKOPPLADE" OTÄTHETER	16
TVÅ OTÄTHETER "I SERIE"	18
ALTERNATIVT GRAFISKT FÖRFARANDE	19
KORT OM TÄTHET OCH TÄTHETSPROVNING AV BYGGNADER .	20
OTÄTA OCH TÄTA YTTERVÄGGAR	21
<u>TERMIKEN - EN OFRÅNKOMLIG FÖRETEELSE</u>	
<u>I UPPVÄRMDA BYGGANDER</u>	23
TERMISK DRIVKRAFT - EN FÖLJD AV TYNGDLAGEN	23
VEDSPISEN SOM TERMISK MOTOR	24
BYGGNADEN SOM TERMISK MOTOR	25
LIKHEITEN MELLAN EN SJÄLVDRAGSVENTI- LERAD LÄGENHET OCH VEDSPISEN	26
<u>KARAKTERISTISKA EGENSKAPER HOS</u>	
<u>SJÄLVDRAGSVENTILATION</u>	27
GRUNDLÄGGANDE FUNKTIONSSÄTT - VID VINDSTILLA ...	27
OMKASTNING AV FLÖDESRIKTNING I KANALER	33
STÖRNING AV VIND	42
RÅD OCH REKOMMENDATIONER FÖR ENERGI- SPARVERKSAMHETEN	48
ERFARENHETER OCH MÖJLIGHETER TILL FÖRBÄTTRING I BEFINTLIGA SYSTEM	49
<u>KARAKTÄRISTISKA EGENSKAPER HOS</u>	
<u>FRÄNLUFTSVENTILATION</u>	51
FÖRBEREDANDE KLARLÄGGANDEN	52
ALLMÄNT FUNKTIONSSÄTT	55
STÖRNING AV TERMIK	56
STÖRNING AV VIND	56
RÅD OCH REKOMMENDATIONER FÖR ENERGISPÄR- VERKSAMHETEN	59
ERFARENHETER OCH MÖJLIGHETER TILL FÖRBÄTTRING I BEFINTLIGA BYGGNADER	65

<u>KARAKTÄRISTISKA EGENSKAPER HOS FRÅN- OCH TILLUFTSVENTILATION</u>	66
ALLMÄNT FUNKTIONSSÄTT	66
STÖRNING AV TERMİK	67
STÖRNING AV VIND	69
RÅD OCH REKOMMENDATIONER FÖR ENERGISPAR- VERKSAMHETEN	70
ERFARENHETER	71
<u>SAMMANSTÄLLNING AV SYSTEMEGENSKAPER - UTVECKLINGSMÖJIGHETER</u>	72
UTVECKLINGSMÖJLIGHETER	73
<u>LUFTVÄXLING OCH EFFEKTAVGIVNING</u>	74
BESTÄMNING AV LUFTLÄCKNING GENOM VÄGGFÄLT	74
BESTÄMNING AV EFFEKTAVGIVNING	77
<u>VENTILATIONSPRINCIPERNAS TILLÄMPNING I KONTORSHUS</u>	81
BAKGRUND	81
<u>EN VANLIG HYBRID - FT-SYSTEM MED SJÄLVDRAG</u>	82
TRYCKBALANSERING	85
KOMMUNICERANDE HUSKROPPAR	86
<u>FRÅN- OCH TILLUFTSVENTILATION</u>	88
NOLLTRYCKSNIVÅN OCH DESS BETYDELSE	95
RÅD OCH REKOMMENDATIONER FÖR ENERGISPAR- VERKSAMHETEN	98
<u>MÄTNINGAR</u>	100
SAMBAND MELLAN FLÖDE OCH TRYCK	100
<u>AVSLUTNING</u>	103
SAM SPELET BYGGNAD / VENTILATION - ETT STEG MOT HELHETSSYN	103
BYGGNADEN SOM TOTALSYSTEM	104

INLEDNING

TILLBAKABLICK

I och med att energifrågorna fått en framträdande plats i opinion och i Svensk Byggnorm har byggandet på senare år undergått en snabb förändring. Kraven på energihushållning har medfört ökade krav på värmeisolering och införande av rekommendationer beträffande täthet. När normen kom visste man inte mycket om täthetens betydelse.

Det blev författarens uppgift att med anslag från BFR utarbeta en systemanalys - vars innebörd eller konturer inte närmare definierats. Jag valde att skapa en beräkningsmodell för luftläckning. Tanken var att en sådan modell borde kunna tjäna som en gemensam plattform för diskussion byggnadstekniker emellan. Ganska snart stod det klart att luftläckningen är intimt kopplad även till ventilationstekniken och således utgör ett gemensamt problem över ämnesgränserna byggnadsteknik/ventilationsteknik.

Resultatet av den första etappens arbete publicerades (Nylund, 1979 - Tjyvdrag och ventilation). I rapporten presenteras beräkningsmodellen och några resultat från tillämpningar. Läckfunktioner gavs avsiktligt generella funktionsbeteckningar för att var och en som vill göra beräkningar själv skulle kunna välja "matematisk klädedräkt". Möjligen kan detta vara en anledning till att många inte insett att den presenterade modellen kan användas för direkt tillämpning.

Vi har själva tillämpat den i ett stort antal experimentella undersökningar och funnit den vara ett värdefullt och nödvändigt instrument när det gäller att kartlägga ventilation/luftläckning i byggnader. Dess tillförlitlighet bekräftades ganska snart i vårt arbete med undersökningar av kontorshus.

Beräkningsmodellen innebär tillämpning av sedan länge vedertagna samband inom hydro- och aeromekanik på ett nytt ämnesområde och borde inte vara främmande för vare sig byggnads- eller ventilationstekniker. För att underlätta användandet presenteras emellertid parallellt med denna skrift en Appendix - "Beräkning av ventilation och luftläckning - vägledning för att upprätta beräkningsprogram" - som kan rekvideras från Byggdok.

I föreliggande skrift behandlas inte detaljer i beräkningsmodellen men för att antyda arten av problemområdet redovisas närmast dess huvuddrag.

HUVUDDRAGEN I BERÄKNINGSMODELLEN

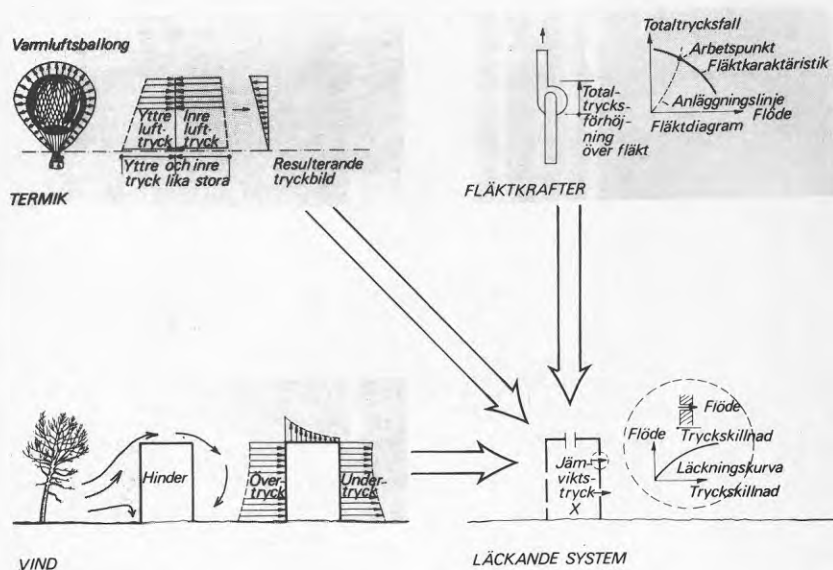
Beskrivningen anknyter till FIGUR 1.

Analysen går ut på att identifiera två system, ett läckande system och ett påverkande kraftsystem och att uppställa en balansekvation för luftflöden.

Det läckande systemet utgörs av höljets otätheter och de ventilationskanaler som bryter igenom höljet.

- Det illustreras av den nedre figuren till höger. Den streckade cirkeln anger en lokal otäthet i ytterväggen med tillhörande läckkurva, dvs samband mellan flöde och tryckskillnad. Sådana läckkurvor kan avse såväl lokala otätheter som totalt flöde genom alla otätheter i en större yta. Läckkurvan uttrycker strömningskaraktistiken vid luftens passage genom höljet.

Den övre högra figuren illustrerar en ventilationskanal och tillhörande fläkt-diagram. Axlarna för flöde och tryckskillnad är omkastade i förhållande till nyss diskuterade diagram. Den streckade kurvan - anläggningslinjen - anger strömningskaraktistiken hos luftvägen i kanalen och är således helt analog med tidigare läckkurvan i den undre figuren.



FIGUR 1 HUVUDDRAGEN I ENCELLSMODELLEN FÖR BERÄKNING AV LUFTLÄCKNING

I båda fallen är kurvorna krökta. Detta innebär att man inte kan summera läckflöden av olika drivkrafter till varandra.

Kraftsystemet består av termik, vind och fläktkrafter. Dessa betraktas som yttre krafter som verkar på höljet.

- Termiken, som illustreras med en varmluftsballong, uppkommer av att luften ute är tyngre än luften inne. Trycken ute och inne är lika stora vid öppningen nedtill. Det yttre avtar mer med höjden än det inre, så att den resulterande tryckskillnaden blir ett inre övertryck som tilltar med höjden. Termiken är väl definierad och stabil (annars skulle vi inte våga oss på ballongfärder).
- Vindkrafterna uppkommer genom övertryck och undertryck på olika begränsningsytor av ett hinder. Storleken av trycken är en produkt av det dynamiska trycket i den fritt blåsande vinden och formfaktorer som bestäms av hindrets form och storlek, ytornas orientering i förhållande till vindriktningen. Krafterna är ofullständigt kända och fluktuerande.
- Flätkrafter illustreras av den heldragna krökta kurvan i det insprängda fläktdiagrammet överst till höger.

Flödesbalans:

Tidigare nämndes att läckkurvornas krökta form inte medger summering av luftläckning av de tre drivkrafterna. I stället sammansätts drivkrafterna till ett samlat kraftangrepp på det läckande systemet.

Tryck av vind och termik betraktas alltså som yttre krafter som adderas till varandra och verkar på höljets olika delytor. Ventilationskanalers yttre mynnningar betraktas också som delytor. På dessa verkar flätkrafter.

De yttre krafterna - vind och termik - påverkas inte av höljets täthet. Däremot inverkar denna på flätkrafterna, vilket kommer att beskrivas senare.

- Krafterna - de summerade trycken - ger upphov till luftströmning in genom vissa delytor och ut genom andra. Villkoret för jämvikt är flödesbalans, så att summa flöden in = summa flöden ut. Jämviktstillståndet ger upphov till ett inre jämviktstryck. Detta har i den undre högra figuren betecknats med x och anger avvikelse - undertryck eller övertryck - i förhållande till det yttre lufttrycket i jämnhöjd med byggnadens bas.

Lösningen av flödesbalanskvationen går ut på att bestämma detta jämviktstryck. I och med detta är beräkningen i stort sett genomförd.

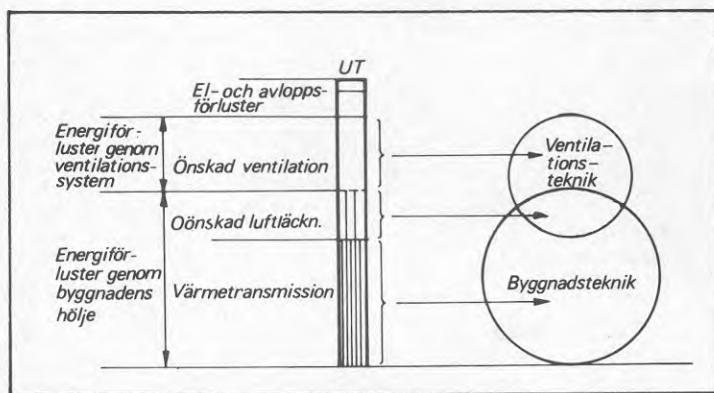
LUFTLÄCKNING - ETT PROBLEM ÖVER SKRÅGRÄNSEN

Luftläckningens roll kan nu belysas med utgångspunkt från FIGUR 2. Figuren illustrerar energiavgivning från en byggnad. Den undre delen anger förluster av värmetransmission genom höljet.

Transmissionen är proportionell mot värmegenomgångstalet, det s k k-värdet, som beror av värmeisoleringsförmågan och tjockleken hos de materialskikt som ingår i höljet. Transmissionsegenskaperna beror alltså på den byggnadstekniska utformningen, vilket i figuren anges med en sammanbindande linje mellan transmissionsförluster och den undre "bollen" byggnadsteknik.

Ventilationsförlusterna beror på ventilationssystemet och skall på samma sätt hänföras till ventilationstekniken.

Mellan transmissions- och ventilationsförluster i stapeldiagrammet finns förluster som orsakas av luftläckning. Till vänster om stapeln markeras att dessa förluster tillsammans med transmissionsförlusterna utgör energiflödet genom höljet. Luftläckningen påverkas både av den byggnadstekniska utformningen och ventilationssystemet. Den är alltså ett gemensamt problem för byggnadsteknik och ventilationsteknik.



- Transmissionsförlusterna är proportionella mot k-värdet och beror av byggnadstekniken.
- Ventilationsförlusterna beror av ventilationstekniken.
- Luftläckningen beror av både byggnads- och ventilationstekniken och utgör ett gemensamt problem, men som tidigare i alltför stor utsträckning utgjort ett ingenmansland.

FIGUR 2 ENERGIFÖRLUSTER FRÅN EN BYGGNAD

Av olika skäl, varav ett är svårigheten att tackla problemet har den kommit att hamna i ett ingenmansland mellan byggands- och ventilationstekniken.

Det är sålunda symptomatiskt att man för att ange medvetenheten om problemet fortfarande går runt det och avfärdar det som "ofrivillig ventilation". Detta bidrar bara till att skapa intryck av något okontrollerbart och opåverkbart som händer i gränlandet mellan byggands- och ventilationsteknik och för vilket vi som tekniker inte har ansvar.

I denna skrift skall visas att luftläckningen inte alls är något ogripbart utan tvärt om låter sig studeras med utgångspunkt från sedan decennier beprövade och vedertagna samband inom aero- och hydrostatiken. (Låt vara att påfrestningen av vind är ofullständigt känd.)

BAKOMLIGGANDE ARBETE

Det arbete som ligger bakom det som redovisas i denna skrift har varit strängt inriktat på att komma underfund om hur byggnaden fungerar. Ganska snart efter tillkomsten av beräkningsmodellen blev det möjligt med tillämpning i ett antal energiundersökningar av kontorshus - de flesta för Byggnadsstyrelsen.

Under vintrarna 81/82 och 82/83 har fem av dessa kontorshus studerats mer ingående med medel från BFR.

Parallellt med detta arbete har vi under de två senaste åren medverkat som konsulter i det BFR-finansierade "Sundbybergsprojektet", som avser bostadshus.

Arbetet har på så sätt präglats av att tillgodose den praktiska energisparverksamheten med teoretisk vidareutveckling och med utveckling av mätmetoder för fältundersökningar.

De teoretiska delarna av arbetet har i stor utsträckning finansierats av BFR inom några olika projekt. Den gemensamma nämnaren för dessa har varit att undersöka samspelet byggnad/ventilation. Arbetet har nu nått därhän att erfarenheterna kan redovisas i ett sammanhang.

ERFARENHETER

Det står klart att bristande överblick av byggnadens funktion är ett allvarligt hinder när det gäller att spara energi. Rekommendationer av åtgärder sker ofta på måfå.

Något mer specificerat har erfarenheterna påvisat:

- Nödvändigheten av att genom mätningar och beräkningar klarlägga hur den enskilda byggnaden fungerar.
- Luftläckningens stora betydelse för energiförluster och att bristande kunskaper resulterat i brister när det gäller
 - uppfattning och energisparåtgärders effekt
 - tekniskt utförande
 - efterfrågan på underlag för energikalkyler.
- Möjligheterna och förutsättningarna för direkta och enkla provningsmetoder i fält.
- Brister i vedertagna och standardiserade provningsmetoder och i normens täthetskriterier.

I diskussioner rörande byggnaders verkningssätt framhålls ofta erfarenheter som till synes går stick i stäv med varandra. Det visar sig ofta att meningsmotståndarna har olika utgångspunkter i meningen byggnad/ventilationssystem.

Det är därför lämpligt med en klassificering i systemkategorier. Närmast redovisas en typindelning som successivt tagit form ur de erfarenheter som framkommit under de senaste åren och som visat sig vara relevant både när det gäller att bedöma effekten av tätningsåtgärder och när det gäller att välja mätmetoder för att bestämma luftläckning.

TYPINDELNING AV SYSTEM BYGGNAD/VENTILATION

Indelningen i systemkategorier redovisas i FIGUR 3. Figuren anger i vertikal led två huvudtyper av byggnader:

- Flervåningshus som är vertikalt täta i sitt inre. Hit hör flerbostadshus där kraven på ljud- och brandisolering normalt sörjer för god täthet.
- Flervåningshus som är vertikalt otäta i sitt inre. Hit hör kontorshus av modernare snitt, hallar och småhus.

För var och en av dessa byggnadstyper görs en indelning i byggnader med otäta respektive täta ytterväggar. Med detta avses inte fixerade nivåer på tätheten. Avsikten är att senare beskriva inverkan av tätningsåtgärder.

ventilations-system	ytterväggar tätta byggnader		ytterväggar otätta byggnader		dag-/natt-fall/ fall ventilation hybrider funktions- analys krävs!
	otäta a)	täta b)	otäta a)	täta b)	
självdrag		S1		S2	
frånluft		F1		F2	
från-otilluft		FT1		FT2	

FIGUR 3 TYPINDELNING AV SYSTEM BYGGNAD/VENTILATIONS-SYSTEM

I vertikalled har gjorts en indelning med avseende på huvudtyper av ventilationssystem i:

- Självdragsventilation - S
- Frånluftsventilation - F
- Från- och tilluftsventilation - FT

Klassificeringen i systemkategorier avser renodlat fungerande system som kan tillskrivas skilda funktionsätt. Det förekommer emellertid hybrider, vilket är särskilt påtagligt när det gäller kontorshus. Variationerna är här så stora att det inte räcker med att ange schablonfunktionen. Här är det nödvändigt att genom mätningar och beräkningar klarlägga funktionen från fall till fall. Detta markeras till höger i figuren.

PRESENTATION

Den nyss redovisade typindelningen enligt FIGUR 3 avses i fortsättningen utgöra en stomme som skall tillföras innehåll varefter de olika systemkategorierna genomgås. Innan vi går in på detta presenteras en erforderlig bakgrund i två avsnitt: "GRUNDLÄGGANDE BEGREPP" och "TERMIKEN. ETT OFRÅNKOMLIGT BEGREPP I UPPVÄRMDA BYGGNADER".

Egentligen handlar det om ingenjörsmässigt sett enkla beräkningssamband. Trots det krävs en viss ansträngning för att sätta sig in i nya tänkesätt. Det väljs här att skapa successiv förståelse med hjälp av några beräkningsmässigt enkla specialfall.

Beräkningsmetodikerna illustreras grafiskt så långt det är praktiskt. Många enklare problem kan för övrigt med fördel behandlas grafiskt.

För att underlätta för de läsare som själva vill göra numeriska kontroller redovisas underlag för detta med indragen text - som här. Ambitionen har härvid varit att göra den matematiska/numeriska redovisningen tydlig och enkel.

Den indragna texten behöver inte läsas för förståelsens skull.

Genomgången av systemkategorierna börjar med den vänstra halvan i FIGUR 3 och sker på så sätt att ett flerbostadshus tänks försett med i tur och ordning SJÄLVDRAGSVENTILATION, FRÅNLUFTSVENTILATION och FRÅN- OCH TILLUFTSVENTILATION.

Av utrymmesskäl kommer här endast de renodlade fallen att behandlas. Har man kännedom om dessa underlättas förståelsen för "hybridfallen" väsentligt.

Effekten av tätningsåtgärder kommer att framträda vid jämförelser mellan otäta och täta ytterväggar inom varje kategori. I anslutning till avsnitten lämnas även "Råd och rekommendationer för energisparande" när det gäller tätningsåtgärder. De skilda funktionssätten för kategorierna ovan kommenteras i ett uppsummerande kapitel SAMMANSTÄLLNING AV SYSTEMEGENSKAPER - UTVECKLINGSMÖJLIGHETER. I och med det är den vänstra halvan av FIGUR 3 "avklarad" och läsaren torde förhoppningsvis ha fått erforderlig inblick i syn- och tanksätt för att placera egna iakttagelser i ett vidare sammanhang när det gäller flerbostadshus.

I redogörelsen för den högra halvan i FIGUR 3 ändras karaktären i framställningen något. Det går här inte att redogöra för bestämning av flöden med grafisk hantering. Det blir nödvändigt med en begränsad matematisk/numerisk hantering i huvudframställningen.

Som bakgrund redovisas ett avsnitt "LUFTVÄXLING OCH EFFEKTAVGIVNING".

De grundläggande funktionssätten för inre otäta byggnader med självdragsventilation och med frånluftsventilation är i stort sett desamma som för inre täta byggnader och behandlas därför endast kortfattat i "VENTILATIONSPRINCIPERNAS TILLÄMPNING I KONTORHUS". Det mesta utrymmet i den senare delen av rapporten ägnas åt FRÅN- OCH TILLUFTSVENTILATION, som är den dominerande principen i nyare kontorshus. I dessa har otätheter i taket ofta stor betydelse, vilket gör att det finns en mycket vanlig och betydelsefull hybrid som kräver en egen rubrik "FRÅN- OCH TILLUFTSVENTILATION MED SJÄLVDRAG".

Efter redogörelsen för denna hybrid avslutas genomgången av systemkategorierna med den mer renodlade kategorien "FRÅN- OCH TILLUFTSVENTILATION", som avslutas med "Råd och rekommendationer för energisparandet".

GRUNDLÄGGANDE BEGREPP

Redan inledningsvis stötte vi på ett skilt synsätt hos byggnads- och ventilationstekniken som måste klaras upp. Fläktdiagrammet i FIGUR 1 längst upp till höger anger flöde utmed den horisontella axeln och tryckskillnad utmed den vertikala.

Anledningen till det ursprungliga valet av axelriktningar är att ventilationens uppgift är att transportera vissa dimensionerade flöden genom kanaler och kanalsystem. Det är då naturligt och praktiskt att uppfatta flödet som oberoende variabel och tryckfall som det motstånd flödet initierar i en kanalväg.

I vårt fall är det emellertid klart fördelaktigt med det omvända synsättet, nämligen att flödet orsakas av en tryckskillnad/tryckfall från tilloppet till utloppet i en strömningsväg. Vi använder i fortsättningen detta synsätt. Tryckfallet betraktas som den oberoende drivkraften och anges utmed horisontalaxeln. Flödet är den beroende storheten och anges utmed vertikalaxeln.

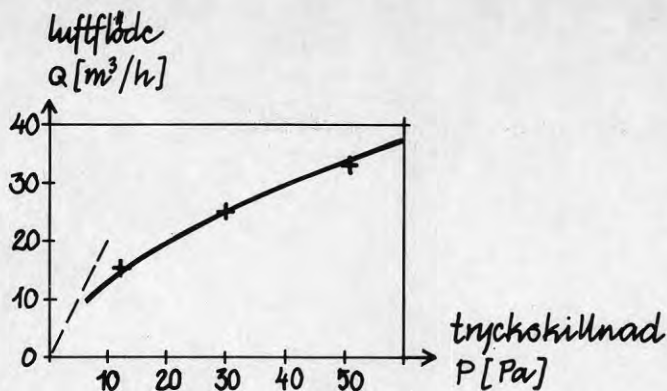
LÄCKFUNKTION FÖR EN OTÄTHET

Litet längre fram kommer vi att på flera ställen redogöra för hur man använder läckkurvor vid flödesberäkning och behöver en kort benämning och beteckning. Låt oss kalla läckkurvorna för Q/p -kurvor, vilket anger att det är frågan om ett samband mellan flöde Q (m^3/h) och tryckskillnad p (Pa).

Genom experiment bestäms luftläckning = luftflöde Q vid några olika värden på drivkraften = tryckskillnaden p . De experimentellt funna värdeparen kan inritas i diagram - FIGUR 4.

Parvisa värden för Q och p sammanbinds till en kurva - läckkurvan för den undersökta otätheten.*)

*) Det bör betonas att det vanliga - och här presenterade synsättet med en kontinuerlig läckkurva mot origo innebär en förenkling och approximation som kan vara mycket grov när vi rör oss med låga tryck. Strömningstekniskt kännetecknas en läckkurva av en linjär och brantare kurvdel nära origo, den sträckade kurvan i figuren, och ett övergångsområde till det krökta tillstånd som anges i figuren. Vi bortser tills vidare från denna komplikation, som senare kommenteras i kapitlet "MÄTNINGAR".



FIGUR 4 LÄCKKURVA UPPRITAD PÅ BASIS AV EXPERIMENTELLT UPPMÄTTA VÄRDEN

Matematisk approximation av läckkurva

En ofta använd approximation är

$$Q = k \cdot p^{\beta}, \text{ där} \quad (1)$$

där k och β är koefficienter.

Värdet på β ligger inom intervallet 0,5 till 1. Vid turbulent strömning gäller $\beta = 0,5$ och vid laminär $\beta = 1,0$. Vid provning av byggnadstekniska detaljer fås ofta värden omkring $\beta = 0,6$ å $0,7$.

Beräkning av värden sker med utgångspunkt från experimentellt funna värdepar. Antag att vi har två värdepar i FIGUR 4.

Vid har två ekvationer (A) och (B):

$$Q_1 = k \cdot p_1^{\beta} \quad (A)$$

$$Q_2 = k \cdot p_2^{\beta} \quad (B)$$

Genom division $\frac{(A)}{(B)}$ fås

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\beta}, \text{ som ger}$$

$$\beta = \frac{\ln(Q_1/Q_2)}{\ln(p_1/p_2)} \quad (2)$$

Insättning av det funna värdet i t ex (A) ger:

$$k = \frac{Q_1}{p_1} \quad (3)$$

Kontrollera gärna det följande exemplet. Antag att de två värdeparen i figuren är följande:

$$\text{Med } p_1 = 12,5; \quad Q_1 = 15$$

$$p_2 = 30; \quad Q_2 = 25$$

fås

$$\beta = \frac{\ln 15/25}{\ln 12,5/30} = 0,58$$

som insatt i (3) ger

$$k = \frac{15}{12,5^{0,58}} = 3,47$$

Läckkurvan kan nu skrivas:

$$Q = 3,47 \cdot p^{0,58}$$

Normalt har man tillgång till fler än två värdepar och kan göra flera bestämningar av k och β . Sedan värdena för k och β bestämts kan kurvan konstrueras genom att beräkna flödet för varierande värden på p . Kurvor som konstrueras på detta sätt brukar ofta få god anpassning till de experimentellt funna värdeparen.

TVÅ "PARALLELLKOPPLADE" OTÄTHETER - FIGUR 5

Vi söker resulterande läckkurva för två otätheter 1 och 2 i ett väggfält som utsätts för en tryckskillnad.

Den resulterande läckkurvan fås enkelt genom summering i vertikalled enligt figuren. Utmed en vertikal linje, ett godtyckligt valt värde för p , gäller att flödet genom otäthet 1 = Q_1 och genom otäthet 2 = Q_2 . Det sammanlagda läckaget är $Q_1 + Q_2$ och ger en punkt på den resulterande kurvan. Upprepas detta vid några andra värden för tryckskillnaden fås den sökta kurvan. Principen kan givetvis tillämpas för fler än två otätheter.

Matematisk behandling

$$Q_1 = k_1 \cdot p^{\beta_1} \text{ och}$$

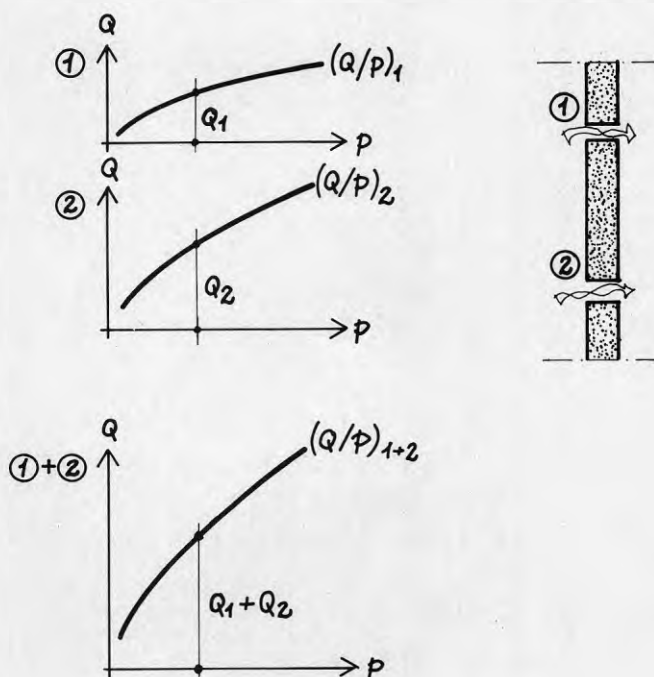
$$Q_2 = k_2 \cdot p^{\beta_2}$$

Genom summering fås

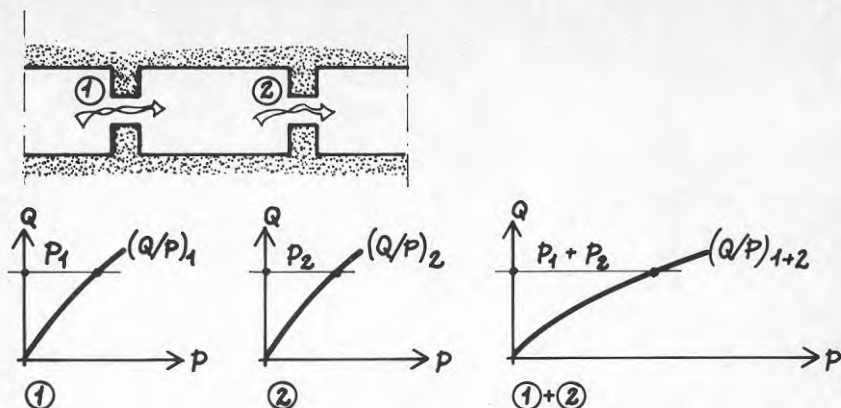
$$Q_{1+2} = k_1 \cdot p^{\beta_1} + k_2 \cdot p^{\beta_2} \quad (4)$$

Endast om $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ kan man uttrycka läckfunktionen i en enda term.

$$Q_{1+2} = (k_1 + k_2) \cdot p^{\beta} \quad (5)$$



FIGUR 5 RESULTERANDE LÄCKKURVA FÖR TVÅ PARALLELLKOPPLADE OTÄTHETER FÅS GENOM VERTIKAL SUMMERING.



FIGUR 6 RESULTERANDE LÄCKKURVA TILL TVÅ SERIEKOPPLADE OTÄTHETER FÅS GENOM HORIZONTAL SUMMERING.

TVÅ OTÄTHETER "I SERIE" - FIGUR 6

Vi söker på motsvarande sätt resulterande läckkurva för två otätheter i samma strömningsväg. Tryckskillnaden p är sammanlagd drivkraft.

Den resulterande kurvan fås i detta fall genom summering i horisontalled. För ett godtyckligt valt värde på Q gäller att tryckfallet över otäthet 1 = p_1 och över otäthet 2 = p_2 .

Summan $p_1 + p_2$ är den totala tryckskillnaden för de seriekopplade otätheterna 1 + 2. Upprepning vid flera värden Q ger fler punkter och den resulterande kurvan kan konstrueras.

Även i detta fall kan förfarandet tillämpas vid fler än två seriekopplade otätheter.

Matematisk behandling

Under förutsättning att $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ kan problemet behandlas matematiskt utan iteration (passning).

Flödet Q är detsamma genom otätheterna 1 och 2.

Vidare gäller enligt förutsättningarna att $p = p_1 + p_2$.

För otätheterna 1 och 2 gäller

$$Q = k_1 \cdot p_1^\beta$$

$$Q = k_2 \cdot p_2^\beta$$

Ur dessa fås

$$p_1 = \frac{Q \frac{1}{\beta}}{k_1 \frac{1}{\beta}}$$

$$p_2 = \frac{Q \frac{1}{\beta}}{k_2 \frac{1}{\beta}}$$

$$p = p_1 + p_2 = Q \frac{1}{\beta} \left(\frac{1}{k_1 \frac{1}{\beta}} + \frac{1}{k_2 \frac{1}{\beta}} \right)$$

Löses Q i detta uttryck fås

$$Q = \frac{1}{\left(\frac{1}{k_1 \frac{1}{\beta}} + \frac{1}{k_2 \frac{1}{\beta}} \right) \beta} \cdot p^\beta$$

Uttrycket kan ges den enkla grundformen

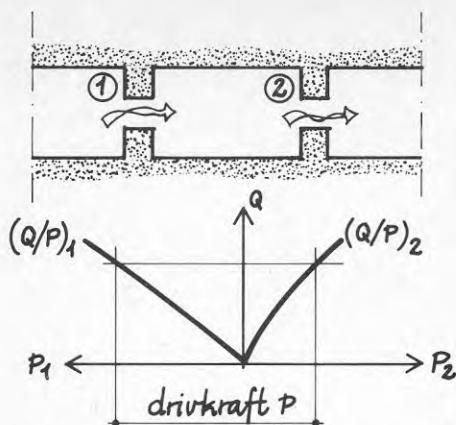
$$Q = k \cdot p^\beta, \text{ där} \quad (6a)$$

$$k = \frac{1}{\left(\frac{1}{k_1 \frac{1}{\beta}} + \frac{1}{k_2 \frac{1}{\beta}} \right) \beta} \quad (6b)$$

ALTERNATIVT GRAFISKT FÖRFARANDE

I stället för den grafiska bilden i FIGUR 6 kan man förfara enligt FIGUR 7. Läckkurvorna 1 och 2 vänds "rygg mot rygg". Detta grafiska förfarande är i motsats till det föregående begränsat till två seriekopplade läckvägar.

Vi antar att vi har ett visst tryckfall från den vänstra till den högra öppningen. Detta betraktas i fortsättningen som den drivkraft som står till förfogande och betecknas p . Flödesbalansen fås genom att uppsöka det läge där det horisontella avståndet mellan Q/p -kurvorna är detsamma som drivkraften p . Samtidigt fås tryckfallen p_1 och p_2 över de båda åtstrykningarna.



FIGUR 7 ALTERNATIV BEHANDLING AV TVÅ SERIEKOPPLADE OTÄTHETER

När det gäller att skaffa sig förståelse för hur byggnader fungerar som läckande system är det lämpligt att börja med grafiska lösningar. När man så upptäcker att man får för dålig precision i resultaten blir nästa naturliga steg större papper och skarpare penna och därefter kombination av grafisk lösning och numeriska stöd- och kontrollberäkningar.

Den läsare som gjort numeriska kontroller i det föregående har redan börjat arbeta på detta sätt.

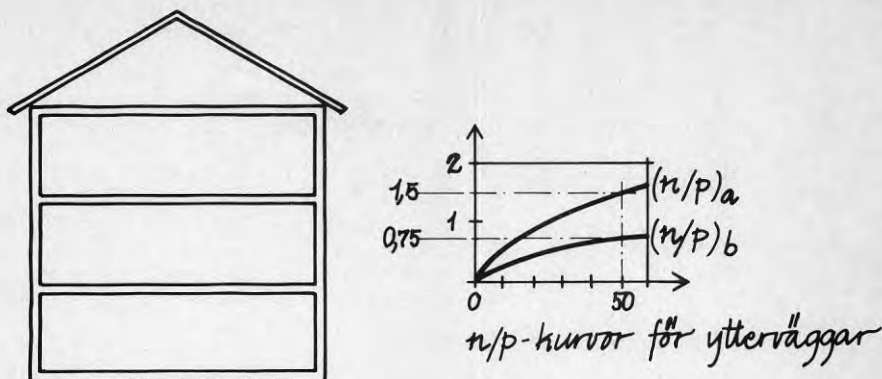
Programmerbara fickkalkylatorer är utmärkta när det gäller att lösa problem av enklare slag.

KORT OM TÄTHET OCH TÄTHETSPROVNING AV BYGGNADER

FIGUR 8 visar ett tvärsnitt genom ett flervånings bostadshus.

I den senare redogörelsen kommer vi att återkomma till denna byggnad och "förse" den med ventilationssystem. Här behandlas endast omslutande ytterväggar.

Tätthetsprovning av en lägenhet enligt den standardiserade tryckprovningssmetoden innebär att man tätar ventilationsdon och entrédörr och sätter lägenheten under övertryck och/eller undertryck med hjälp av en fläkt. Luftflödet och tryckskillnaden inne/ute registreras. Genom att variera flödet och tryckskillnaden får man ett antal värdepar och kan rita upp samma slags kurva som den i FIGUR 4. Denna kurva kommer då att utgöra den resulterande läckkurvan för alla parallellkopplade läckvägar i lägenhetens ytterväggar. (Innebörden av begreppet resulterande läckkurva definieras av FIGUR 5.)



FIGUR 8 FLERBOSTADSHUS OCH LÄCKKURVOR FÖR LÄGENHET.

$n_{50} = 1,5$ för fallet a, dvs otäta väggar

$n_{50} = 0,75$ för fallet b, dvs täta väggar

Kriterier för täthet och för ventilation/luftläckning uttrycks vanligen i sorten omsättning per timme, vilket innebär antal byggnadsvolymer (eller rumsvolymer) per timme. Vi betecknar antalet omsättningar med n .

Eftersom intresset här är mer direkt koncentrerat på antalet omsättningar än på flödets storlek kan man dividera flödena med lägenhetsvolymen och upprita en läckkurva med vertikalaxeln graderad i antal luftomsättningar. En sådan kurva kallar vi i fortsättningen för n/p kurva.

Byggnormen anger täthetskrav i form av omsättningar vid tryckskillnaden 50 Pa. Vi anger i fortsättningen detta med otäthetsfaktorn n_{50} . Den anger hur många lägenhetsvolymer luft som vid ett inre övertryck eller undertryck av storleken 50 Pa pressas ut respektive sugas in genom de ytterväggar som omger lägenheten.

OTÄTA OCH TÄTA YTTERVÄGGAR

För att ge substans åt FIGUR 3 behöver vi en utgångspunkt för att diskutera skillnad i funktion vid otäta respektive täta ytterväggar. Byggnormens täthetsrekommendation för flervånings bostadshus är $n_{50} = 1$.

Vi väljer för byggnaden de två alternativen

- otäta ytterväggar $n_{50} = 1,5$ och
- täta ytterväggar $n_{50} = 0,75$.

Värderingarna otäta och täta är endast relativa och satta i förhållande till SBN:s värde. I detta fall förutsätts värdena inkludera eventuella tillufts- (spring-)ventiler.

Som exempel på uppmätta värden, n_{50} kan nämnas att vid en serie mätningar i Sundbybergsprojektet blev medelvärdet $n_{50} = 1,21$. Standardavvikelsen $s = 0,24$. Väggarna utgörs här av putsad lättbetong.

Till höger i FIGUR 8 illustreras n/p -kurvor för de två alternativa täthetsnivåerna. Läckkurvorna betecknas $(n/p)_a$ och $(n/p)_b$, där index a och b angav otäta respektive täta ytterväggar i överensstämmelse med littereringen i FIGUR 3.

Det kan påminnas att det otäta alternativet $(n/p)_a$ motsvarar den otäthet som normen angav under en första övergångsperiod. Från det kommentarerna till SBN nr 1977:3 kom ut och fram till 1 juli 1978 godtogs 50 % högre otäthet än den som senare kom att gälla - och som gäller nu.

TERMIKEN - EN OFRÅNKOMLIG FÖRETEELSE
I UPPVÄRMDA BYGGNADER

TERMISK DRIVKRAFT - EN FÖLJD AV TYNGDLAGEN

Termiska drivkrafter och luftströmning kallas ofta skorstensverkan och uppfattas i allmänhet på ett obestämt sätt som en följd av att varm luft stiger uppåt. Detta i och för sig är riktigt, men det är en fördel om man inser att det är frågan om en direkt följd av tyngdlagen.

FIGUR 9 visar en enkel byggnad med en öppning i taket och ett hål i väggen som i a) är blockerat av ett vattenlås i form av en vätskemanometer. Luften i byggnaden är varmare än uteluften. Lufttrycket på den yttre vätskeytan utgörs av tyngden av en yttre luftpelare från lufthavets övre gräns ned till vätskeytan.

Trycket på den inre vätskeytan är summan av tyngden av en yttre luftpelare från lufthavets övre gräns och ned till taknivån plus tyngden av en inre luftpelare från taknivån till vätskeytan.

Drivkraften utgörs av skillnaden mellan trycket på yttre och inre vätskeytor. Vid taknivån är trycken lika stora. Skillnaden i tryck blir produkten av höjden h och densitetsskillnaden mellan tyngre yttre och lättare inneluft.

Den termiska drivkraften betecknas \bar{p} och fås som:

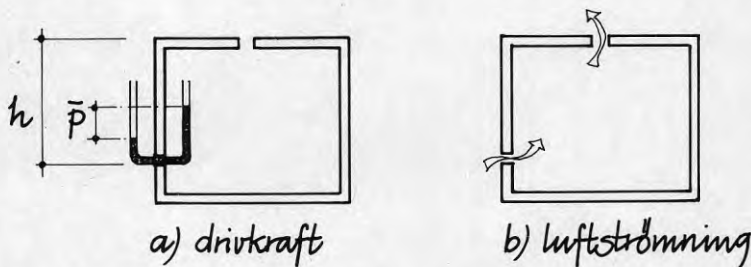
$$\bar{p} = \varrho_0 \cdot g \cdot 273 \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_r} \right) h \approx 0,043 (T_r - T_u) h \quad (7)$$

där ϱ_0 = densitet vid 0°C = $1,29 \text{ kg/m}^3$

T_u = utetemperatur (K)

T_r = rumtemperatur (K)

g = tyngdfaktorn (N/kg) (= m/s^2)



FIGUR 9 TERMISK DRIVKRAFT OCH LUFTSTRÖMNING

Hittills har inte någon luftströmning ägt rum eftersom drivkraften motverkas av den högre vattennivån i den inre skänkeln.

Om öppningen frigörs får vi en luftströmning som i b). Den ovan definierade drivkraften balanseras nu av tryckförlusterna eller tryckfallen i strömningsvägen.

Vi anknyter till vad som tidigare sagts om två otätheter i serie. Om läckkurvorna för de två hålen är kända kan beräkning av luftflödet ske på det sätt som tidigare redovisats i FIGUR 7.

Som sammanfattning av avsnittet kan konstateras att termiken är en direkt och fysikaliskt väl definierad följd av tyngdlagen. Inser man detta underlättas förståelsen.

VEDSPISEN SOM TERMISK MOTOR

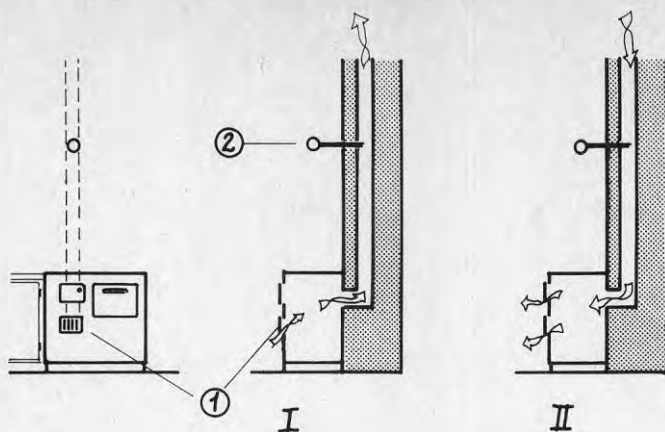
Praktisk erfarenhet av hanterandet av en vedspis kan ge en del tips om hur termiken fungerar i byggnader. Det finns nämligen påtagliga likheter. FIGUR 10 illustrerar en vedspis.

Två stabila funktionsstadier förekommer. Till vänster (I) visas spisen i användning då rumsluft strömmar in genom dragluckan, värms upp och i form av heta och lätta rökgaser stiger uppåt genom skorstenen. Även då elden slocknat men spis och rökkanal fortfarande är varma fortsätter luftcirkulationen.

Till höger (II) visas det omvända stadiet som också är stabilt och som råder när vi inte använt spisen på ett tag och spjället varit skjutet. Temperaturen i huset är högre än i rökkanalen. När vi öppnar spjället kommer tyngre luft från kanalen att ge upphov till en nedåtriktad luftströmning som gör att kall luft tränger in i huset genom spisen. Försöker vi elda får vi in röken. Det behövs en knuff i rätt riktning ("luntning") för att få det rättvända stadiet.

Vi skall senare visa att ventilationssystem - precis som spisen - kan ha två stabila funktionsstadier; ett rätt- och ett omvänt.

Avslutningsvis kan man, när det gäller spisens rättvända funktion, konstatera att flaskhalsen i strömningsvägen ligger i dragluckan. Rökkanalen har när spjället är öppet, väsentligt mindre motstånd än dragluckan. Därför reglerar vi lufttillförseln (och fyren) med dragluckan och inte med spjället. Öppet eller halvöppet spjäll spelar ingen större roll.



FIGUR 10 VEDSPIS 1 - DRAGLUCKA 2 - SPJÄLL

I Rättvänt stadium
 II Omvänt stadium

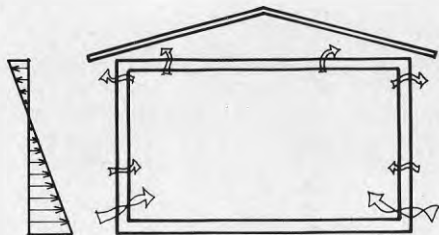
BYGGNADEN SOM TERMISK MOTOR

En byggnad skiljer sig från den täta behållaren i FIGUR 9 på så sätt att det förekommer otätheter litet här och var i höljet. FIGUR 11 avser illustrera en hallbyggnad, dvs en inre öppen byggnad som omges av ytterväggar, tak och golv.

Vid vindstilla, dvs då inga vindkrafter föreligger fungerar byggnaden så att man får en tryckbild som t ex den till vänster i FIGUR 11. I byggnadens undre del läcker kall luft in och i den övre delen läcker varm luft ut.

Den värme som tillförs byggnaden ger termiska drivkrafter och underhåller den luftströmning som uppträder på grund av dessa.

Byggnaden med sina otätheter och uppvärmningssystemet bildar liksom vedspisen en termisk motor.



FIGUR 11 TRYCKBILD OCH LUFTLÄCKNING FÖR EN INRE ÖPPEN BYGGNAD - VINDSTILLA

LIKHETEN MELLAN EN SJÄLVDRAGSVENTILERAD LÄGENHET OCH VEDSPISEN

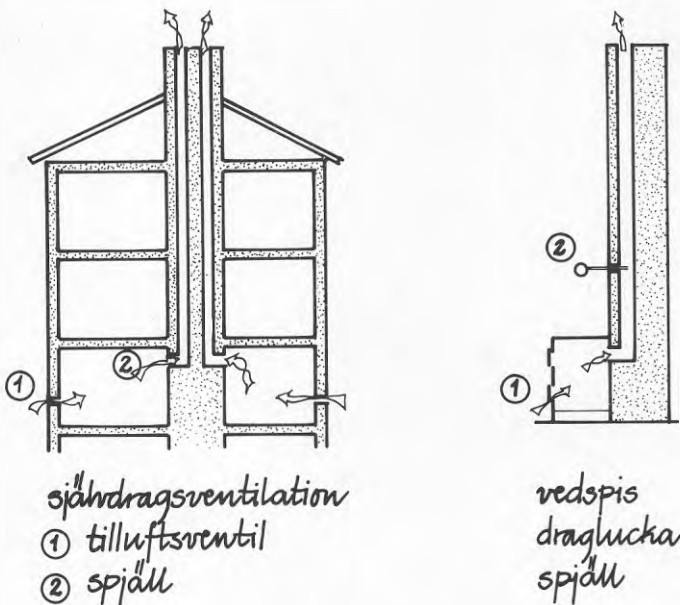
Analogin mellan byggnad och vedspis blir särskilt tydlig och användbar som tankemodell när det gäller funktionen hos en självdragsventilerad lägenhet.

Med självdragsventilation avses här den utformning som var vanlig på 40-talet och finns i ett stort antal befintliga hus. FIGUR 12.

Tilluften tas in genom ytterväggen, ofta genom springventiler under fönster. Evakueringen sker genom två, tre eller fler murade kanaler. Figuren visar två kanaler. Evakueringskanalerna är ofta försedda med enkla spjäll.

Till höger i figuren visas i avsiktligt vald skala en sektion genom den tidigare illustrerade vedspisen. Flaskhalsen i luftströmningen genom spisen är som nämndes tidigare dragluckan. Springventilen har motsvarande roll i lägenheten.

På samma sätt som vi reglerar fyren med dragluckan skall ventilationen regleras med ventilen. Behandlar vi spjället oklokt när det gäller vedspisen kan det gå illa. Likaså går det mindre bra om vi behandlar evakueringsspjällen i lägenheten på ett oklokt sätt. Detta berörs i ett senare avsnitt - "Omkastning av flödesriktning i kanaler".



FIGUR 12 LIKHETEN MELLAN SJÄLVDRAGSVENTILATION OCH VEDSPISEN

KARAKTERISTISKA EGENSKAPER HOS SJÄLVDRAGSVENTILATION

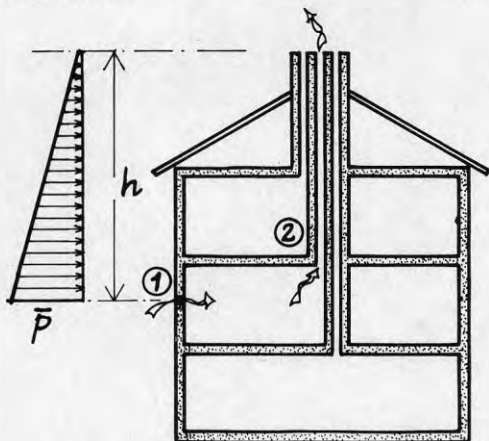
Vi har i Sverige ett stort bestånd av bostäder med självdragsventilation som under kommande år skall åtgärdas ur bl a energisynpunkt. Det gäller då att förstå hur husen fungerar. Detta är en anledning till att egenskaperna hos självdragssystem behandlas ganska utförligt i denna skrift.

Ett annat skäl är att kunskapen om hur självdragsventilation fungerar underlättar förståelsen även för hur byggnader med mekanisk ventilation fungerar. Det termiska tillskottet till mekaniska drivkrafter finns alltid. Dessutom fungerar mekaniskt ventilerade byggnader, t ex kontorshus, som självdragsventilerade under icke-driftstid, dvs när fläktarna är avstängda. Låt vara inte så renodlat som bostadshus. Vi behöver kunskap också om natt- och helgfallet för sådana byggnader. Detta sagt som påminnelse till läsare för vilka mekaniska lösningar av ventilation är ett måste.

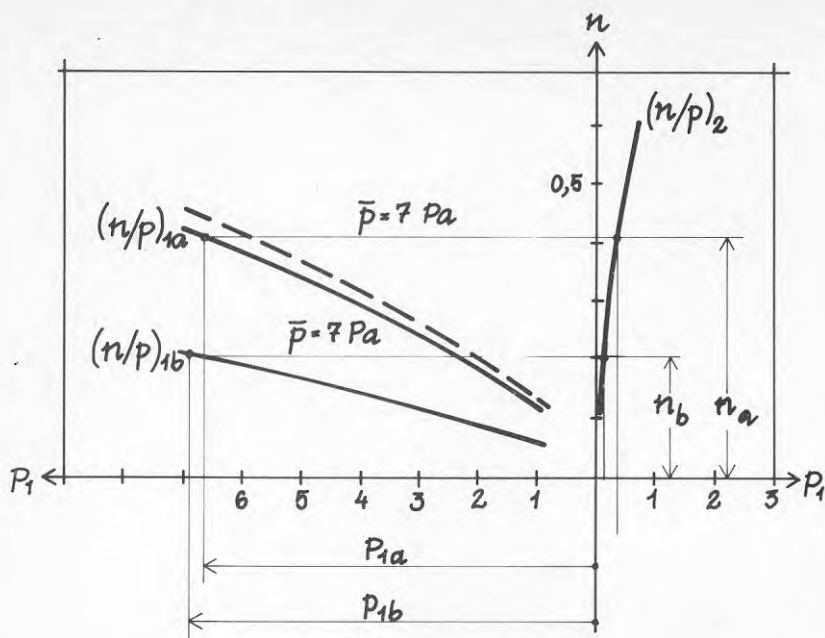
GRUNDLÄGGANDE FUNKTIONSSÄTT - VID VINDSTILLA

Vi betraktar på nytt lägenheten i flerbostadshuset, FIGUR 8. I FIGUR 13 anges de parallellkopplade otät-
heterna i ytterväggarna med 1 och de parallellkopplade kanalerna med 2.

Den termiska drivkraften, som tidigare definierats av uttrycket (7), ökar med höjden från skorstenstoppen och nedåt. Om vi känner n/p -kurvor för strömningsmotstånd 1 och 2 kan vi beräkna luftväxlingen på precis samma sätt som tidigare illustrerats i FIGUR 7. Att vi har luftväxling n (oms/h) i stället för flöde Q (m^3/h) utmed vertikalaxeln ändrar ingenting i för-
farandet.



FIGUR 13 FLERVÅNINGS BOSTADSHUS MED SJÄLVDRAGSVENTILATION



FIGUR 14 GRAFISK BESTÄMNING AV SJÄLVDRAGSVENTILATION

FIGUR 14 visar n/p -kurvor för strömningsvägarna 1 och 2 arrangerade på detta sätt. Kurvorna $(n/p)_{1a}$ och $(n/p)_{1b}$ är desamma som kurvorna i FIGUR 8. Den streckade kurvan strax ovan skall kommenteras senare. $(n/p)_2$ för kanalerna är baserad på erfarenheter av mätningar och är representativ för två parallellkopplade kanaler.

Vi antar att temperaturerna är $+21^{\circ}\text{C}$ inomhus och 0°C utomhus och att höjden från skorstenstoppen ned till strömningsvägen 1 är $h = 8$ m. Den termiska drivkraften blir

$$\bar{p} = 0,043 \cdot 8 \cdot 21 = 7 \text{ Pa.}$$

Tillämpning av det grafiska förfaringssättet från FIGUR 7 på kurvan $(n/p)_{1a}$ ger luftväxlingen $n_a = 0,4$ och tryckfallet över ytterväggen $p_{1a} = 6,6$ Pa. Om samma förfarande görs med det tätare alternativet - kurvan $(n/p)_{1b}$ fås $n_b = 0,2$ och $p_{1b} = 6,8$ Pa.

n/p -kurvorna i figuren har uppritats från följande samband:

$$n_{1a} = 0,12 \cdot p^{0,65}$$

$$n_{1b} = 0,06 \cdot p^{0,65}$$

$$n_2 = 0,7 \cdot p^{0,5}$$

Om vi antar att tryckfallet över ytterväggen är x Pa och att resten av tryckfallet, dvs $(7-x)$ Pa sker vid strömningen genom kanalerna blir ekvationen för flödesbalansen i fallet a:

$$0,12 \cdot x^{0,65} = 0,7 (7-x)^{0,5} \quad (8)$$

Värdet för x beräknas genom passning till $x = 6,6$ Pa, varefter luftväxlingen enkelt kan bestämmas till $n = 0,41$ oms/h.

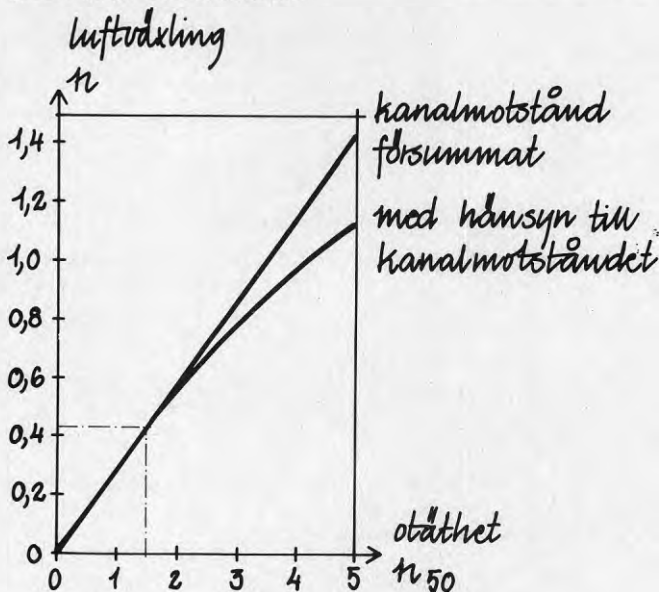
Om vi försummar kanalernas motstånd och låter hela drivkraften verka på n/p -kurva 1 fås endast ett litet fel i resultatet på grund av att väggarna utgör flaskhals i strömningsvägen.

Numeriskt får vi:

$$n = 0,12 \cdot 7^{0,65} = 0,43 \text{ oms/h.}$$

Resultatet blir ca 5 % större luftväxling än när hänsyn tas till kanalernas motstånd.

Som illustration anges i FIGUR 15 vad som händer om vi i exemplet låter tätheten hos ytterväggarna variera. Den horisontella axeln anger otäthet n_{50} . Den undre kurvan är beräknad med hänsyn till kanalernas motstånd. Vid beräkning av den övre kurvan här kanalernas motstånd försummas.



FIGUR 15 LUFTVÄXLING VID VARIERANDE TÄTHET n_{50} .
Temperaturskillnad inne/ute = 21°C .
Höjd från skorstenstopp = 8 m.

Vi ser att felet vid försummande av kanalernas motstånd blir mycket litet och att luftväxlingen då är mycket nära linjärt beroende av otätheten hos ytterväggarna, då ytterväggarna är någorlunda täta.

En korrektion

Vid såväl den grafiska som den numeriska redogörelsen har flödesbalansen i det tidigare inneburit att volymer kall inströmmade luft satts lika med volymen varm utströmmade luft. Detta (fel) har gjorts för att göra framställningen enkel.

Balanskvationen skall egentligen för att vara korrekt innebära att massflöden (kg luft per timme) in och ut skall vara lika stora. Nu är det emellertid praktiskt att fortsätta att "se luften" i volymsflöden. För att då skapa en korrekt balans måste hänsyn tas till att uteluften har högre densitet än rumsluften. Om vi då inför en "expansionsfaktor" för den inströmmade luften, får vi en flödesbalans som anger luftvolymen in och ut vid samma temperatur, nämligen innetemperaturen.

Expansionsfaktorn uttrycks av kvoten mellan innetemperaturen T_r och utetemperaturen T_u uttryckta i grader Kelvin (K). I exemplet får koefficienten värdet $(273+21)/(273+0) = 1,08$.

I och för sig kan korrektionen inrymmas i det grafiska förfarandet genom att använda den streckade kurvan som ligger 8 % högre än kurvan $(n/p)_{1a}$. Här är emellertid inte avsikten att utveckla en grafisk teknik som tillåter diverse hänsynstaganden. Den grafiska redovisningen är till för att underlätta "förståelsen" för grunderna.

I den fortsatta redogörelsen bortses därför helt från denna korrektionsfaktor. Den skulle bara "röra till" den grafiska framställningen.

Vid den numeriska lösningen innebär hänsynstagandet samma sak som att uttrycket för n_1 ändras från

$$n_{1a} = 0,12 \cdot p^{0,65} \text{ till} \\ n_{1a} = 0,12 \cdot 1,08 \cdot p^{0,65} = 0,13 \cdot p^{0,65}$$

En förnyad beräkning av den korrigerade funktionen ger resultatet $n = 0,44$ oms/h, mot tidigare $n = 0,41$.

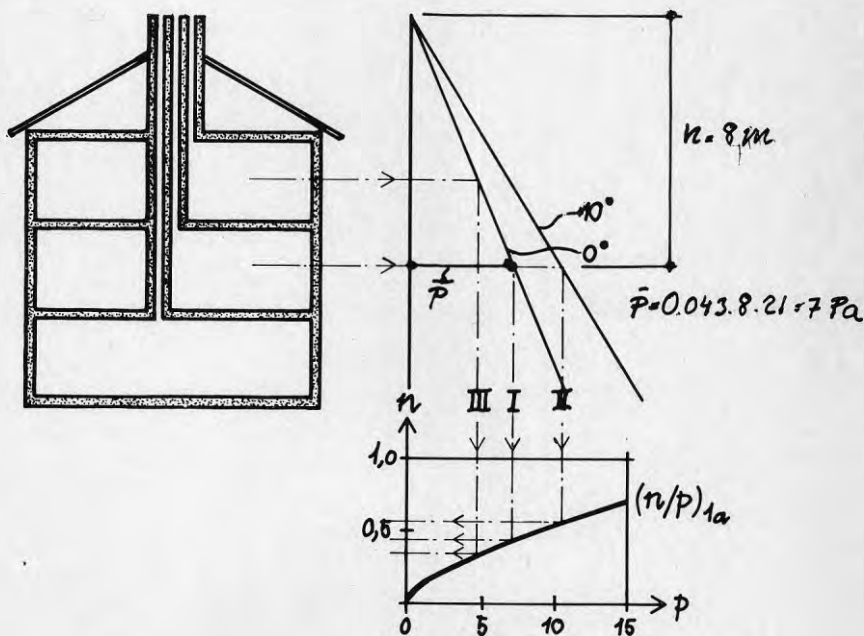
För att den numeriska framställningen inte "i sak" skall avvika från den grafiska bortses vi i fortsättningen från korrektionen även här.

Den läsare som tränger vidare och "greppar" systemtänkande och beräkningssätt torde knappast ha någon svårighet att vid problemlösning ta hänsyn till att alla inströmmade luftflöden som är kallare än rumsluften multipliceras med en "expansionsfaktor".

Försummandet av strömningsmotståndet i ventilationskanalerna ger i exemplet ett något för högt värde, ca 5 %, och försummandet av expansionsfaktorn ett 8 % för lågt värde. Sammantaget får vi ett fel av 3 %.

Variation med utetemperatur och våningsplan

Vi återgår till huset i det tidigare exemplet i FIGUR 16. Till höger anges termiska drivkraft vid 0°C och även vid -10°C . Beräkning av luftväxlingen kan ske mycket enkelt när vi antar att ytterväggarna tar upp hela tryckfallet. n/p -kurvan under tryckdiagrammet är densamma som $(n/p)_{1a}$ i FIGUR 14. Den beräkning som tidigare gjordes ersätts nu av konstruktionslinjen I i FIGUR 16. Luftväxlingen är $n = 0,4$. (Numerisk kontroll ger $n = 0,43$.)



FIGUR 16 VENTILATIONENS VARIATION MED UTETEMPERATUR OCH LÄGENHETERS HÖJDNIVÅ

I	Luftväxling vid utetemp	0°C i mittre lägenhet
II	"	-10°C "
III	"	0°C i övre lägenhet

Vid utetemperaturen -10°C fås luftväxling enligt konstruktionslinje II i diagrammet av $n = 0,55$. I diagrammet anges vidare luftväxlingen i den högst belägna lägenheten. (Lägenheterna antas vara lika täta.) Konstruktionslinje III ger $n = 0,32$ eller omkring 25 % lägre än i mittlägenheten.

Luftväxlingen varierar alltså avsevärt med såväl utetemperatur som våningsplan.

Redogörelsen för självdragsventilationen har hittills omfattat det grundläggande funktionssättet vid vindstilla. De presenterade arrangemangen av läckkurvor och drivkrafter har givit en möjlighet att tämligen enkelt kvantifiera flöden. I övrigt har inget nytt tillförts. Resultaten bekräftar endast en tidigare allmän (kvalitativ) uppfattning om egenskaper och funktionssätt.

För att ge innehåll åt FIGUR 3 kan vi mot bakgrunden av FIGURERNA 14, 15 och 16 och tidigare kommentarer göra följande sammanfattning när det gäller det grundläggande funktionssättet för system av kategorin S1.

S1 BETRÄFFANDE GRUNDLÄGGANDE FUNKTIONSSÄTT VID VINDSTILLA

- Ventilationen beror i hög grad av utetemperaturen. Lägre utetemperatur ger mer ventilation.
- Ventilationen beror på våningsplan. Lägre ner belägna lägenheter har mer ventilation än lägenheter högre upp, vid i övrigt lika förhållanden.
- Flaskhalsen i strömningsvägen - in genom väggen och upp genom kanalerna - utgörs av ytterväggarnas otätheter oavsett om de är otäta eller täta, dvs vare sig vi har systemet S1a eller S1b i FIGUR 3. Man inser då konsekvensen av en förändring från S1a till S1b, dvs en täthetsförbättring medför följande förändringar:

S1a --> S1b :

- Ökad täthet ger minskad ventilation. Sambandet är så gott som omvänt proportionellt.
- Ökad täthet påverkar inte nämnvärt tryckskillnaden över väggen (undertrycket i lägenheten).

OMKASTNING AV FLÖDESRIKTNING I KANALER

Vi har under vintrarna 81/82 och 82/83 konstaterat flera fall då man efter att ha tätat fönster fått klagomål på ökat drag i lägenheter. Kan det finnas fog för sådana klagomål?

Tidigare angavs att vedspisen har två stabila funktionsstadier; ett rättvänt och ett omvänt. Samma sak gäller självdragsventilation med den utformning (flera evakueringskanaler) som diskuteras här. Systemet kan ha ett stabilt funktionsstadium då luften går rätt väg och ett omvänt då den går uppåt i en eller några kanaler och nedåt i någon kanal. Dessa stadier benämns stadium I och stadium II.

Vi väljer lägenheten i det tidigare exemplet för att belysa vad som kan inträffa. FIGUR 17 visar schematiskt lägenheten och de två evakueringskanalerna. FIGUR 17 a) visar stadium I och b) visar stadium II.

Otättheterna i de omgivande väggarna symboliseras av läckstället 1. För att skilja evakueringskanalerna åt numreras de med 2 och 3. Under figurerna anges ekvationerna för respektive flödesbalans.

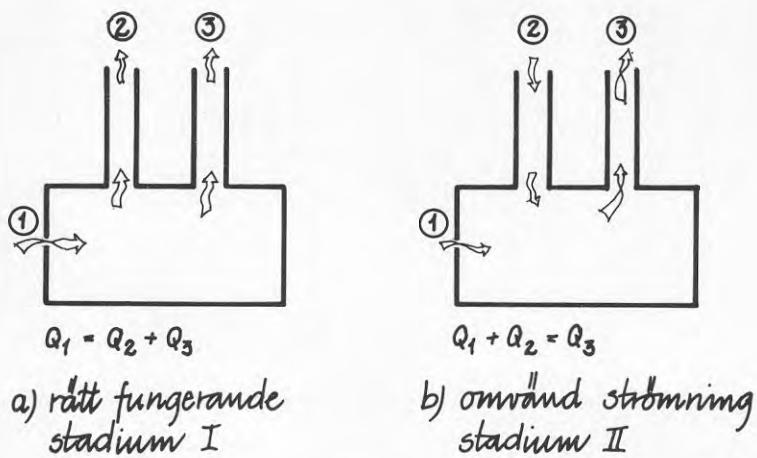
Hur sker omkastning från stadium I till stadium II

FIGUR 18 a) återger det rätt fungerande stadiet med det tillägget att vi fört in ett extra tillskott p_s till drivkraften i kanal 3.

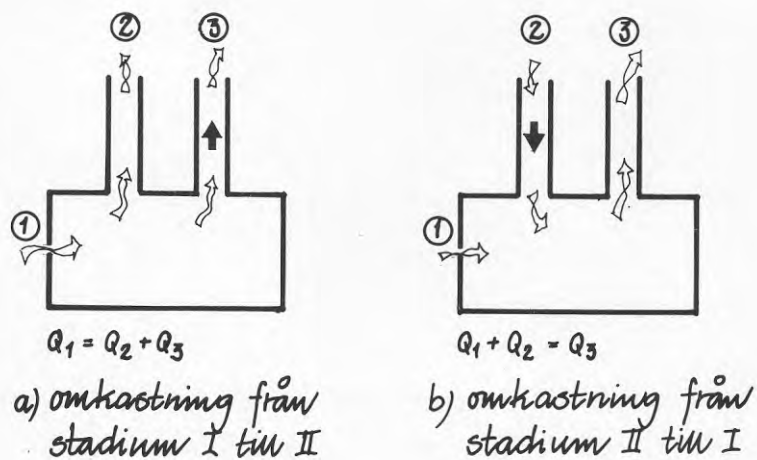
Detta ger en ökning av undertrycket i lägenheten och bidrar på så sätt till att öka luftströmningen 1 genom väggen men motverkar den uppåtgående luftströmningen genom kanal 2. Om störningskraften successivt ökas bringas luftströmmen att kasta om riktning.

Om kraften får verka under en tid, kommer den i verkligheten murade kanalen att kylas av den nedströmmande kalluften och om detta fortgår tillräckligt länge fortsätter den omvända strömningen även om störningen upphör. Tillståndet har blivit stabilt. Storleken av den störningskraft som krävs för att åstadkomma "snedtändning" kan inte anges utan hjälp av matematiken och beräkningar.

En sak kan man dock inse genom att utgå från ett ytterlighetsfall. Ju tätare ytterväggarna är desto lättare uppstår "snedtändningen". Om vi nämligen tänker oss att lägenheten har hermetiskt täta väggar, så slipper luften inte upp genom kanalerna. I detta läge behövs bara ett "oändligt litet" tillskott till drivkraften i den ena kanalen för att denna skall "ta över" och orsaka snedtändning i den andra.



FIGUR 17 VENTILATIONSSYSTEMET HAR TVÅ MÖJLIGA OCH STABILA FUNKTIONSTILLSTÅND



FIGUR 18 ARRANGEMANG FÖR ATT HÄRLEDA OMKASTNING FRÅN DET ENA STADIET TILL DET ANDRA

Närmast följer en härledning av storleken av störningskraften p_s .

Vi kan studera vad som sker vid snedtändning med utgångspunkt från flödesbalansen i FIGUR 17 a) och får

$$k_1 \cdot x^{\beta_1} = k_2 (\bar{p} - x)^{\beta_2} + k_3 (\bar{p} - x)^{\beta_3} \quad (9)$$

Om störningskraften p_s tillförs i kanal 3:

$$k_1 \cdot x^{\beta_1} = k_2 (\bar{p} - x)^{\beta_2} + k_3 (\bar{p} + p_s - x)^{\beta_3}$$

I det ögonblick luftströmmen i kanal 2 vänder är flödet $Q_2 = 0$, dvs $\bar{p} - x = 0$. Den andra termen bortfaller och vi får att snedtändning inträffar för:

$$k_1 \cdot \bar{p}^{\beta_1} < k_3 \cdot p_s^{\beta_3}$$

$$\frac{p_s}{\bar{p} \cdot \beta_1 / \beta_3} > \left(\frac{k_1}{k_3} \right)^{1/\beta_3} \quad (10)$$

Uttrycken (9) och (10) skall strax tillämpas för att beräkna storleken på störningskraften för lägenheten i "vårt" exempel.

Först kan det vara på sin plats med en kvalitativ kommentar till händelseförloppet. För detta ändamål räcker det med det förenklade uttryck som fås om exponenterna antas vara lika stora och lika med 0,5. Vi får då uttrycket

$$\frac{p_s}{\bar{p}} > \left(\frac{k_1}{k_3} \right)^2 \quad (10b)$$

Vi ser att risken för snedtändning blir större om p_s ökar eller om drivkraften \bar{p} minskar. Vi ser också att risken ökar när k_1 minskar, dvs när ytterväggarna görs tätare.

Storleken av störningskraften i det tidigare exemplet kan nu beräknas med utgångspunkt från flödesbalans-ekvationen (8). Som tidigare antas två evakueringskanaler med samma karaktäristik. Uttrycket (9) får då formen:

$$0,12 \cdot x^{0,65} = 0,35 \cdot \sqrt{7 - x} + 0,35 \cdot \sqrt{7 + p_s - x}$$

som enligt (10) ger

$$\frac{p_s}{0,65/0,5} > \left(\frac{0,12}{0,35} \right)^2 \quad \text{vilket ger } p_s > 1,475$$

Vi låter en temperaturhöjning T_s i kanal 3 ge upphov till störningskraften p_s .
Med hjälp av tidigare uttryck (7) fås:

$$p_s = 0,043 \cdot T_s \cdot h, \text{ som ger}$$

$$T_s = \frac{1}{0,043 \cdot h} \cdot p_s \quad (11)$$

I exemplet, dvs $h = 8$ m fås

$$T_s = \frac{1}{0,043 \cdot 8} \cdot 1,475 = 4,29 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Det innebär att en temperaturhöjning av mer än $4,3^\circ\text{C}$ i det rum varifrån kanal 3 utgår, ger snedtändning i kanal 2.

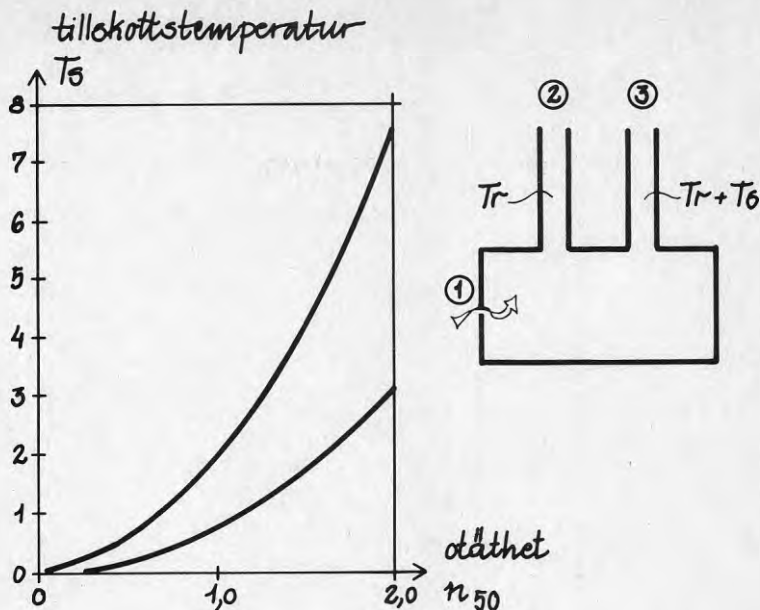
Om snedtändningen sker i början av uppvärmningssäsongen, då temperaturskillnaden ute/inne är omkring hälften så stor eller $2 \frac{1}{2} = 10,5^\circ\text{C}$, räcker det med en övertemperatur $T_s = 2,2$ ($\bar{p} = 7/2 = 3,5$).

För fullständighetens skull och som bakgrund till FIGUR 19 kombineras (10) och (11) till

$$T_s > \left(\frac{k_1}{k_3}\right)^{1/\beta_3} \cdot (0,043 \cdot h)^{\frac{(\beta_1/\beta_3) - 1}{\beta_3}} \cdot (T_r - T_u)^{\frac{\beta_1}{\beta_3}} \quad (12)$$

De läsare som har erfarenhet av stabilitetsberäkningar inom hållfasthetslära och bärverksstatik har insett att stabilitetsberäkningen i det föregående är "samma andas barn" som knäckningsberäkning.

FIGUR 19 illustrerar hur mycket högre temperatur T_s i kanal 3 behöver vara för att luften skall börja strömma nedåt i kanal 2. Den övre kurvan avser temperaturskillnaden 21°C inne/ute och den undre avser halva temperaturskillnaden $T_r - T_u = 10,5^\circ\text{C}$. Detta motsvarar ungefär tillståndet i början av eldningssäsongen då risken för snedtändning är stor. Om den uppträder då och blir stabil, så blir den "stabilare och stabilare" ju mer utetemperaturen sedan sjunker. Av figuren framgår att det för någorlunda täta väggar behövs mycket måttlig temperaturstörning för att snedtändning skall ske.



FIGUR 19 ERFORDERLIG TILLSKOTTSTEMPERATUR I KANAL 3 FÖR ATT LUFTEN I KANAL 2 SKALL BÖRJA STRÖMMA BAKVÄGEN.

Övre kurva $T_r = 21^{\circ}\text{C}$, $T_u = 0^{\circ}\text{C}$

Nedre kurva $T_r = 21^{\circ}\text{C}$, $T_u = 10,5^{\circ}\text{C}$

Hur stor blir luftväxlingen i stadium II ?

I tidigare FIGUR 15 redovisades luftväxlingen som funktion av otätheten hos omgivande väggar. Diagrammet avsåg temperaturerna 21°C inne och 0°C ute samt vindstilla.

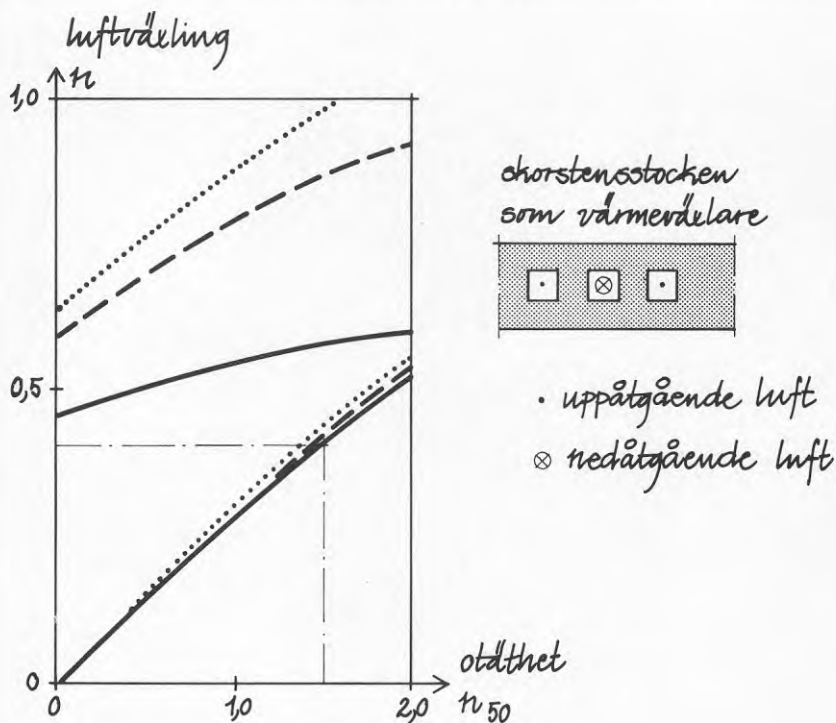
Av det föregående avsnittet framgick att risken för omkastning från stadium I till II ökar snabbt med ökande täthet. Det innebär att tätning - för att spara energi - ökar risken för snedtändning.

Under den nu gångna vintern har inom "Sundbybergsprojektet" påträffats flera exempel då tätningsåtgärder medfört omkastning till stadium II. Oftast fungerar kanalen i badrum rätt under det att endera kökskanalen eller någon av sovrumskanalerna har omvänd strömning.

Frågan är hur luftväxlingen ändras vid omkastning till omvänt tillstånd.

FIGUR 20 visar resultat från beräkning av luftväxling vid rättvänt tillstånd respektive omvänd flödesriktning i en av kanalerna. För två kanaler som i tidigare exempel gäller heldragna kurvor. Tidigare beräknades luftväxlingen till $n = 0,4$ vid otätheten $n_{50} = 1,5$ hos ytterväggar. Vi återfinner detta med hjälp av konstruktionslinjerna i figuren. Streckade kurvor gäller om lägenheten hade haft tre evakueringskanaler och prickade om den haft fyra kanaler. I alla tre fallen uppträder den omvända strömningsriktningen i endast en av kanalerna.

Beräkningen avser som tidigare temperaturskillnad 21°C inne/ute och avser stationärt temperaturtillstånd vid jämvikt. Beräkningen bygger på en kombination av flödesbalans med de termiska drivkrafter som fås för temperaturer vid värmebalans i den värmexlaren som skorstensstocken utgör. Omgivande kanaler med varm luft och skorstensstockens omgivande yta tillför värme till den kalla luftström som strömmar ner genom en kanal. Värmexlaren illustreras till höger i figuren.



FIGUR 20 LUFTVÄXLING VID STABILA JÄMVIKTSTILLSTÅND I LÄGENHETEN I EXEMPLET

Temperaturskillnad $T_r - T_u = 21^{\circ}\text{C}$

Den undre heldragna kurvan avser stadium I
 " övre " " " stadium II
 För tre kanaler gäller streckade kurvor
 " fyra " " " prickade "

Av figuren framgår att luftväxlingen i stadium I inte påverkas nämnvärt av om lägenheten har 2, 3 eller 4 kanaler på grund av att ytterväggarnas otätheter utgör "flaskhalsen" i sammanhanget. Vi konstaterar också att luftväxlingen i stadium II är avsevärt större. I verkligheten har vi oftast tre eller fyra evakueringskanaler. Vid en otäthet $n_{50} = 1$ ökar luftväxlingen ca 2,5 ggr vid övergång från stadium I till stadium II.

Detta innebär att man löper påtaglig risk för ökad energiförbrukning om man tätar utan att ha kontroll över vad som kan hända.

Utöver den ökade luftväxlingen som kräver mer värmeförsörjning tillkommer att luften i den omvänt fungerande kanalen är obehagligt kall. Man har fått påtagligt tjyvdrag - inte från yttervägg utan från kanalen i lägenhetens inre.

Hur kan man återställa den rätta funktionen ?

Om man nu råkat få det omvända tillståndet gäller det att återställa stadium I och att veta hur. FIGUR 18 b) återger det omvända stadiet. Den totala drivkraften för strömningen in genom yttervägg och upp genom kanal 3 är \bar{p} . I kanal 2 är luften kallare och tyngre, vilket representeras av en motverkande kraft, p_m .

För en kvantitativ undersökning av vad som händer vid övergång från stadium II till stadium I måste vi ta till beräkningar som hjälpmedel på ungefär samma sätt som tidigare för omkastningen från stadium I till II.

I likhet med detta kan vi emellertid även här föra ett kvalitativt resonemang kring FIGUR 18b och samtidigt ha i minnet att murverket i kanal 2 är nedkyllt om stadiet varit stabilt under längre tid.

- Om man öppnar ett fönster tvingas luften att få rätt väg i kanalen. Effekten är endast temporär.
- Man kan motverka kraften p_m genom att värma luften i kanalen. Även i det fallet är effekten temporär. (Uppvärmning under 15 minuter med en hårtork placerad över evakueringsgallret har provats men visat sig vara otillräckligt. Strax efter det hårtorken avlägsnas återkommer den omvända strömningsriktningen.)
- Det fruktbara angreppssättet kan återigen liksom då snedtändningen belystes anas med hjälp av ett ytterlighetsfall. Om kanal 3 blockeras inser man att luften inte har någon annan möjlighet än att gå i rätt riktning uppåt genom kanal 2. Blockeringen av kanal 3 gör emellertid att den börjar fyllas med kall uteluft och kyls ner. Resultatet blir att vi efter att avlägsna blockeringen åter har stadium II fast denna gång med omvänd strömningsriktning i kanal 3. Lös-

ningen ligger istället i att göra en delvis tätning av evakueringsgallret till kanal 3, så att luften i kanal 2 vänder och går rätt väg och att luft fortfarande går rätt väg genom kanal 3. Efter en à två veckor kan förtäckningen av kanal 3 avlägsnas, var- efter stadium II har återställts. Om det finns eva- kueringsspjäll använder man sig av detta för att å- stadkomma återställande av rätt funktion.

Flödesbalanskvationen för FIGUR 18 b) blir om expo- nenterna satts ($\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0,5$):

$$k_1 \sqrt{x} + k_2 \sqrt{\bar{p} - p_m - x} = k_3 \sqrt{\bar{p} - x}$$

Gränsfallet till stadium I kännetecknas av att flödet i kanal 2 är noll, vilket sker för $x = \bar{p} - p_m$.

Flödena blir då:

$$Q_1 = k_1 \sqrt{\bar{p} - p_m}, \quad Q_2 = 0 \quad \text{och} \quad Q_3 = k_3 \sqrt{p_m}$$

Omkastning sker då $Q_1 > Q_3$ (kanal 2 måste börja hjälpa 3:an att evakuera luft). Detta uttrycks av olikheten

$$k_1 \sqrt{\bar{p} - p_m} > k_3 \sqrt{p_m}$$

$$\frac{\bar{p}}{p_m} > 1 + \left(\frac{k_3}{k_1}\right)^2$$

Det tidigare beskrivna sättet att återställa stadium I går sålunda ut på att gradvis täta kanal 3, dvs minska värdet för k_3 till dess $HL < VL$.

Det står klart att man inte kan förvänta sig av de bo- ende att de skall kunna kontrollera och återställa eventuellt felfungerande ventilation. I varje fall inte utan samarbete med och hjälp av fastighetsskötare som behärskar problemen. I verkligheten har man tre eller fyra kanaler, varav en har snedtänt. Detta inne- bär att situationen är litet mer komplicerad än vad som beskrivits här.

Vad som skulle krävas är rutinmässigt återkommande kontroll och åtgärdande av kunnig personal.

Den konventionella självdragsventilationen är mycket känslig för störningar av detta slag. Detta beror på den utveckling som skedde då vi övergick till central- värme och då det som kunde ha blivit en bättre funge- rande naturlig ventilation istället gick mot en ut- formning med flera evakueringskanaler som lätt blir antagonister.

Som sammanfattning på detta avsnitt återges inramat för anknytning till FIGUR 3 konsekvensen av steget Sl a - Sl b:

Sl a - Sl b

BETRÄFFANDE OMKASTNING AV FLÖDESRIKTNING
I KANALER

I och med att ytterväggen blir tätare ökar risken för att luftströmningen i någon kanal kastas om. Kanalen kommer att fungera som tilluftskanal. Om detta sker i början på uppvärmningssäsongen och inte återställs blir det omkastade stadiet stabilt.

Konsekvensen blir olägenheter i form av tjuvdrag och en energiförbrukning som kan vara flera gånger större än den man hade före tätningarbetet. Det går att återställa den rätta funktionen men kräver kunskap och engagemang som de boende inte har.

STÖRNING AV VIND

För att skapa grundläggande förståelse för principiella egenskaper har redogörelsen hittills endast omfattat termiska drivkrafter. Naturligtvis påverkas luftväxlingen i en självdragsventilerad byggnad av vind.

För att ta hänsyn till kombinerad inverkan av termik och vind krävs oftast tillgång till en fullständigare beräkningsmodell, jfr FIGUR 1.

Emellertid kan man när det gäller just självdragsventilerade hus belysa vindens störande inverkan på luftväxlingen på ett förenklat sätt. Denna möjlighet sammanhänger med evakueringskanalernas ringa motstånd i luftens strömningsväg. Ett exempel på detta angavs i FIGUR 15, där det framgår att man inte får särskilt stort fel om kanalernas motstånd försummas.

Man stöter ofta på uppfattningen att det blåser "rakt igenom hus" på så sätt att man får inläckning på lo-vartsidan och utläckning på läsidan.

Vi skall i detta avsnitt se litet närmare på vad som händer då det från att vara vindstilla uppträder blåst.

Hänsyn till vindverkan tas vanligen genom införandet av formfaktorer. De i Svensk Byggnorm angivna formfaktorerna är avsedda för dimensionering med hänsyn till vindlast och är därvidlag på säkra sidan och något för höga för vårt ändamål.

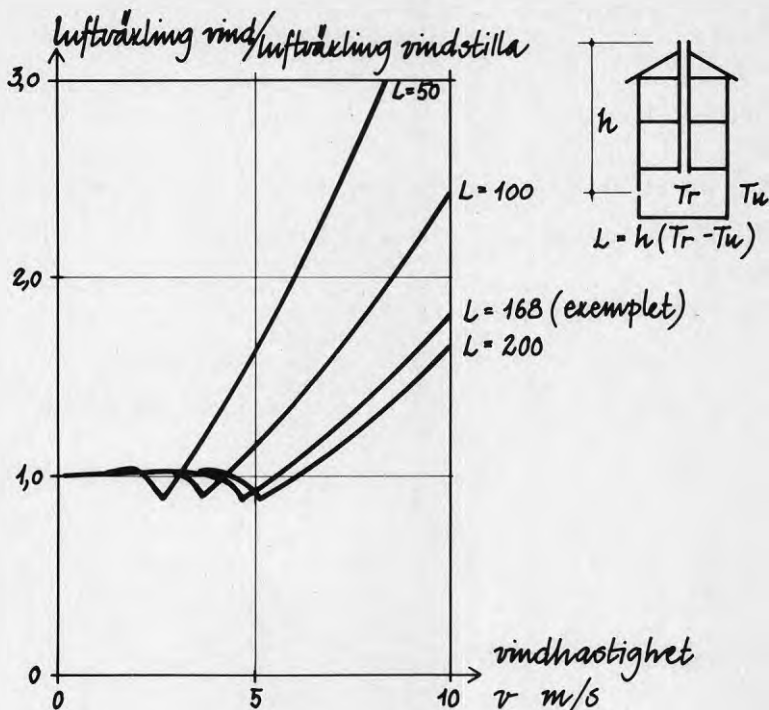
Kunskapen om formfaktorers storlek är ofullständig liksom över huvud taget kunskapen om det mikroklimat som uppträder av vindpåverkan. Resonemangen och bakomliggande beräkningar i detta avsnitt gör därför inte anspråk på att presentera korrekta korrektionsfaktorer. De skall i stället uppfattas som ett sätt att komma åt huvuddragen i störningsmönster av vindpåverkan.

Störning av vindanblåsning mot väggar

FIGUR 21 visar resultat från beräkning av luftväxling vid varierande vindhastighet utmed den horisontella axeln. Den vertikala anger förhållandet mellan luftväxling vid anblåsning och luftväxling vid vindstilla. De fyra kurvorna i diagrammet anger storheten L , som är produkten av skorstenshöjd h och temperaturskillnad inne/ute, dvs $L = (T_r - T_u) \cdot h$ i uttrycket (7). En av kurvorna avser det tidigare exemplet, $L = 8 \times 21 = 168$.

Vid beräkningen har använts formfaktorerna 0,7 för lovartvägg och -0,5 för lävägg. Värdena motsvarar normens värden för vindlaster.

Storleken av luftväxlingen vid vindstilla beror som tidigare visats av otätheten. Däremot påverkas störningen av vind - kvoten mellan luftväxling vid vind och vid vindstilla - inte av otäthetsnivån.



FIGUR 21 INVERKAN AV ANBLÄSNING PÅ VÄGG

Inverkan uttrycks som en funktion av $L =$ skorstenshöjd \times temperaturskillnad inne/ute. Formfaktorer 0,7 för lovertvägg, -0,5 för lävägg och 0 för skorstenstopp. Vertikalaxeln anger förhållandet mellan luftväxling vid vind och vid vindstilla.

Vi ser att luftväxlingen inte påverkas nämnvärt av vinden förrän denna uppnår en viss nivå. För $L = 168$ fås ett minimum vid vindhastigheten $v = 4,7$ m/s, varefter den ökar för att vid 10 m/s vara 1,8 ggr större än vid vindstilla. (Det innebär 1,8 ggr det värde $n = 0,4$, som beräknades i anslutning till FIGUR 14).

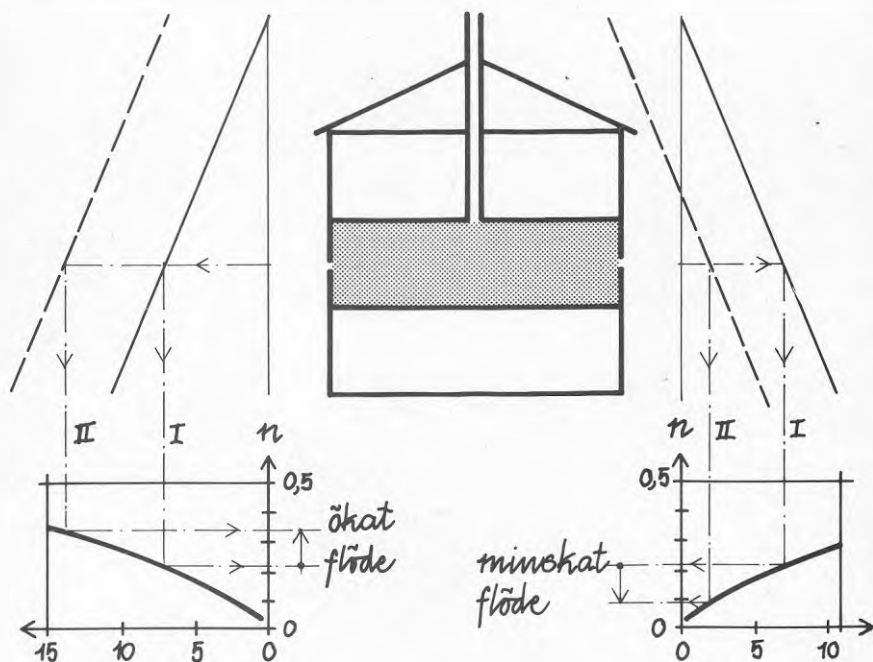
Den distinkta minimipunkten för kurvan (kurvorna) uppträder på grund av att väggens läckageställen koncentrerats till en och samma nivå. Om otätheterna är fördelade i lägenhetens höjdedel fås en mer avrundad sänka på kurvan. Längst till vänster - för $v = 0$ - är inläckningen lika stor genom båda väggarna. För ökande vindhastighet ökar inläckningen genom lovertväggen samtidigt som den minskar genom läväggen. Summan av flödena är ungefär konstant.

Vid minimipunkten ändrar luftströmmen i läväggen riktning så att vi för högre vindhastigheter får en utströmning av luft. Härvid uppträder en snabb tillväxt av luftväxlingen med ökande vindhastighet. Ju större den termiska drivkraften är desto högre vindhastighet krävs för att det skall blåsa ut genom läväggen. Anledningen till att luftväxlingen till en början minskar med ökande vindhastighet kan vid första påseende verka förbryllande men kan förklaras på följande sätt.

Vi återvänder till den tidigare studerade lägenheten och skall studera vad som händer med hjälp av FIGUR 22.

Den heldragna tryckbildnen återger samma förhållande som i tidigare FIGUR 16. Skillnaden är, att ytterväggarnas otätheter har här fördelats med häften på den vänstra och hälften på den högra ytterväggen.

Vid termisk drivkraft 7 Pa blir luftläckningen 0,2 oms/h för vardera väggen, dvs totalt $n = 0,4$ oms/h eller samma värde som framräknats tidigare. Konstruktionslinje I anger detta.



FIGUR 22 LUFTVÄXLING AV TERMISK OCH AV TERMISK OCH VIND FRÅN VÄNSTER.

Heldragen tryckprofil av termik

Streckad tryckprofil av termik plus vind från vänster

Formfaktor 0,7 för lovartvägg och $-0,5$ för lävägg

Vi tänker oss nu vind från vänster som ger ett tillskott till trycket på den vänstra väggen och en minskning av trycket på den högra motsvarande formfaktorerna $+0,7$ och $-0,5$.

Vi får en tryckbild som anges med streckade linjer och motsvarande flöden som anges med streckade konstruktionslinjer II.

Det ökade tryckfallet över lovartväggen ger en ökning av luftflödet genom den vänstra väggen och det minskade tryckfallet över läväggen en minskning av flödet genom den högra. Resultatet blir i ett hastighetsintervall en mindre luftväxling än vid vindstilla. Anledningen är att n/p -kurvan är krökt och att tryckökningen till vänster sker i ett flackare område än minskningen till höger.

Av det föregående framgår att den termiska drivkraften har en stabiliserande inverkan. Ju högre värde för parametern L , dvs produkten av temperaturskillnad och skorstenshöjd, desto högre vindhastighet behövs innan man får den snabbt ökande luftväxling som uppträder efter det luft börjat blåsa ut genom läväggen.

Hade lägre och kanske mer realistiska värden använts för formfaktorerna hade minimipunkterna förskjutits åt höger, dvs givit ännu högre grad av stabilitet gentemot genomblåsning.

Vindanblåsningen mot byggnadens väggar ger alltså inte a priori upphov till "blåst genom byggnaden", som man ofta tror, och inte heller till någon nämnvärd ökning av luftväxlingen annat än för relativt höga vindstyrkor.

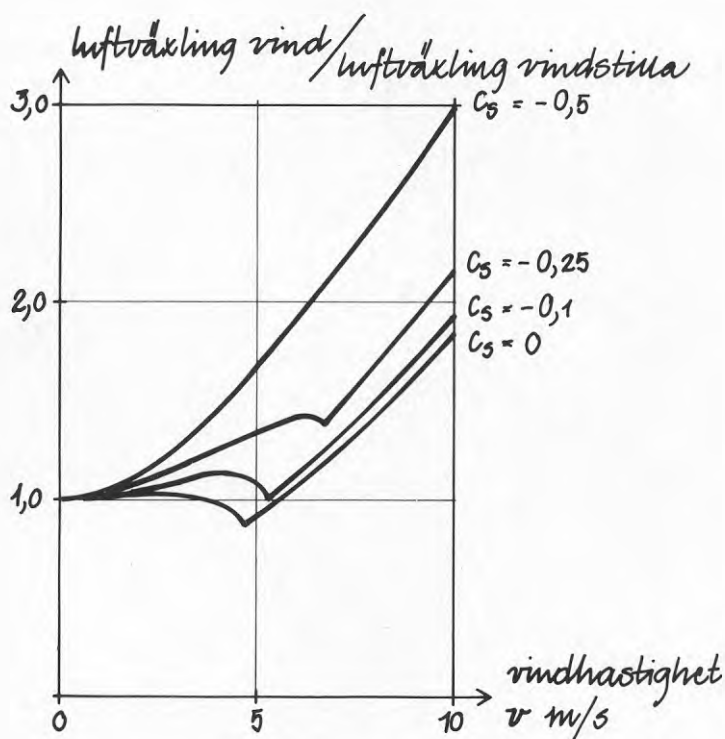
Störning av vindsug ovan tak

I det föregående har ingen hänsyn tagits till vindens inverkan på evakueringskanalernas mynningar. I FIGUR 23 redovisas resultat av motsvarande beräkningar under antagande om vindsug på kanalmyningar. Återigen betraktas det tidigare exemplet. Med formfaktor $c_s = 0$, dvs ingen inverkan av vind, fås identiskt samma kurva som för $L = 168$ i FIGUR 21. För formfaktor $c_s = 0,1$, $-0,25$ och $-0,5$ fås de övre kurvorna i diagrammet.

I motsats till anblåsningen mot väggarna har vindsug på kanaltoppar en märkbar inverkan på luftväxlingen. Däremot gäller fortfarande att det krävs höga vindstyrkor för att det skall strömma luft ut genom läväggen. Den lokala minimipunkten hos kurvor med $c_s = 0,1$ och $c_s = -0,25$ anger de hastigheter då det börjar strömma ut luft genom läväggen. För kurvan $c_s = -0,5$ uppträder inte genomblåsning ens vid höga vindstyrkor.

Det förtjänar påminnas om att vindens inverkan är ofullständigt utredd. Här har vinden betraktats som en statisk påverkan av konstant vindhastighet och vindriktning (konstanta formfaktorer).

I verkligheten är förhållandena väsentligt mer komplicerade.



FIGUR 23 INVERKAN AV VIND I EXEMPLET.

Formfaktorer 0,7 för lovartvägg och $-0,5$ för lävägg. Fyra värden för formfaktor c_s vid skorstenstopp.

Som sammanfattning för anknytning till FIGUR 3 återges:

S1 BETRÄFFANDE STÖRNING AV VIND

- Det undertryck som uppstår i lägenheten skapar stabilitet mot genomblåsning. Den stabiliserande effekten tilltar med ökad skorstenshöjd och temperaturskillnad inne/ute.
- Vid låga vindstyrkor påverkas luftväxlingen ganska litet av anblåsningen mot väggar (tryck på lovartvägg och undertryck på lävägg). Först vid högre vindstyrkor läcker luft ut genom läväggen, varefter luftväxlingen ökar med tilltagande vind.

Störningsmönstret påverkas inte av tätheten hos väggarna.

- Däremot påverkas luftväxlingen i hög grad av om det uppträder undertryck av vind vid ventilationsskorstenarnas mynningar ovan tak. Någon utläckning genom läväggen sker dock inte heller i detta fall för annat än höga vindstyrkor.
- Om det uppträder övertryck vid kanalmyningarna ovan tak blir förhållandena annorlunda. Det stabiliserande undertrycket minskar och luftväxlingen ökar.

RÅD OCH REKOMMENDATIONER FÖR ENERGISPARVERKSAMHETEN

Av det föregående torde ha framgått att tätning av ytterväggar i självdragshus ger minskad luftväxling och minskad energiförbrukning. Detta förutsätter att lägenheterna har mer än tillräcklig ventilation. Hur detta kan konstateras anges i nedan inramade rekommendation av tillvägagångssätt för systemkategori S1 i FIGUR 3. Var på det klara med att tätningen lätt kan ge motsatt effekt, nämligen tjuvdrag, ökad energiförbrukning - och dåligt rykte åt energisparandet.

S1 BETRÄFFANDE TÄTNINGSÅTGÄRDER FÖR
ENERGISPARANDE

Ventilationen i undre våningar är högre än i högre upp belägna. Genom mätningar kan man få en uppfattning att ev åtgärder inte sker till priset av dålig ventilation.

Mätningförfarande och kriterier:

- Mätningar företas under vinterhalvåret vid relativt låg vind.
- Mät temperaturen utomhus = T_u °C.
- Mät och summera flöden genom evakueringsdon = Q_m .
- Mät lägenhetens volym, V, från ritningar eller på plats.
- Beräkning luftväxling vid mättillfälle $n_m = Q_m/V$.

Kriterium:

Bedöm lägsta godtagbara luftväxling n_v (t ex 0,5 oms/h som skall tillgodoses så snart utetemperaturen är lägre än +12°C. (Vid högre temperatur accepteras fönstervädring.) För lägenheten gäller att förutsättningar finns att spara energi om följande villkor uppfylls.

$$n = n_m \times \frac{9}{21 - T_u} > n_v$$

- Var medveten om att tätningsåtgärder ökar risken för snedtändning av någon kanal och den ökade energiförbrukning och obehag som kan uppträda.
- Var medveten om att de boende eller fastighetsförvaltningen idag inte klarar att återställa ett system som snedtänt och blivit stabilt.

ERFARENHETER OCH MÖJLIGHETER TILL FÖRBÄTTRING I BEFINTLIGA SYSTEM

Den allmänna uppfattningen om självdragsventilation är att den fungerar dåligt. Man bör vara medveten om att subjektiva uppfattningar om ventilationens kvalitet bygger på principen "hälsan tiger still". Vid väl fungerande ventilation är allt gott och väl. Man blir medveten om ventilationen när den i något hänseende fungerar dåligt, t ex dålig lukt, drag och störande ljud.

När det gäller självdragsventilation så förekommer såväl bra som dåligt fungerande ventilation. Detta kan förekomma i samma hus och till och med i samma trappuppgång där lägre lägenheter har bra luft och högst upp belägna besvärar av dålig lukt.

Oavsett detta gäller att den utformning av självdragsventilation, som beskrivits här, medför problem.

Tidigare nämndes att självdragsventilationen fick en olycklig utformning då man vid övergången till centralvärme försåg varje lägenhet med flera evakueringspipor. I princip utfördes en kanal på varje ställe där man tidigare hade en kakelugn med tillhörande rökkanal.

Man var på 40-talet inne på en utvecklingslinje med en kanal från varje lägenhet, som kunde ha resulterat i avsevärda förbättringar. Detta kan utläsas av årsberättelser från Stockholms stads byggnadsnämnd. Utvecklingen avstannade emellertid av flera skäl och vi övergick på 50-talet i Sverige till mekanisk ventilation. De spirande kunskaper som fanns beträffande naturlig ventilation föll i glömska.

Styrning av ventilationsflödet

För att åstadkomma en lika stor ventilation i lägenheten oavsett våningsplan och hålla samma ventilation oberoende av utetemperatur finns redan ett system i marknaden

SPAR-VEN^R

Öppningsarean anpassas till lägenhetens höjdnivå. En bimetallstyrd klaff öppnar och stryper öppningen vid ökande respektive sjunkande utetemperatur. Ventilen placeras i överkant på fönsterbågar.

Ventilen får ses som ett första försök att åstadkomma en styrning av ventilationsnivån i bostadshus med konventionella självdragssystem.

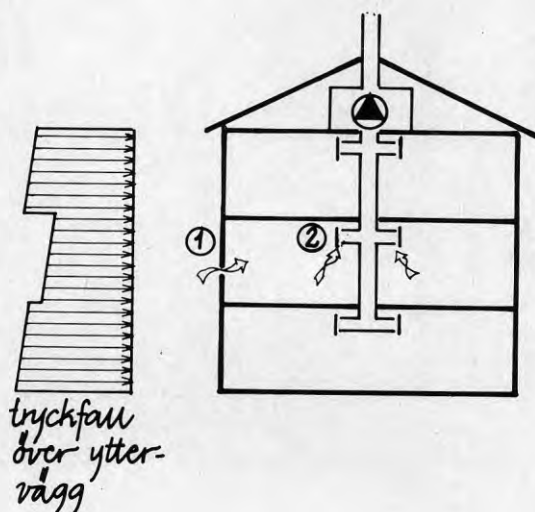
Vad som behövs utöver styrning med avseende på höjdläge och temperatur - tillsammans den termiska drivkraften - är en eliminering av vindtryck vid kanaler-
nas övre mynnningar. Arbete pågår med att utveckla tekniken för att komma tillrätta med denna störning som i anslutning till FIGUR 23 konstaterades vara väsentlig.

Däremot är störningen av anblåsning mot väggarna sannolikt ett mindre problem än man trott när det gäller total luftväxling och energibehov. Dock får man inte glömma de obehag som uppträder vid blåst på grund av ökad luftinströmning genom lovertväggar.

KARAKTÄRISTISKA EGENSKAPER HOS
FRÅNLUFTSVENTILATION

Frånluftsventilation bygger på fläktevakivering av ventilationsluft. Tilluftsmängden bestäms i stor utsträckning av frånluftsfläktens och kanalsystemets karaktäristika och tas in genom ev tilluftsventiler och oavsiktliga otätheter i höljet. FIGUR 24 visar huset från tidigare exempel, men här försett med frånluftsventilation. På vinden finns en fläkt eller sugkammare från vilken luften evakueras. Från denna och nedåt leder en vertikal kanal med förgreningar i varje lägenhet. Moderna anläggningar har ett anseeligt undertryck i fläktkammare och kanaler och ett likaså anseeligt tryckfall över evakueringsdonen. Äldre anläggningar arbetar med mindre undertryck och fungerar mer som "förstärkta självdragssystem".

Innan vi går in på att belysa samspelet mellan byggnaden och ventilation kan det vara lämpligt att litet närmare beröra fläktkrafterna i FIGUR 1 och visa hur de skall hanteras för det syfte som är aktuellt här.



FIGUR 24 BYGGNADEN FÖRSEDD MED FRÅNLUFTSVENTILATION

FÖRBEREDANDE KLARLÄGGANDEN

Allra först skall den föregående hanteringen med två n/p-kurvor vända rygg mot rygg och påverkande drivkraft av termik rekapituleras och begreppsmässigt förankras till definitionerna från FIGUR 1.

- Det läckande systemet i FIGUR 1 representeras grafiskt av de två n/p-kurvorna i FIGUR 25a.
- Kraftsystemets termik representeras på motsvarande sätt av FIGUR 25b.
- I anslutning till FIGUR 1 angavs att beräkning av flöden sker genom att lösa det inre obekanta jämviktstrycket med hjälp av en flödesbalansekvation så att in- och utströmmande luftmängder är lika stora.

Den grafiska motsvarigheten får vi genom att kombinera FIGURERNA 25a och b, som därför måste ha samma skala utmed horisontalaxeln.

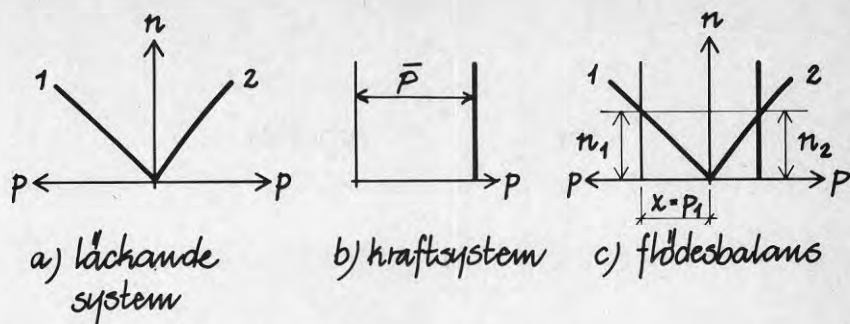
Vi tänker oss för enkelhetens skull att kraftsystemet är uppritat på transparent papper och lägger b) ovanpå a). Flödesjämvikt kräver en inbördes horisontalförskjutning så att luftflödet in = luftflödet ut. Resultatet illustreras i c). Den erforderliga horisontalförskjutningen mellan vertikalaxlarna representerar just det inre jämviktstrycket i lägenheten som i vårt enkla fall är detsamma som tryckfallet över otäthet 1. Vi har då genomfört den grafiska motsvarigheten till en numerisk passningsberäkning.

Hantering av fläktkrafter

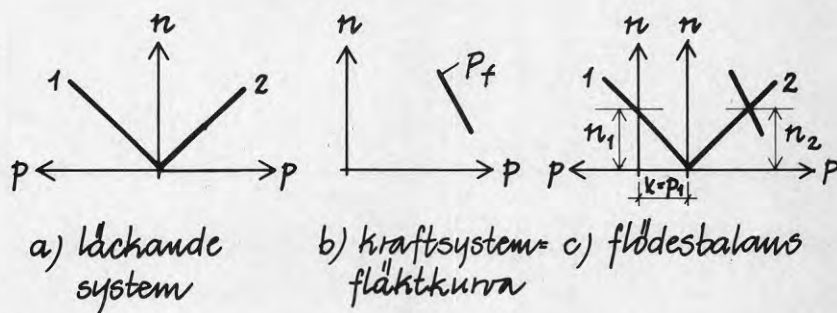
I det föregående exemplet var drivkraften konstant, dvs opåverkad av flödet. När det gäller fläktkrafter är detta inte fallet. Fläktkraften utgörs av den totaltrycksförhöjning som åstadkommes av en given fläkt med givet varvtal. Som framgår av FIGUR 1 är fläktkraften beroende av flödets storlek. Detta medför dock inga större komplikationer jämfört med den tidigare hanteringen av termik. Det kan i detta sammanhang nämnas att flödet i volymsenheter inte beror av temperaturen hos luften.

Motsvarande användande av fläktkraft illustreras i FIGUR 26. Figur a) visar det läckande systemet och b) kraftsystemet.

Flödesbalansen konstrueras grafiskt på samma sätt som nyss i FIGUR 25. Skillnaden är att vi tidigare inte behövde bekymra oss om vertikalskalan i kraftsystemet. I detta fall måste figur a) och b) ha samma horisontalskala och samma vertikalskala och den inbördes förskjutningen i c) ske med horisontalskalorna utmed samma linje.



FIGUR 25 LUFTVÄXLING AV TERMISK DRIVKRAFT

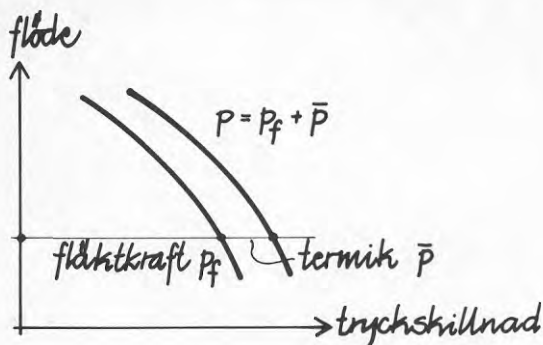


FIGUR 26 LUFTVÄXLING AV MEKANISK FLÄTKRAFT

Kombinerad effekt av fläkt och termik

I normalfallet uppvärmd byggnad föreligger termisk drivkraft som hjälper eller motverkar fläkten beroende på om fläkten driver luften uppåt eller nedåt. Eftersom det i vårt fall blir aktuellt med frånluftsfläkt på vinden, medför termiken ett tillskott till drivkraften. Den termiska andelen är som framgått opåverkad av flödet. Vi får, jfr FIGUR 27, ett konstant tillskott av \bar{p} till fläktkraften p_f . Den kombinerade effekten blir alltså en parallellförskjutning av fläktkurvan åt höger, då termiken hjälper fläkten som i vårt fall.

Samma sak gäller om man vill studera störningsmönster av stadigvarande vindtryck av vind på skorstenstoppen. Kurvan parallellflyttas åt höger vid undertryck och åt vänster vid övertryck på skorstenen.



FIGUR 27 TOTAL DRIVKRAFT p AV FLÄKT OCH MEDVERKANDE TERMISK

Fläkten, byggnaden och lägenheten

En frånluftsventilerad lägenhet har (i motsats till en självdragsventilerad) inte ett separat ventilations-system. Lägenheten står via kanalsystemet i förbindelse med de övriga lägenheter som är anslutna till frånluftsfläkten. Detta framgår av FIGUR 24.

Den i anslutning till FIGUR 26 redovisade hanteringen av kraft- och läckande system avser hanteringen av helheten, dvs ventilationssystemet och ytterväggarna hos alla lägenheter som ventileras av fläkten. Detta innebär t ex att vertikalskalans omsättningstal, n , anger den sammanlagda inre volymen hos de anslutna lägenheterna.

En förändring av ventilationsmängden eller tätheten i en av lägenheterna påverkar hela systemet. Konsekvensen av en förändring kan därför inte undersökas genom att studera en avgränsad lägenhet - annat än under vissa förutsättningar.

Sådana begränsande förutsättningar införs i det följande i avsikt att enkelt kunna påvisa de principiella egenskaperna hos frånluftsventilation, vilket är den primära avsikten i detta kapitel. Vi antar sålunda att:

- Lägenheterna har samma volym, lika stor ventilation och samma täthet hos ytterväggarna.
- En förändring i en lägenhet åtföljs av samma förändring i de övriga.

Med denna idealisering uppgår man proportionalitet så att förfarandet enligt FIGUR 26 kan tillämpas på en enskild lägenhet.

ALLMÄNT FUNKTIONSSÄTT

Vi väljer för att skapa ett renodlat fall att förse byggnaden i FIGUR 24 med ventilationssystem av modern typ, dvs med relativt kraftig fläkt, och antar att anläggningen dimensionerats för att ge 0,5 oms/h vid arbetspunkten $p_A = 150$ Pa. (Här avses arbetspunkten vid dimensioneringen av ventilationssystemet.) Det förutsätts vidare att man lyckats dimensionera och utföra anläggningen så att den verkliga n/p -kurvan överensstämmer med den teoretiska, dvs ger 0,5 oms vid 150 Pa med öppna fönster, dvs utan inverkan av ytterväggarnas motstånd. Ytterväggarnas täthet antas vara densamma som i det tidigare exemplet med självdragsventilation.

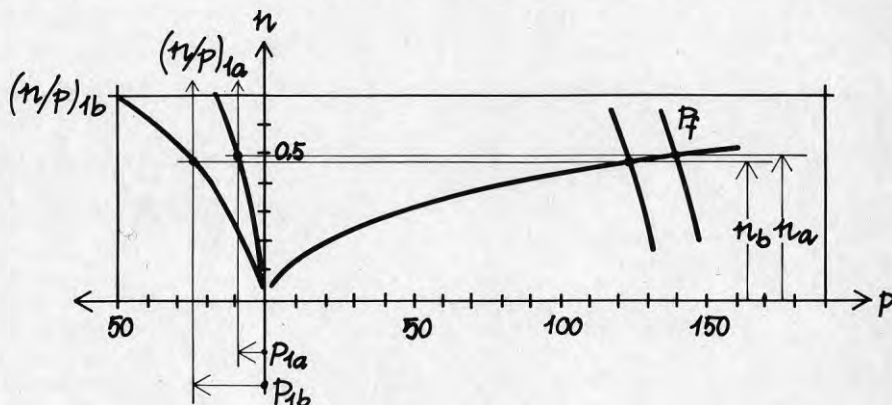
Tillämpning av förfarandet i FIGUR 26 ger resultatet - FIGUR 28.

Först kan konstateras att den verkliga arbetspunkten på grund av ytterväggarnas motstånd förskjuts så att tryckfallet blir något lägre än 150 Pa.

För den övre kurvan $(n/p)_{1a}$ fås då luftväxlingen $n_a = 0,48$ och tryckfallet över vägg $p_{1a} = 8,5$ Pa. För det tätare alternativet $(n/p)_{1b}$ fås värdena $n_b = 0,46$ och $p_{1b} = 23$ Pa. Dessa värden har beräknats numeriskt, eftersom precisionen i den grafiska hanteringen inte ger möjlighet att ange den andra siffran i värdena. Däremot räcker noggrannheten i den grafiska behandlingen för att konstatera följande.

- Skillnaden i täthet ger obetydlig skillnad i luftväxling.
- Skillnaden i täthet ger en väsentlig förändring av tryckfallet över väggen.

Effekten av tätning i frånluftsfallet blir alltså den motsatta mot vad som gäller för självdragsfallet, som framgår vid jämförelse av FIGURERNA 14 och 28.



FIGUR 28 GRAFISK BESTÄMMNING AV FRÅNFLUFTSVENTILATION

Den fördubblade tätheten ger en ökning av undertrycket i lägenheten som är mer än den dubbla. Konsekvenserna av detta blir:

- Ökade lufthastigheter från kvarvarande otätheter med risk för förstärkning av olägenheter.
- Förstärkning av luktspridning mellan lägenheter. (Hacken i tryckbilden i FIGUR 24 blir större. Detta förtydligas i det avslutande avsnittet om frånluftsventilation.)

STÖRNING AV TERMIK

Generellt gäller som nämnts att termiken hjälper frånluftsfläkten. Vid svaga fläktar och/eller höga byggnader är tillskottskraften inte försumbar. I vårt fall blir dock effekten mycket begränsad. Om vi t ex utgår från samma termiska kravkraft, $\bar{p} = 7 \text{ Pa}$, som vi räknade med i självdragsfallet, kan konstateras att den sammansatta drivkraften, jfr FIGUR 27, skulle representeras av en kurva som är parallell med fläktkurvan i FIGUR 28 och förskjuten sträckan 7 p åt höger. Vi inser att detta inte skulle ge någon märkbar förändring av flödet och belastar inte framställningen med ytterligare en figur, som bara skulle bli svår att skilja från FIGUR 28. Numerisk kontroll ger $n_a = 0,50$ jämfört med tidigare $n_a = 0,46$.

STÖRNING AV VIND

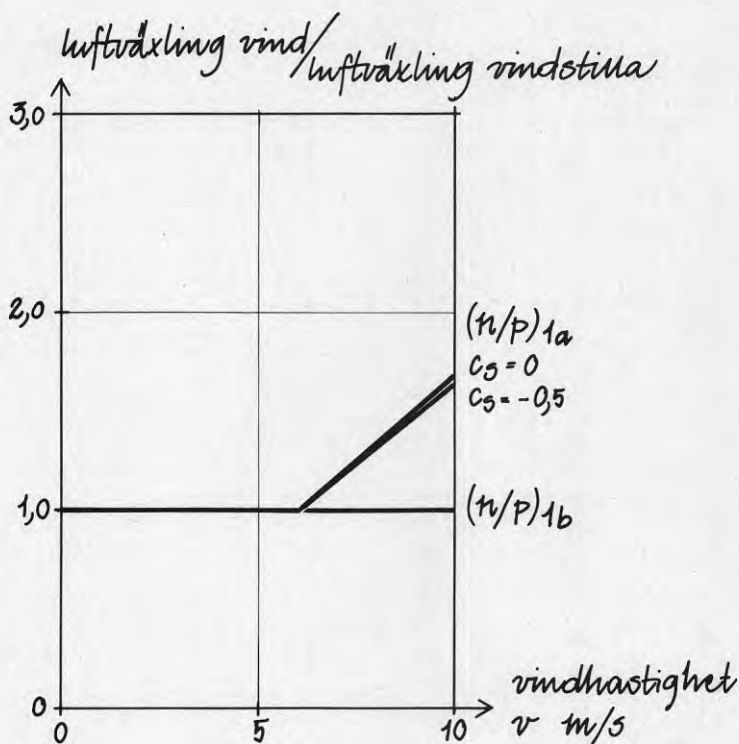
Strömningsmönstret av vind har studerats på samma sätt som för självdragsfallet. FIGUR 29 visar resultatet och innefattar såväl inverkan av trycksug mot väggar som vindsug vid skorstenstopp.

De övre kurvorna avser det otätare alternativet $(n/p)_{1a}$ som är stabilt mot störningar upp till vindhastigheten $v = 6 \text{ m/s}$. Därefter börjar luft läcka ut genom läväggen och luftväxlingen tilltar med ökad vindhastighet.

Mönstret är i stort sett etsamma som för självdragsfallet med $L = 168$ i FIGUR 21. Däremot är inverkan av vindsug vid skorstenstoppen mycket blygsam. Resultaten för formfaktorn $c_s = 0$ och $c_s = 0,5$ blir så gott som desamma till skillnad mot inverkan i självdragsfallet, FIGUR 23.

Ytterligare en avvikelse från självdragsfunktionen kan noteras. Det tätare alternativet $(n/p)_{1b}$ ger till resultat en rät linje på nivån 1,0 från $v = 0 \text{ m/s}$ till $v = 10 \text{ m/s}$. Stabiliteten mot utläckning genom lovartväggen finns ännu vid vindhastigheten $v = 10 \text{ m/s}$. Till skillnad mot självdrag påverkas störningsmönstret således av ytterväggarnas täthet.

Detta var att förvänta redan då det i FIGUR 28 konstaterades att den förbättrade tätheten gav ett väsentligt större undertryck som förmår hålla vindsuget på - och utläckningen genom läväggen - "i schack" vid högre vindhastigheter än tidigare.



FIGUR 29 INVERKAN AV ANBLÅSNING MOT BYGGNADEN.

Formfaktor 0,7 för lovartvägg och -0,5 för lävägg.

Formfaktor $c_s = 0$ och $c_s = 0,5$ för skorstenstopp.

Som sammanfattning för anknytning till FIGUR 3 gäller för redodlat fungerande frånluftsventilation följande:

Systemkategori Fl

- Ventilationen påverkas inte i väsentlig omfattning av utetemperatur och inte heller av lägenhetens läge i byggnadens höjded. (Observera att höga hus i kombination med svaga fläktar resulterar i hybrider mellan frånlufts- och självdragsventilation och kräver bedömning från fall till fall.)
- Flaskhalsen i strömningsvägen - in genom yttervägg och upp genom ventilationssystem - utgörs av ventilationskanalsystemet. Man kan då inse att konsekvensen av en täthetsförändring från Fla till Flb blir följande:
 - Luftväxlingen - och energibehovet för ventilation - minskar endast marginellt.
 - Undertrycket i huset ökar väsentligt. Som en följd av detta får man:
 - . Minskad känslighet för störningar av vind.
 - . Ökad luftinströmning genom kvarvarande otätheter och risk för obehag.
 - . Ökad risk för luktspridning mellan lägenheter.

RÅD OCH REKOMMENDATIONER FÖR ENERGISPARVERKSAMHETEN

De sammanfattande rekommendationerna blir:

Systemkategori F1 i FIGUR 3

BETRÄFFANDE TÄTNINGSÅTGÄRDER

Huvudregel

- För renodlat fungerande frånluftssystem kan man inte åstadkomma någon väsentlig energibesparing med tätningsåtgärder. Om man har mer än tillräcklig ventilation är det enklare och billigare att justera luftflöden i kombination med nedvarvning av fläktar.

Kriterium för huvudregelns giltighet:

Om tryckfallet över ytterväggen i övre våningen är större än 10 Pa gäller huvudregeln. För att kontrollera detta kan man göra på följande sätt:

Mät tryckfallet över ytterväggen med stängda fönster och balkongdörrar. Detta kan göras med en vätskemanometer vars ena slang ansluts till ett 3 å 4 mm kopparrör som bockas till en form som överensstämmer med den spalt som bildas av anslaget mellan fönsterbåge och karm och som normalt får plats.

Kompletterande regler:

Utöver den i huvudregeln åsyftade energibesparingen gäller att andra bedömningar måste göras och ibland kan motivera byte av lister - ibland inte.

- Generande drag från fönster

För de fall då man kan konstatera olägenheter av drag på grund av dåliga tätningslister kan tätning ge sekundärt betingad energibesparing. Eliminering av obehaget kan medge en sänkning av inomhustemperaturen, vilket ger minskad energiförbrukning. En förutsättning för detta är att det generande draget verkligen beror på fönstertätningen och inte till under fönstren belägna springventiler. I så fall blir effekten den motsatta, då förbättring av tätningslister ger ökat luftflöde genom ventilerna.

- Generande drag från de andra delarna av väggarna

För otäta ytterväggar, t ex regelväggar, kan generande drag vara lokaliserat till andra partier än fönstren. T ex till golvssocklar och andra otätheter.

I sådana fall gäller det omvända förhållandet att byte av tätningslister kan ge en sekundärt betingad ökning av energiförbrukningen. Tätningen av fönstren medför ökad lufthastighet genom andra otätheter som måste kompenseras med högre rumstemperatur.

- Ojämn fördelning av ventilationen i lägenheten

Rum utan evakuering men försedda med tilluftsdon kan bli utan ventilation på grund av att luften går "minsta motståndets väg" genom otäta fönster i rum som ligger närmare fläktevakueringen. I så fall kan byte av lister bidra till en jämnare fördelning av luftväxling och motiveras av detta.

I den föregående redogörelsen infördes ett idealiserat tillstånd så att en lägenhet kunde behandlas på samma sätt som byggnaden i sin helhet. Även om detta fall i verkligheten aldrig blir helt realiserat är det tillräckligt för att belysa det principiella funktionssättet, vilket skett ovan.

I det följande avsnittet om frånluftsventilationen undanröjs denna begränsning och då måste skapas underlag för att betrakta en lägenhet som en del i det större system som består av ventilationssystemet och alla anslutna lägenheter. Som tidigare "matematiska" avsnitt sker detta med indragen text. Anledningen är denna gång inte att det innehåller matematik utan dess karaktär av något mer ingående redogörelse.

HELHETSSYSTEMET OCH DESS UPPBYGGNAD OCH INVERKAN AV EN FÖRÄNDRING I EN LÄGENHET

FIGUR 30 visar schematiskt tre lägenheter med gemensam fläkt. Parallella strömningsvägar har koncentrerats till ett tilluftsdon och ett evakueringsdon i var och en av lägenheterna b, c och d. Beteckningarna a och e anger start- och slutpunkt för de tre parallella strömningsvägarna a-b-e, a-c-e och a-d-e.

Till höger om byggnaden anges läckkurvan eller Q/p-kurvan för strömningsvägen a-c-e genom lägenhet c. Kurvan utgör resulterande läckkurva till de seriekopplade motstånden a-c för väggen och c-e för "kanalstråket" som har sammansatts på det sätt som angivits i FIGUR 6.

(Detta sätt att summera är att föredra när det gäller att ge en koncentrerad bild av det läckande systemet. När det däremot gäller att differentiera bilden är den alternativa "rygg mot rygg-metoden" enligt FIGUR 7 att föredra.)

Under byggnaden i figuren visas - inringad - Q/p-kurvan för det totala systemet a-e, byggnad plus ventilationssystem. Denna kurva är enligt summeringen underifrån och uppåt sammansatt av de tre parallella strömningsvägarna a-b-e, a-c-e och a-d-e. Deras roll markeras av de tre inritade sektorer som tillsammans ger den totala kurvan eller annorlunda uttryckt den grafiska bilden av det läckande systemet.

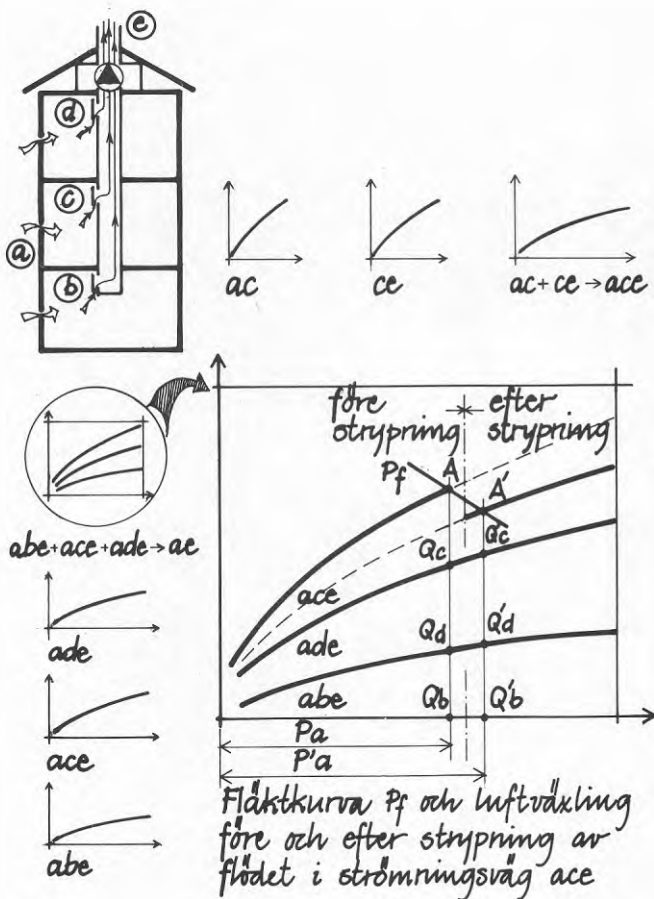
Denna grafiska bild har förstörats i det stora diagrammet i figuren. Vi vill undersöka vad som sker om vi inför en kraftig strypning i luftvägen genom lägenhet C. Inget hindrar att vi kastar om ordningsföljden på sektorerna. För att inte "gröta till" figuren placeras a-c-e överst.

I diagrammet har inritats en fläktkurva p_f . Skärningspunkten mellan denna och den övre kurvan - det

totala systemet - utgör den verkliga arbetspunkten A, som anger totalt flöde Q och drivkraften p_A . Utmed den vertikala linjen genom A fås luftväxlingen i de olika lägenheterna.

Om vi nu gör en strypning i luftvägen a-c-e av omkring 50 % flyttas totalkurvan ned och ger en ny arbetspunkt A' med ett lägre totalflöde, en annan drivkraft p'_A och delflöden Q'_b , Q'_c och Q'_d .

Vi ser att luftväxlingen minskat i lägenhet c och ökat något i lägenheterna b och d.

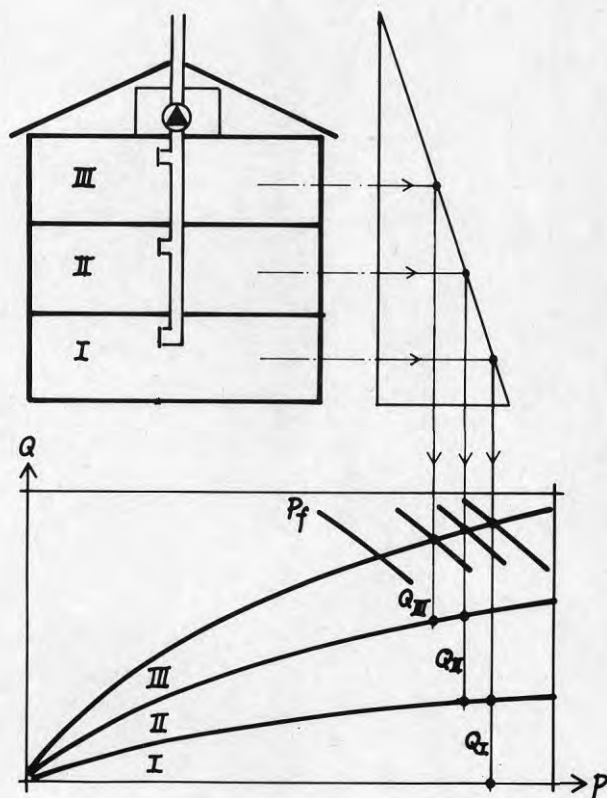


FIGUR 30 TOTALA ANLÄGGNINGENS Q/p-KURVA OCH DESS UPPBYGGNAD. FÖRÄNDRING AV FLÖDET I EN LÄGENHET.

Genom att arbeta på detta sätt med fläktkurva och totalsystemets Q/p -kurva före och efter förändringar får vi drivkraften före och efter en förändring, liksom förändringen av flöden. Studium av förändring i enbart en lägenhet måste således infogas i helhetsbilden.

Medverkande termik:

För fullständighetens skull tänker vi oss att vi utöver fläktkraften har medverkande termik. Detta illustreras i FIGUR 31.



FIGUR 31 UTÖVER FLÄKTKRAFTEN p_f TILLKOMMER TERMIK SOM GER ÖKNING AV FLÖDEN

Beträffande Q/p-kurvor och fläktkurva:

Flera av Q/p-kurvorna i redogörelsen och i FIGUR 30 är tänkta kurvor som inte är åtkomliga för mätningar. T ex kurvor för två eller tre parallella strömningsvägar i samma kanalavsnitt. De väsentliga kurvorna eller Q/p-funktionerna kan emellertid mätas. Dessa är med hänvisning till FIGUR 30.

- Ytterväggens täthet exemplifierad av den inringade Q/p-kurvan a-c till höger i figuren. Provning av täthet kan ske med tryckprovning. Den kan även ske med en enklare metod.
- Q/p-kurvan för det totala systemet kan mätas relativt enkelt med en metod som utvecklats för att tillgodose mätbehov inom Sundbybergsprojektet och som studerats vidare med anslag från Nordtest.
- Arbetspunkten A bestäms vid mätning enligt den nyssnämnda metoden.

ERFARENHETER OCH MÖJLIGHETER TILL FÖRBÄTTRING I BEFINTLIGA BYGGNADER

Erfarenheten har visat att man får besvärande drag från tilluftsventiler som tidigare var placerade under fönster men idag ofta sitter vid fönstrens överkant. Draget är i det senare fallet mest påtagligt ett par meter in från ytterväggen, där den kalla luftströmmen "dimper ner". Den ökade tätheten hos dagens byggnader i förhållande till 60-talets har förstärkt problemet. Tidigare otätare väggar ger en mer diffus lufttillförsel i stället för de nu mer distinkta och mer känbara. Å andra sidan är det nödvändigt med täta väggar och kontrollerad placering av tilluftsdon om man utgår från kravet att olika rum skall ges en kontrollerad luftväxling.

En annan erfarenhet av frånluftsventilation i såväl äldre som nyare hus är att man lätt får in lukt från grannlägenheter. Anledningen till detta kan belysas med utgångspunkt från tryckbilden till vänster i FIGUR 24. Hacken i kurvan har lagts in för att markera att man i regel har olika stort undertryck i lägenheter beroende på olikheter i injusterade ventilationsflöden eller olika täthet i ytterväggen. De större undertrycken i de övre och undre lägenheterna i figuren drar till sig matos genom de otätheter som trots allt finns - om inte annat genom brevinkast via trapphus. Samma förhållande gäller mellan lägenheter i samma våningsplan. Luktspridningen förstärks om man t ex vid matlagning tillgriper fönstervädning. Undertrycket i den lägenheten försvinner så att hela undertrycket i omgivande lägenheter drar till sig matoset.

En tredje erfarenhet är de ljudstörningar som uppträder. I nyare hus förekommer att det t ex piper i fönster och väser i evakueringsdon.

Det finns när det gäller förbättringar ett behov av utveckling av don - inte minst när det gäller tilluftsdonen i ytterväggen. Problemet att finna lämpliga utformningar är troligen inte lätt.

Ett problem slipper man dock ta hänsyn till vid fungerande frånluftsventilation. Tilluftsdonen behöver inte ha någon flödesreglerande funktion som är fallet vid självdragsventilation.

KARAKTÄRISTISKA EGENSKAPER HOS FRÅN- OCH TILLUFTSVENTILATION

Från- och tilluftsventilation har med undantag för en period i början av 70-talet fått sitt genombrott inom bostadsventilationen först på senare år.

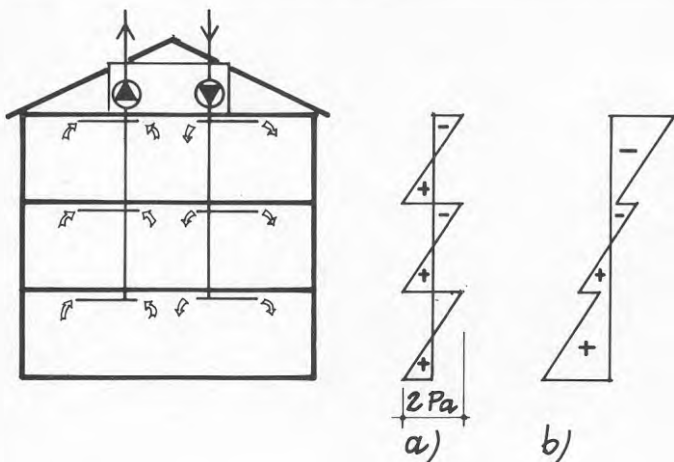
Möjligheten att enkelt anordna värmeåtervinning med hjälp av värmeväxling mellan från- och tilluft har gjort den intressant från energisynpunkt. En annan fördel är möjligheten att distribuera kontrollerade luftflöden till lägenhetens olika utrymmen.

Erfarenheterna av användningen av ventilationsprincipen i bostadshus är ganska nya jämfört med de tidigare beskrivna systemen självdrag och frånluft.

ALLMÄNT FUNKTIONSSÄTT

Ventilationsprincipen illustreras schematiskt i FIGUR 32, där huset från tidigare exempel försetts med FT-ventilation. Till vardera från- och tilluftsfläkt hör ett kanalsystem, här förenklat illustrerat av flödespilar.

Tilluftsfilter, ev värmeväxlare o d anges inte i figuren. Normalt injusteras anläggningarna med något större frånluftsflöde än tilluftsflöde.



FIGUR 32 BYGGNADEN FÖRSEDD MED FRÅN- OCH TILLUFTSVENTILATION

- Tryckprofil vid balanserat system och $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ och helt avskilda lägenheter i vertikalled.
- Motsvarande tryckbild då luftförbindelse finns t ex via entredörrar och trapphus.

För att redogöra för det renodlade fallet förutsätts emellertid här ett system med fullständig balans, dvs lika stora från- och tillluftsflöden i alla lägenheter och i hela huset.

Om injusteringen gjorts vid lika ute- och innetemperatur får vi ingen tryckskillnad eller luftläckning vid tillfällena då dessa temperaturförhållanden föreligger.

STÖRNING AV TERMIK

I verkligheten har vi oftast temperaturskillnad inne/ute som påverkar tryckförhållanden över yttervägg. Vad som händer med tryckförhållandena i en byggnad som injusterats vid temperaturskillnaden noll beror av flera faktorer. Som utgångspunkt för ett kvalitativt resonemang väljs som grundmönster den tryckbild a) som anges till höger om byggnaden i FIGUR 32. Plus-tecken anger yttre övertryck och luftläckning utifrån och in och minustecken det omvända.

Vi antar nu att grundmönstret uppnåtts genom injustering till fullständig balans vid en viss temperaturskillnad. Om temperaturskillnaden är 20°C fås enligt (7) en amplitud av ca 2 Pa. I förutsättningarna ingår att tilluften har värmts till rumstemperatur i fläktrummet och att detta skett efter fläkten och att flödesbalansen avser luft av rumstemperatur. Vidare förutsätts väggens otätheter vara jämnt fördelade i höjled. Neutralnivån i tryckbild a) ligger då något lägre än mitten av vägghöjden. Skulle den ligga på mitten, skulle inläckande luftflöde efter expansion vara större än läckflödet ut, vilket inte går ihop.

Förändringar av utetemperaturen ger förändringar av tryckbilderna, som ibland kan vara små men ibland väsentliga beroende på fläktars kapacitet och hushöjd.

För att belysa den ungefärliga storleksordningen av luftläckningen kan nämnas, att den för tryckbild a) och tidigare täthetskurva $(n/p)_{1a}$ blir $n = 0,1$ oms/h. Detta motsvarar en årlig luftläckningsförlust av omkring 1 MWh för en 80 m² lägenhet. Hur dessa värden beräknas kommer att framgå senare i redogörelsen för kontorshus.

Inverkan av sjunkande utetemperatur

Resonemanget nedan kan endast göras kvalitativt och belysa principerna i stort.

- Termiken ökar då utetemperaturen sjunker. Bidraget till drivkraft för frånluftsfläkt ger en ökning av frånluftsflödet. Samtidigt minskar tilluftsfläktens flöde av den ökade och motriktade termiken. Sammantaget ger detta en obalans i fläkthöjden som tende-

rar att ge ett undertryck i lägenheterna och en höjning av neutralnivåerna i förhållande till tryckbild a).

- Expansion av tilluftsflödet från fläkt och genom otätheter verkar i motsatt riktning, skapar trycktillskott i lägenheterna och en sänkning av neutralnivåerna i tryckbilden.

Vilken av dessa faktorer som överväger beror helt av förutsättningarna. För höga byggnader eller svaga fläktar dominerar den första faktorn. För låga byggnader och starka fläktar blir det tvärt om.

Inverkan av luftförbindelser mellan lägenheter

Tidigare berördes vid diskussion av luktspridning i frånluftsventilerade hus de ofrånkomliga luftförbindelser som finns genom brevinkast och otäta trapphusdörrar via trapphuset. I från- och tilluftsventilerade hus gör dessa luftförbindelser att tryckskillnaderna - hacken - i tryckprofilen minskar.

Om otätheterna är dominerande fås en kontinuerlig tryckprofil.

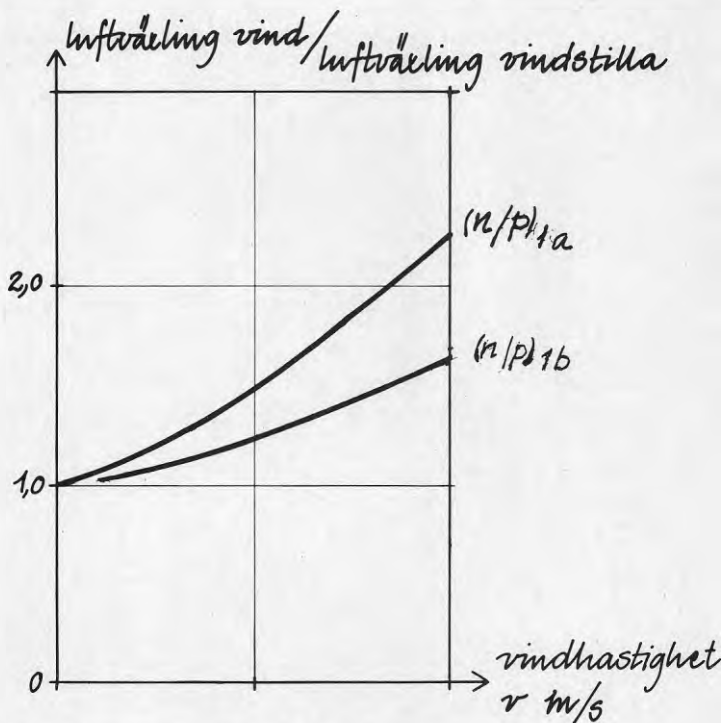
STÖRNING AV VIND

På samma sätt som tidigare har byggnadens känslighet för störning av vind beräknats för anblåsning vinkelrätt mot den ena ytterväggen. Beräkningen har avsett det otätade ytterväggsalternativet med $n_{50} = 1,5$. Formfaktorerna som tidigare $+0,7$ för lovartvägg och $-0,5$ för lävägg. Resultatet anges i FIGUR 33.

Av figuren framgår att den stabilitet mot genomblåsning som finns vid självdragsventilation och i synnerhet vid frånluftsventilation inte föreligger vid från- och tillluftsventilation. Beräkningen avser förhållandet mellan summan av luftläckning plus nominell ventilation dividerad med den nominella ventilationen som satts $n = 0,5$ oms/h.

Inverkan av vindtryck (eller vindsug) på skorstenstoppar är som vid frånluftsventilation mycket ringa.

Effekten av tätningsåtgärder blir att luftläckningen minskar i proportion till täthetsförbättringen. För ytterlighetsfallet - hermetiskt tät vägg - blir läckningen noll.



FIGUR 33 STÖRNING AV VIND

Nominell ventilation $n = 0,5$.
Formfaktor $+0,7$ för lovartvägg och
 $-0,5$ för lävägg

RÅD OCH REKOMMENDATIONER FÖR ENERGISPARVERKSAMHETEN

Som rekommendation och för anknytning till FIGUR 3 gäller för från- och tillluftsventilation.

Systemkategori FT1 i FIGUR 3

- Tätning av ytterväggar medför minskad luftläckning och minskad energiförbrukning av termiska drivkrafter och av vindanblåsning.
- Ett annat sätt att minska luftläckningen är att skapa undertryck genom avsiktlig obalans mellan från- och tillluftsflöden. Man bör då vara medveten om att ökad obalans ger ökad konfrontation med de nackdelar som kännetecknar frånluftsventilationen och som tidigare redovisats.

När det gäller att bedöma graden av återvinning i system med värmeväxlare bör man vara medveten om att en obalans visserligen ger en ökning av temperaturverkningsgraden för värmeväxlaren - sådan den vanligen definieras - men att återvinningen inte beror av temperaturverkningsgraden utan av den totala verkningsgraden för systemet. Denna "systemverkningsgrad" sjunker vid obalans mellan flödena*).

- Till skillnad från självdrags- och frånluftsventilation kan från- och tillluftsventilation skapa inre övertryck över ytterväggar och tak. Detta medför att man måste ställa ökade krav på ytterhöljets utförande med tanke på fuktpåfrestningen.

Förändring av flöden och förändringar av tätheten och dess fördelning i höjddled måste noga övervägas om man har en vägg- eller takkonstruktion som är fuktkänslig. Dessa aspekter skall belysas ytterligare i redogörelsen för kontorshus.

*) A.Lindh och P.O.Nylund. En granskning av ett FTX-ventilerat småhus, BFR rapport R115:1982

ERFARENHETER

Erfarenheterna från FT-ventilation i flerbostadshus är som nämnts ganska nya. Fördelarna - möjligheterna till enkel form av återvinning och kontrollerad lufttillförsel har nämnts. Negativa erfarenheter är:

- Störning av ljud.
- Känslighet för driftstörningar i form av igensättning av tilluftsfilter.

Vi har på påträffat fall där filtren varit helt igensatta så att byggnaden omvandlats till att bli frånluftsventilerad. Tilluftskanalerna fungerar då som effektiva luktspridare mellan lägenheterna. En lägenhet med större frånluftsflöde drar till sig luft från en med mindre. Hyresgästerna märker detta och täpper till tilluftsdonen.

Det krävs alltså regelbunden tillsyn av kompetenta och engagerade fastighetsskötare för att säkerställa rätt funktion.

SAMMANSTÄLLNING AV SYSTEMEGENSKAPER
- UTVECKLINGSMÖJLIGHETER

De principiellt viktiga egenskaperna för de tre kategorierna S1, F1 och FT1 i FIGUR 3 kan nu sammanfattas. Nedanstående TABELL 1 avser att ge en överblick över hur systemen skiljer sig åt beträffande effekten av ökad täthet hos yttervägg vid vindstilla och känsligheten för ökad luftväxling vid vind. Inom parentes anges nummer på de figurer och sidnummer för tidigare sammanfattande kommentarer som kan tjäna som påminnelse.

TABELL 1

System- kate- gori enligt FIGUR 3	Effekt av ökad täthet vid låg utetemperatur och vid vindstilla		Känslighet för ökad luft- växling av vind	
	Tryckskilln över vägg	Luftväxling/ luftläckning	Vindkrafter på yttervägg	Vindkrafter vid kanaltopp
S 1	oförändrad (FIGUR 14 och sid 32)	minskar	mindre känslig (FIGUR 21, sid 47 o FIGUR 23)	känslig
F 1	ökar (FIGUR 28 och sid 58)	oförändrad	okänslig (FIGUR 29 och sid 58)	okänslig
FT 1	oförändrad (i huvudsak) (Sid 70)	minskar	känslig (FIGUR 33 och sid 70)	okänslig

Speciellt framträdande är det "tvärtom"-förhållande som råder mellan kategorierna S1 och F1 när det gäller effekten av ökad täthet vid vindstilla. Det förhållandet att "flaskhalsen" i luftströmningen ligger i ytterväggen för system S1 och i kanalsystem för system F1 gör att effekterna förändring av tryckskillnad över vägg och förändring av luftväxling av ökad täthet blir de omvända.

Inför den senare behandlingen av kontorshus finns det anledning att göra en distinktion när det gäller möjligheten att bedöma störningsmönster av vind. I FIGUR 22 adderades vindtryck till termiskt drivtryck för vardera lovart- och läväggen. Det är endast vid självdragsventilation som detta är korrekt.

Den öppna förbindelsen med uteluften gör att inre lufttryck är praktiskt taget oberoende av trycket på väggarnas utsida. Ett tillskott i vindtryck ger en lika stor förändring av tryckfallet över väggen.

(Som upplysning för byggnadstekniker har vi att göra med ett aerostatiskt bestämt fall analogt med bärverksstatiskt bestämda fall. I detta fall är det inre lufttrycket bestämt.)

För de övriga systemkategorierna måste det obekanta jämviktstrycket lösas med flödesbalansekvation.

Av redogörelsen hittills torde framgå att det är nödvändigt att känna funktionen hos de hus man ställs inför om man skall kunna påverka energiförbrukningen. Vet man vilka tecken man genom observationer och enkla mätningar skall söka efter, har man en chans att göra meningsfulla åtgärder.

UTVECKLINGSMÖJLIGHETER

Utgångspunkten för utveckling mot bättre fungerande system för flerbostadshus är att vi har byggnader med varierande form, höjd och täthet hos ytterväggar. Den inre tätheten i vertikalled är som regel god eller kan med ganska enkla medel förbättras.

De ventilationssystem som står till buds utgörs av de tre huvudprinciperna S-, F- och FT-ventilation och där byggnaderna ofta utgör hybrider mellan kategorierna.

Byggnaden som totalsystem omfattar mer än samspelet byggnad/ventilation, som behandlas i denna skrift. En första naturlig utvidgning är att ta med uppvärmningssystemet i bilden och att definiera och analysera totalsystemet byggnad/ventilation/uppvärmning.

Sannolikt kommer då förutsättningarna för att utveckla driftsäkra, tysta och väl fungerande system att förändras - i synnerhet vid nyproduktion. Den ökade kunskapen ger bättre möjligheter att söka sig fram bland för- och nackdelar hos de idag existerande huvudtyperna och finna lösningar vid sidan av.

Exempelvis gäller att den idag existerande självdragsventilationen uppvisar flera brister när det gäller funktionen beroende på den utformning den gavs för några decennier sedan. Detta behöver inte alls betyda att naturlig ventilation som princip skulle vara "död-född". Tvärt om syns den ha mycket goda förutsättningar att med radikalt annan utformning och med en roll i det utvidgade totalsystemet byggnad/ventilation/uppvärmning utvecklas till väl fungerande lösningar.

LUFTVÄXLING OCH EFFEKTAVGIVNING

I detta kapitel redovisas en bakgrund för den senare redogörelsen för kontorshus.

De grundläggande funktionssätten för kontorshus är desamma som beskrivits för bostadshus både när det gäller inverkan av termik och av vind. Den väsentliga skillnaden ligger i att höjden på den cell som studeras blir flera gånger större än vid bostadshuset. Termiken blir då dominerande.

Redogörelsen begränsas till inverkan av termik vid täta och otäta ytterväggar med samma täthetsnivåer som flerbostadshuset i det föregående. Det gäller således att studera luftläckning genom höga väggfält, där tryckskillnader varierar avsevärt i höjddled.

Vi övergår i fortsättningen till att bestämma luftflöden numeriskt i stället för grafiskt och behöver därför en bakgrund för beräkning av luftläckning, vilket sker i det följande avsnittet "BERÄKNING AV LUFTLÄCKNING GENOM VÄGGFÄLT". I det därpå följande avsnittet "BESTÄMNING AV EFFEKTAVGIVNING" redovisas utgångspunkten för att översätta luftväxling till energi.

BESTÄMNING AV LUFTLÄCKNING GENOM VÄGGFÄLT

Specifik luftläckning

Otäteterna hos väggfält kan inte längre representeras av en resulterande otäthet mitt på väggfält. Vi inför benämningen specifik luftläckning per kvadratmeter väggyta och betecknar den med q . Analogt med de tidigare läckfunktionerna $Q = k \cdot p^\beta$ kan vi ange specifik luftläckning som

$$q = \ell \cdot p^\beta \quad (13)$$

På samma sätt som vi anger normenlig otäthet med n_{50} kan vi ange den med q_{50} som avser specifik otäthet i $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot 50 \text{ Pa})$. Normens värden för bostadshus är $n_{50} = 3,0$ för småhus, $n_{50} = 2,0$ för tvåvåningshus och radhus och $n_{50} = 1,0$ för flervåningshus. Om man multiplicerar dessa värden med "ordinär" byggnadsvolym och dividerar med ordinär omslutningsyta för de tre kategorierna fås motsvarande värden för specifik otäthet $q_{50} = 4,5$ å $7 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot 50 \text{ Pa})$.

För att omräkna värden för bostadshuset*) i den tidigare redogörelsen till specifik otäthet antar vi att huset har en bredd = 11 m och att lägenhetsytan = 80 m^2 . Lägenhetsvolymen blir $80 \times 2,5 = 200 \text{ m}^3$. Lägenheten har $80 / 11 = 7,3 \text{ m}$ fasad. Omslutande ytterväggar blir $2 \times 7,3 \times 2,5 = 36 \text{ m}^2$. Med normenlig otäthet $n_{50} = 1$ fås $q_{50} = 1 \cdot 200 / 36 = 5,5$.

Med $\beta = 0,65$ kan den normenligt specifika otätheten uttryckas:

$$q = 0,43 \cdot p^{0,65} \quad (14)$$

För det otätare alternativet i FIGUR 8 fås

$$q = 0,65 \cdot p^{0,65} \quad (15)$$

Luftläckning i ett elementarfall

Den termiska tryckbilden är vid inre vertikalt otäta byggnader kontinuerlig och linjär med en neutralnivå på en viss höjd. Luftläckningen för varierande utseende på tryckbilden kan bestämmas med utgångspunkt från ett elementarfall som skall redovisas här. (För en fullständigare redogörelse hänvisas till Appendix.)

FIGUR 34 anger en triangulär tryckbild med storleken p_{\max} vid basen. Det specifika flödet på denna nivå betecknas q_{\max} . Ytan av det väggfält genom vilket läckningen sker betecknas A.

Den totala luftläckningen fås då enligt ettdera av uttrycken:

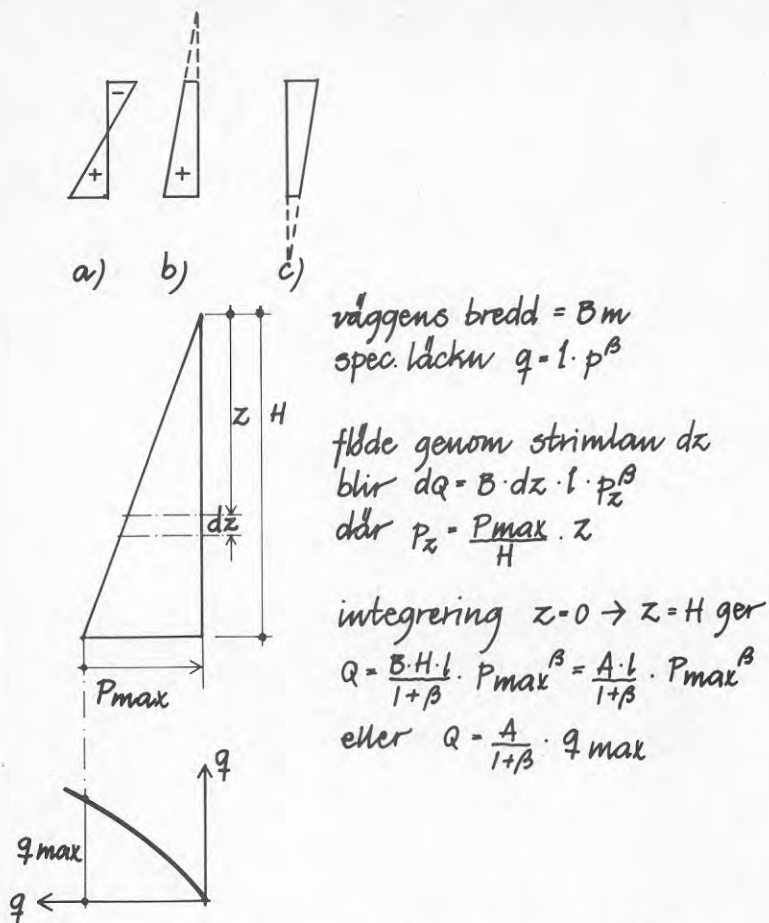
$$Q = A \cdot \frac{1}{1+\beta} \cdot q_{\max} \quad (16a)$$

eller

$$Q = A \cdot \frac{l}{1+\beta} \cdot p_{\max}^{\beta} \quad (16b)$$

där p_{\max} bestäms av (7).

*) För kontorshus finns idag inte några normvärden. Det är angeläget att man i ett kommande normarbete för såväl bostads- som kontorshus strävar efter att uttrycka otäthet som specifik otäthet och också tar hänsyn till att preferenstrycket 50 Pa inte kan uppnås på annat än en nivå i byggnaden om temperaturerna inne och ute är olika. Detta blir speciellt accentuerat vid provning av höga byggnader.



FIGUR 34 LUFTLÄCKNING AV TRIANGULÄR TRYCKBILD

Var och en av tryckbilderna a), b) och c) längst upp i figuren kan hanteras med detta elementarfall. I fallet a) fås inläckning av den undre triangeln i tryckbilden och utläckning av den övre.

I de andra fallen, b) och c), fås in- respektive utläckning som skillnaden mellan tryckbild i form av en stor triangel och en liten - de streckade.

BESTÄMNING AV EFFEKTAVGIVNING

För att belysa storleken av energiförlusterna väljer vi att betrakta energi per tidsenhet, dvs den avgivna effekten.

Effektavgivningen från byggnad till omgivning kan uttryckas som produkten av genomströmmande luftflöde i m³/h och det energitillskott i Wh/m³ som luften fått på vägen genom byggnaden.

Energiinnehållet i luft är sammansatt av två andelar; en som representerar luftens temperatur över 0°C och en som representerar ångbildningsvärmens hos den fukt som ingår.

Effektavgivningen beror av luftens temperaturhöjning och fukttillskott enligt följande approximativa uttryck:

$$E = Q \cdot (0,33 \cdot (T_a - T_u) + v_{FT} \cdot 0,7) \quad (17)$$

E = effekt i W

Q = flöde (m³/h) vid ca 20°C temperatur

0,33 = c · ρ (Wh/m³ °C) (specifik värmekapacitet x densitet)

T_a = avluftens temperatur

T_u = uteluftens temperatur

v_{FT} = fukttillskott*) g/m³ luft.

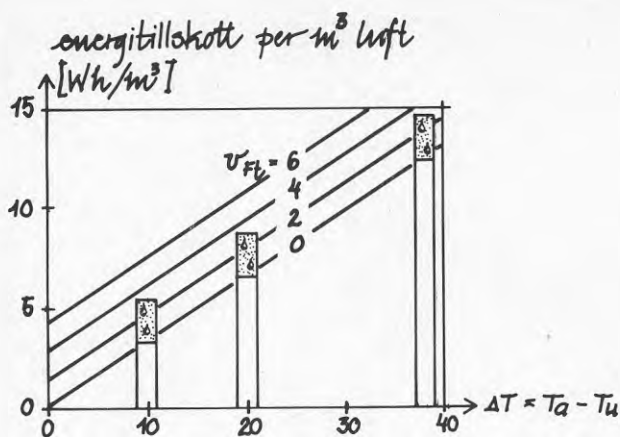
0,7 = energiinnehåll i fukt (Wh/g)

I litteraturen anges ventilationsförluster ofta med enbart den första termen i (17). (Exempelvis anges i SBN 80 beräkning av dimensionerande ventilationsförluster på detta sätt.)

FIGUR 35 illustrerar energitillskottets beroende av temperaturhöjning från T_u till T_a vid varierande fukttillskott v_{FT} = 0, 2,4 och 6 g/m³ luft. Den undre kurvan anger den första termen. Staplarna har beräknats för ett fukttillskott av v_{FT} = 3 g/m³ och avluftstemperatur T_a = 20°C. De övre delarna anger fuktberoende tillskott i energinivån.

Vid LUT, dvs för t ex Stockholm T_a - T_u = 38°C får man ca 15 % för liten avgivning om fukttillskottet försummas.

*) Lars Erik Nevander och Bengt Elmarsson anger i Fukthandboken 1981, riktvärden för fukttillskottet av storleken 2 å 4 g/m³ för bostadshus. Preliminära resultat från en pågående - våren 83 -undersökning bekräftar storleksordningen. För kontorshus föreligger inte några uppgifter - sannolikt är tillskottet väsentligt lägre.



FIGUR 35 ENERGITILLSKOTT AV UPPVÄRMNING OCH FUKTTILLSKOTT
Kurvskaran anger fukttillskott v_{FT} i g/m^3

Vid utetemperatur = $0^{\circ}C$ - den mittre stapeln - blir avvikelserna ca 25 % och vid början och slutet av eldningssäsongen, då $T_a - T_u =$ ca 10 %, blir avvikelserna ca 40 %.

Energiavgivningen till omgivningen är alltså ofta väsentligt större än vad man i allmänhet räknar med.

Vid beräkning av energibalanser och värmebehov för bostäder och kontorshus blir dock felet vanligen ganska litet, eftersom en stor del av energiinnehållet av fukt är "personfukt" som vi "fått gratis". I den följande redogörelsen för kontorshus är fukttillskottet blygsamt, varför energiutbytet räknas utan hänsyn till fukten.

I andra fall, t ex restaurangkök, simhallar, kan fukttillskottet vara en dominerande andel och måste beaktas.

Vidare får energiinnehållet av fukt inte försummas, då man vill återvinna värme ur avluften. Även för bostadshus gäller som framgår av FIGUREN att fukten ger ett väsentligt tillskott till den energipotential som kan utnyttjas för värmeåtervinning. Hänsyn till att en (stor) del erhållits som personfukt tas genom att den betraktas som gratis tillförd energi.

Effektavgivning i elementarfallet

Genom att kombinera uttrycken (13), (16) och (17) kan effektavgivning för elementarfallet beräknas. Vi utgår från den kalla luft som passerar in genom väggen och värms till innetemperatur = 20°C innan den passerar ut ur byggnaden.

FIGUR 36 anger effektavgivningen för två olika utetemperaturer. Fall a) med utetemperatur = -18°C som är dimensionerande för maximalt effektbehov i Stockholm och fall b) med utetemperatur = 0°C . Det senare är intressant av två skäl. För det första är det mycket frekvent i vårt klimat och för det andra är temperaturskillnaden 20°C inne/ute ungefär medelvärdet av temperaturskillnad inne/ute under uppvärmningssäsongen. Multiplicerar vi avgiven effekt med uppvärmningssäsongens längd får vi ett ungefärligt mått på energiavgivning under denna period.

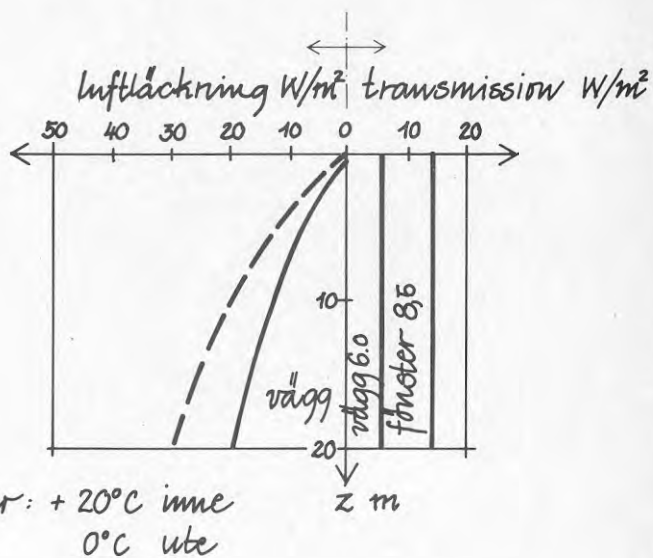
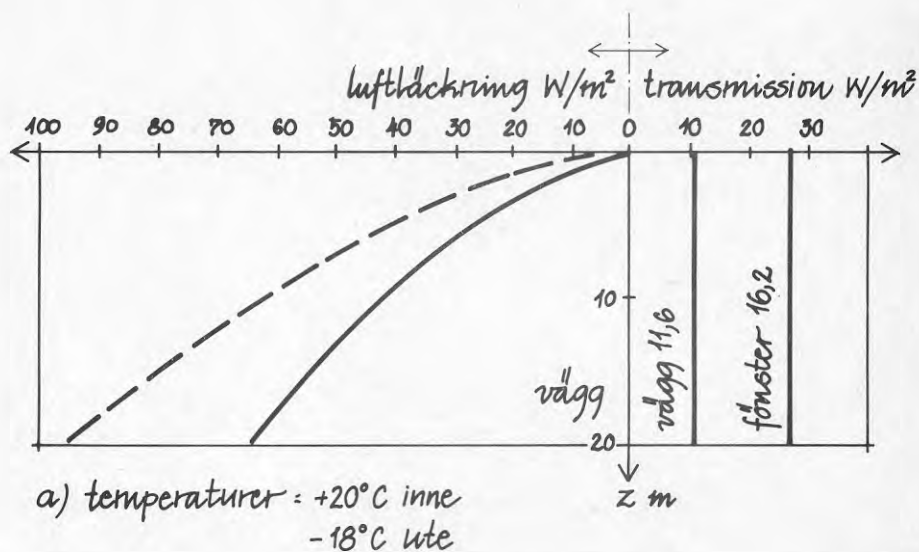
Vertikalaxeln i diagrammen anger höjd från neutralnivån. Åt vänster anges effekt av luftutbyte. Den hel-dragna kurvan avser normenlig otäthet enligt (14) och den streckade det otätare alternativet enligt (15). Vid tillämpning av (17) har inte medräknats något fuktillskott.

För att ha något att jämföra med har åt höger avsatts effektavgivning av transmission genom yttervägg, varvid denna förutsatts ha normenlig isoleringsförmåga, $k = 0,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C})$.

Effektavgivningen genom luftläckningen är alltså väsentlig. Redan några meter under neutralnivån och utetemperaturen 0°C är avgivningen av luftläckning större än av transmission. Jämförelsen avser transmission genom en kvadratmeter väggyta. För att få en uppfattning om fönstrens inverkan har avgivning under natt beräknats med "mörker"-k-värde = 2,0 och med 25 % fönsterandel. Om avgivningen "slås ut" på väggytan fås de ytor och värden som anges längst till höger i figurerna.

Det kan påminnas om att luftläckningen beräknats för enbart termisk drivkraft.

Nu skall man inte dra slutsatsen att luftläckningen alltid utgör en onödig förlust eftersom den ibland - självdrags- och frånluftsventilation - ingår i tilluftsflödet.



FIGUR 36 EFFEKTAVGIVNING AV TRANSMISSION OCH LUFTLÄCKNING PER KVADRATMETER VÄGG.

Normenlig värmeisolering, $k = 0,3$

Normenlig otäthet, $q_{50} = 5,5$, heldragen kurva

Otätare alternativ, $q_{50} = 8,2$, streckad kurva

VENTILATIONSPRINCIPERNAS TILLÄMPNING I KONTORSHUS

BAKGRUND

Skillnaden mellan utförandet av bostadshus och byggnader avsedda för kontor var under de första decennierna på 1900-talet inte särskilt stor. Byggnader för kontorsändamål försågs med samma slags ventilation som bostadshus, dvs med självdragsventilation. Här är skillnaden minst mellan bostads- och kontorshus. De dominerande kanalerna gör precis som vid bostadshus att man inte får några hack i tryckbilderna även om lägenheterna är tätt avskilda i horisontalled.

Senare förstärktes drivkraften för evakuering på mekanisk väg. Byggnaderna utrustades med vad som tidigare kallades kontrollventilation och idag kallas frånluftsventilation. Vid frånluftsventilation av kontorshus som är inre otäta i vertikalalled fås en kontinuerlig tryckbild. Tryckskillnader över bjälklag utjämnas genom inre luftspridning.

I äldre kontorshus hittar man ofta självdragsventilation kombinerad med frånluftsventilation av t ex toalettutrymmen - vilket innebär en hybrid i förhållande till typindelningen enligt FIGUR 3. Tilluften togs in genom ventiler och otätheter i yttervägg.

Olägenheter med drag och neddimpande kalla luftflöden från högt upp belägna ventiler gjorde att man sökte andra vägar och bättre lösningar. Ett sätt blev att inte bara evakuera utan också tillföra luften på mekanisk väg. Denna lösning - från- och tilluftsventilation - utvecklades snabbt från 50-talet till att idag vara den dominerande ventilationsprincipen.

Parallellt med denna utveckling har förändringar på den byggnadstekniska sidan medfört att bostads- och kontorshus numera byggs på väsentligt olika sätt. Genomföringar av installationer för el- och svagström och för ventilationskanaler, hisschakt m m har gjort att moderna kontorshus är otäta i såväl horisontal- som vertikalled.

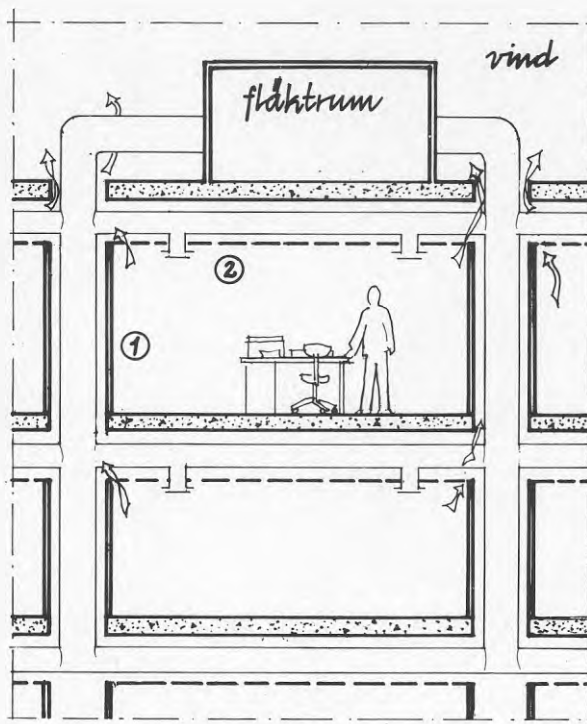
Beräkningsmodellen, FIGUR 1, har begränsningen att byggnaden betraktas som en inre öppen cell. Ganska snart stod det klart att ett modernt kontorshus fungerar som en inre öppen cell och att modellen är tillämplig. Den största praktiska användningen av beräkningsmodellen har vi haft just för kontorshus, där vi fått otaliga bekräftelser på dess användbarhet.

EN VANLIG HYBRID - FT-SYSTEM MED SJÄLVDRAG

Innan den renodlade från- och tillluftsventilationen behandlas finns det anledning att behandla en hybrid, som är så vanlig att den givits en egen huvudrubrik.

FIGUR 37 illustrerar ett förhållande som förekommer mycket ofta. Figuren visar ventilationskanaler och ursparingar i bjälklag. Ordningsföljden "på bygget" är följande:

- Ventilationsinstallatören monterar vertikala ledningar och horisontella dragningar under tak i varje våningsplan och fram till fläktrum på vinden.
- Byggnadsentreprenören monterar schaktväggar - t ex av regelverk + dugbla gipsskivor. Anslutningar mellan schaktvägg och kanaler blir otäta.
- Därefter monteras - icke täta - undertak i korridorer och kontorsrum.

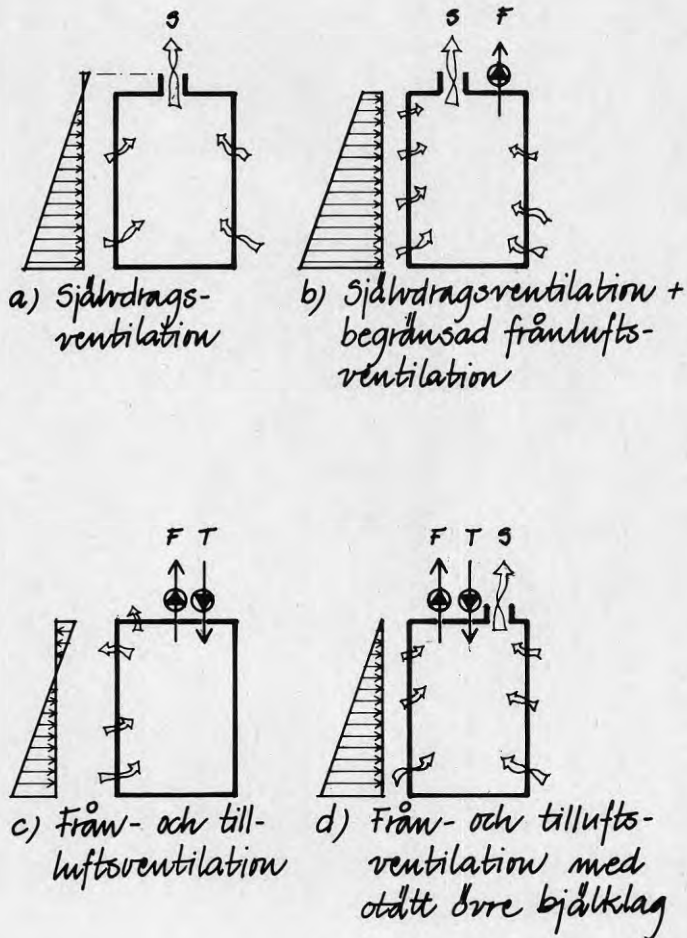


FIGUR 37 HYBRID FRÅN- OCH TILLUFTSVENTILATION MED SJÄLVDRAG

Ursparringarna i övre bjälklag blir vanligtvis inte tätade, vilket innebär att man utöver det avsedda ventilationssystemet har ett rejält tillskott av självdragsevakuering. (Även om det inte är frågan om ett självdragssystem med kanaler till olika våningar ger en öppning i taket samma resultat.)

Att denna hybrid är vanlig beror på att man i bygg- och installationsprogram inte redovisar detaljer och förfarande för igensättning av ursparringar i vindsbjälklaget.

Är man medveten om problemet och föreskriver metod och utförande av tätning i programhandlingar blir merkostnaden mycket blygsam.



FIGUR 38 EXEMPEL PÅ TRYCKBILDER

När det gäller befintliga byggnader, som fungerar på detta sätt, finns det möjligheter att åstadkomma väsentliga besparingar till mycket låg kostnad.

FIGUR 38 illustrerar tryckbilder för några olika system och hybrider.

- a) visar tryckbild vid självdragsventilation,
- b) vid självdragsventilation kombinerad med svag frånluftsventilation,
- c) avser från- och tillluftsventilation vid täta vindsbjälklag och
- d) hybrid med otätt vindsbjälklag.

Om otätheterna är stora fås samma tryckbild som vid självdragsventilation. Detta medför som illustrerats i FIGUR 36 avsevärda energiförluster av luftläckning. Det med S markerade flödet i figur c) utgör alltså ett extra luftflöde av varm luft, som går direkt till kråkorna. Vi har påträffat flera fall med flöden av storleksordningen 10.000 m³/h vid ungefär 20°C temperaturskillnad inne/ute.

TRYCKBALANSERING

Vi upptäckte 1977 och 78 existensen av dessa hybridfall i kontorshus och fann att det med enkla åtgärder var möjligt att åstadkomma väsentliga energibesparingar. Experimentella och teoretiska studier har tidigare gjorts och redovisats av J. Rydberg och av J. Tamura.

När det gäller att "diagnosticera" och praktiskt åtgärda byggnader genom att injustera ventilationen och förändra tryckbilden i gynnsam riktning har Östen Sandberg gjort ett förtjänstfullt pionjärbete som påbörjades i Kiruna redan på 60-talet. Han har kallat modifieringen av tryckbilden för tryckbalansering och vi kan gott behålla denna benämning.

Tryckbalansering i Kiruna stadshus

I samband med injustering av värmen i Kiruna stadshus upptäcktes - Sandberg (1979)* - att det fanns ett yttre övertryck på byggnadens hela höjd. Det var fråga om en tryckbild av den typ som anges i FIGUR 38 d), som ger en systematisk inläckning i byggnaden. Den större luftläckningen nedtill i byggnaden innebar större kyleffekt i undre våningar än i övre, vilket var en försvårande omständighet vid injustering av värmen. Byggnaden var ett exempel på en hybrid liknande den i FIGUR 37, där det otäta övre bjälklaget dock inte gick att täta så lätt som håll i betongbjälklag. I Kiruna stadshus hade man att göra med en stor, otät träkonstruktion i taket. I stället valdes att låta självdraget ta hand om evakueringen och vid fallande utetemperatur göra följande:

- 1) Varva ner frånluftsfläkten
- 2) Stänga fläkten helt
- 3) Reducera arean i frånlufthuvudkanalen

På så sätt har han lyckats "hålla tryckbilden i schack" med nolltrycksnivå ungefär mitt på byggnadens höjd även vid låg utetemperatur.

Resultatet av detta blev:

- Mindre luftläckning och energiförluster
- Minskade olägenheter av drag
- Bättre (jämnare i höjddled) förutsättningar att injustera värmeanläggningen.

*) Sandberg, Ö, 1979. Tryckbalanserad ventilation - ett måste. Byggmästaren 1979:6 - samt information vid personliga sammanträffanden.

Stadshuset, som var den första byggnad som tacklades på detta sätt, har sedan följts av ett antal objekt.

Vid förändring av tryckbilden på detta sätt måste man vara medveten om att det inre övertryck som uppstår i den övre delen av byggnaden vid fuktalstrande verksamhet och fuktkänsliga vägg- och takkonstruktioner kan ge upphov till skador.

I fallet Kiruna stadshus, där väggarna inte är känsliga i förhållande till den aktuella fuktbelastningen, uppträdde skador på murverket i ytterhörn längst upp i byggnaden. Ganska snart påstods det - och det påstås fortfarande - att tryckbalanseringen orsakat dessa skador och att de var orsakade av fukt.

Den verkliga orsaken till skadorna var emellertid en helt annan. Vid taket finns en hammarbandskonstruktion av stål som från början låg stumt an mot murverket vid sina ändar. Skadorna berodde alltså på skillnader i rörelser hos stålbalkar och ytterväggar och på avsaknaden av rörelsemöjlighet. Idag - femton år efter åtgärdandet - finns inga tecken på fuktskador.

KOMMUNICERANDE HUSKROPPAR

I samband med att vi upptäckte existensen av nyss beskrivna hybridfall stod det också klart att tryckprofilen hos en byggnad påverkas av om den är "otätt kopplad" med en annan. Ett polishus, som undersöktes 1977, bestod av en högdel och till denna kopplade och vid sidan liggande lågdelar. Högdelen fungerade som skorsten åt lågdelarna, där undertrycket blev så stort att luften gick in även genom evakueringsdon.*)

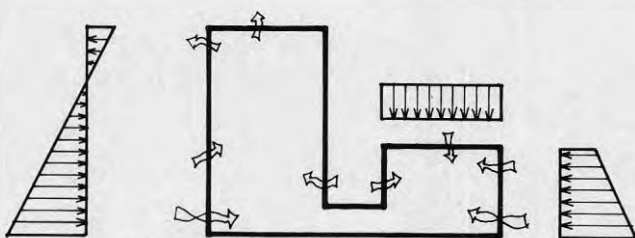
Samma sak hade tidigare upptäckts och åtgärdats i Kiruna.

FIGUR 39 illustrerar schematiskt hur kopplade huskroppar ger upphov till en tryckbild som är gemensam för båda. Den övre figuren a) visar en högdel och en lågdela, där lågdelen har ett inre undertryck, vilket ger upphov till onödigt drag. Den undre figuren b) visar två likadana huskroppar i lutande terräng som har luftförbindelse sinsemellan. Taket på det lägre belägna har i figuren avsiktligt förlagts på samma nivå som basen i det högre för att med den angivna gemensamma tryckbilden visa att det lägre huset kan ha ett inre undertryck och det högre ett inre övertryck.

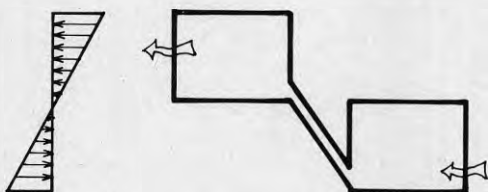
*) BFR R39:1979. Byggnaders lufttätthet. A.Lindh, N-E Lindskoug, P O Nylund

Kombinationsmöjligheterna och variationerna i verkligheten är naturligtvis närmast oändliga. Hur tryckbilden ser ut måste mätas. Det väsentliga är att man inser sammanhangen och vet vad det är för mönster man söker efter när man planerar och genomför sina mätningar och när man efter att ha kartlagt tryckförhållanden försöker finna en vettig åtgärd.

Innan man överväger tryckbalansering av flera kommunicerande byggnader som en enhet bör man naturligtvis först prova om det inte går att skära av luftförbindelsen.



a) högdelen och lågdelen



b) två likadana huskroppar på olika nivå

FIGUR 39 KOMMUNICERANDE HUSKROPPAR MED GEMENSAM TRYCKBILD

FRÅN- OCH TILLUFTSVENTILATION

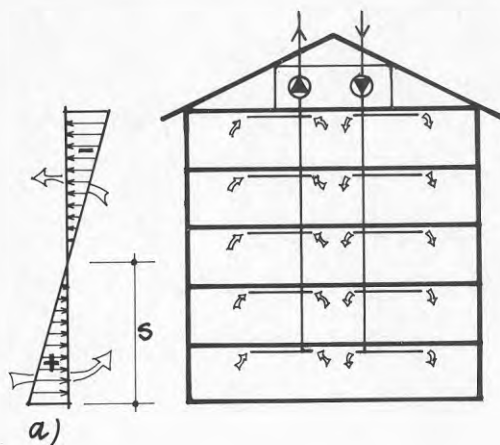
Från hybridfallet återgår vi till det renodlade fallet utan oavsiktliga öppningar i byggnaden, dvs till systemkategori FT2 i FIGUR 3.

FIGUR 40 visar schematiskt kontorshuset försett med från- och tilluftsventilation. Tryckprofilen kan vid lika stora till- och frånluftsfloden se ut som i a) till vänster om byggnaden. Nedtill läcker kall luft in och upptill varm luft ut ur byggnaden. När det gäller FT-ventilerade kontorshus är de yttre förutsättningarna ytterst varierande.

- Byggnaderna har stora variationer i höjd och storlek.
- Ventilationssystemen kan ha mycket olika utformning och funktionssätt.

De stora variationsmöjligheterna gör att känslighetsanalysen i det följande måste bli mycket begränsad. Vi måste "låsa" flera parametrar.

Ventilationsanläggningen antas vara injusterad vid utetemperatur = innetemperatur = 20°C. Vi definierar - tillfälligt och enbart för exemplet - "nominell luftväxling" - n_0 som frånluftsmängden vid injusteringstillfället.



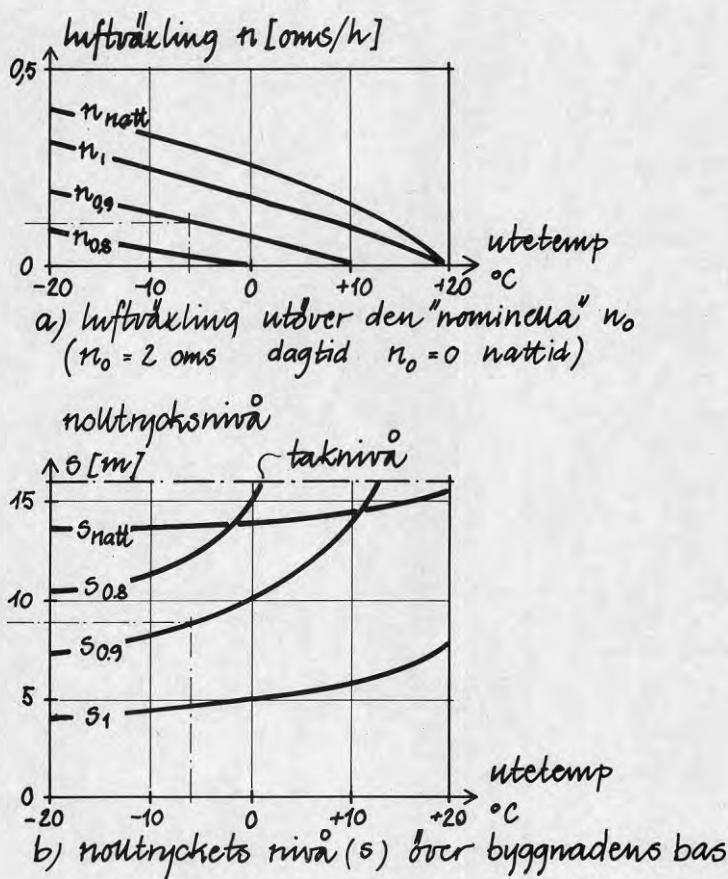
FIGUR 40 FRÅN- OCH TILLUFTSVENTILERAT KONTORSHUS
 Planyta 30 x 30 m. Höjd 16 m - Volym 14.400 m²
 Omkrets 120 m

Ett första huvudfall

- nominell luftväxling $n_0 = 2,0$ oms/h

Nivån av luftväxlingen är realistisk för byggnader där man inte har återluftsföring. Vi skall undersöka tre kombinationer av fläktflöden. Ett fall har fullständig balans mellan till- och frånluftsflöden $n_T = n_0$ vid injusteringen. Det andra har 10 % lägre tilluftsflöde - $n_T = 0,9 \cdot n_0$ och det tredje 20 % lägre tilluftsflöde - $n_T = 0,8 \cdot n_0$.

FIGUR 41 redovisar resultat då byggnaden är försedd med det otätare ytterväggsalternativet $q_{50} = 8,2$ m³/(m² · h · 50 Pa).



FIGUR 41 LUFTLÄCKNING OCH NOLLTRYCKSNIVÅ VID FT-VENTILATION - OTÄTT HÖLJE ($q_{50} = 8,2$)
Nominell vent $n_0 = 2,0$ oms/h vid $T_u = 20^\circ\text{C}$

n_1 och s_1	$Q_{\text{till}} = Q_{\text{från}}$	- " -
$n_{0,9}$ och $s_{0,9}$	$Q_{\text{till}} = 0,9 \times Q_{\text{från}}$	
$n_{0,8}$ och $s_{0,8}$	$Q_{\text{till}} = 0,8 \times Q_{\text{från}}$	

Den övre figuren a) anger vid varierande utetemperatur hur mycket luftväxlingen överstiger den nominella för vart och ett av fallen 1, 0,9 och 0,8 ovan. Den översatta kurvan anger nattfallet, då fläktarna är avslagna, varvid det förutsatts att det inte finns spjäll som stängs vid driftstidens slut. (Anläggningslinjen har antagits vara densamma i drifts- och icke-driftsfall).

Den undre figuren b) anger höjdläge s för tryckprofilens nolläge som i fortsättningen kallas nolltrycksnivå.

Vi kan notera följande:

- Nolltrycksnivån är lägre vid kall väderlek. Fallet är ett exempel på vad som nämndes i avsnittet STÖRNING AV TERMISK för FT-ventilation i flerbostadshus. Fläktarna antas vara relativt starka (500 Pa totaltryckförhöjning), vilket gör att expansionen av tilluften ger ett trycktillskott som sänker nolltrycksnivån.

(Detta gäller inte generellt utan beror av flödesstorlek, totaltryckfall och hushöjd.)

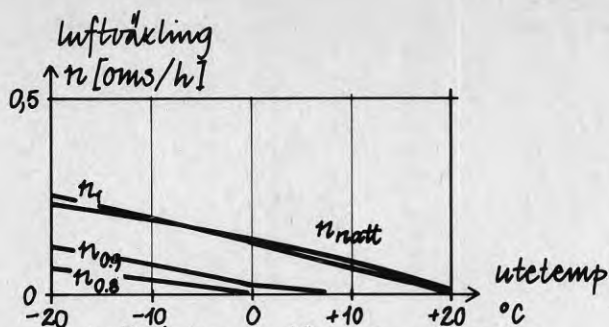
För mindre tilluftsflöde $n_T = 0,9 n_O$ och $n_T = 0,8 n_O$ ligger nolltrycksnivån högre än för det första fallet $n_T = 1 n_O$.

I FIGUR 42 redovisas motsvarande beräkningsresultat då byggnaden är försedd med yttervägg enligt det tätare alternativet $q_{50} = 4,1$.

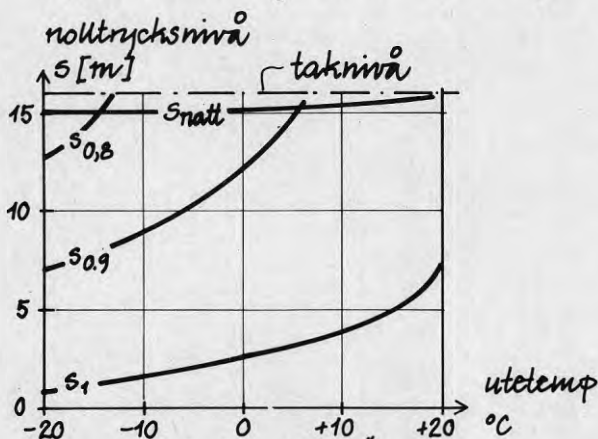
Av den övre figuren a) framgår att luftväxlingen utöver den nominella är mindre än för det otäta alternativet.

Den undre figuren b) visar att spridningen i höjddled mellan kurvorna S_1 , $S_{0,9}$ och $S_{0,8}$ är större än i FIGUR 41.

Detta är naturligt eftersom variationer i tilluftsflödet ger större trycktillskott i byggnaden ju tätare höljet är.



a) luftväxling utöver "nominell" n_0
($n_0 = 2$ oms dagtid $n_0 = 0$ nattid)



b) nolltryckets nivå över
byggnadens bas

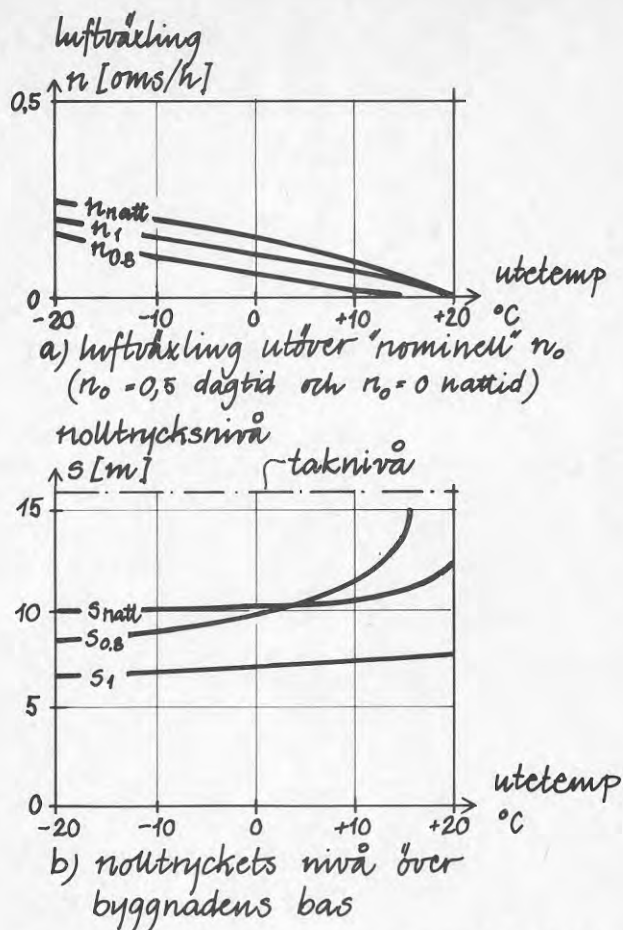
FIGUR 42 NOLLTRYCKETS NIVÅ VID FT-VENTILATION
- TÄTT HÖLJE ($q_{50} = 4,1$)

Nominell vent $n_0 = 2,0$ oms/h vid $T_u = 20^\circ\text{C}$

Ett andra huvudfall

- nominell luftväxling $n_0 = 0,5$ oms/h

Motsvarande beräkningar har gjorts för denna lägre luftväxling och för det otäta väggalternativet - samma som i FIGUR 41. Resultaten anges i FIGUR 43. Jämförs dessa figurer framgår av de övre delarna a) att luftväxling utöver den nominella är mindre. Av de undre figurerna b) framgår att skillnaden mellan nolltrycksnivå vid balans och obalans minskat. (Kurvorna s_1 och $s_{0,8}$ ligger närmare varandra i FIGUR 43. Detta är naturligt, eftersom skillnaden mellan från- och tillluftsflöden är 4 ggr mindre i detta fall.



FIGUR 43 LUFTVÄXLING OCH NOLLTRYCKSNIVÅ VID FT-VENTILATION - OTÄTT HÖLJE ($q_{50} = 8,2$)

Nominell vent $n_0 = 0,5$ oms/h vid $T_u = 20^\circ\text{C}$

Den ökning av luftväxling som fås beror inte enbart på läckflödet genom yttervägg (och kan därför inte kallas luftläckning). Den innefattar också förändrade flöden genom fläktar i förhållande till injusteringstillfallet. Det innebär att man vid beräkning av effektavgivning och om man vill försöka åtgärda byggnaden eller ventilationen för att optimera energiförbrukning måste känna de delflöden som ingår i helhetsbilden.

Exempelvis kan energiinnehållet i ett ökat frånluftsförflöde vid förekomst av värmeväxlare delvis återvinnas, vilket inte gäller för utläckande luft genom yttervägg eller tak.

För att belysa att kalkyler av delflöden är ganska enkla följer här ett exempel med direkt anknötning till det föregående.

NUMERISKT BERÄKNINGSEXEMPEL

Exemplet går ut på att beräkna värden för luftväxling (utöver den nominella) och nolltrycksnivå för det fall som beskrivs av streckprickade linjer i FIGUR 41 dvs, $n_o = 2,0$, $T_u = -6^\circ\text{C}$, $q_{50} = 8,2$.

FIGUR 44 c) visar byggnaden med tilluftsfläkt T och frånluftsfläkt F.

Tryckbild i utgångsläget, se a) i figuren

$$\bar{p} = 0,043 \cdot 16 \cdot 26 = 17,9 \text{ Pa.}$$

Den sökta tryckbildens illustreras av b) där det inre undertrycket vid byggnadens bas skall lösas ur en ekvation för jämvikt mellan flöden in och ut.

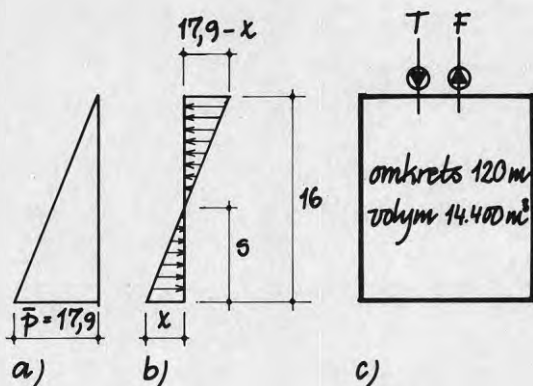
$$\text{Likformigheten ger: } s = \frac{16}{17,9} \cdot x$$

Flöde in genom vägg:

Med specifik otäthet enligt (15) fås flödet enligt (16 b), där arean $A =$ byggnadens omkrets gånger höjden s .

$$\begin{aligned} Q_{\text{in}} &= 120 \cdot \frac{16}{17,9} \cdot x \cdot 0,65 \cdot \frac{1}{1,65} \cdot x^{0,65} \cdot \frac{293}{267} = \\ &= 46,37 \cdot x^{1,65} \end{aligned} \quad (\text{A})$$

Faktorn $293/267$ representerar expansion av luft som värms från -6°C till $+20^\circ\text{C}$.



FIGUR 44 BYGGNAD, FLÄKTAR OCH TRYCKBILD

Flöde ut genom vägg:

$$Q_{\text{ut}} = 120 \cdot \left(16 - \frac{16}{17,9} \cdot x\right) \cdot 0,65 \cdot \frac{1}{1,65} \cdot (17,9 - x)^{0,65}$$

som hyfsas till

$$Q_{\text{ut}} = (756,36 - 42,25 \cdot x) (17,9 - x)^{0,65} \quad (\text{B})$$

Fläktflöde in:

Nominell luftväxling $n_o = 2$ motsvarar $2 \cdot 14\,400 = 28\,800$ m³/h. $n_T = 0,9 n_o$ ger vid totaltrycksförhöjning 500 Pa

$$Q_T = K \cdot \sqrt{500} = 0,9 \cdot 28\,800 \rightarrow K = 1159$$

Om flätkurvan förenklat antas vara vertikal, vilket ger mycket litet fel vid detta höga tryck

$$Q_T = 1159 \cdot \sqrt{500 - (17,9 - x)} \cdot \frac{293}{267} = 1272 \cdot \sqrt{500 - (17,9 - x)} \quad (\text{C})$$

Den andra termen inom parentesen representerar det inre övertryck som motarbetar fläkten.

Fläktflöde ut:

$$Q_F = 1288 \sqrt{500 + (17,9 - x)} \quad (\text{D})$$

Flödesjämvikt:

Jämviktsekvationen ger att flöden

$$(A) + (C) = (B) + (D)$$

Det obekanta jämviktstrycket löses genom passning. I detta fall fås jämvikt för $x = 10,03$, vilket ger följande värden:

$$\begin{array}{r} (A) - \text{Flöde in genom vägg} = 2.081 \\ (C) - \text{Flöde in genom fläkt} = 28.218 \\ \hline 30.299 \end{array}$$

$$\begin{array}{r} (B) - \text{Flöde ut genom vägg} = 1.271 \\ (D) - \text{Flöde ut genom fläkt} = 29.026 \\ \hline 30.298 \end{array}$$

Luftläckning utöver den nominella blir

$$n_{0,9} = \frac{30.298 - 28.800}{14.400} = 0,104 \text{ oms/h}$$

Jämför streckprickad linje i FIGUR 41 a).

Nolltrycksnivån blir

$$s = \frac{16}{17,9} \cdot 10,03 = 8,96 \text{ m (jfr streckprickad linje i FIGUR 41 b).}$$

Som framgår är hanteringen beräkningsmässigt ganska enkel.

Av de redovisade figurerna framgår att ju större flödena är genom fläktar och ju tätare höljet är desto större blir effekten på nolltrycksnivån.

Enbart uppmätning av nolltrycksnivån vid driftsfallet säger inget om de totala förlusterna av ventilation och luftläckning är optimala, eftersom variation i fläktflöden inverkar mycket starkt.

NOLLTRYCKSNIVÅN OCH DESS BETYDELSE

Nolltrycksnivån karakteriserar tillsammans med temperaturskillnaden inne/ute tryckprofilen. FIGUR 45 illustrerar tre alternativa tryckbilder. Med utgångspunkt från dessa och mot bakgrunden av FIGUR 36 kan nolltrycksnivåns betydelse kommenteras litet närmare.

Tryckbild i driftsfallet - dagfallet

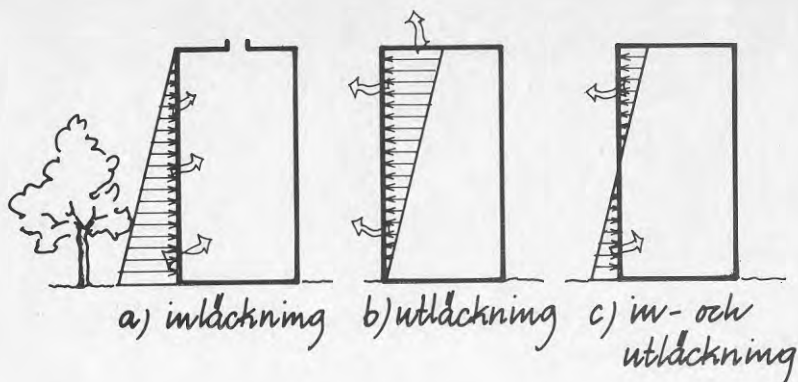
I fallet a) FIGUR 45 sker en inläckning som medför betydligt större värmebehov längst ned i byggnaden. Konsekvenserna blir:

- Svårigheter att injustera värmesystem.
- Olägenheter av drag. Speciellt uttalat är detta i anslutning till entréer. Receptioner och cafeterior kan vara synnerligen utsatta för drag.

I fallet b) sker en utläckning genom ytterväggar och tak. I detta fall finns inte problem med väsentligt olika värmebehov upptill och nedtill i huset och inte heller problem med drag.

- Problemet vid denna tryckprofil är det inre övetrycket som ställer krav på vägg- och takkonstruktion. Tryckprofilen innebär en ökad fuktbelastning.

Fallet c) är ett mellanting och en kompromiss mellan olägenheterna hos de tidigare fallen.



FIGUR 45 ALTERNATIVA TRYCKPROFILER

Tidigare har konstaterats att undertryck i lägenheter har en stabiliserande inverkan mot genomblåsning av lägenheten vid vind. Samma inverkan har ett inre övertryck. Detta innebär att man vid en tryckprofil enligt c) får mer störning av vind än för fallen a) och b).

Tryckbild i nattfallet

Av FIGURERNA 41 - 43 framgår att luftväxlingen nattetid är väsentlig. Byggnaden fungerar i stort sett som ett självdragsventilerat hus. Inte helt renodlat eftersom nolltrycksnivån s_{natt} inte ligger ända upp i byggnadens topp. Effektförlusterna är dock avsevärda. Som exempel är i FIGUR 41 värden för $n_{\text{natt}} = 0,25$ oms vid $T_u = 0^\circ\text{C}$.

Med volymen 14.400 m³ fås effektagivningen enligt (17) - utan fukttillskott:

$$E = 0,25 \cdot 14.400 \cdot 0,33 \cdot 20 = 23.800 \text{ W.}$$

En fördubbling av tätheten ger ungefär halva värdet - jfr FIGUR 42.

Ännu större effekt fås om man installerar spjäll som är stängda under icke-driftstid. Tryckbilderna förskjuts från ett utseende ungefär som i a) till det i c) i FIGUR 45.

Effekten av ett tätt spjäll framgår om vi i FIGUR 36 b) jämför ett segment ned till 14 m (s_{natt} i FIGUR 41) med ett ned till 8 m.

För fuktkänsliga konstruktioner i ytterväggar och tak är det lämpligt att se till att något inre övertryck inte uppstår, vilket åstadkoms genom avsiktlig obalans mellan fläktflöden, dvs på det sätt som vanligen görs. Detta ger en tryckbild med neutralnivån vid eller ovan

taknivån. För effektivast möjliga utnyttjande av värmeväxling bör ytterväggarna vara så täta som möjligt. Luftläckning innebär onödiga förluster.

Av FIGUR 36 b) framgår t ex att:

- för en byggnad med höjden 20 m är förlusterna av luftläckningen den klart största förlustposten, och transmissionsförlusterna för väggen, ytan av den mellersta stapeln, den minsta.

Redan för ett småhus i två plan är läckningsförlusterna av enbart termisk drivkraft ungefär lika stora som transmissionsförluster genom vägg vid normenliga värden för täthet och k-värde.

Som sammanfattning för anknytning till FIGUR 3 konstateras:

Systemkategori FT2

- Variationen av byggnadsstorlek, ventilationsutformning och flödesstorlekar gör att systemkategorin är mycket heterogen.
- Ökad täthet ger minskad luftläckning och energiförbrukning.
- Till skillnad från S- och F-ventilation kan man få övertryck som ger ökad fuktbelastning på ytterväggs- och takkonstruktion. Ökad täthet ger ökad känslighet för förändringar av tryckbilden.
- Samtidigt medför den ökade tätheten att mängden konvektiv fukt som vid ett inre övertryck pressas ut genom väggen minskar och därmed skaderisken.

Sammantaget innebär dessa förhållanden att det krävs ganska kvalificerade byggnadstekniska bedömningar och en grundläggande förståelse för systemfunktionen.

RÅD OCH REKOMMENDATIONER FÖR ENERGISPARVERKSAMHETEN

Listan av åtgärder skulle kunna göras lång, men skulle föra in på rent ventilationstekniska och reglertekniska åtgärder som ligger utanför författarens kompetensområde. Här görs en begränsning till de åtgärder som sammanhänger med det ämnesområde som behandlas i rapporten, nämligen de yttre randvillkoren för byggnadernas luft- och energiutbyte med omgivningen.

För de renodlat fungerande systemkategorierna är de principiella funktionssätten och likaså effekten av tätningsåtgärder desamma som tidigare redovisats för flerbostadshus.

För kontorshus kompliceras situationen av att det förekommer driftfall och icke-driftfall. Byggnader med mekanisk ventilation - kategorier F2 och FT2 fungerar under icke-drifttid som självdragsventilerade.

- Detta innebär att man i båda fallen kan spara stora mängder energi genom att installera spjäll i huvudkanaler som automatiskt stängs då fläktarna slås ifrån. (Det är dock inte alltid lätt att göra detta i gamla anläggningar.)
- För byggnader med från- och tilluftsventilation kan ventilationsförlusterna minskas även under drifttid om fläktarna inte är för många och för utspridda och det går att åstadkomma återluftförling och utnyttja luftinläckning som uteluftstillförsel.
- För att konstatera om man står inför renodlade systemkategorier räcker det inte med att studera ritningar och ta fram driftsdata och driftsrutiner. Det krävs en ingående besiktning av byggnad och ventilationsanläggning för att kontrollera förutsättningarna och planlägga de mätningar som måste göras.

Dessa går ut på att registrera fläktflöden och tillhörande tryckprofiler i höjddled vid varierande flöden. Ofta är det lämpligt att göra en täthetsprovning av hela byggnaden i samband med mätningarna.

Resultaten analyseras med hjälp av den beräkningsteknik som åsyftas i FIGUR 1. Resultatet blir inte sällan en bristande överensstämmelse mellan parvisa värden av totalt fläktflöde och tillhörande tryckbild. Bristen på överensstämmelse ger en indikation på förekomsten av ett okänt dominerande läckställe, som man sedan kan leta efter och finna.

På detta sätt har vi i flera fall hittat läckställen som inte kunnat upptäckas vid den första besiktningen och som klarlagt fallens karaktär av hybrider. Ofta är det frågan om dominerande otätheter i byggnadens övre del.

Åtgärder som i sådana fall kan ge stora energibesparingar är att täta de upptäckta, stora läckställena

eller att påverka tryckförhållandena genom att ändra fläktflöden - den tidigare beskrivna tryckbalanseringen. På så sätt kan en billig åtgärd ge en större reduktion av luftläckningen än en mycket kostsam tätning av ytterväggarna.

Det är sålunda för inre öppna byggnader, kontorshus, hallar och småhus inte möjligt att - som för tidigare behandlade flerbostadshus - ange närmare förfarande när det gäller att avgöra effekten av tätningsåtgärder. Här krävs grundläggande insikter om hur byggnaden och ventilationssystemet samverkar och hur problem kan hanteras genom mätningar och beräkningar.

MÄTNINGAR

Byggnormens täthetskriterium i form av omsättningstal n_{50} kan uppfattas som en form av godhetstal för byggnadens ytterhölje. När det gäller att utföra mätningar av de storheter som karaktäriserar en byggnads egen-skaper med avseende på luftväxling är det av flera skäl naturligt att tillgripa andra metoder och principer.

I denna rapport redogörs inte för mätmetoder. Förståelsen för systemtänkandet kommer före behovet av tillämpning. Här skall bara med ett par exempel antydast innebörden av andra metoder och principer.

Först skall göras en nyansering när det gäller sambandet mellan tryck och flöde - Q/p - och n/p -kurvorna.

SAMBAND MELLAN FLÖDE OCH TRYCK

I FIGUR 4 och fotnot på sid 14 presenterades två kurv-grenar som går delvis om lott. Existensen av dessa och det principiella mönstret fås ganska enkelt ur de samband för strömning i rör, som i litteraturen presenteras som grundläggande utgångspunkt inom såväl hydrostatik som ventilationsteknik.

Om vi bortser från skalan i FIGUR 4 finns en laminär gren ($\beta = 1,0$) som blir mer och mer instabil i ett övergångsområde och en krökt gren som åt höger går mot ökad turbulens och ett värde $\beta = 0,5$. Läget av övergångszonen beror på strömningsvägens dimensioner.

Tryckprovning av en byggnad, lägenhet eller väggyta innebär provning av ett stort antal parallellkopplade otätheter av varierande art, form och dimension, som kan ha övergångsområden på olika ställen utmed tryckskalan.

Tryckprovningen kännetecknas av ett väsentligt inslag av turbulens i rummet som kan förväntas störa strömningen och förhindra laminär strömning i kritiska områden. Läckkurvan får karaktären av en undre gränskurva eller envelope till vad som skulle bli resultatet av en provning utan inslag av turbulens.

Detta är en anledning till att utveckla metoder för mätning i tryck- och flödestillstånd som är naturligt för byggnaden. Utformning enligt denna princip kan ibland förenkla och ibland komplicera mätningarna. Det första exemplet är en förenkling av mätningar i förhållande till den standardiserade tryckprovningsmetoden.

Frånluftsventilerade byggnader

Funktionstillståndet överensstämmer med tillståndet vid undertrycksprovning enligt tryckprovningssmetoden.

En modifierad undertrycksprovning ger oss vad vi behöver veta för att beräkna ventilationsförluster. Genom att mäta ventilationsflödet och undertrycket i byggnaden konstateras om fläkten är tillräckligt stark för att störningar av vind och termik kan negligeras. Om så är fallet har man vad man behöver för att beräkna ventilationsenergin.

Om inte görs ytterligare mätningar, fortfarande med hjälp av befintliga fläktar och strypning av flöden. Resultatet blir en total läckkurva i det tryckintervall som är byggnadens naturliga.

Självdraagsventilerade byggnader

Här kompliceras valet av mätmetod.

- Ett sätt som vi provat är att tryckprova lägenheter för att användas vid beräkning på samma sätt som redovisats tidigare och som framgår av FIGUR 16.
- Ett annat sätt är att använda samma teknik som nyss beskrevs för frånluftsventilerade byggnader genom att mäta evakueringsflöden och tryckskillnad över vägg vid kall väderlek och vindstilla. Man får ett värdepar, Q_1/p_1 , då samtliga evakueringskanaler är öppna och ett annat Q_2/p_2 , då några av kanalerna täcks för och kan konstruera en läckkurva som anknuter till naturligt trycktillstånd.

I ett par lägenheter användes båda metoderna. Den första gav ett resultat som den heldragna kurvan i FIGUR 4 och den andra som den streckade. Iakttagelserna var tillräckligt tydliga för att inte "bortförklaras som mätfel".

Störning av turbulens

I anslutning till dessa mätningar gjordes därför i några lägenheter mätningar med alla evakueringskanaler öppna. Summering av evakueringsflöden gav ett utgångsvärde för totalflödet.

Efter att ha startat en omblandningsfläkt i hallen - långt från kanaler och ytterväggar - gjordes en ny mätning, varvid flödet minskat - i ett av fallen med 30 %.

Efter det fläkten stängts av och efter att ha väntat en stund - ca 10 minuter - gjordes en förnyad mätning. Flödet hade då återgått till det ursprungliga och högre värdet.

Det iakttagna fenomenet bekräftades senare vid en serie laboratoriemätningar.

Slutsatsen av iakttagelserna är att mätningar och mätmetoder i möjligaste mån skall anpassas till för byggnaden och ventilationen naturliga strömnings- och trycktillstånd.

Beträffande spårgasmätning med omblandningsfläktar

Mot bakgrunden av detta har tillförlitligheten hos spårgasmätningar ifrågasatts. Sedan dess har framkommit att man på några håll gjort iakttagelser som kan förklaras av det redovisade förhållandet.

AVSLUTNING

SAMPELET BYGGNAD / VENTILATION - ETT STEG MOT HELHETSSYN

Det arbete från vilket en del resultat redovisats här kan ses som ett första steg att nå en helhetssyn. Redan detta arbete har påvisat hur bristande överblick gett utrymme för energisparåtgärder som inte ger avsedd effekt och systemutveckling som inte beaktat helhetsfunktionen.

Beräkning av energiförluster

Man kan konstatera att effekt- och energiförluster av luftläckning är en väsentlig post i byggnadens totala energibalans. Beräkning av energiförluster utan hänsyn till luftläckning eller med ett fixerat omsättningstal "rakt över uppvärmningsperioden" blir därför verklighetsfrämmande räkneövningar oavsett hur sofistikerade de är på andra poster av energitillförsel och energiförluster. För att komma åt en byggnads energibalans krävs mätningar och beräkningar - inte minst av täthetskaraktäristik och luftväxling.

Utformning av ytterhölje

Under några decennier har ytterhöljets utformning påverkats av existerande beräkningsmetoder. De godhets-tal som beräkningsmässigt kunnat hanteras har påverkat materialval och teknisk utformning. De allmänt spridda kunskaperna inom byggnadstekniken har varit hur man "räknar på" värmetransmission och på fuktdiffusion.

Detta har resulterat i utformningar där de beräkningsbara egenskaperna kommit i förgrunden. Ytterhöljet har komponerats genom att kombinera ett antal material med vardera en renodlad och långt utvecklad egenskap.

I och för sig är det inget negativt i detta. Man bör dock vara medveten om att den totala konstruktionen blir känslig för sidoverkningar. Konstruktionen blir byggfysikaliskt sett mer komplicerad och kritisk.

Tidigt insåg man att fuktkonvektion utgjorde en allvarligare fuktbelastning än fuktdiffusion och även att luftläckning vid sidan av värmetransmission hade stor betydelse.

Den beräkningsmodell som presenterats ger oss en naturlig möjlighet att hantera både luftläckning och fuktkonvektion beräkningsmässigt och att bättre överblicka förutsättningarna för att utveckla väl fungerande ytthöljen.

Redan nu med dagens krav har arkitekter och konstruktörer svårt att utforma tillförlitliga konstruktionsdetaljer, speciellt kring fönster.

Som framgått av det tidigare fås en ganska marginell effekt av ytterligare k-värdesskärpning. Om vi nämligen håller oss till systemkategorin från- och tillläggsventilerade byggnader, där ventilationsbehovet inte kräver luftläckning, ser vi av FIGUR 36 att transmissionsförlusterna för väggytan med dagens normkrav är "ganska klämda" mellan transmission genom fönster till höger och luftläckningen till vänster.

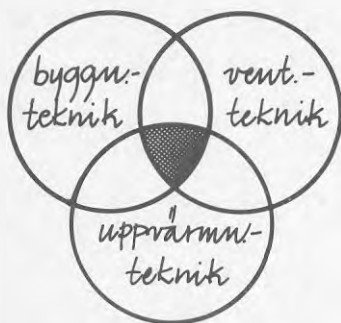
Nyss nämndes att beräkning av energiförluster för befintliga byggnader utan hänsyn till luftläckning blir verklighetsfrämmande räkneövningar. När man ställer prognoser för energibehov för "byggnader i andanom" gäller samma sak.

Man måste räkna med luftläckningen!

BYGGNADEN SOM TOTALSYSTEM

Byggnader har mycket varierande individuella särdrag. Iakttagelser av olika energiförbrukning hos ytligt sett likadana byggnader bör alltid ge anledning till att undersöka om det finns grundläggande tekniska skillnader innan man gömmer avvikelser i statistiska bearbetningar och avfärdar avvikelser som brukarberoende.

En byggnads behov av effekt för att ge tillfredsställande inomhuskomfort vid varierande klimatpåfrestning beror av byggnaden och installationerna. Byggnaden måste då ses som ett totalsystem, FIGUR 46. I detta ingår också uppvärmningstekniken. Rätt effekt skall levereras vid rätt tidpunkt. Byggnaden och uppvärmningssystemet är två termodynamiska system som skall stå i samklang med varandra. Systemegenskaper och helhetsfunktion måste grundligt studeras.



FIGUR 46 BYGGNADEN SOM TOTALSYSTEM

Det inre och prickade fältet markerar utgångspunkten för ett vidgat systemtänkande. För att kunna hantera energisparande i byggnader krävs gediget byggnadstekniskt kunnande. Man får nämligen se upp med de byggfysikaliska konsekvenserna av förändringar i totalsystemet. Till det byggnadstekniska kunnandet måste fogas erforderliga kunskaper om ventilations- och uppvärmningssystemfunktion för att greppa totalfunktionen och för att kunna föra diskussioner över ämnesgränserna.

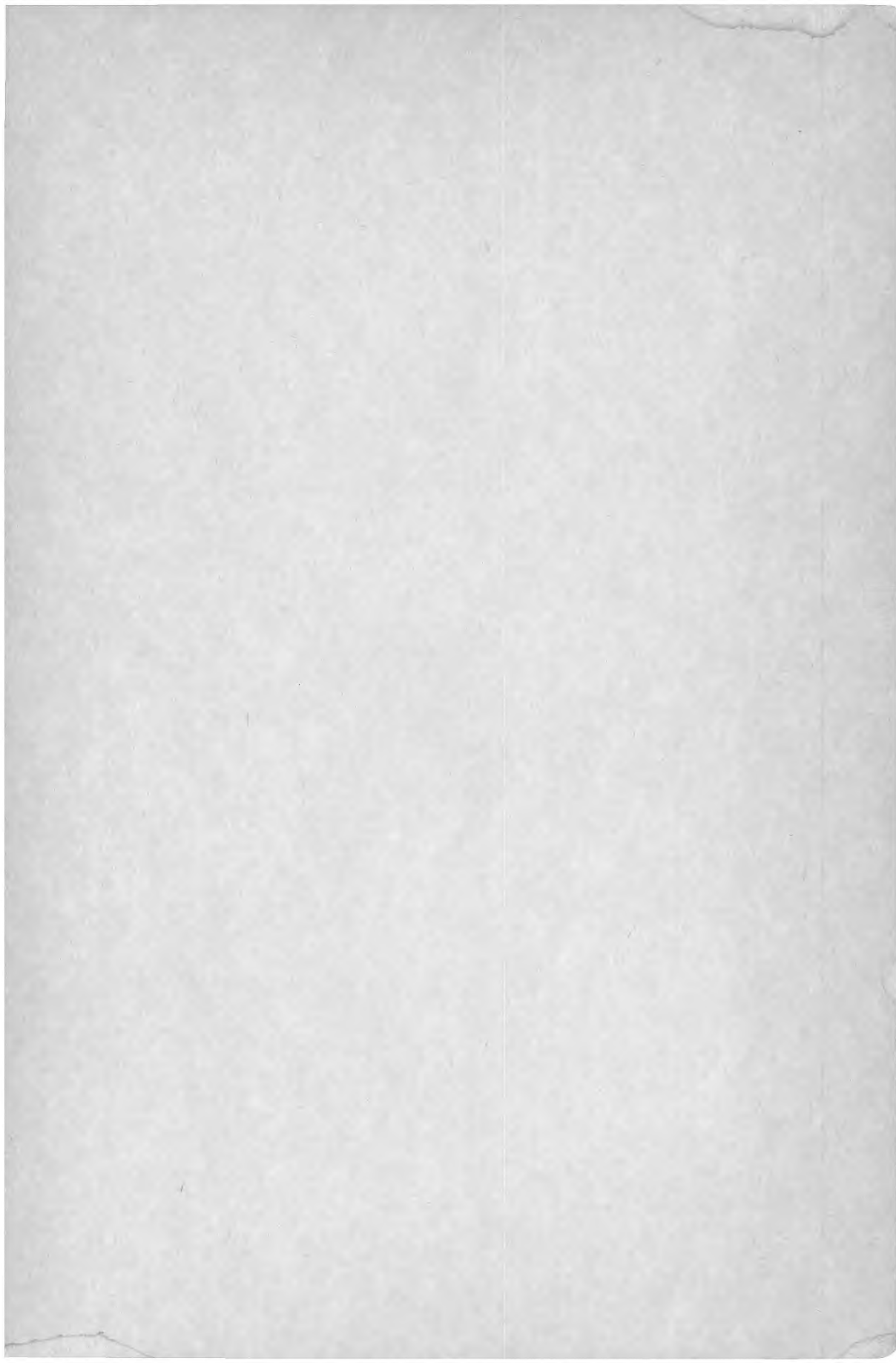
Specialiseringen - ett allvarligt hinder

Energisparande i byggnader går ut på att betrakta byggnaden som energikonsument. På detta område finns inga traditioner vare sig det gäller utbildning och forskning eller vetenskaplig utveckling. Vi har fått en situation med ett omfattande utbud av energisparåtgärder, -komponenter och -system, som ibland utvecklas utan hänsyn till helheten (totalsystemet). Möjligheten att sovra bland utbudet är begränsad av samma brist på helhetssyn. Åtgärder, komponenter och system som är resultat av deloptimeringar finns litet varstans inom byggnads-, ventilations- och uppvärmningstekniken. Deloptimeringarna är en konsekvens av specialisering. Områdena i FIGUR 46 svävar idag fritt i förhållande till varandra. Trots lovvärda försök att foga samman bilden finns fortfarande gränser mellan disciplinerna i figuren.

Det gäller att samla och utnyttja det ingenjörskunnande som finns på olika (del)-områden som en bas för forskning och vidareutveckling.

Vi har inte rätt att i ensidig energisparnit glömma bort den kunskap som finns inom de olika delområdena och att bortse från det arbete som gjorts - ibland i det tysta. Följden blir bara en ny specialistgrupp och risk för dimridåer över gränserna.

Trots allt finns det nämligen på olika håll ett stort kunnande, som emellertid är splittrat av skrågränser och även på annat sätt - ibland av formell utbildningsnivå. Det gäller att ta vara på detta kunnande och att arbeta för att "greppa" byggnaden som totalsystem.





**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
770841-1 från Statens råd för byggnadsforskning
till Tyréns Företagsgrupp AB, Stockholm.**

R1: 1984

ISBN 91-540-4052-3

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6704001

**Abonnemangsgrupp:
Z. Konstruktioner och material**

**Distribution:
Svensk Byggtjänst, Box 7853
103 99 Stockholm**

Cirka pris: 40 kr exkl moms