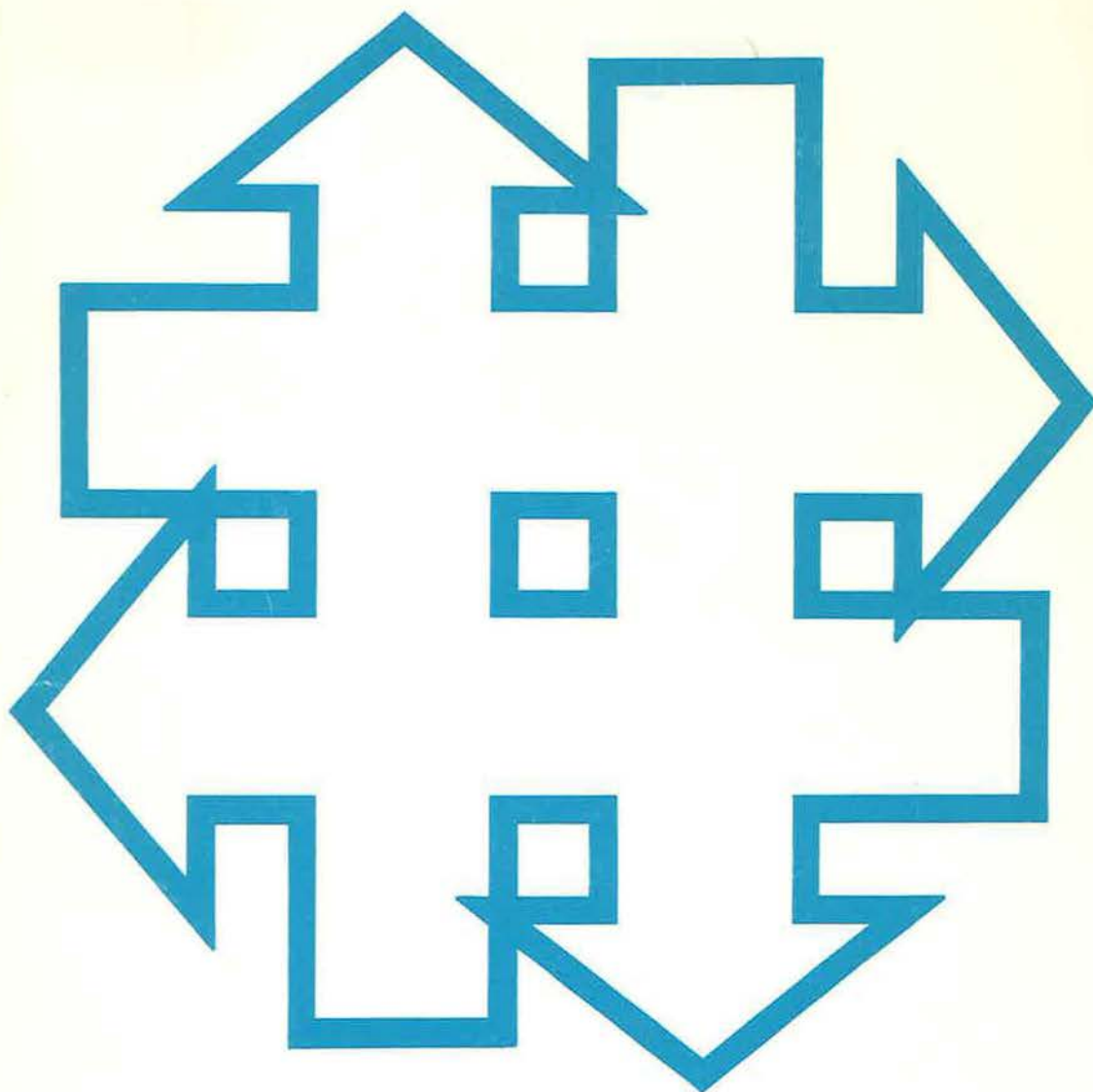


AICR SE 28

#1346

# Mikroklimat och luftväxling

Kamal Handa  
Gunnar Kärrholm  
Thomas Lindquist



Täthetsgruppen

STATENS RÅD FÖR BYGGNADSFORSKNING

# **Mikroklimat och Luftväxling**

**Kamal Handa  
Gunnar Kärholm  
Thomas Lindquist**

Redigering och layout: Fred Heymann och  
Elisabeth Sedig, Informationsprojekt AB

T3:1979

ISBN 91-540-2961-9

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

LiberTryck Stockholm 1979 952135

# Förord

Våren 1977 bildades på initiativ av Statens råd för byggnadsforskning en arbetsgrupp som inom området »Lufttäthet i byggnader» skulle kartlägga forskningsbehovet och initiera forskning. Arbetsgruppen fördelade under sin fortsatta verksamhet uppgifterna på fem undergrupper som skulle behandla frågor om terminologi, mätmetoder, systemanalys, byggnadstekniska lösningar och mikroklimat. Inom det sistnämnda området skulle endast de faktorer behandlas som har betydelse för byggnaders luftväxling.

Föreliggande skrift, som innefattar en problembeskrivning och en översikt över forskningsbehovet inom området mikroklimat utarbetades vid avdelningen för Byggnadskonstruktion, CTH. Kapitel 3, utom avsnitt 3.6.2, är en bearbetad översättning av Kamal Handas skrift »Wind induced natural ventilation». Övriga delar har skrivits av Gunnar Kärrholm och Thomas Lindquist.

Författarna hade vid skriftens uppläggning förmånen att rådgöra med en expertgrupp bestående av Enno Abel, Sune Larm, Lars Erik Nevander och Bengt Wirén, till vilka vi framför vårt varma tack.

Kamal Handa, Gunnar Kärrholm, Thomas Lindquist

# Innehåll

<b>Beteckningar</b> .....	7
<b>1 Inledning</b> .....	9
<b>2 Modell för en byggnads luftväxling</b> .....	11
2.1 Definitioner och terminologi .....	11
2.2 Systemanalys .....	12
<b>3 Vindbetingade tryck</b> .....	15
3.1 Inverkande faktorer .....	15
3.2 Vindens egenskaper .....	16
3.3 Stationära tryck på friliggande, enkla byggnadskroppar .....	24
3.4 Tryckfördelningens beroende av byggnadens detaljutformning .....	28
3.5 Inverkan av närliggande bebyggelse .....	34
3.6 Vindturbulensens inverkan på en byggnads luftväxling .....	38
<b>4 Temperatureffekter</b> .....	56
<b>5 Samordnade klimatdata</b> .....	58
<b>6 Forskningsuppgifter</b> .....	61
6.1 Uteklimatet .....	61
6.2 Inneklimatet .....	63
6.3 Pågående forskning .....	63
<b>Litteratur</b> .....	64
<b>Sammanfattning</b> .....	67

# Beteckningar

$A$	area, $m^2$
$C_1$	dynamisk förlustfaktor
$C_{d1}$	flödesfaktor
$c_p$	yttre formfaktor
$C(z)$	höjdfunktion för vindprofiler
$f$	frekvens, Hz
$g$	jordacceleration, $m/s^2$
$g_\alpha$	spetsfaktor
$K$	von Karmans konstant
$K_r$	markytans skrovlighetskoefficient
$k$	konstant
$N$	summationstal
$n$	luftomsättningstal, $h^{-1}$
$p$	tryck relativt atmosfärtrycket, Pa
$\Delta p$	tryckskillnad över klimathöljet, positivt för utvändig övertryck, Pa
$\Delta p_r$	skillnaden mellan atmosfärtrycket och innetrycket i en punkt på ett referensplan, positivt för utvändig övertryck, Pa
$Q$	ventilationsförlust, Wh
$q$	luftflöde, $m^3/s$
$q_{tot}$	total ventilation, $m^3/s$
$R_w(\tau)$	autokorrelationsfunktionen för vindtrycksskillnaden mellan punkt 1 och 2
$R_{p1p2}(\tau)$	korskorrelationsfunktionen för vindtrycken i punkt 1 och 2
$S_w(f)$	spektraltätheten för vindtrycksskillnaden mellan punkt 1 och 2
$S_{p1p2}(f)$	korsspektrum för vindtrycken i punkt 1 och 2
$T$	tidsintervall vid integrering
$T_i$	innetemperatur, $^\circ K$
$T_u$	utetemperatur, $^\circ K$
$\Delta T$	$T_i - T_u$
$V$	byggnadens inre volym
$V_o$	lufthastighet genom en öppning, $m/s$

$v(t)$	vindhastighet, m/s
$v_*$	friktionshastighet
$z$	avstånd i höjded, m
$z_0$	markytans friktionshöjd
$z_s$	gränshöjd, m
$\alpha$	exponent beroende av markskrovligheten
$\beta$	turbulensberoende faktor
$\Delta$	differens
$\delta$	amplitud
$\eta$	verkringsgrad för ventilationsvärmväxlare
$\lambda$	våglängd, m
$\rho$	luftdensitet, kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	standardavvikelse

#### Index

A	terrängtyp
B	terrängtyp
C	terrängtyp
F	frånluft
g	gradient, -höjd, -hastighet
i	inomhusvärden
K	klimatbetingad
M	mekaniskt styrd
m	aritmetiskt medelvärde
n	delyta, delvärde
T	tilluft
u	utomhusvärden

# 1 Inledning

Behovet av att kunna reglera och beräkna luftväxlingen i byggnader har accentuerats till följd av ökade krav på energihushållning. Betydande delar av värmeförlusterna sker i samband med luftströmning genom otäta väggar, golv och tak. Relativt sett blir dessa energiförluster större sedan de klimatskiljande byggnadernas konventionellt bedömda värmeisolering förbättrats.

Energhushållningsaspekten motiverar att ventilationen begränsas samt att oavsiktlig ventilation genom klimathöljets otätheter förhindras. Detta kräver byggnader med hög lufttäthet. Ur komfort- och hälsosynpunkt måste man emellertid uppnå en viss minimiventilation. För byggnader med självdrags- eller mekaniskt frånluftssystem har tilluften tidigare till största delen kunnat passera genom klimathöljets otätheter. I täta byggnader kommer detta tilluftsflöde att förhindras. Eftersom det torde vara omöjligt att föreskriva såväl en högsta som en lägsta täthetsnivå, måste man vid dessa typer av ventilationssystem tillföra luft genom planerade och kontrollerbara öppningar av typ vädringsluckor och springventiler.

Luftströmningen genom byggnadsdelar bestäms av flera faktorer. Till dessa hör

- vindförhållanden
- temperaturer inom- och utomhus
- otätheternas omfattning, fördelning, form och vatteninnehåll
- ventilationssystemets typ, utformning och kvalitet
- ventilationsflödet
- byggnadsvolymens uppdelning
- brukarnas vanor beträffande temperaturnivå, vädring och öppethållande mellan rummen.

Denna skrift behandlar mikroklimatets inverkan på luftväxlingen, dvs de av vind och utetemperatur betingade tryckskillnader som förorsakar luftströmningen genom byggnadens otätheter.

Dessa tryckskillnader kan emellertid inte bestämmas utan beaktande av de övriga, ovan nämnda företeelser som inverkar på luftströmningen. Mikroklimatets effekt kombineras därför på ett komplicerat sätt med andra faktorer som inflytande på sys-



temet byggnad och omgivning. Huvuddelen av framställningen har ägnats åt bestämning av vindtryck. Detta innebär inte att fläktstyrda tryck skulle vara mindre viktiga eller att termiskt betingade tryck lämnas utan avseende. Vindeffekterna har tilldelats en dominerande plats eftersom de är svåra att beskriva.

## 2 Modell för en byggnads luftväxling

### 2.1 DEFINITIONER OCH TERMINOLOGI

Luftväxlingen i en byggnad kan schematiskt åskådliggöras med FIG 2.1. Till- och frånluftsflöden delas där upp i en mekaniskt och en mer eller mindre klimatstyrd del. Det mekaniskt styrda luftflödet går genom ett avpassat kanalsystem med till- och frånluftsdon, av praktiska skäl innefattas eventuell kanalläckning. Den klimatstyrda delen går genom otätheter i byggnadens klimathölje, avsiktliga öppningar och ventiler. Gränsen mellan mekaniskt styrt och klimatstyrt flöde är inte alltid självklar, men bör utgå från ett tillgängligt drivtryck. Tryckfall i mekaniska system är av storleksordningen 100 Pa, klimatbetingade tryck är oftast en tiopotens lägre. Självdragsventilation kan betraktas som klimatstyrd.

Om alla luftflöden omräknas till rumstemperatur får vi med beteckningar enligt FIG 2.1 det enkla sambandet

$$q_{MT} + q_{KT} = q_{MF} + q_{KF} = q_{tot} \quad [2.1]$$

tillluft                  frånluft

där

$q_{tot}$  = total ventilation, m<sup>3</sup>/s

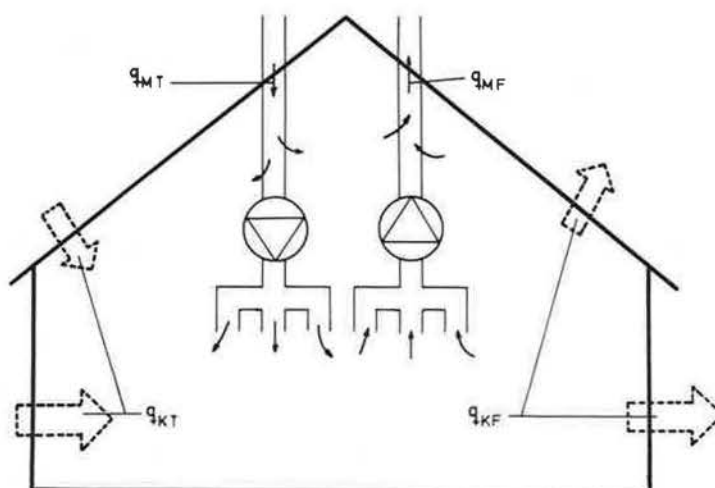
FIG 2.1. Schematisk bild av en byggnads luftväxling

$q_{MT}$  = mekaniskt styrd tilluft, innefattande kanalläckning inom byggnaden

$q_{MF}$  = mekaniskt styrd frånluft, innefattande kanalläckning inom byggnaden

$q_{KT}$  = klimatbetingad tilluft genom otätheter, öppningar och ventiler

$q_{KF}$  = klimatbetingad frånluft genom otätheter, öppningar och ventiler.



Om den totala ventilationen divideras med byggnadens inre volym  $V$  erhålls den totala luftomsättningen som per timme blir  $n = 3600 q_{\text{tot}}/V$  ( $\text{h}^{-1}$ ).

Det numeriskt största värdet av  $q_{\text{MT}}$  och  $q_{\text{MF}}$  betecknas *avsiktlig ventilation*, skillnaden mellan total ventilation och avsiktlig ventilation betecknas *oavsiktlig ventilation*.

## 2.2 SYSTEMANALYS

P O Nylund har sammanställt ett antal generella samband som vid stationära eller långsamt ändrade förhållanden beskriver en byggnads luftväxling med omgivningen. Sambanden återges här i bearbetad form.

### *Flödesbalansen*

Om man i [2.1] beaktar de av temperaturskillnader betingade volymändringarna, erhålls

$$\begin{aligned} q_{\text{MT}} \cdot \frac{T_i}{T_u} + q_{\text{KT}} \cdot \frac{T_i}{T_u} &= q_{\text{MF}} + q_{\text{K}} = \\ &= \text{total ventilation vid rumstemperatur} \end{aligned} \quad [2.2]$$

där

$T_i$  = innetemperaturen, °K

$T_u$  = utetemperaturen, °K

I ovanstående samband mäts tilluftsflöden vid utetemperatur och frånluftsflöden vid innetemperatur. Flödena  $q_{\text{MT}}$  och  $q_{\text{MF}}$  kan i en första approximation antas oberoende av småre, naturliga tryckvariationer och byggnadens grad av otäthet.

### *Tryckskillnaden över klimathöljet*

Tryckskillnaden  $\Delta p_n$  över klimathöljet vid punkten  $n$  kan tecknas

$$\Delta p_n = \frac{1}{2} \rho c_{pn} v^2 - \rho_0 g 273 \left( \frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_i} \right) z_n + \Delta p_r \quad [2.3a]$$

vindtryck      skorstenseffekt      referenstryck

där

$\Delta p_n$  = tryckskillnaden över klimathöljet i en punkt  $n$ , positiv för utvändigt övertryck, Pa

$\rho$  = luftdensiteten,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$c_{pn}$  = formfaktor i en punkt  $n$

$v$  = vindhastigheten,  $\text{m}/\text{s}$

- $\rho_o$  = luftdensiteten vid 0°C och rådande atmosfärtryck, kg/m<sup>3</sup>  
 $z_n$  = avståndet i höjdlid till punkten n från ett valt, horisontellt referensplan, m  
 $\Delta p_r$  = skillnaden mellan atmosfärtrycket och innetrycket i en punkt på referensplanet, positivt för utvändigt övertryck, Pa

Ekvation [2.3a] kan i SI-systemet approximativt skrivas

$$\Delta p_n \approx 0,6 C_{pn} v^2 + 0,04 \Delta T \cdot z_n + \Delta p_r \quad [2.3b]$$

där

$$\Delta T = T_u - T_i$$

#### **Läckflödet**

Flödet  $q_n$  genom en area  $A_n$  på klimatbarriären kan skrivas

$$q_n = A_n \cdot f_n(\Delta p_n) \quad [2.4]$$

där  $q_n$  räknas positivt för strömning *till* byggnaden. Den tryckberoende funktionen  $f_n(\Delta p_n)$  skrivs ofta

$$f_n(\Delta p_n) = k \cdot (\Delta p)^\beta$$

där  $0,5 \leq \beta \leq 1$ , varvid  $\beta = 0,5$  vid turbulent strömning och  $\beta = 1$  vid laminär strömning. Formeln är dock inte tillämpbar vid springor, vars öppningar kan ändras med trycket som t ex vid läpplister.

#### **Samband mellan totala flöden och delflöden**

De totala flödena  $q_T$  och  $q_F$  till och från byggnaden sammanfattas av flöden  $q_n$  genom klimathöljets delytor

$$\begin{aligned}
 q_T &= \sum_{n=1}^N q_n && \text{för positiva } q_n \\
 q_F &= \sum_{n=1}^N |q_n| && \text{för negativa } q_n
 \end{aligned}
 \quad [2.5]$$

där

- $q_T$  = totalt tilluftsflöde  
 $q_F$  = totalt frånluftsflöde  
 $N$  = antalet delytor

I den fysikaliska modellen förutsättes att byggnaden har ett försumbart inre strömningsmotstånd, samt att luftväxlingen genom springor och öppningar sker vinkelrätt mot väggens plan. Detta kan innebära grova approximationer, som dock i första fallet kan övervinnas genom att byggnaden delas upp i sammanhängande luftceller, som var och en beräknas med hjälp av kopplade ekvationssystem.

Av ekvation [2.3a] framgår att vindhastigheten samt ute- och innetemperaturerna har primär inverkan på tryckskillnaderna över byggnadens klimathölje och därmed på delflödena  $q_n$ . Insättning i [2.3b] visar att vindbetingade tryckskillnader dominerar över temperaturbetingade redan vid låga vindhastigheter såvida antalet våningar är litet.

Temperaturen inverkar som framgår av ekvation [2.2] också på flödesbalansen eftersom temperaturskillnader mellan ute och inne medför en förändring av den omsatta luftmassans volym. Härtill kommer svårbestämda effekter på otätheternas dimensioner och luftens viskositet, vilka inverkar på parametrarna i ekvation [2.4].

## 3 Vindbetingade tryck

### 3.1 INVERKANDE FAKTORER

Tryckskillnaden över en byggnads klimathölje beror på vindhastigheten, inne- och utetemperaturerna (skorstenseffekten), eventuella fläktstyrda luftflöden samt klimathöljets permeabilitetsegenskaper. Dessa faktorer är som nämnts kopplade till varandra och det går inte att i ett generellt fall särbehandla dem och »addera fram» en lösning. Av denna anledning bör också begreppet »inre formfaktor» reserveras som en abstraktion enbart för vindlaständamål. I det följande särbehandlas dock för enkelhetens skull vindkrafterna och deras betydelse för en byggnads luftväxling under antagandet att referenstrycket  $\Delta p_r$  är känt. Den för  $\Delta p_r$  bestämning nödvändiga kopplingen till andra fysikaliska företeelser diskuteras senare.

En stor svårighet vid behandlingen av en byggnads vindbetingade luftväxling är avsaknaden av tillförlitliga uppgifter om vindtrycksfördelningen över byggnaden. Det finns flera allvarliga begränsningar i den tillgängliga informationsmängden.

För det första behandlar den bara ett begränsat antal byggnadstyper, mätta i vindtunnel.

För det andra studeras till övervägande delen endast friliggande byggnader, ett fall som är sällsynt i praktiken. Ytterst få arbeten har utförts om vindens inverkan på byggnader i grupp, se Soliman och Fricke. Undersökningar som har syftat till en översiktlig beskrivning av vindförhållandena i stora områden är inte tillämpliga vid bestämning av en mera detaljerad vindtrycksfördelning.

För det tredje har mätningarna nästan undantagslöst skett på modeller i vindtunnlar. De yttre randvillkoren kan med dagens vindtunnelteknik i många fall simuleras med acceptabel noggrannhet. Med speciell försöksteknik kan även inflytandet på  $C_p$ -fördelningen av lokala byggnadsdetaljer studeras. Det bör dock observeras att de för luftväxlingsbestämningar mest avgörande vindhastigheterna är så måttliga att luftens termiska skiktning avsevärt kan påverka vindhastighetens höjdberoende.

Svårigheter föreligger att i liten modellskala korrekt återge den  $Re$ -beroende strömningen genom smala springor och

andra typer av öppningar, vilkas storlek och form dessutom är svåra att definiera. Vidare har inverkan av vindturbulensen på luftströmningen genom byggnadens klimathölje endast behandlats i ringa omfattning. Detta problem kan säkrast studeras om man har tillgång till resultat från fullskaleförsök i särskilt utrustade provhus och laboratorier. Turbulensen kan avsevärt påverka tryckfördelningen nära en öppning, och på så vis påverka luftströmningen i enskilda rum (se Cockroft och Robertsson).

Storleken och fördelningen av otätheterna i väggar och tak påverkar de invändiga trycken och bör studeras systematiskt i befintliga byggnader. Innetryckens fördelning kan också variera med ventilationsöppningarnas växlande grad av vindexponering.

Användandet av taksarg, taksprång, fasadpelare och andra arkitektoniska detaljer påverkar luftströmningen kring en byggnad (se Leuthensser) och kan anordnas på ett sådant sätt att byggnadens ventilationsförluster minskar. Införandet av låga taksargar på stora tak och ett ventilerat utrymme mellan ytter- och innertak har också betydelse för tryckfördelningen och bör undersökas med hänsyn till effekter på luftväxlingen.

I detta avsnitt kommer vindens egenskaper att behandlas, speciellt med avseende på medelhastighetsprofil, turbulensförhållanden och vindenergispektrum. Den yttre och inre vindtrycksfördelningen för friliggande byggnader med enkla begränsningsytor berörs kortfattat. Exempel ges på hur arkitektoniska detaljer påverkar luftströmningen och trycken kring en byggnad. Vidare redogörs för en vindtunnelstudie inriktad på bestämning av kringliggande byggnaders betydelse för vindförhållandena. Slutligen behandlas översiktligt vindturbulensens inverkan på en byggnads luftväxling.

## 3.2 VINDENS EGENSKAPER

### 3.2.1 Vindhastighet

Vindhastigheten varierar slumpmässigt med tiden i storlek och riktning och beskrivs därför lämpligen med statistiska metoder. Om den antas vara normalfördelad räcker det med att ange medelvärde och standardavvikelse för att beskriva sannolikheten för ett visst utfall.

Vindhastighetens ögonblicksvärde  $v(t)$  vid tiden  $t$  kan uttryckas som summan av aritmetiska medelvärdet  $v_m$  och den fluktue-

rande delen  $\delta v(t)$

$$V(t) = v_m + \delta v(t) \quad [3.2.1]$$

Standardavvikelsen  $\sigma_v$  skattas med hjälp av formeln

$$\sigma_v^2 = \frac{1}{T} \int_0^T [V(t) - v_m]^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T \delta v(t)^2 dt \quad [3.2.2]$$

där

T = den tid för vilken medelvärdet bildats

Uttrycket [3.2.2] blir i allmänhet beroende av T men varierar svagt för T-värden mellan 5 minuter och en timma. Vanligen väljs T till 10 minuter eftersom detta tidsintervall används på meteorologiska stationer och svarar mot låga värden i vindens energispektrum.

Vindstötar i samband med turbulens orsakas främst av virvelbildningar, lokala tryckskillnader, vindavböjning kring föremål, temperaturändringar eller av kombinationer av dessa företeelser. Virvelstorleken och turbulensgraden varierar inom vida gränser. Stora virvlar kan ha en utsträckning av tusentals meter och ge upphov till förhöjda vindhastigheter som varar flera minuter. Små virvlar förorsakas av smärre hinder och har en mot dessas dimensioner svarande utsträckning i längd och varaktighet. Sådana virvlar kan ändra tryckfördelningen kring otätheter i en byggnads klimathölje och på så vis påverka tryckdifferenserna och därmed luftväxlingen. Vindens turbulens beror på markens textur och luftens termiska förhållanden. När vindhastigheten överstiger 5 m/s är det i övervägande grad markfriktionen som orsakar vindturbulens.

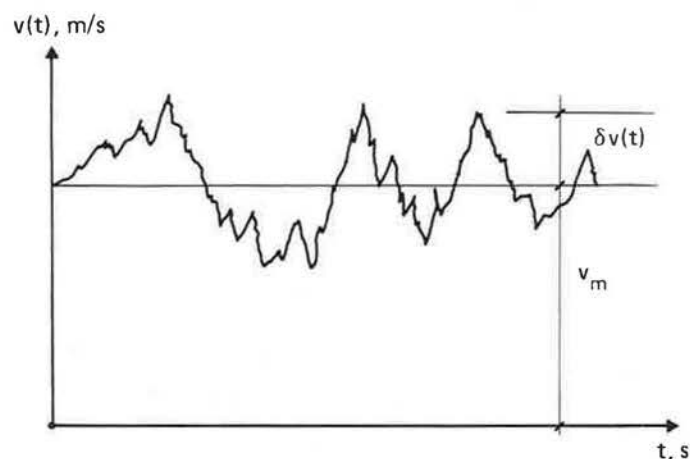


FIG 3.2.1. Hastighetsregistrering uppdelad på medelvärde  $v_m$  och fluktuerande del  $\delta v(t)$ .



### 3.2.2 Medelhastighetsprofil

Luftens rörelser i skiktet närmast över jordytan påverkas av friktionen mot marken. Vindhastigheten är 0 vid markytan och växer normalt med ökande höjd  $z$ , se FIG 3.2.2. Medelvindhastigheten  $v_m(z)$  uppvisar en profil som i beräkningssammanhang beskrivs antingen med en exponentiell eller en logaritmisk funktion av  $z$ .

På en viss höjd  $z_g$  över markytan, gradienthöjden, upphör inverkan av markskrovligheten. Vindhastigheten på denna höjd kallas gradientkastigheten  $v_{gm}$ , se FIG 3.2.2.

Medelvindhastighetsprofiler för olika markskrovlighet kan vid tillämpning av ett exponentiellt uttryck i  $z$  tecknas

$$v_m(z) = v_{gm} \left(\frac{z}{z_g}\right)^\alpha \quad [3.2.3]$$

där

$v_m(z)$  = medelvindhastigheten på höjden  $z$ , m/s

$v_{gm}$  = gradientkastigheten på höjden  $z_g$ , m/s

Exponenten  $\alpha$  beror på markens skrovlighet och tilldelas olika värden för olika terrängtyper, se tabell 3.2.1. Formeln [3.2.3] tillämpas när  $z$  är större än en viss gränshöjd  $z_s$ . Den kan då också skrivas

$$v_m(z) = v_m(z_s) \cdot \left(\frac{z}{z_s}\right)^\alpha \quad [3.2.4]$$

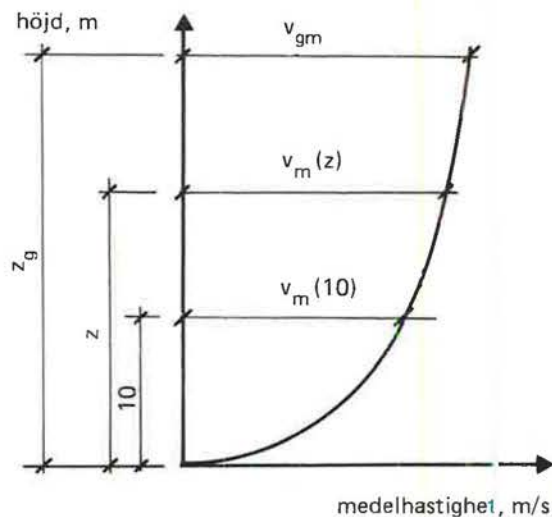


FIG 3.2.2. Medelhastighetsprofil.

Tabell 3.2.1. Definition av markskrovlighetstyper.

Terrängtyp	Beskrivning	$\alpha$	$z_g, m$	$z_s, m$
A	Utsatt öppen terräng med få eller inga hinder, t ex kust eller plan slätt.	0,1	250	5
R	Öppen terräng med små, spridda hinder, t ex flygfält, öppna landskap med enstaka byggnader. Referensterräng för vindmätning.	0,15	300	10
B	Terräng med talrika, tätt placerade hinder. Typen inkluderar små skogsbestånd, förorter till stora städer.	0,22	350	15
C	Terräng med stora byggnader. Typen inkluderar storstadscentra.	0,3	400	20

Gränshöjden  $z_s$  hänför sig till medelskrovlighetshöjden runt den byggnad som studeras. Mätningar som gjorts vid Post Office Tower i London antyder att gränshöjden kan sättas lika med de omgivande byggnadernas höjd (se Helliwell). Medelvindshastigheten under gränshöjden antas vara konstant (oberoende av höjden). Detta motiveras av att vinden uppför sig på ett mycket svårbestämbart sätt närmast marken och att det därför inte är möjligt att för detta område ange någon mera nyanserad vindprofil. Detta gör behandlingen av blandad bebyggelse inom ett område komplicerad.

Terrängtypen R i tabell 3.2.1, öppen terräng, väljs som referensfall. Skälet till detta är att de meteorologiska stationer som levererar meteorologiska data oftast är förlagda till en sådan terräng. En uppgift om vindhastighet baseras på medelvärdet mätt under 10 minuter på 10 m höjd. Vindprofilerna för andra terrängtyper kan uttryckas med hjälp av data för öppen terräng genom att utgå från gradienthöjden  $z_g$ , se tabell 3.2.1. Gradienthastigheten  $v_{gm}$  är densamma för alla terrängtyper vilket möjliggör omräkning från en terrängtyp till en annan.

Hastighetsprofilen för referensvinden uttryckt i gradienthastigheten blir

$$v_{Rm}(z) = v_{gm} \left(\frac{z}{300}\right)^{\alpha = 0,15} \quad [3.2.5]$$

Hastighetsprofilen för referensvinden uttryckt i standardhöjden 10 m blir

$$v_{Rm}(z) = v_{Rm}(10) \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{\alpha = 0,15} = v_{Rm}(10) \cdot C_R(z) \quad [3.2.6]$$

På motsvarande sätt skrivs hastighetsprofilen för terrängtyp A som

$$v_{Am}(z) = v_{gm} \left(\frac{z}{250}\right)^{\alpha = 0,1} \quad [3.2.7]$$

Genom insättning av [3.2.5] och [3.2.6] i [3.2.7] får vi

$$v_{Am}(z) = v_{Rm}(10) \cdot 30^{\alpha = 0,15} \cdot \left(\frac{z}{250}\right)^{\alpha = 0,1} \quad [3.2.8]$$

eller

$$v_{Am}(z) = C_A(z) \cdot v_{Rm}(10) \quad [3.2.9]$$

där

$$C_A(z) = 30^{0,15} \cdot \left(\frac{z}{250}\right)^{0,1} = 1,13 \left(\frac{z}{5}\right)^{0,1} \quad [3.2.10]$$

På motsvarande sätt kan vindprofiler över andra terrängtyper enkelt uttryckas.

Ett alternativt sätt att återge vindhastighetens höjdberoende är att anta en logaritmisk profil,

$$v_m(z) = v_{*m} \frac{1}{K} \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad [3.2.11]$$

där

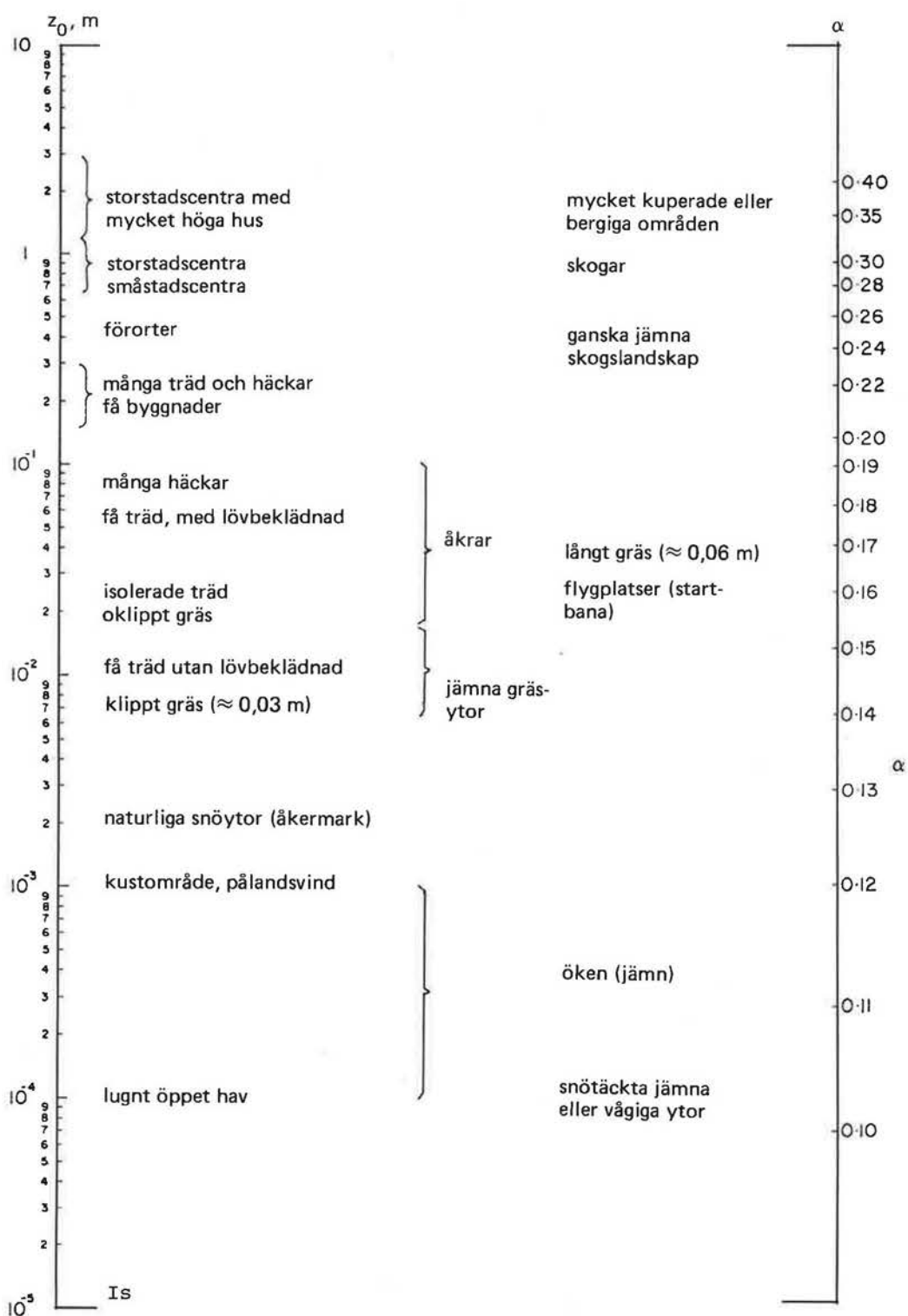
$v_{*m}$  = friktionshastigheten, m/s

$K$  = von Karmans konstant, vars värde är 0,4

$z_0$  = markytans friktionshöjd, m

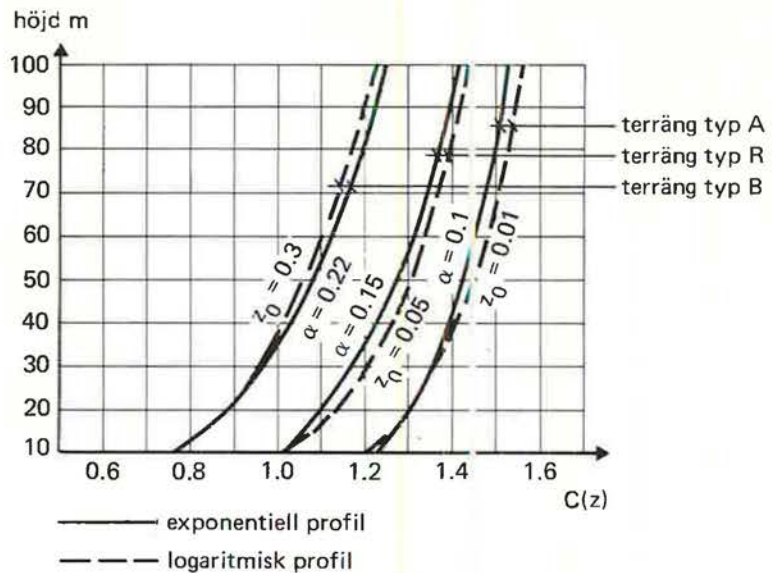
Värdet på  $z_0$  varierar mellan 1 mm och 3 m beroende på markskrovligheten. Höjden  $z_0$  är ungefär 10% av ojämnheternas medelhöjd. Uttrycket [3.2.11] gäller från ungefär  $20 z_0$  till  $z = 60$  m.

Den logaritmiska vindprofilen används vid vindtunnelmätningar och vid meteorologiska mätningar. I praktiken är det dock knappast någon skillnad mellan den logaritmiska och den exponentiella vindprofilens hastighetsvärden. Den senare profilen väljs ofta på grund av sin större lätthanterlighet i beräkningssammanhang. En jämförelse mellan den logaritmiska och den exponentiella vindprofilen görs i FIG 3.2.3. Man ser att båda profilerna ger i stort sett samma värde på vindhastigheten. Tabell 3.2.2 visar ett ungefärligt samband mellan friktionshöjden  $z_0$  och exponenten  $\alpha$ .



Tabell 3.2.2. Terrängbeskrivning gällande flera kilometer lovert om mätplatsen. Samband mellan friktionshöjd  $z_0$  och exponenten  $\alpha$  (ur *Engineering Sciences Data, The response of flexible structures to atmospheric turbulence, Item 76001, London, 1976*).

FIG 3.2.3. Jämförelse mellan höjdfunktionen  $C(z)$  i uttrycket  $v_m(z) = C(z)v_m(10)$  bestämd med exponentiell och logaritmisk vindprofil.



I praktiken är det som förut antytts knappast möjligt att ange en vindprofil under gränshöjden  $z_s$ . Vid så låga höjder bör man förutsätta en av  $z$  oberoende vindhastighet.

### 3.2.3 Turbulensförhållanden

Variansen  $\sigma_v^2$  för den fluktuerande delen av vindhastigheten kan erhållas antingen genom direkt integrering med avseende på tiden enligt ekvation [3.2.2] eller genom integrering av arean under kurvan för vindenergispektrum. Integreringen sker i senare fallet med avseende på frekvensen. Olika analytiska uttryck på vindspektra har föreslagits (se Handa, K, 1973). Ett enkelt uttryck framgår av ekvationen

$$fS_v(f) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \sigma_v^2 \frac{y}{3 + y^2} \quad [3.2.12]$$

där

$$y = 2\pi fL/v_m \quad [3.2.13]$$

Terrängtyp	$K_r$
A	0,0025
R	0,0050
B	0,0140
C	0,0300

$L$  är turbulensens längdskala, vars värde varierar mellan 50 och 200 m och  $f$  är frekvensen i Hz. FIG 3.2.4 visar vindspektrum i enlighet med uttrycket [3.2.12].

Variansen av vindhastigheten fås genom att integrera uttrycket [3.2.12] med avseende på  $f$

Tabell 3.2.3. Värderna på markytans skrovlighetskoefficient.

$$\sigma_v^2 = \int_0^{\infty} f \cdot S_v(f) d(\ln f) \quad [3.2.14]$$

Värdet på  $\sigma_v$  kan enligt Davenport beräknas enligt formeln

$$\frac{\sigma_v}{v_m(z)} = 2,45 K_r \cdot \left(\frac{z}{L}\right)^\alpha \quad [3.2.15]$$

där  $K_r$  är en koefficient som beror av markytans skrovlighet och vars värde för olika terrängtyper visas i tabell 3.2.3.

Kvoten mellan  $\sigma_v$  och  $v_m(z)$  kallas *turbulensintensiteten* och återges i FIG 3.2.5 för olika höjd över marken.

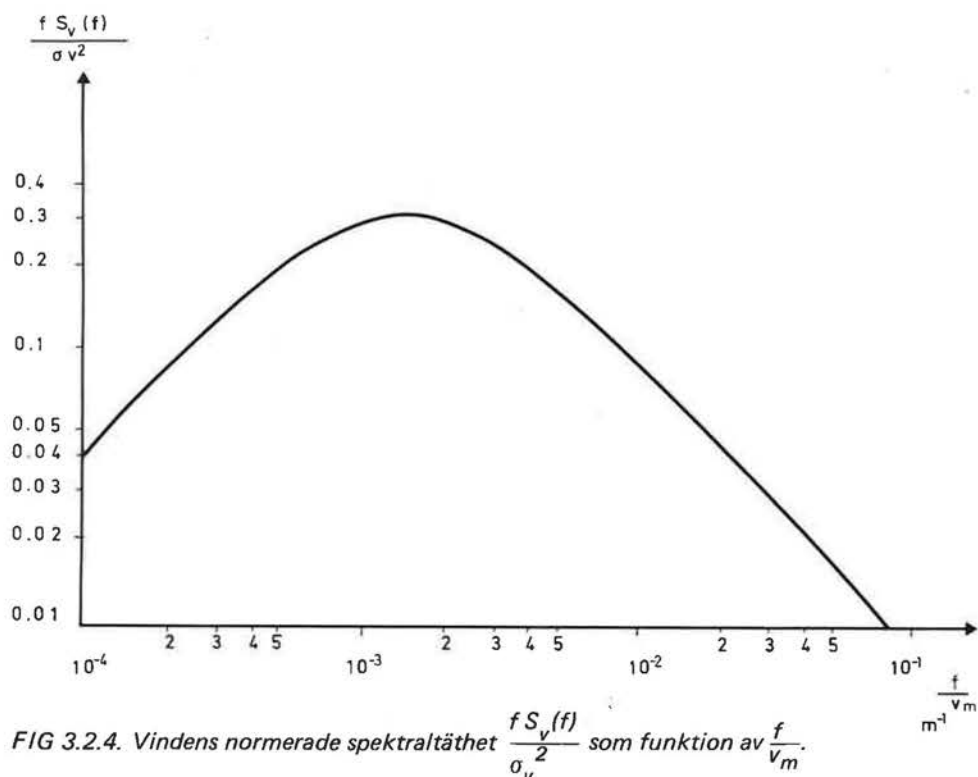


FIG 3.2.5. Turbulensintensiteter för olika terrängtyper och höjder.

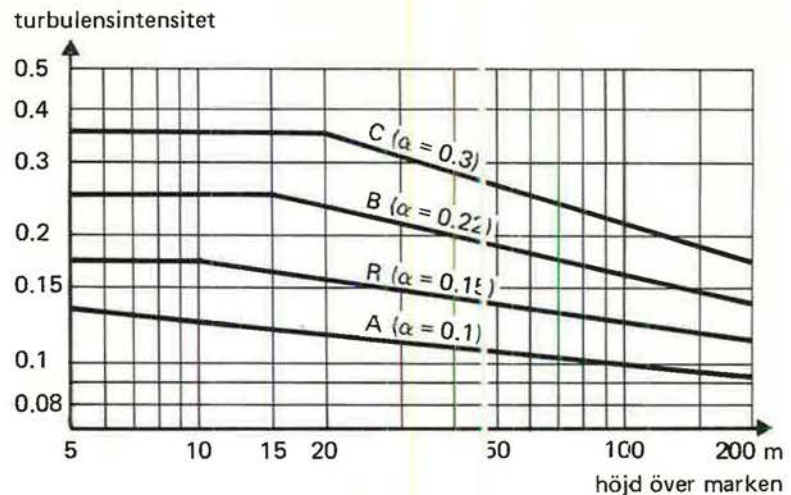
Terrängtyp:

A Kust

R »Referensterräng» – motsvarande flygplatser

B Förorter till stora städer

C Storstadscentra.



### 3.3 STATIONÄRA TRYCK PÅ FRILIGGANDE, ENKLA BYGGNADSKROPPAR

#### 3.3.1 Strömningsförhållanden kring en friliggande byggnad

När vinden blåser mot en byggnad, bromsas den upp på byggnadens lovartsida och åstadkommer därigenom ett positivt tryck. FIG 3.3.1 illustrerar förhållandet. Luftflödet böjs av vid byggnadens hörn varvid ett undertryck eller sug bildas på sidoväggarna och taket, om det senare har liten lutning. Undertryck uppkommer också på byggnadens läsida. Trycken fluktuerar beroende på vindturbulensen.

När vinden angriper vinkelrätt mot fasaden uppkommer maximalt tryck på fasadens mittparti. Nära hörnen minskar trycket i allmänhet snabbt. De negativa tryck som uppkommer på sidoväggar och tak är ojämnt fördelade. De största sugkrafterna uppkommer nära hörn och kanter.

#### 3.3.2 Inverkan av byggnadens form

Vindtryck på tak är i hög grad beroende på takets utformning. De är positiva i lovart för taklutningar större än  $30^\circ$ . För lägre lutningar utsätts också lovartsidan för sugkrafter.

Betydande undertryck uppkommer lätt längs takkanter i och med att strömlinjerna lutar i förhållande till takytan. På tak med liten lutning ( $< 10^\circ$ ) bildas vid sned anblåsning hörnvirvlar åtföljda av stora sugkrafter, se FIG 3.3.2.

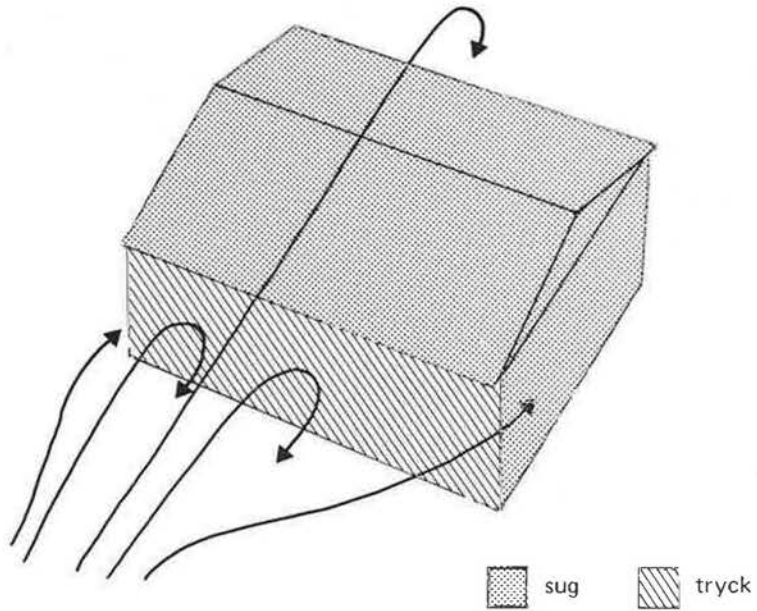


FIG 3.3.1. Typisk tryckfördelning över en byggnad.

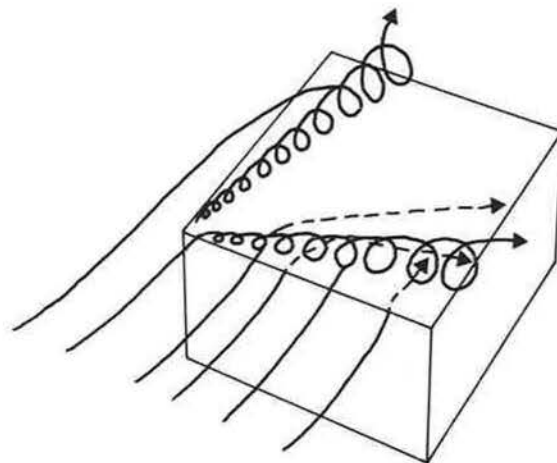


FIG 3.3.2. Virvelbildning vid horisontellt tak.

### 3.3.3 Formfaktorer för yttre vindtryck

Några värden på formfaktorn som diskuterats under arbetet med nya lastnormen visas i FIG 3.3.3a och b. De förutsätter konstanta tryck över ett antal angivna deltytor och skall användas för byggnaders dimensionering. Deras användbarhet i samband med luftväxlingsberäkningar och för placering av ventilationsöppningar är inte klarlagd.



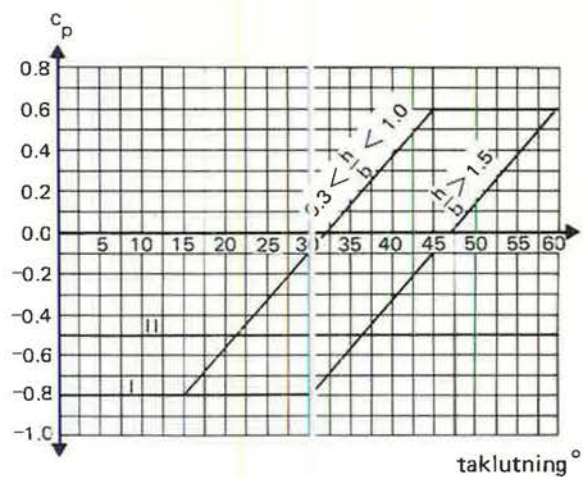
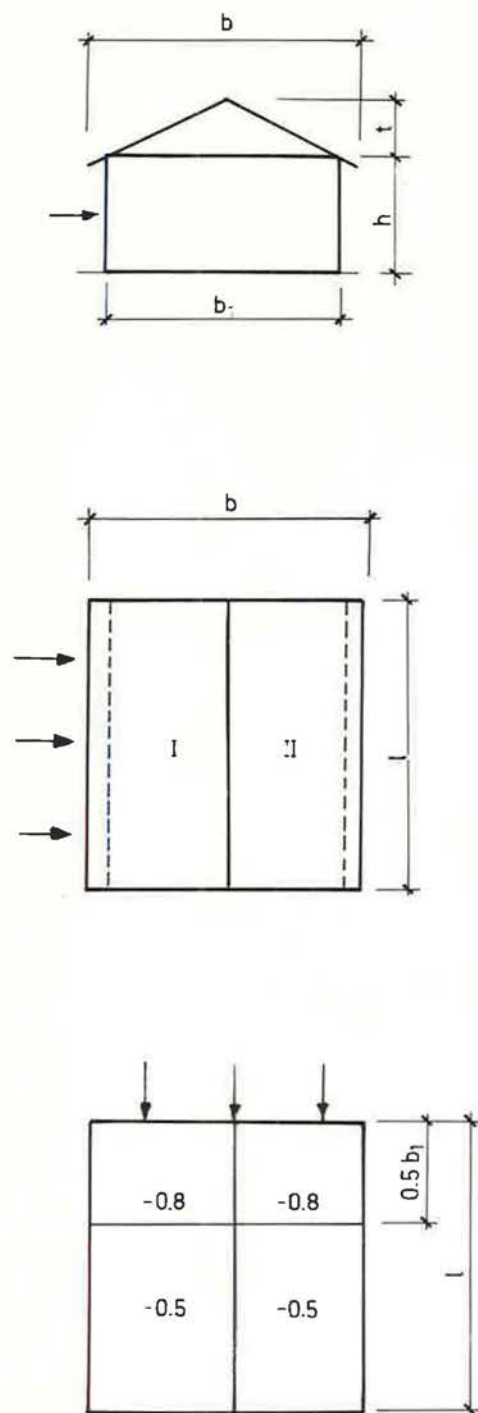
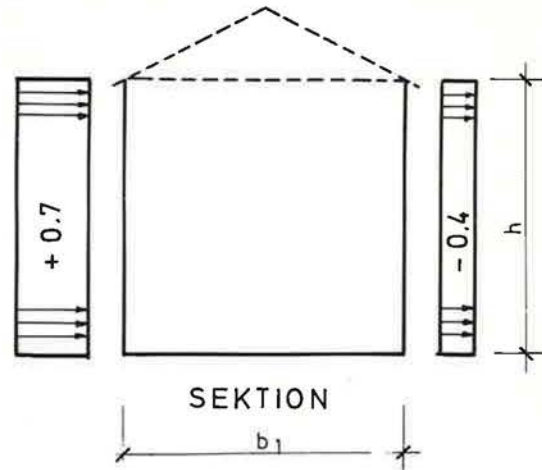
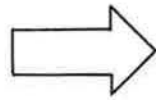


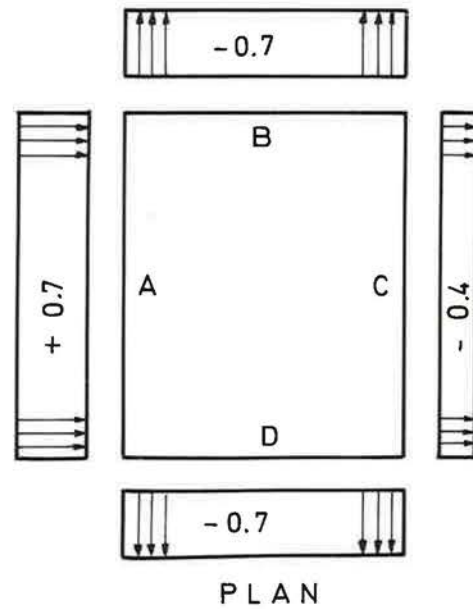
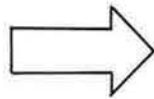
FIG 3.3.3a. Förslag till yttre formfaktorer för tak vid låga och medelhöga byggnader. Villkor:  $b < l$ .  
Referenshöjden  $H = h + \frac{t}{2}$   $\frac{h}{b_1} \leq 2$ .

$$\frac{h}{b_1} < 2$$



a)

$$\frac{h}{b_1} > 2$$



b)

VÄGG	A	$c_p = +0.8$
VÄGG	B,D	$c_p = -0.8$
VÄGG	C	$c_p = -0.4$

FIG 3.3.3b. Förslag till yttre formfaktorer för väggar.

Uppkomsten av höga lokala sugkrafter beaktas genom införandet av lokala formfaktorer för vissa randområden, se FIG 3.3.4. Sådana speciellt utsatta byggnadsytor bör undvikas vid placering av in- och utlopp för ventilationsanläggningen. Störningar kan annars lätt fortplantas in i byggnaden.

### 3.3.4 Formfaktorer för innertryck

I SBN:s lastförutsättningar har man introducerat begreppet formfaktor för inre vindlast. Uttrycket bör undvikas i samband med luftväxlingsberäkningar. Det inre trycket är visserligen avhängigt av ett yttre vindtryck men dessutom av bl a termiska förhållanden, ventilationssystemets funktion och klimathöljets luftgenomsläpplighet.

### 3.3.5 Metoder för bestämning av vindtryck

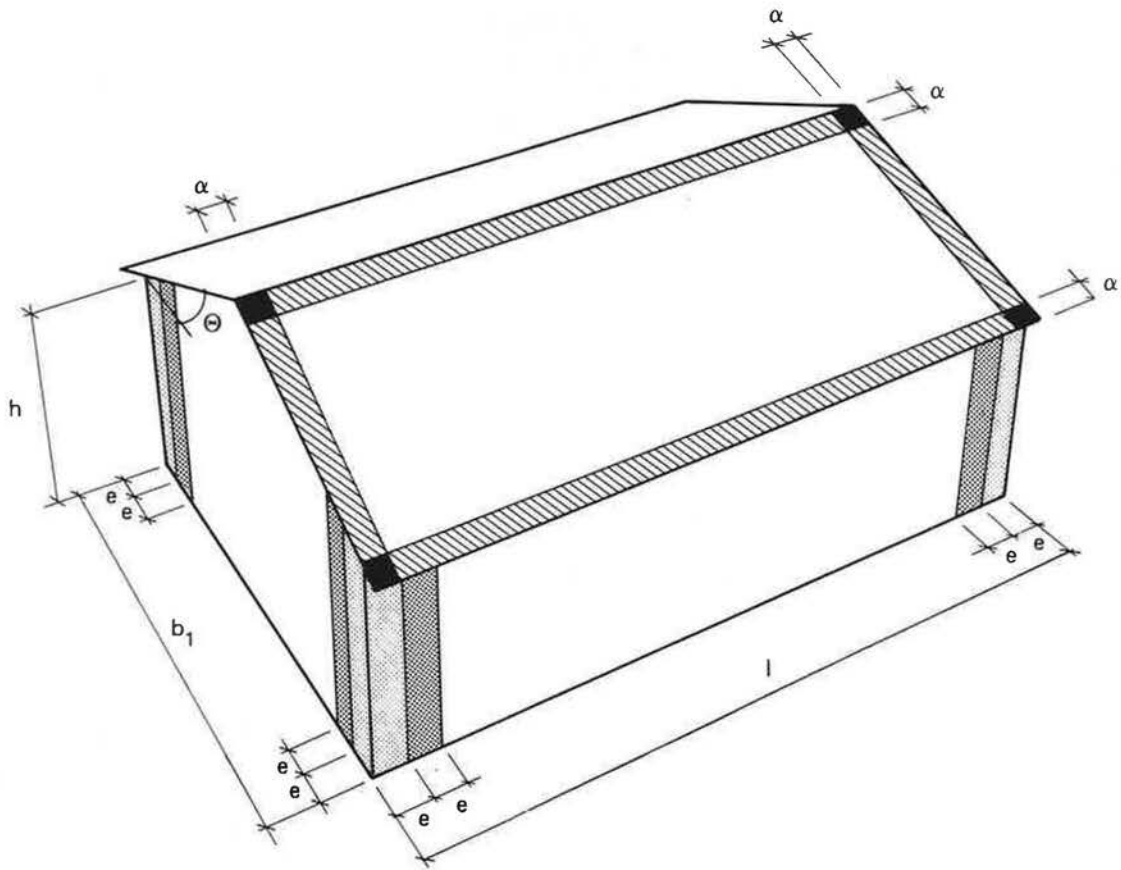
Det är omöjligt att ge en fullständig beskrivning av luftströmningen runt alla typer av byggnader. Allmänt användbara uppgifter kan endast lämnas för standardiserade, relativt enkla hustyper. Den stora variationen i byggnaders exponering för vind, den lokala topografin och vindens komplicerade strömningförhållanden gör det nödvändigt att företa fullskalemätningar eller korrekt simulerade modellförsök.

De flesta undersökningar av låghus som redovisas har företagits i vindtunnel (se Chien, Jensen och Hellers & Lundgren). Först nyligen har fullskalemätningar företagits i England, Amerika och Sverige (se Eaton & Mayne, Handa & Kärrholm, Thuresson och Marshal). Fastän modellstudierna ofta ger en principiellt riktig bild av strömningförhållandena runt byggnaden kan de fortfarande uppvisa avsevärda lokala avvikelser i förhållande till fullskalemätningar beroende på svårigheten att korrekt simulera turbulens, topografi och vegetation i vindtunnel.

## 3.4 TRYCKFÖRDELNINGENS BEROENDE AV BYGGNADENS DETALJUTFORMNING

### 3.4.1 Formfaktorerna och byggnadens textur

Formfaktorerna som återges i nationella byggnormer är i allmänhet baserade på vindtunnelmätningar på småskaliga modeller. Inverkan av arkitektoniska detaljer har inte kunnat återges vid dessa försök beroende på begränsningar i modellens storlek. Några vindtunnelförsök har ändå gjorts för att speciellt studera inverkan av taksarg, utsprång och fasadpelare på tryck-



Giltighetsområde


$$b_1 < l$$


$$a = 0.1b_1 \text{ eller } h$$


$$e = \frac{\alpha}{2}$$

$$l < \alpha < 5 \text{ m}$$

$$0.5 < e < 2.5 \text{ m}$$

  $c_{p1} = -2.0$

  $c_{p1} = -5 + 0.1 \cdot \Theta$  för  $\Theta < 20^\circ$   
 $= -3.0$  för  $\Theta > 20^\circ$

  $c_{p1} = -2.0$


  $c_{p1} = -1.2$

FIG 3.3.4. Förslag till lokala formfaktorer. De lokala formfaktorerna skall endast användas vid dimensionering av yttre byggnadsdetaljer och dessas infästning.

fördelningen över lådformiga modeller (se Leuthensser). Detta avsnitt refererar resultat av dessa undersökningar och kommenterar betydelsen av arkitektoniska detaljer vid värderingen av formfaktorer.

#### 3.4.2 Inverkan av taksarg

Byggnader med horisontellt tak förses i allmänhet med en sarg längs takets omkrets. Inverkan av olika typer av taksargar har studerats i vindtunnel (se Leuthensser). FIG 3.4.1 visar skillnaderna i tryckfördelning vid olika förhållanden mellan sargens höjd  $d$  och byggnadens höjd  $h$ . Om vinden är riktad i  $45^\circ$  vinkel mot väggarna, fås maximalt sug genom uppkomsten av virvlar, jämför kap 3.3.3. En studie av figurerna visar att tryckfördelningen är mest ojämn för tak utan sarg. En ökning av sarghöjden tenderar att utjämna tryckfördelningen över taket.

#### 3.4.3 Inverkan av taksprång

Inverkan av taksprång studerades genom vindtunnelmätningar på modeller med olika relationer mellan dimensionerna  $h$ ,  $b$  och  $e$  på modellernas höjd, bredd och taksprång, se FIG 3.4.2.

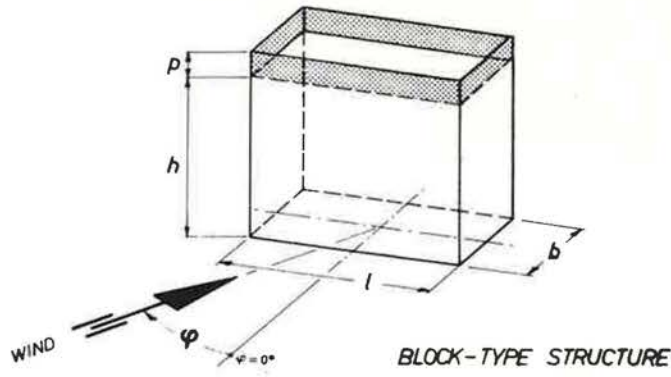
Vindtrycksfördelningen över taket för vindinfall vinkelrätt mot fasaden ändrades väsentligt genom införandet av taksprång. När taksprångsförhållandet  $e/h$  ändrades från 0 till 1:6, ökade det maximala suget från  $-0,68$  till  $-1,2$  i vissa punkter. Det blev ingen nämnvärd skillnad i tryckfördelning på taksprångets undersida.

När vindriktningen ändrades till  $45^\circ$ , ändrades trycken på hörnen och runt kanterna. FIG 3.4.2 visar formfaktorer vid olika kombinationer av  $e/h$ . Även trycket på undersidan av taksprånget ändrades.

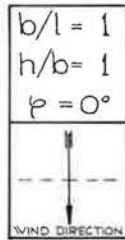
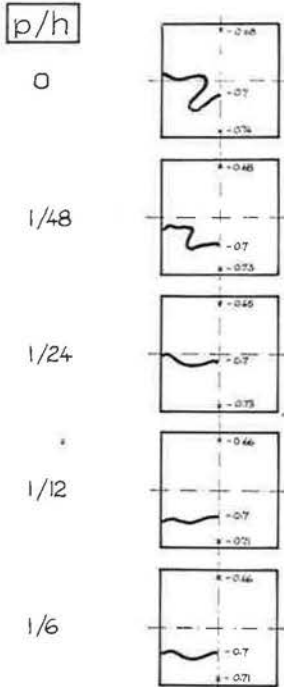
Försöket visar att taksprång snarare försämrar tryckförhållanden vid tak genom att öka de lokala sugkrafterna.

#### 3.4.4 Inverkan av fasadpelare

De flesta byggnaders fasader innehåller någon form av yt- ojämnhet, t ex fönsternischer eller utstickande pelare, balkar och listverk. Leuthensser redovisar ett försök att studera fasadpelares inverkan på vindtrycket genom att i vindtunnel utföra mätningar på husmodeller med pilastrar enligt FIG 3.4.3. Undersökningen omfattade ett antal parallelepipediska modeller med olika avstånd mellan fasadpelarna. FIG 3.4.4 och 3.4.5



Archit'l Feature: ROOF PARAPETS  
ISOBARS ( $c_p$ -Contours) on ROOF  
of  
BLOCK-TYPE STRUCTURE



Archit'l Feature: ROOF PARAPETS  
ISOBARS ( $c_p$ -Contours) on ROOF  
of  
BLOCK-TYPE STRUCTURE

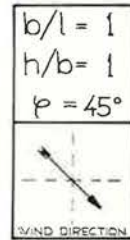
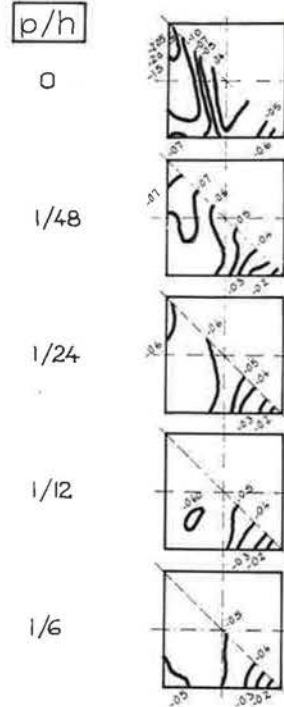


FIG 3.4.1. Inverkan av taksarg på vindtrycksfördelningen över tak (enligt Leuthensser).

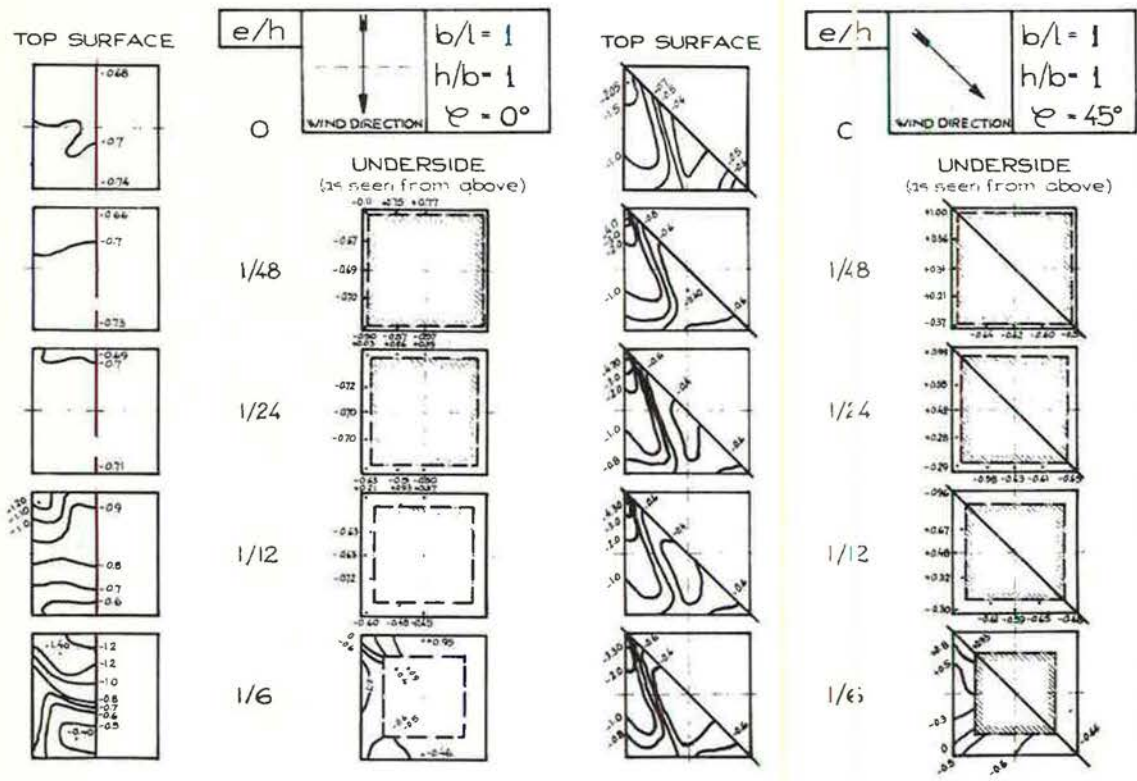
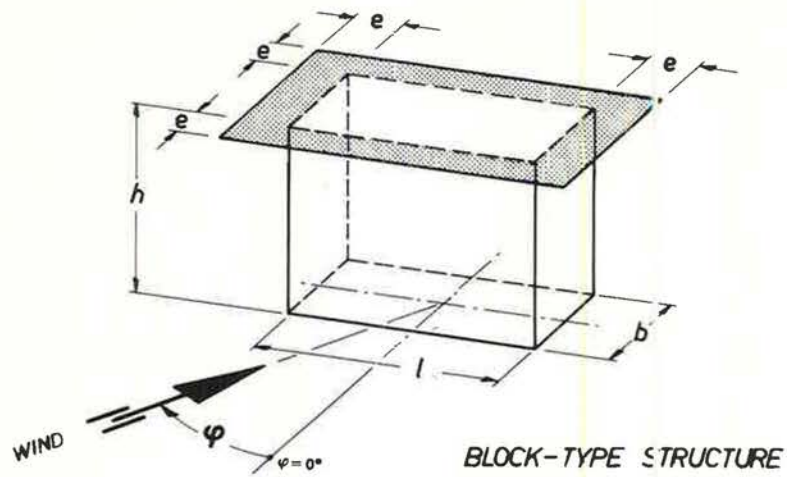


FIG 3.4.2. Inverkan av taksprång på vindtrycksfördelning (enligt Leuthensser).

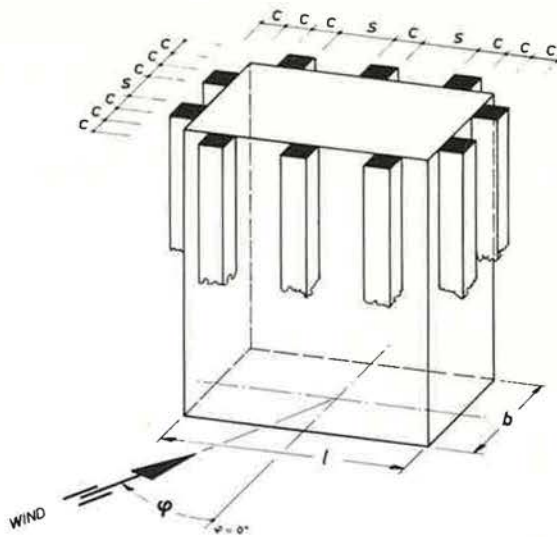


FIG 3.4.3. Byggnad med fasadpelare (enligt Leuthensser).

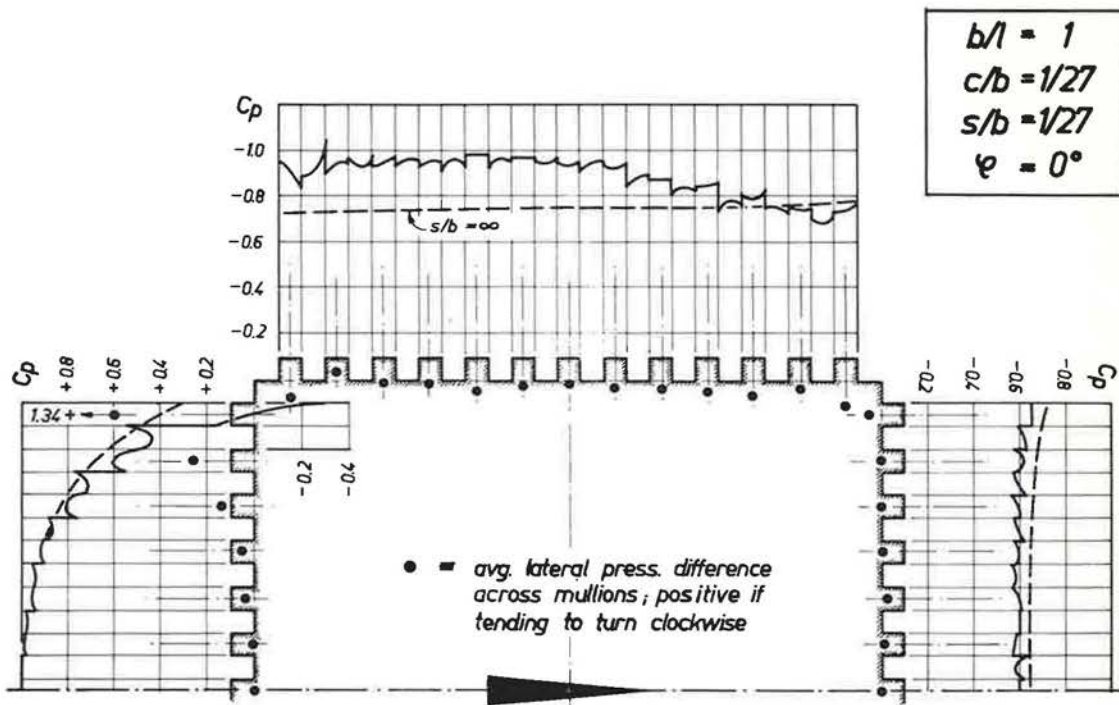


FIG 3.4.4. Inverkan av fasadpelare (mullions) på yttre tryckfördelning vid vinkelrät anblåsning ( $s/b = 1/27$ ) (enligt Leuthensser).



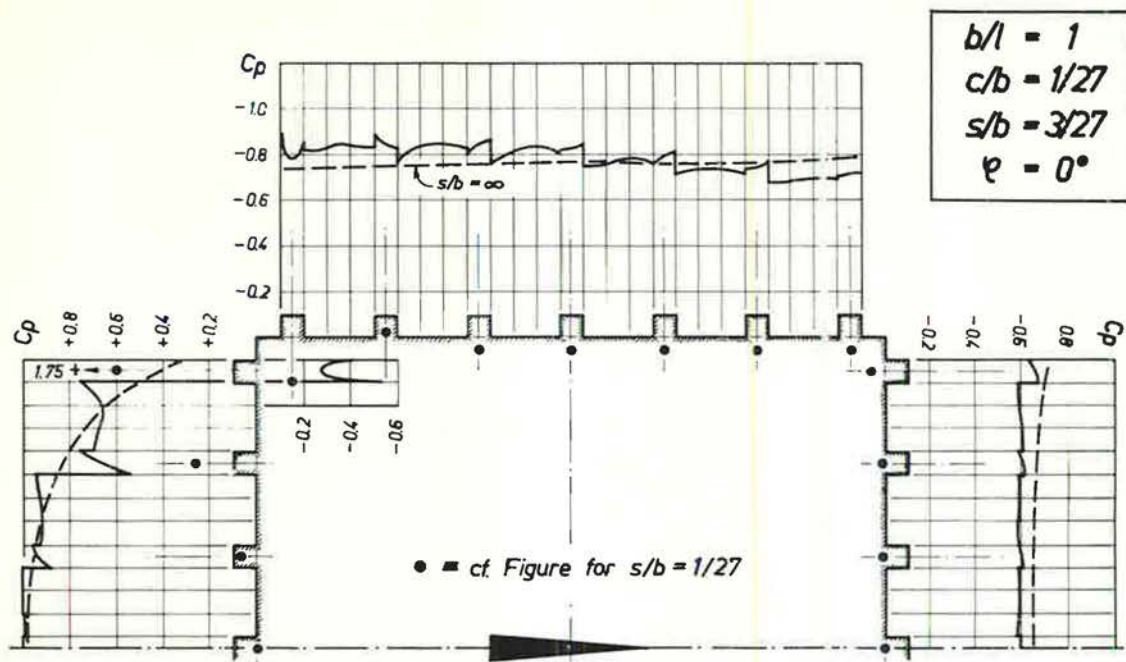


FIG 3.4.5. Inverkan av fasadpelare på (mullions) yttre tryckfördelning vid vinkelrät anblåsning ( $s/b = 5/27$ ) (enligt Leuthensser).

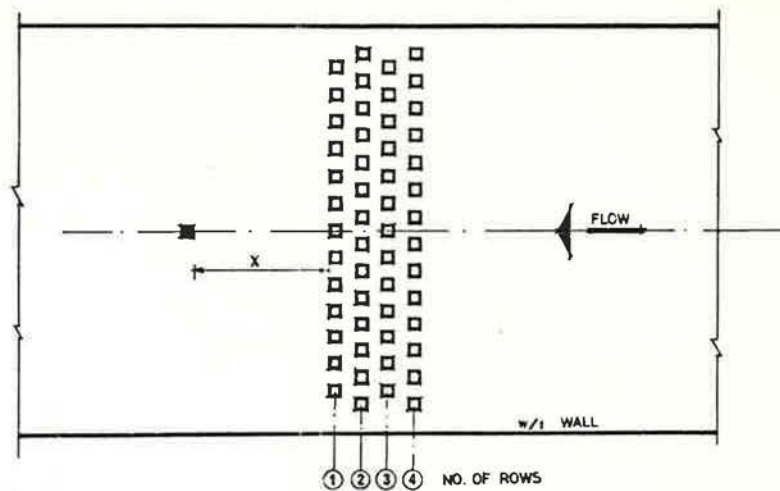
visar ändringen i formfaktor för två olika förhållanden mellan pelaravståndet  $s$  och husbredden  $l$ . Figurerna återger också formfaktorerna för en modell utan fasadpelare.

Då vinden blåser vinkelrätt mot fasaden ökar formfaktorn för sidoväggen från  $-0,75$  till  $-1,0$  för tätt placerade fasadpelare ( $s/b = 27$ ) medan sidoväggsvärdena inte påverkas av glest placerade pelare ( $s/b = 5/27$ ). Å andra sidan ökar trycket på frontväggen samtidigt som suget ökar vid hörnen.

### 3.5 INVERKAN AV NÄRLIGGANDE BEBYGGELSE

Uppgifter om vindtrycksfördelning är i allmänhet baserade på studier av friliggande byggnader. Som följd härav brukar vind-effekterna anges utan beaktande av den närliggande bebyggelsens inverkan. Ett försök att belysa dessa förhållanden redovisas av Soliman & Frick, som genomförde en serie vindtunnelstudier på enkla, identiskt lika husmodeller arrangerade i grupper med olika mönster och täthet. De varierade grupperingarnas inverkan noterades med avseende på tryckfördelningen över en av husmodellernas (mätmodellens) lovart- och läsida.

FIG 3.5.1. Mätmodell i lä bakom en modellgrupp (enligt Soliman & Frick).



I en första mätomgång placeras modellgruppen på lovartsidan av mätmodellen. Två vindprofiler, motsvarande öppen terräng ( $\alpha = 0,15$ ) och storstadscentra ( $\alpha = 0,35$ ) simulerades i vindtunneln. FIG 3.5.1 visar modelluppställningen.

Bebyggelsens inverkan på vindtrycket åskådliggjordes med »formfaktordifferensen»  $\Delta C_p$  definierad som

$$\Delta C_p = \frac{p_1 - p_2}{\frac{1}{2} \rho v^2} = C_{p1} - C_{p2}$$

där

$p_1, p_2$  = vindtryck

$C_{p1}, C_{p2}$  = formfaktorer på lovart- och läsidan av mätmodellen.

Variationen i formfaktordifferensen  $\Delta C_p$  visas i FIG 3.5.2.

När avståndet mellan mätmodellen och modellgruppen, uttryckt som  $x/h$ , ändras, se FIG 3.5.1, ändras formfaktorerna avsevärt.

Man lägger märke till att värdet på  $\Delta C_p$  minskar kraftigt när mätmodellen ligger nära modellgruppen. Detta indikerar att modellgruppens lätryck samverkar med lovartstrycket på mätmodellen och sålunda orsakar en minskning i värdet på  $\Delta C_p$ .

En andra mätomgång utfördes med mätmodellen placerad centralt inom modellgruppen med olika placeringsmönster och täthet. FIG 3.5.3 visar några mönster som provades i vindtunneln.

FIG 3.5.2. Formfaktordifferensen  $\Delta C_p$  som funktion av förhållandet mellan avståndet  $x$  mellan mätmodell och modellgrupp och modellhöjden  $h$ . Modelltätheten  $D$  är 25% (enligt Soliman & Frick).

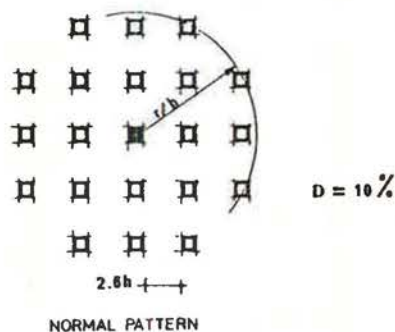
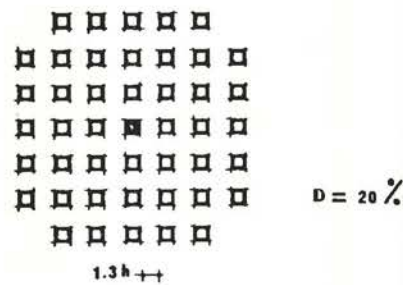
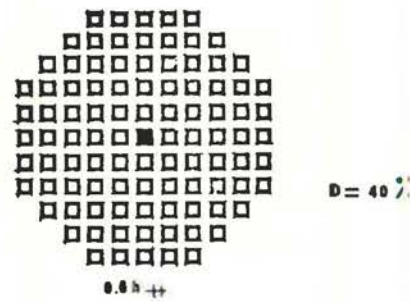
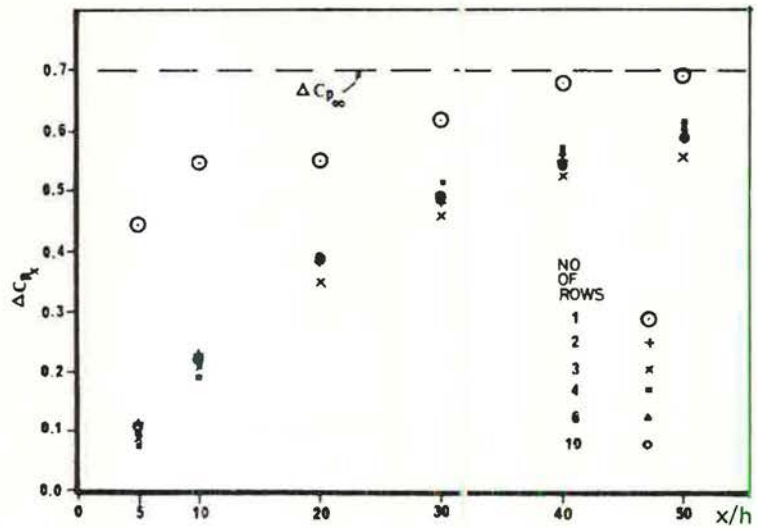


FIG 3.5.3. Modellgrupper med olika täthet; storheten  $D$  karakteriserar modelltätheten (enligt Soliman & Frick).

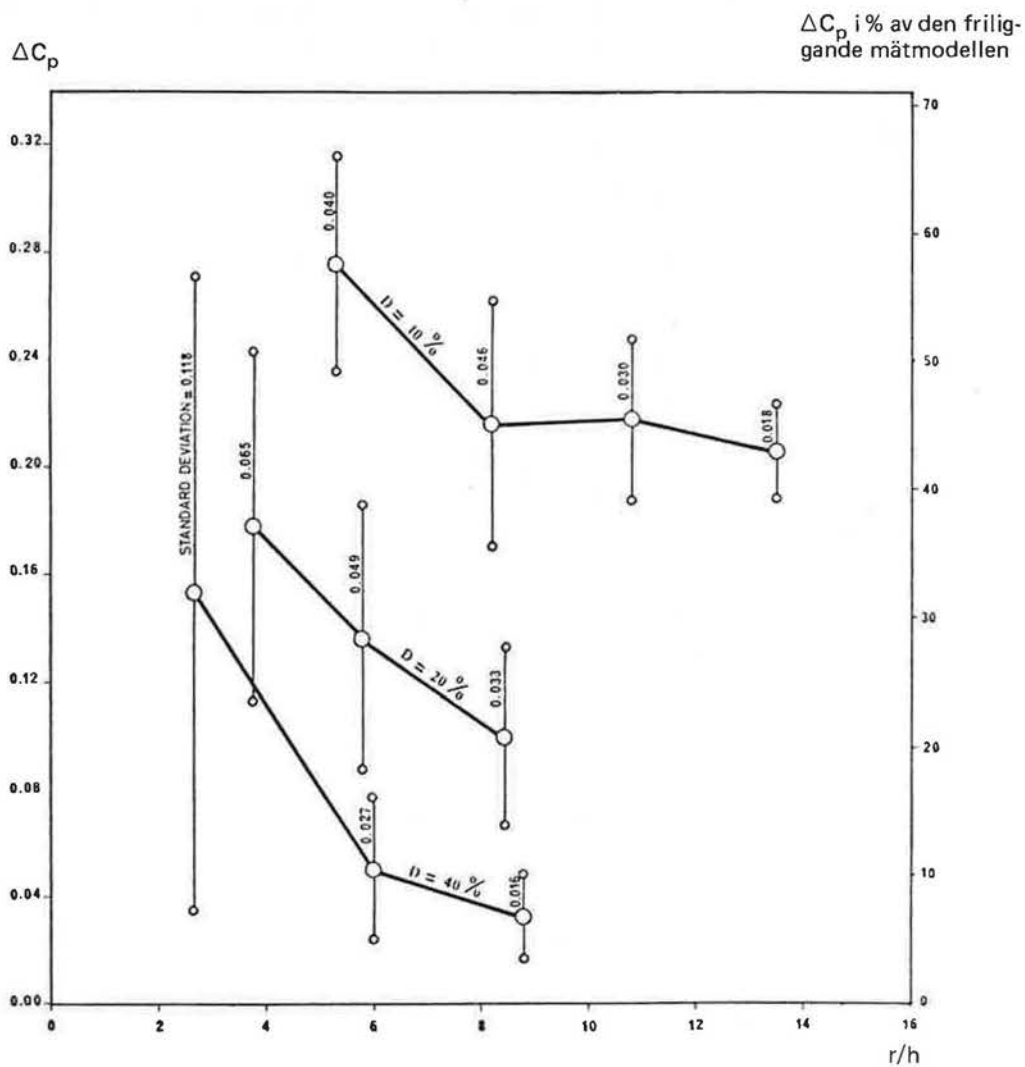


FIG 3.5.4. Formfaktordifferensen  $\Delta C_p$  som funktion av olika värden på  $r/h$  och  $D$  (enligt Soliman & Frick).

Bestämningen av tryckfördelningen på en mätmodell omgiven av andra modeller enligt FIG 3.5.3 visade sig vara besvärlig. Den innefattar tolkningen av gruppstorleken, husmodellernas koncentrationsgrad (kallad modelltäteten) och placeringsmönstret. Formfaktorerna påverkades också av luftflödets anblåsningvinkel. Gruppstorleken karakteriserades genom kvoten  $r/h$  där  $r$  är radien i den minsta vinkel som inneslöt bebyggelsen, FIG 3.5.3.

Resultatet av vindtunnelmätningarna har ritats in på FIG 3.5.4. Man observerar att modelltäteten  $D$  samt förhållandet  $r/h$  påtagligt inverkar på tryckfördelningen. Värdet på  $\Delta C_p$ , med samma definition som ovan, minskar snabbt med ökning i  $D$  och kvoten  $r/h$ .

### 3.6 VINDTURBULENSENS INVERKAN PÅ EN BYGGNADS LUFTVÄXLING

#### 3.6.1 Turbulensförhållanden kring en byggnad

Fullskalemätningar av vindtrycksfördelningen på Royex House i England har gett formfaktorer som är betydligt lägre än motsvarande formfaktorer erhållna från modellförsök i vindtunnel (se Newberry och Eaton). Skillnaden tillskrevs det förhållande att den naturliga vinden är turbulent, medan vindtunnelförsök görs med relativt jämn lufthastighet. Ett fullskaleförsök med en mindre byggnad har bekräftat att formfaktorn minskar vid turbulent vind.

Termisk och mekanisk omblandning av atmosfären gör att redan lovartsvinden mot en byggnad är turbulent. Byggnaden själv stör flödet och skapar på så sätt sin mer turbulens. Störningens storlek är avhängig av byggnadens dimensioner.

FIG 3.6.1 visar strömlinerna kring en byggnad under antagandet att lovartsvinden är jämn och likformig.

Luftflödet delar sig vid hörnen B och D i området bakom och utefter byggnadens sidor bildas lårvirvar. I detta område är strömningen starkt turbulent. I FIG 3.6.1 anger linjerna B B' och D D' utsträckningen av gränsskikten mellan olika strömningsformer.

Friktionskrafterna i luften förorsakar virvlar vid byggnadens lovartsfasad och sidofasader, vilka i sin tur påverkar tryckfördelningen, se FIG 3.6.2.

Vindhastigheterna nära byggnaden påverkas vidare av den atmosfäriska turbulensen vilken får lårvirveln att förskjutas närmare byggnadens läsida. Denna inverkan av turbulensen på lårvirvelbildningen illustreras i FIG 3.6.3 som vidare visar möjligheten att strömlinerna åter häftar vid utmed byggnadens sidor. Strömlinjen separerar vid hörnet D, men kan återhäfta vid D' varvid en sluten virvel bildas vid byggnadens sida mellan D och D'. En andra separation inträffar vid C varvid lårvirvelns gränsskikt beskrivs av linjerna B B' och C C' (se Hunt).

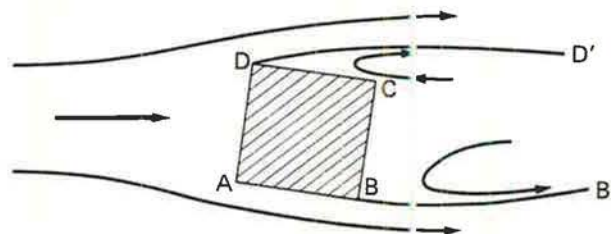


FIG 3.6.1. Luftflödet kring en byggnad vid jämn likformig vind (enligt Hunt).

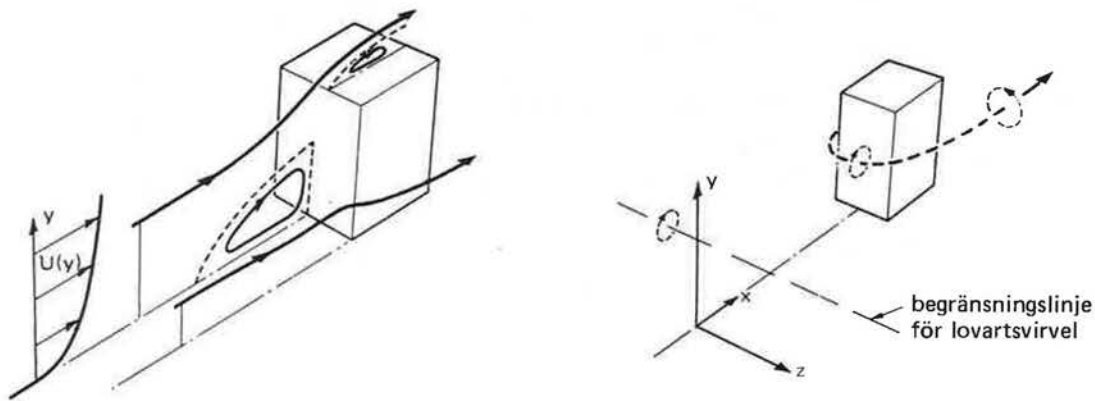


FIG 3.6.2. Inverkan av friktionskrafter på luftströmningen runt en byggnad (enligt Hunt).

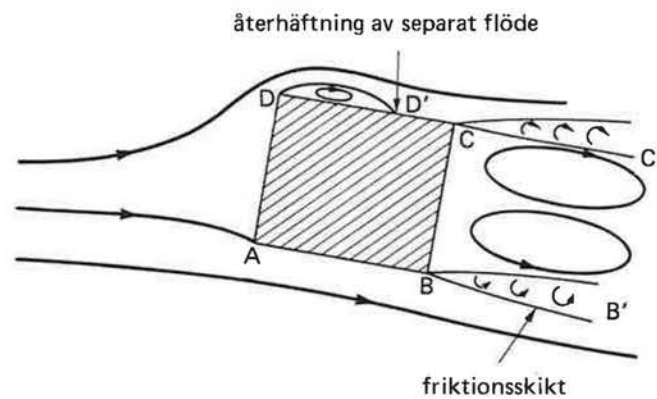


FIG 3.6.3. Luftflödet kring en rektangulär byggnad i turbulent vind (enligt Hunt).

Grovt sett kan turbulensen uppdelas på tre typer enligt FIG 3.6.4. Den första typen utgörs av den infallande vindens turbulens, vilken bestäms av atmosfärens termiska och mekaniska omblandning. Detta område motsvarar vindstötter med lång våglängd. Tryckfördelningen över en byggnad är fullt korrelerad då  $\lambda/D \gg 1$ , där  $D$  är en längd som svarar mot byggnadens utsträckning.

Den andra typen av vindfluktuationer härrör från byggnaden själv och kallas lävirvelturbulens. Kvoten mellan  $\lambda$  och  $D$  avgör korrelationen för tryckfördelningen över byggnaden. Om kvoten  $\lambda/D$  är mycket mindre än 1, är vindtrycket endast korrelerat över små byggnadsytor.

Den tredje turbulensstypen uppkommer genom vidhäftningen av ett gränsskikt mot byggnadsytan, denna störning utbreder sig bakåt i form av friktionsskikt. Längdskalan är avhängig av

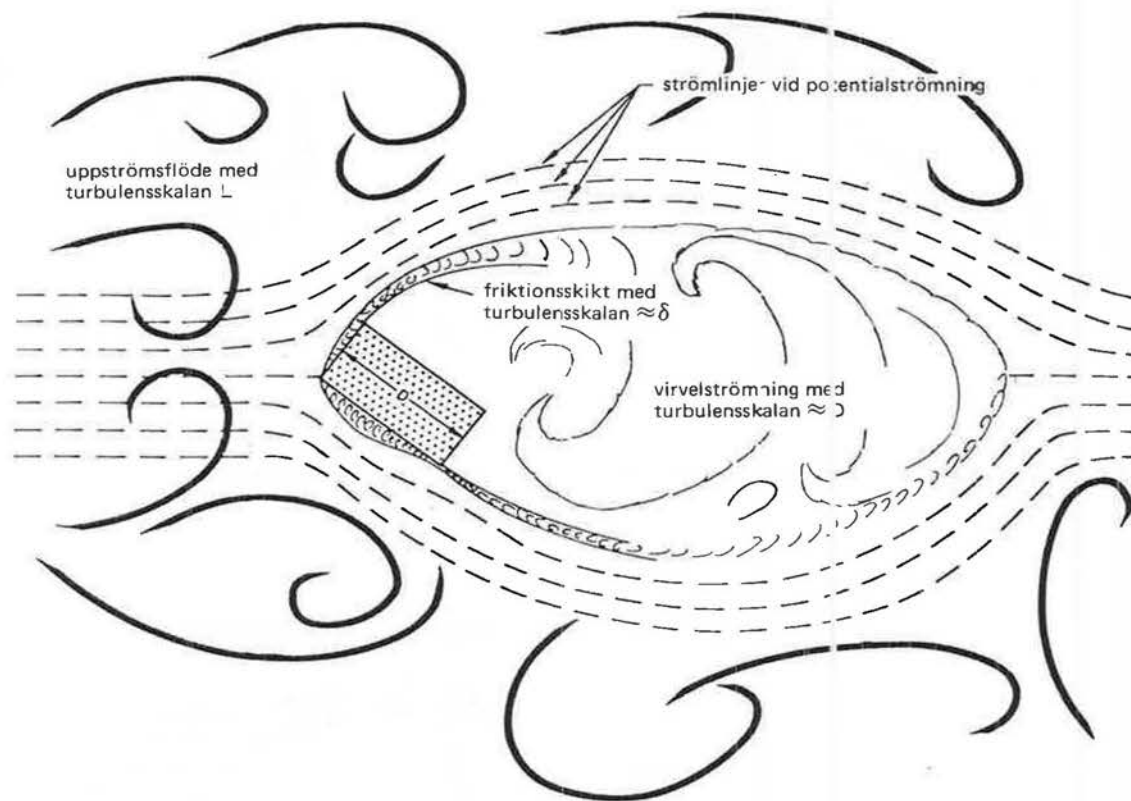


FIG 3.6.4. Det turbulenta flödet kring en byggnad (enligt Davenport).

gränsskiktets tjocklek, turbulenstypen utmärks av mycket korta våglängder och mycket hög fluktuationsfrekvens.

Ovanstående beskrivning av jämn och turbulent strömning visar problemets svårighetsgrad samt att förenklade antaganden om jämn, likformig strömning måste tillämpas med försiktighet. I det följande görs ett försök att även ta med turbulensens inverkan på luftväxlingen i en byggnad med öppningar.

Turbulensens inverkan på luftväxlingen kan beskrivas med utgångspunkt från vindens energispektrum. Vid homogent och isotropt flöde kan vindenergispektrumet approximeras med det i ekvation [3.2.12] angivna uttrycket.

Ekvation [3.2.12] återges i FIG 3.6.5. Vindenergispektrumet har normaliserats genom division med  $\sigma_v^2$ . Turbulensskalan  $L$  beror på turbulensintensiteten och motsvarar lärvirvelns storlek. Turbulensen karakteriseras också genom de ingående vindstötarnas våglängd.

$$\lambda = v_m / 2\pi f$$

[3.6.1]

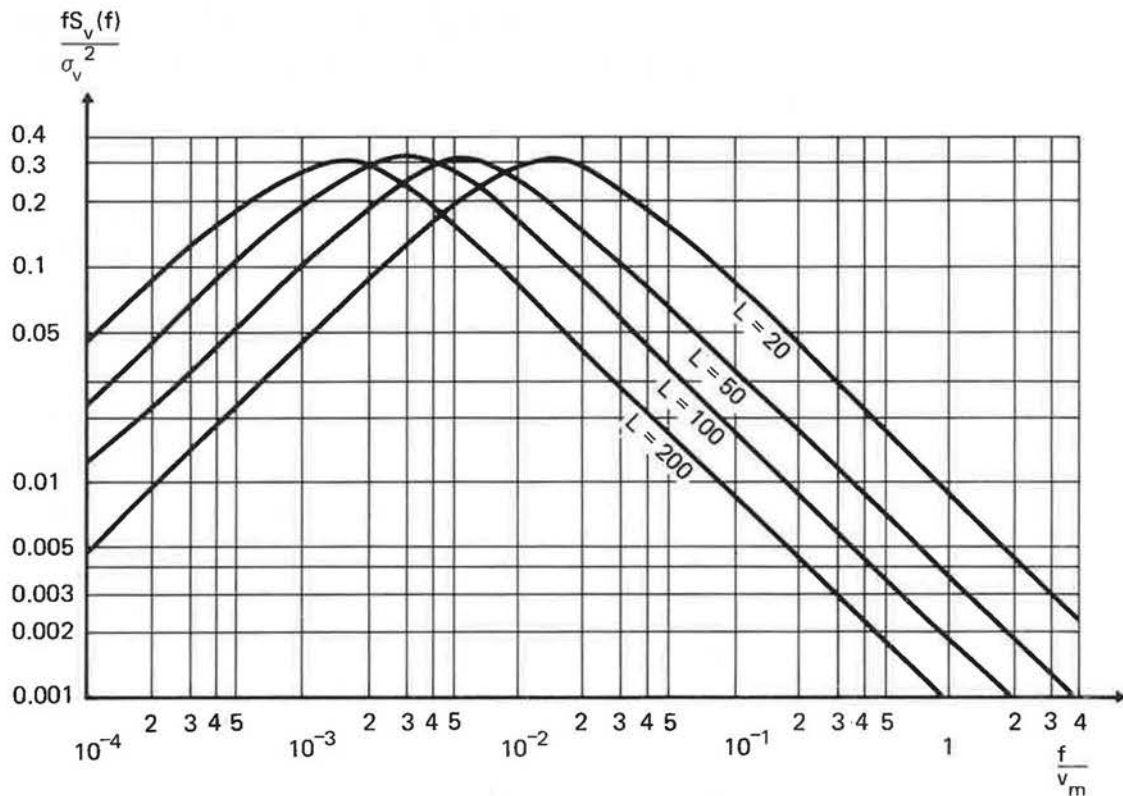


FIG 3.6.5. Vindenergispektrum som funktion av turbulensskalan  $L$ .

Bilsborrow och Fricke har rapporterat om luftväxlingsmätningen på en byggnadsmodell försedd med öppningar. De påpekar att modellstudierna visar att påtagliga fluktuationer uppkommer genom variationer i vindens hastighet och riktning samt genom virvelavlösning vid modellen.

Cockroft och Robertson har presenterat en enkel modell som behandlar inverkan av turbulent flöde på luftväxlingen genom enstaka öppning i en byggnad. De beskriver betydelsen av vindturbulensen för uppkomsten av ett pulserande flöde samt visar att en tredjedel av det fluktuerande flödet genom öppningen blandas med luftmassan inne i byggnaden.

### 3.6.2 Mekanismer för luftväxling vid fluktuerande tryck

Ändringar i vindhastigheten – vindturbulens – kring en byggnad ger upphov till tryckfluktuationer som i sin tur påverkar luftväxlingen i byggnaden. Trots att tryckfluktuationerna har sin grund i vindturbulens, behöver inte det härav uppkomna luftflödet genom byggnadens otätheter vara turbulent. Läckströmningens tillstånd bestäms av Reynolds tal, men det är



sannolikt att den övergångszon som finns mellan laminärt och turbulent flöde förskjuts för den störning som tryckfluktuationerna utgör.

I föregående kapitel beskrevs inverkan av vindens medeltryck på byggnadens luftväxling. Genom att även studera tryckets variation kring medelvärdet blir modellen för luftväxlingen avsevärt mer komplicerad. Man kan ställa sig frågan om det är motiverat att ta hänsyn till inverkan av tryckfluktuationerna, m a o om dessa har någon märkbar inverkan på luftväxling, ventilationsförlust och komfort.

Svaret kan fås först efter grundliga teoretiska och experimentella studier. Några undersökningar har redan genomförts i vilka skilda effekter av tryckfluktuationerna behandlats. Mycket arbete återstår dock innan frågan har fått ett uttömmande svar. I det följande skall vi genom att skissera ett antal luftväxlingsmekanismer vid fluktuerande tryck söka belysa problemet. Man bör observera att dessa effekter i flera fall är motriktade varandra, d v s de kan både öka och minska betydelsen av tryckfluktuationer. De kan också inverka på sambandet som sådant mellan luftväxling, ventilationsförlust och komfort och är mer eller mindre kopplade till företeelser såsom masströghet, adiabatisk resp isoterm kompression samt förskjutningar i övergången mellan laminär och turbulent strömning.

#### »Integrationseffekten»

Flödet  $q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) i en spalt följer sambandet

$$q = k \cdot \Delta p^\beta.$$

För laminär strömning är  $\beta = 1$  och flödet därmed proportionellt mot tryckskillnaden  $\Delta p$ ; vid turbulent strömning är  $\beta = 0,5$  och flödet därmed proportionellt mot kvadratroten av  $\Delta p$ . Medelvärden av fluktuerande tryck och flöde för  $\beta < 1$  är ej proportionella. Man inser att tryckfluktuationer *minskar* luftväxlingen, förhållandet kan kallas *integrationseffekten* och illustreras av FIG 3.6.6.

#### »Komforteffekten»

Penetrationsdjupet för en uteluftström som kommer in i ett rum via en spalt är avhängigt av drivtrycket. Kraftiga tryckstötter kan föra luftströmmen så långt att den i jetströmmar berör vistelsezonen, se FIG 3.6.7. Effekten blir mer uttalad vid få och koncentrerade läckor. Trots att medelvärdet av luftväxling-

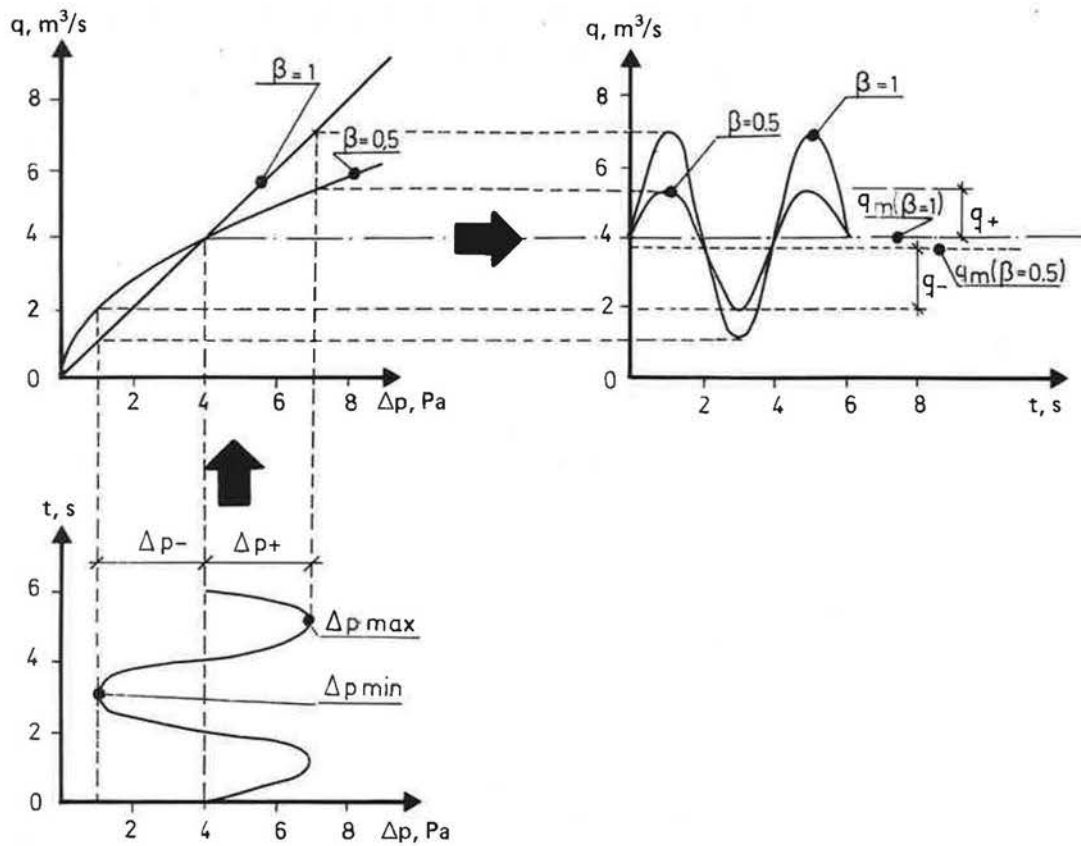


FIG 3.6.6. Integrationseffekten. En ökning  $\Delta p_+$  av tryckdifferensen  $\Delta p$  ger för  $\beta = 0,5$  en mindre flödesökning  $q_+$  än den flödesminskning  $q_-$  som erhålls vid en lika stor minskning  $\Delta p_-$ .

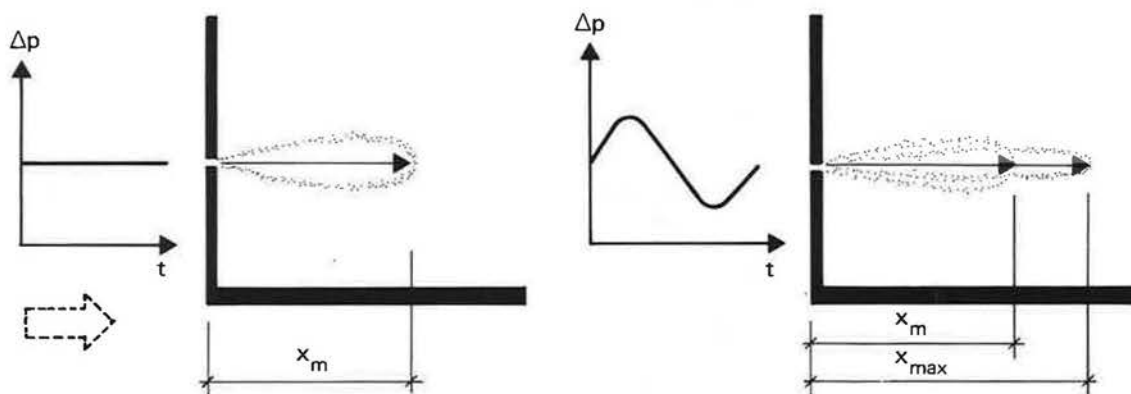


FIG 3.6.7. Penetrationsdjup för luftström. Fluktuerande tryckdifferens  $\Delta p$  ger penetrationsdjup  $x_{max}$  som tillfälligt överstiger medeldjupet  $x_m$ .

en och därmed ventilationsförlusten inte direkt påverkas, kommer den operativa temperaturen att sänkas, vilket kan medföra kompensationsåtgärder genom höjd rumstemperatur.

Avsnitt 3.6.3 innehåller ett beräkningsexempel på denna komforteffekt.

»Pulsationseffekten»

Tryckvariationerna på en otät byggnads yttertor åstadkommer ett pulserande flöde in i och ut ur byggnaden – *pulsationseffekten*, se FIG 3.6.8. Pulsationsflödet är proportionellt mot tryckfluktuationerna i relation till atmosfärtrycket, pulsationsfrekvensen och byggnadens inre volym (isotermisk kompression).

Storleken av pulsationsflödet ges av uttrycket:

$$q = \frac{2 \cdot f \cdot \delta p \cdot V}{P_{\text{atm}}} \text{ m}^3/\text{s}$$

där

- f = tryckväxlingsfrekvensen, Hz
- $\delta p$  = tryckväxlingsamplituden, Pa
- V = byggnadens inre volym, m<sup>3</sup>
- $P_{\text{atm}}$  = atmosfärtrycket  $\approx 100\,000$  Pa

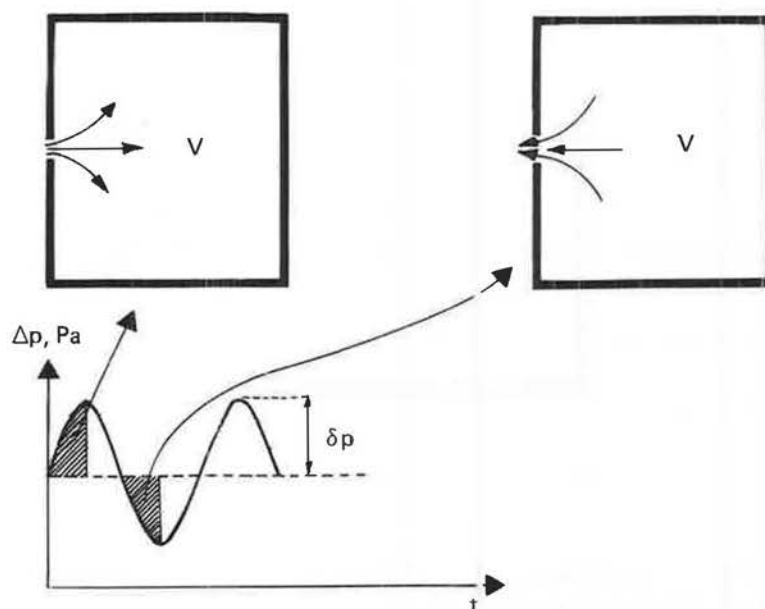


FIG 3.6.8. Illustration till pulsationseffekten.

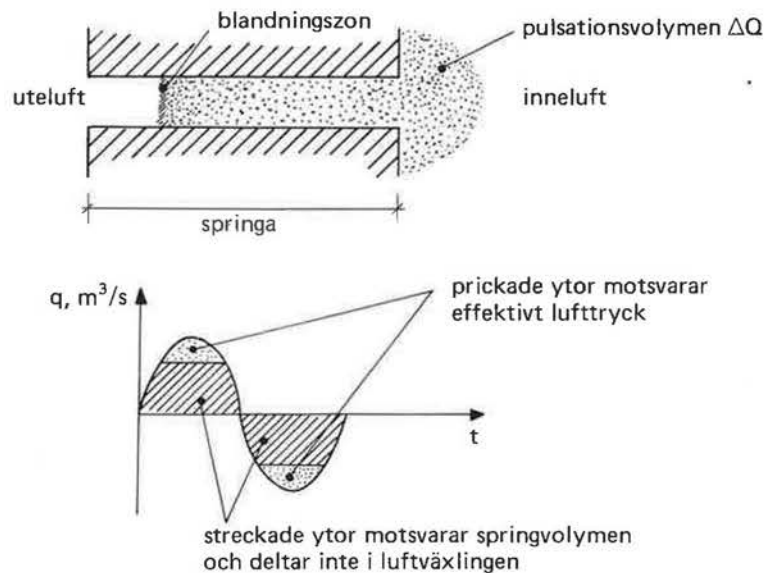


FIG 3.6.9. Kolveffekten. Streckade och prickade ytor i diagrammet motsvarar pulsationsvolymen  $\Delta Q$ .

En tryckväxling av  $\pm 10$  Pa med frekvensen 1 Hz vid rumsvolymen  $500 \text{ m}^3$  ger således pulsationsflödet

$$\frac{2 \cdot 1 \cdot 10 \cdot 500}{100\,000} = 0,10 \text{ m}^3/\text{s} = 360 \text{ m}^3/\text{h},$$

motsvarande 0,72 oms/h

#### »Kolveffekten»

Den del av ett pulserande flöde genom en smal springa som motsvarar springvolymen kommer inte att blanda sig med rumsluften. Förhållandet kan kallas *kolveffekten*, syftande på att luften i springan fungerar som en kolv som skiljer rumsluft och uteluft, se FIG 3.6.9. En viss omblandning kan ske i själva »kolvytan», men den torde vara förhållandevis obetydlig. I ett föregående exempel har vi räknat ut luftväxlingen genom pulsation för  $\pm 10$  Pa vid 10 Hz till 0,72 oms/h. Om springvolymen i detta exempel varit större än  $0,1 \text{ m}^3$  hade en effektiv luftväxling i praktiken upphört.

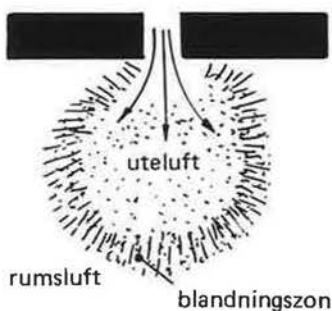


FIG 3.6.10. Inblandningseffekten. På ömse sidor om en springa bildas vid pulserande luftströmning zoner inom vilka ute- och inneluft blandas.

#### »Inblandningseffekten»

Ett pulserande flöde genom en springa åstadkommer en luftväxling genom att ute- och inneluft blandas. Denna *inblandningseffekt* leder inte till en fullständig omblandning under pulsationsperioden, se FIG 3.6.10. Utbytet underlättas emellertid starkt genom lokal luftströmning, exempelvis i form av konvektionsströmmar.

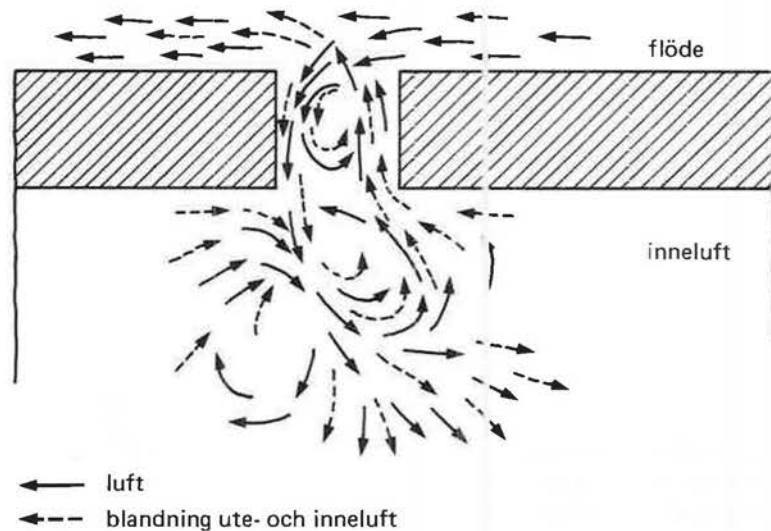


FIG 3.6.11. Penetrerande virvlar (enligt Malinowski).

#### »Penetrerande virvlar»

Genom stora öppningar, såsom öppna fönster eller långa springor, kan lokala virvlar tränga in, se FIG 3.6.11. Öppningarna måste dock vara så stora att motriktade luftströmmar får plats – penetrerande virvlar.

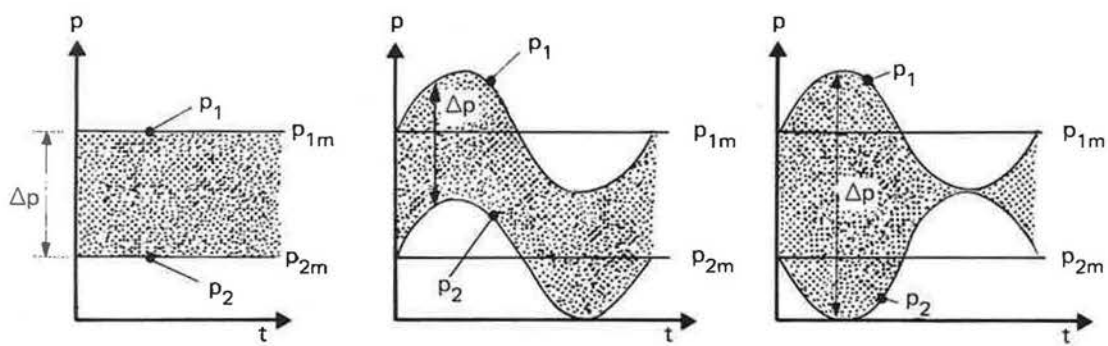
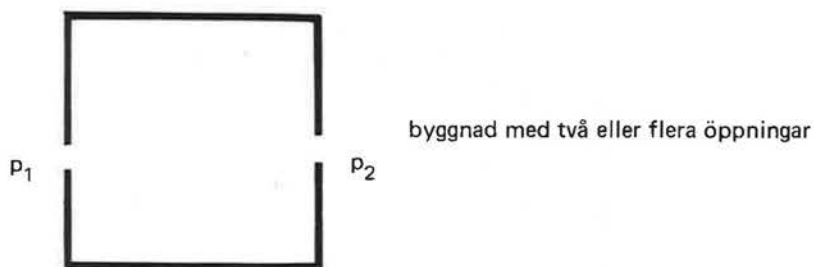
#### »Korrelationseffekten»

Om vindtrycksfluktuationerna över en byggnads yttertor är likformiga och ligger i fas med varandra sägs trycken vara korrelerade. Lokala virvlar och vindens ändliga utbredningshastighet förorsakar fasskillnader mellan tryck i olika punkter, dessa tryck kan sålunda t o m bli motriktade. Den vid motriktade tryck uppkommande ändringen i luftväxlingens tidsmedelvärde kan sägas vara förorsakat av korrelationseffekten. Denna illustreras i FIG 3.6.12 och kan i allmänna fall beräkningsmässigt behandlas med statistiska metoder använda inom signalanalys.

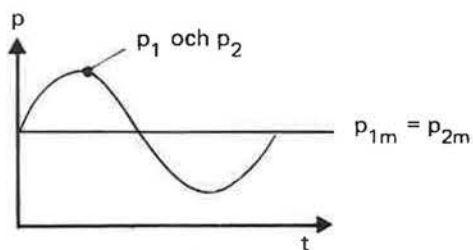
#### »Värmeväxlingseffekten»

Rumsluft och uteluft som omväxlande passerar en springa kyls resp värms av denna. Springan kommer att fungera som en värmeväxlare – värmeväxlingseffekten vid pulserande flöde, se FIG 3.6.13.

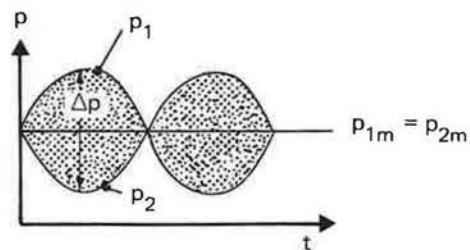
Värmeväxlingseffekten inverkar på två sätt: Den berör den i FIG 3.6.9 visade effektiva luftväxlingen och minskar därför värmeförlusten vid ventilation. Den berör även det i samma



Olika tryckmedelvärden; ingen skillnad i luftväxlingens tidsmedelvärde eftersom strömningen inte byter riktning (gäller för  $\beta = 1$ ).



Samma tryckmedelvärde; trycken i fas, flödets tidsmedelvärde är noll.



Samma tryckmedelvärde; trycken fasförskjutna, strömningen byter riktning, flödets tidsmedelvärde skilt från noll.

FIG 3.6.12. Korrelationseffekten.

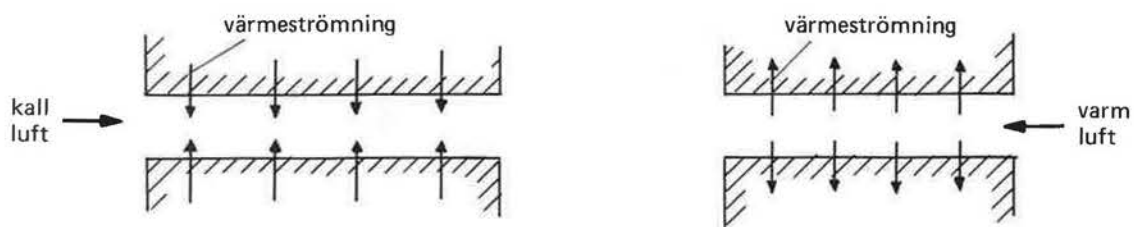


FIG 3.6.13. Värmeväxlingseffekter.

figur visade springvolymsflödet som inte ger någon luftväxling, och ökar därför värmeförlusten utan någon tillhörande ventilation.

En kommersiell värmeväxlare som bygger på denna »pulsationsprincip» har börjat marknadsföras och visar god temperaturverkningsgrad. Den arbetar med växlingsfrekvensen 1/60 Hz.

### 3.6.3 En modell för momentan luftväxling

Genom vindbetingade tryckstötter uppstår momentant ökande luftläckning. Detta kan ge upphov till ökad dragkänsla i vistelsezonen och påverkar därmed klimatkomforten. Utgående från en enkel modell härledes i detta avsnitt maximala värdet av dessa momentana luftflöden. Färledningar illustrerar beräkningsmetoder i tids- och frekvensplanet, vilka har en generell användning vid behandlingen av fluktuerande vindtryck.

#### Förutsättningar

Byggnaden betraktas som en ihålig låda, försedd med öppningar på två motstående sidor enligt FIG 3.6.14.

Vindtrycken  $P_1(t)$  och  $P_2(t)$  på resp lövart- och läsida blir

$P_1(t) = \frac{1}{2} \rho c_{p1} [V(t)]^2$	<b>[3.6.2]</b>
---------------------------------------------	----------------

$P_2(t) = \frac{1}{2} \rho c_{p2} [V(t)]^2$	<b>[3.6.3]</b>
---------------------------------------------	----------------

där

$\rho$  = luftdensiteten

$c_p$  = formfaktorn, som här antages *opåverkad* av vindturbulensen

$V(t)$  = vindens friströmshastighet

Trycken  $P(t)$  uppdelas i aritmetiskt medelvärde,  $p_m$ , och variation kring medelvärdet,  $\delta p(t)$ .

$P_1(t) = p_{1m} + \delta p_1(t)$	<b>[3.6.4]</b>
-----------------------------------	----------------

$P_2(t) = p_{2m} + \delta p_2(t)$	<b>[3.6.5]</b>
-----------------------------------	----------------

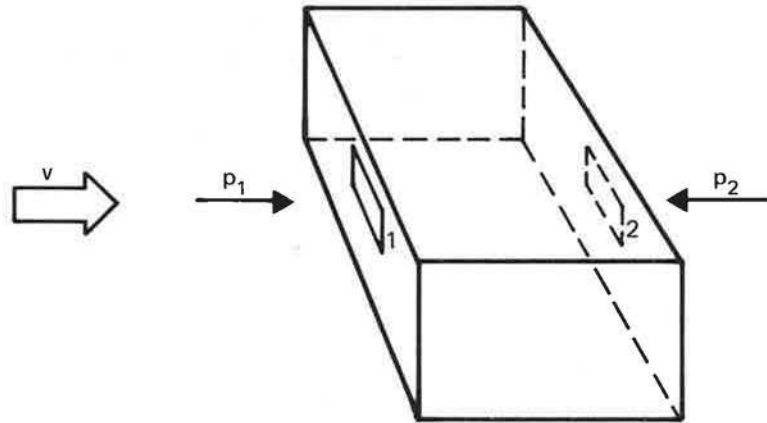


FIG 3.6.14. Byggnad i form av en ihålig låda med öppningar på motstående sidor. Vinkelrät anblåsning.

Tryckskillnaden  $W(t)$  mellan lovart- och läsidan blir

$$W(t) = P_1(t) - P_2(t) \quad [3.6.6]$$

$$w_m + \delta w(t) = (p_{1m} - p_{2m}) + [\delta p_1(t) - \delta p_2(t)] \quad [3.6.7]$$

$$w_m = p_{1m} - p_{2m} \quad [3.6.8]$$

$$\delta w(t) = \delta p_1(t) - \delta p_2(t) \quad [3.6.9]$$

I det följande kommer vi att använda samband och metoder hämtade från statistisk signalanalys.

För vindstötter med lång våglängd (låg frekvens) kan trycken på lovart- och läsidan antas vara helt korrelerade. Autokorrelationsfunktionen  $R_w(\tau)$  kan då tecknas

$$R_w(\tau) = R_{p_1}(\tau) + R_{p_2}(\tau) - R_{p_1 p_2}(\tau) - R_{p_2 p_1}(\tau) \quad [3.6.10]$$

Spektraltätheten för de helt korrelerade vindtrycken på lovart- och läsidan fås av

$$S_w(f) = S_{p_1}(f) + S_{p_2}(f) - S_{p_1 p_2}(f) - S_{p_2 p_1}(f) \quad [3.6.11]$$



För korta våglängder (hög frekvens) kan trycken på lovert- och läsidan antas vara okorrelerade och uttrycken [3.6.10] och [3.6.11] övergår till

$$R_w(\tau) = R_{p1}(\tau) + R_{p2}(\tau) \quad [3.6.12]$$

$$S_w(f) = S_{p1}(f) + S_{p2}(f) \quad [3.6.13]$$

Det kvadratiska medelvärdet av tryckfluktuationen ges av

$$\sigma_w^2 = \int_0^{\infty} S_w(f) \quad [3.6.14]$$

De yttre vindtryckens medelvärden och standardavvikelse erhålles från uttrycken [3.6.8] och [3.6.14]. Nästa steg är att jämföra dessa tryck med trycket på insidan av byggnaden och beräkna det resulterande luftflödet.

#### *Luftflöde genom en öppning*

Totala tryckskillnaden över öppningarna ges av

$$W(t) = [P_1(t) - p_i] + [p_i - P_2(t)] = P_1(t) - P_2(t) \quad [3.6.15]$$

Tryckförlusten genom en öppning på ovartsidan kan uttryckas genom den dynamiska förlustfaktor  $C_{d1}$ ,

$$P_1(t) - p_i = \frac{1}{2} C_1 \rho (V_o)^{1/\beta} \quad [3.6.16]$$

där  $V_o$  är lufthastigheten genom öppningen och  $\beta$  är en konstant som beror på öppningens utformning och Reynolds tal,  $\beta = 0,5$  för turbulent och  $\beta = 1$  för laminär strömning. Även  $C_1$  är en funktion av  $\beta$ .

Alternativt definieras flödesfaktorn  $C_{d1}$  som

$$C_{d1} = \frac{1}{C_1 \beta} \quad [3.6.17]$$

Faktorn  $C_{d1}$  är en funktion av öppningsarean (för värden på  $C_{d1}$  se t ex ASHRE Guide and Data Book, Systems and Equipment for 1967, ASHRE N.Y. 1967).

Ekvation [3.6.16] och [3.6.17] ger

$$V_o = C_{d1} \frac{2}{\rho} [P_1(t) - p_i]^\beta \quad [3.6.18]$$

Luftflödet  $q_1$  på lovartsidan fås som

$$q_1 = V_o A_1 = C_{d1} A_1 \left[ \frac{2}{\rho} (P_1(t) - p_i) \right]^\beta \quad [3.6.19]$$

där

$A_1$  = öppningens tvärsnittsarea

Flödet genom de två öppningarna måste vara lika, vi får

$$\begin{aligned} q &= C_{d1} A_1 \left[ \frac{2}{\rho} (P_1(t) - p_i) \right]^\beta = \\ &\quad \text{lovartsidan} \\ &= C_{d2} A_2 \left[ \frac{2}{\rho} (p_i - P_2(t)) \right]^\beta \\ &\quad \text{läsidan} \end{aligned} \quad [3.6.20]$$

eller alternativt

$$P_1(t) - p_i = \frac{\rho}{2} \left[ \frac{q}{C_{d1} A_1} \right]^{1/\beta} \quad [3.6.21]$$

$$p_i - P_2(t) = \frac{\rho}{2} \left[ \frac{q}{C_{d2} A_2} \right]^{1/\beta} \quad [3.6.22]$$

Summering av [3.6.21] och [3.6.22] ger

$$P_1(t) - P_2(t) = \frac{\rho}{2} \left[ \left( \frac{q}{C_{d1} A_1} \right)^{1/\beta} + \left( \frac{q}{C_{d2} A_2} \right)^{1/\beta} \right] \quad [3.6.23]$$

varur  $q$  löses,

$$\begin{aligned} q &= \left[ \frac{2}{\rho} \frac{P_1(t) - P_2(t)}{(C_{d1} A_1)^{1/\beta} + (C_{d2} A_2)^{1/\beta}} \right]^\beta \cdot \\ &\quad \cdot C_{d1} A_1 C_{d2} A_2 \end{aligned} \quad [3.6.24]$$

Om  $A_1 = A_2$  och  $C_{d1} = C_{d2}$  övergår [3.6.24] till

$$q = C_d A \left[ \frac{P_1(t) - P_2(t)}{\rho} \right]^\beta = C_d A \left( \frac{W(t)}{\rho} \right)^\beta \quad [3.6.25a]$$

som enligt [3.6.7] kan skrivas

$$\begin{aligned} q &= C_d A \left( \frac{w_m}{\rho} \right)^\beta \left( 1 + \frac{\delta w(t)}{w_m} \right)^\beta \approx \\ &\approx C_d A \left( \frac{w_m}{\rho} \right)^\beta \left( 1 + \beta \frac{\delta w(t)}{w_m} \right) \end{aligned} \quad [3.6.25b]$$

Härur erhålles medelvärdet av  $q$ ,

$$q_m \approx C_d A \left( \frac{w_m}{\rho} \right)^\beta$$

och standardavvikelsen

$$\sigma_q \approx C_d A \left( \frac{w_m}{\rho} \right)^\beta \cdot \beta \frac{\sigma_w}{w_m}$$

Det övre gränsvärde  $q_\alpha$  för luftväxling, som under viss tid endast får överskridas med viss sannolikhet  $\alpha$ , kan tecknas

$$q_\alpha = q_m + g_\alpha \sigma_q = C_d A \left( \frac{w_m}{\rho} \right)^\beta \left( 1 + g_\alpha \beta \frac{\sigma_w}{w_m} \right) \quad [3.6.26]$$

där

$g_\alpha$  = en av  $\alpha$  beroende »spetsfaktor»

I uttrycket [3.6.26] ingår tryckdifferensens medelvärde  $w_m$  och standardavvikelse  $\sigma_w$ . De skall nu bestämmas som funktioner av vindhastighetens motsvarande parametrar.

#### Bestämning av den fluktuerande vindtryckskomponenten

Vindtryckets standardavvikelse erhålls genom att beakta vindturbulensen. Vindhastigheten kan uppdelas i sitt medelvärde  $v_m$  och en fluktuerande del  $\delta v(t)$ ,

$$V(t) = v_m + \delta v(t) \quad [3.6.27]$$

Ekvation [3.6.27] införs i [3.6.2] och [3.6.3] vilka i sin tur substitueras i [3.6.8] och [3.6.9],

$$w_m = \frac{1}{2} \rho v_m^2 (c_{p1} - c_{p2}) \quad [3.6.28]$$

$$\delta_w(t) = w_m \left[ 2 \frac{\delta v(t)}{v_m} + \frac{\delta v(t)}{v_m} \right]^2 \quad [3.6.29]$$

Efter serieutveckling fås autokorrelationsfunktion och spektraltäthet för yttre vindtryck,

$$R_p(\tau) = p_m^2 \left[ 4 \frac{R_v(\tau)}{v_m^2} + \frac{R_v(\tau)^2}{v_m^4} \right] \quad [3.6.30]$$

$$S_p(f) = p_m^2 \left[ 4 \frac{S_v(f)}{v_m^2} + \frac{1}{v_m^4} \int_0^f S_v(f) \cdot S_v(f - f_1) df_1 \right] \quad [3.6.31]$$

Integralen i uttrycket [3.6.31] betecknar turbulensens icke linjära inverkan. Denna är i allmänhet liten för höga byggnader. För låga byggnader kan bidraget dock inte alltid försummas. För enkelhetens skull medtas inte integralen i den fortsatta behandlingen, varvid [3.6.31] övergår till

$$S_p(f) = 4 p_m^2 \frac{S_v(f)}{v_m^2} \quad [3.6.32]$$

Tillämpas [3.6.14] för vindtryck  $p$  och vindhastighet  $v$

$$\frac{\sigma_p}{p_m} = \frac{2\sigma_v}{v_m} \quad [3.6.33]$$

#### *Korrelationens betydelse för luftflödet*

Vi studerar två specialfall av vindtryckets korrelation mellan lovart- och läsida, full korrelation och ingen korrelation.

Vid full korrelation är

$$\sigma_w = \sigma_{p1} - \sigma_{p2}$$

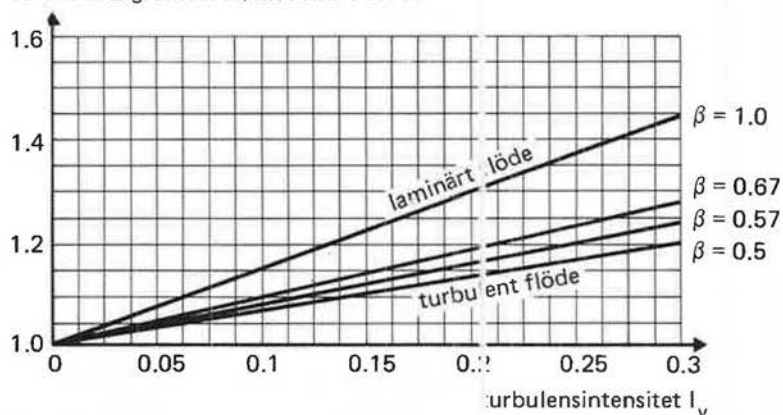
vilket efter insättning av  $\sigma_{p1}$  och  $\sigma_{p2}$  enligt [3.6.33] ger

$$\frac{\sigma_w}{w_m} = \frac{2\sigma_v}{v_m} \quad [3.6.34]$$

Luftflödets gränsvärde blir då enligt [3.6.26]

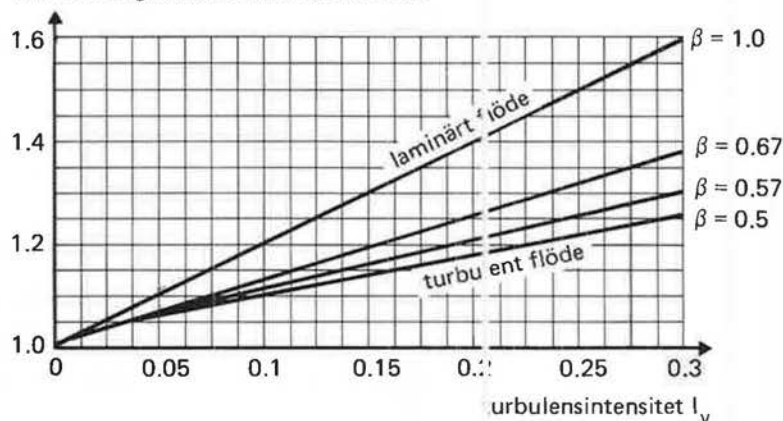
$$q_\alpha = C_d A \left(\frac{w_m}{\rho}\right)^\beta \left(1 + 2g_\alpha \beta \frac{\sigma_v}{v_m}\right) \quad [3.6.35]$$

luftflödets gränsvärde/medelluftflödet



a. Inverkan av turbulensintensiteten  $I_v$  vid helt okorrelerade vindtryck på lovart- och läsidan.

luftflödets gränsvärde/medelluftflödet



b. Inverkan av turbulensintensitet  $I_v$  vid helt korrelerade vindtryck på lovart- och läsidan.

FIG 3.6.15. Turbulensens inverkan på luftflödets momentana, övre gränsvärde. Det maximala luftflödet har normerats med avseende på medelluftflödet. Sambanden gäller för formfaktorerna +0,8 och -0,4 för resp lovart- och läsidan. Spetsfaktorn  $g_\alpha = 1$ .

Då vindtrycken på lovart- och läsidan inte är korrelerade blir i stället standardavvikelsen för tryckskillnaden enligt [3.6.13] och [3.6.14]

$$\sigma_w = \sqrt{\sigma_{p1}^2 + \sigma_{p2}^2}$$

varför man efter insättning av [3.6.33] erhåller

$$\frac{\sigma_w}{w_m} = \frac{\sqrt{p_{1m}^2 + p_{2m}^2}}{w_m} \cdot \frac{2\sigma_v}{v_m}$$

Insättning i [3.6.26] ger

$$q_\alpha = C_d A \left(\frac{w_m}{\rho}\right)^\beta \left(1 + 2g_\alpha \beta \frac{\sigma_v}{v_m} \sqrt{\frac{p_{1m}^2 + p_{2m}^2}{w_m}}\right) \quad [3.6.36]$$

Om turbulensintensiteten  $I_v = \sigma_v/v_m$  är större än 30% bör integraltermen i [3.6.31] beaktas. Dessutom bör observeras att den i [3.6.25b] genomförda lineariseringen förutsätter ett relativt litet värde på andra termen i parentesen i uttrycken [3.6.35] och [3.6.36].

FIG 3.6.15 visar den enligt [3.6.35] och [3.6.36] erhållna inverkan av turbulensintensiteten  $I_v$  på övre gränsvärdet för luftflödet  $q(t)$ . Faktorn  $\beta$  har varierats och spetsfaktorn  $g_\alpha$  har satts lika med 1. Gränsvärdet vid en viss turbulensintensitet har normerats i förhållande till det mot medelvindhastigheten svarande flödet. Uppgifter lämnas för full korrelation och korrelationen = 0.

## 4 Temperatureffekter

Varm luft är lättare än kall vid samma atmosfärtryck. Den varma inomhusluften i en byggnad relativt den kalla utomhusluften ger upphov till en höjdberoende tryckskillnad över klimathöljet benämnd skorstenseffekten. Tryckskillnaden räknas som positiv vid *utvändigt* övertryck och beskrivs av sambandet

$$\Delta p(z) = -\rho_0 g \cdot 273 \left( \frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_i} \right) \cdot z \quad [4.1]$$

där

$\rho_0$  = uteluftens densitet vid 0°C och rådande atmosfärtryck, kg/m<sup>3</sup>

$g$  = tyngdaccelerationen, m/s<sup>2</sup>

$T_u$  = utetemperaturen, °K

$T_i$  = innetemperaturen, °K

$z$  = avståndet i höjdlängd från ett valt referensplan, m

Ekvationen [4.1] kan i SI-systemet approximativt skrivas

$$\Delta p(z) \approx 0,04 \Delta T \cdot z \quad [4.2]$$

där

$\Delta T = T_u - T_i$

Det inre trycket är som tidigare sagt: avhängigt av yttre vindtryck, ventilationsflöden och klimathöljets luftgenomsläpplighet. En referensplansnivå där  $\Delta p_r$  i ekvation [2.3] är 0 benämns neutralnivå. Över neutralnivån ger skorstensverkan ett invändigt övertryck, under fås ett invändigt undertryck. FIG 4.1 illustrerar förhållandet, en neutralnivå har här lagts vid en dominerande otäthet. Vid låga ventilerade byggnader behöver en neutralnivå inte uppstå.

Innetemperaturen kan, utom i undrar tagsfall, ses som en konstant. Utetemperaturen kan vid molnigt väder och måttliga hushöjder antas konstant runt byggnaden. Lokala yttemperaturökningar genom solinstrålning måste kanske beaktas (lokal skorstensverkan i ventilerad luftspalt mellan stomme och ytbeklädnad).

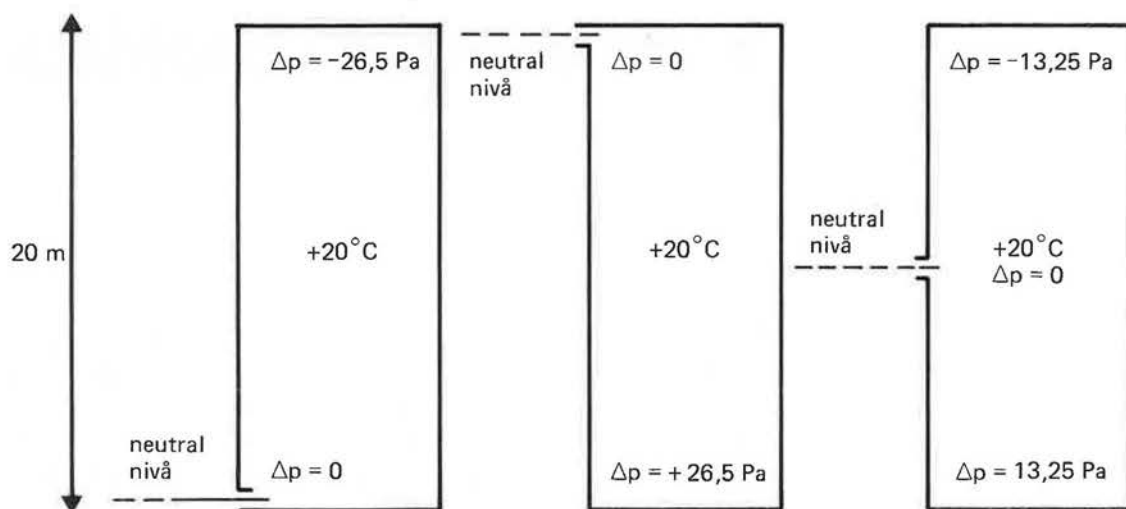


FIG 4.1. Skorstenseffekt i byggnad. Tryckskillnad  $\Delta p$  räknas som positiv vid utvändigt övertryck. Ute-temperaturen =  $-10^\circ\text{C}$ .

Det är viktigt att beakta att temperaturen inne i städer skiljer sig från omgivande landsbygd (där klimatstationerna brukar ligga). Under kortare tidsavsnitt kan avsevärda skillnader uppkomma, men sedda som månads- och årsmedelvärden dämpas skillnaderna. Taesler anger att årsmedeltemperaturen är ca  $1^\circ\text{C}$  högre i städer än på omgivande landsbygd.

Förutom som en drivkraft för luftväxling i en byggnad har naturligtvis temperaturskillnaderna en avgörande betydelse för ventilationsförlusterna. Ventilationsförlusten  $Q$  får man av uttrycket

$$Q \approx V \cdot n \cdot 0,33 \cdot (1 - \eta) \cdot (t \cdot \Delta T) \text{ (Wh)} \quad [4.3]$$

där

$V$  = byggnadens volym,  $\text{m}^3$

$n$  = luftomsättningstalet,  $\text{h}^{-1}$

$0,33$  = luftens värmekapacitet, torr luft,  $\text{Wh}/\text{m}^3 \text{ }^\circ\text{C}$

$\eta$  = verkningsgraden hos ett eventuellt värmeåtervinningssystem, med beaktande av att hela luftomsättningen inte sker via ventilationssystemet

$(\Delta T \cdot t)$  = antalet gradtimmar (temperaturskillnad x tid,  $^\circ\text{C h}$ )



## 5 Samordnade klimatdata

Samordnade klimatdata ger underlag för beräkning av energiförluster under en uppvärmningssäsong. För beräkning av ventilationsförlusterna behövs samordnad statistik beträffande samtidig storlek och varaktighet av i första hand vindhastighet, vindriktning och lufttemperatur. För att illustrera användning och presentationssätt för sådana samordnade klimatdata har FIG 5.1 och 5.2 uppritats. Som underlag för uppritningen lig-

varaktighet för samhörande klimat-  
element, ‰ av total tid

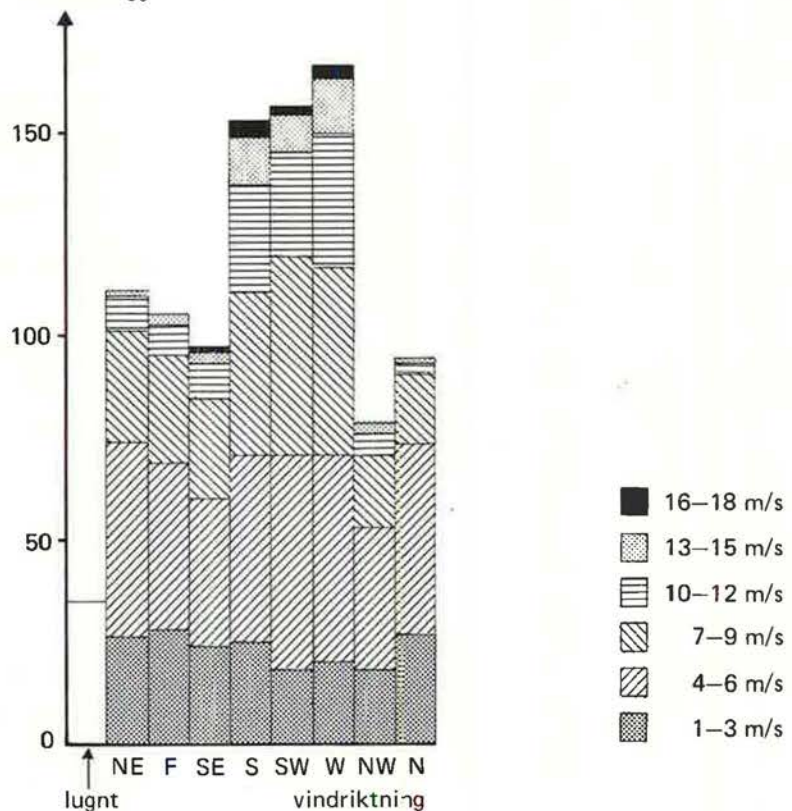


FIG 5.1. Samband mellan vindhastighet och vindriktning för Torshälla flygplats under januari. Värdena är baserade på 20 års observation.

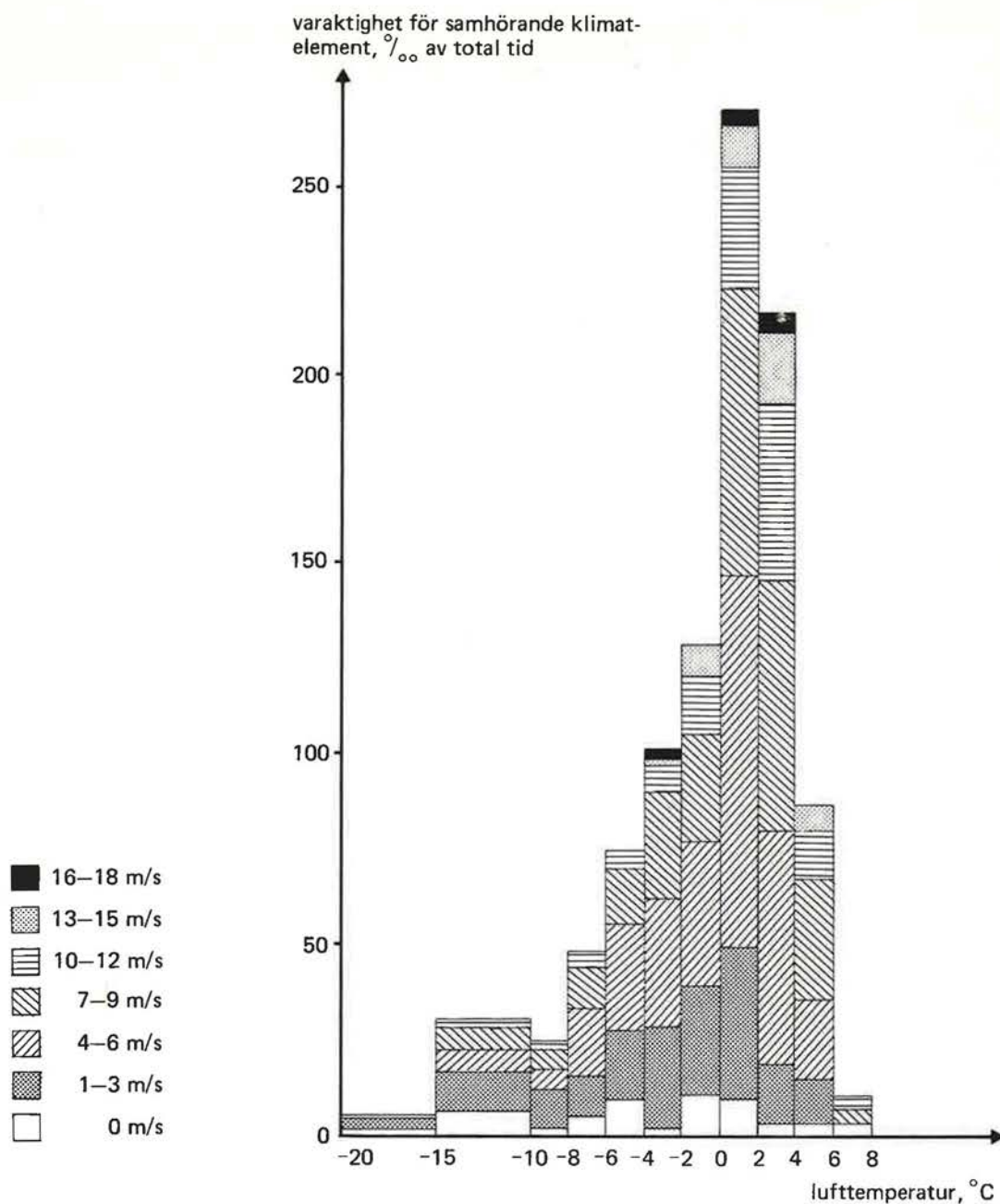


FIG 5.2. Samband mellan vindhastighet och lufttemperatur för Torslanda flygplats under januari. Värdena är baserade på 20 års observationer.

ger tabellvärden från Taesler. FIG 5.1 visar samband mellan vindhastighet och vindriktning, FIG 5.2 samband mellan vindhastighet och temperatur. Sambanden uttrycks som varaktighet i ‰ av total tid för samhörande klimat-element och gäller för Torslanda flygplats under januari.

Av figurerna framgår att en visualisering av tabellvärden kan underlätta en analys av de parametrar som styr luftväxling och ventilationsförluster i en byggnad.

Ännu har inte någon lättillgänglig samordnad statistik framtagits som behandlar samvariationen mellan de tre klimatedementen vindhastighet, vindriktning och lufttemperatur. I första hand bör sådan statistik framtagas för vinterhalvåret. Ett annat sätt är att utnyttja en databank för ett »normalår». SMHI har tagit fram ett databand med timvisa klimatfaktorer för år 1971, gällande tre orter.

## 6 Forskningsuppgifter

### 6.1 UTEKLIMATET

Klimatdata registreras vid ett stort antal väderstationer i Sverige. Registrerade klimatelement av intresse i detta sammanhang utgörs av vindhastighet, vindriktning och lufttemperatur. I första hand kan dessa behöva kompletteras med avseende på vindprofil, turbulensintensitet och vindriktningsfluktuationer. Av primärt intresse är samvariationen av klimatelementen.

För beräkningen av en enskild byggnads luftväxling och ventilationsförlust behövs bl a uppgift om samvariationen mellan vindtrycksfördelning (statisk och fluktuerande) och skorstens-effekt. Som tidigare påpekats är det lämpligt att vid beräkningen av vindtrycksfördelningen arbeta med formfaktorer som tar hänsyn till bebyggelseområdets typ och byggnadens form, textur och läge i bebyggelsen.

Klimatdata från en väderstation behöver således översättas till de naturliga drivkrafter som medverkar till den enskilda byggnadens luftomsättning. Denna översättning, som lämpligen sker i flera steg, illustreras av nedanstående schema.

Med hänvisning till FIG 6.1 formuleras några angelägna forskningsområden:

- Samordnade meteorologiska data. Framtagning av samverkande effekter av vind och temperatur ur tillgängliga meteorologiska data.
- Översättning av meteorologiska data till referenspunkterna för ett visst bebyggelseområde. Inverkan av topografi, kringliggande bebyggelse och vegetation. Lämpliga riktlinjer för referenspunkternas placering. Studierna kan schematiskt utföras genom vindtunnelförsök och för ett flertal bebyggelseområden genom fältmätningar.
- Bestämning av formfaktorer för byggnader i valda typer av bebyggelseområden. Sådana bebyggelseområden kan t ex utgöras av: fristående små- och radhusområden med olika förtätningsgrad samt flerbostadshus med olika storlek, form och inbördes orientering. Huvuddelen av de systematiska studierna genomförs i vindtunnel. Enstaka fall följs upp genom fältmätningar.

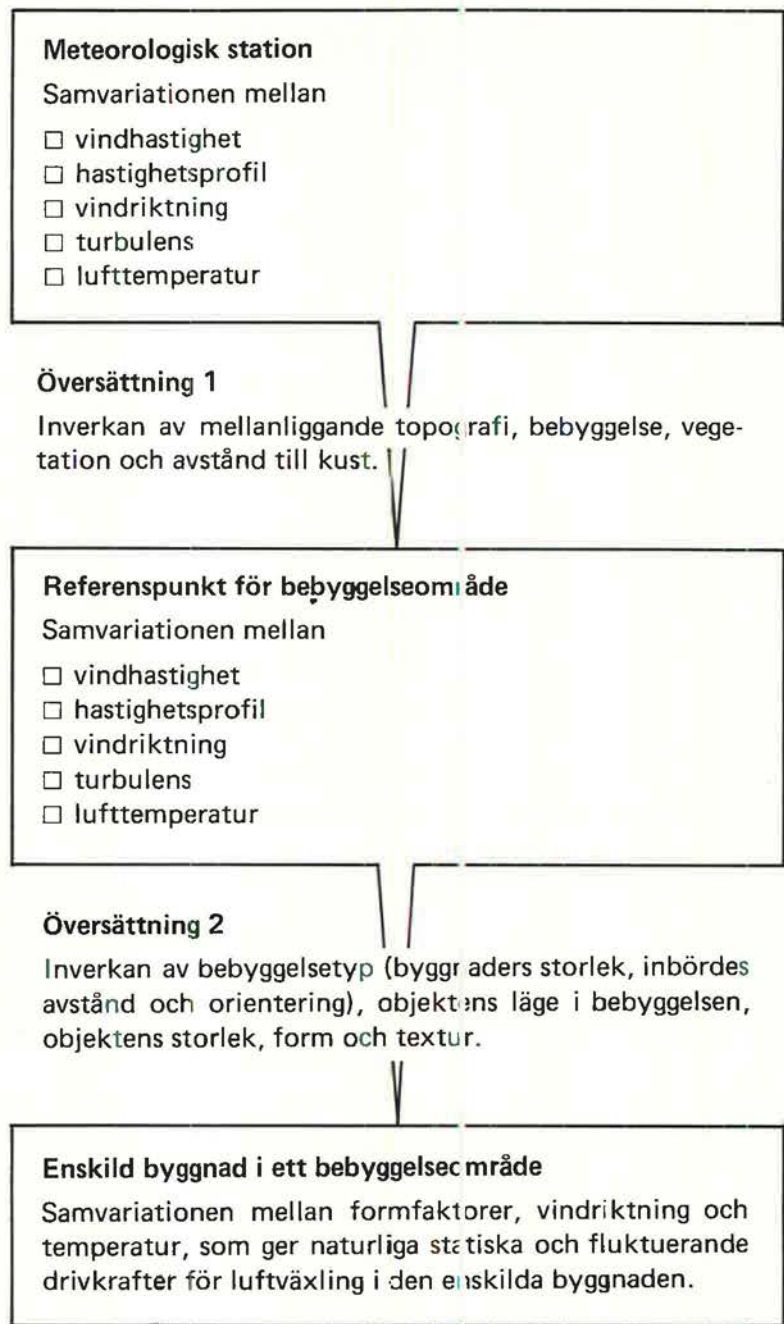


FIG 6.1. Schema för översättning av vid väderstation mätta klimatdata till naturliga drivkrafter för luftväxling i den enskilda byggnaden.

- Inverkan av byggnadens textur på lokala formfaktorer. Undersökningarna bedrivs genom aerodynamiska bedömningar och studier i vindtunnel.
- Dynamiska effekter på luftväxling och luftkomfort. Dessa problem studeras genom fältstudier, modellstudier i laboratorium samt teoretiska beräkningar.

## 6.2 INNEKLIMATET

Följande frågor kan aktualiseras i täta hus:

- Ger täta hus ökade stagnationszoner med åtföljande risk för fönsterkondens, mögelbildning och känsla av »dålig luft»? Krävs ökad luftomsättning för att i olyckliga fall kompensera denna effekt? Kan man finna enkla sätt att öka omblandningen av luft?
- Ger fåtaliga kvarvarande läckor i täta hus upphov till störande jetströmmar i vistelsezonen?
- Framtagning av tilluftsdon för uteluft.
- Hur stor luftomsättning behövs i småhus och i övriga bostäder? Skall siffran göras oberoende av antal personer/ytenhet, volymenhet? Kan ventilationsbehovet minskas med filtrerad återluft?
- Är zonindelning mellan dag- och nattdel en framkomlig väg för att minska ventilationsförlusterna (jämför nattsänkning).
- Ljudstörningar vid mekaniska ventilationssystem. Ljudöverföring mellan rum via ventilationskanaler.
- Vädringsvanor – hur inverkar ett bra ventilationssystem på vädringsfrekvensen? Vad betyder fönstervädning ur energisynpunkt?
- Kan tryckskillnaden över en ytterdörr skapa problem vid öppnandet (gäller F-system)?

## 6.3 PÅGÅENDE FORSKNING

De föreslagna uppgifterna täcks endast i obetydlig omfattning av pågående forskningsaktiviteter i Sverige. Statens institut för byggnadsforskning utför studier av vindhastighetens beroende av avståndet från kust. Vid avdelningen för byggnadskonstruktion, CTH, pågår vindmätning i bebyggelseområden. Resultaten kan delvis utnyttjas för att karaktärisera olika bebyggelseområdens vindförhållanden. Vidare genomförs fullskalemätningar av vindtrycksfluktuationer och studier av stationärt och fluktuerande vindtryck på ett provhus och dessas inverkan på luftväxlingen.

# Litteratur

Bilsborrow, R E & Fricke, F R, *Model verification of analogue infiltration predictions*. Build Sci 1C, pp 217–230, Pergamon Press 1975.

Chein, N et al, *Wind tunnel studies of pressure distribution on elementary building forms*. Iowa Institute of Hydraulic Research, State University of Iowa. Iowa City 1951.

Cockroft, J P & Robertson, P, *Ventilation of an enclosure through a single opening*. Building and Environment. Vol 11, pp 29–35, Pergamon Press, England 1976.

*Code of basic data for the design of buildings*. Chapter of loading, BS13, CP 3, Chapter V, Part 2, 1972.

Davenport, A G, *Gust loading factors*, *Journal of structural division*. Proceedings ASCE. Vol 93 No ST3, June 1967.

Davenport, A G, *The prediction of the response of structures to gusty wind*. International Research Seminar on Safety of Structures. Trondheim, Norway, June 23 to July 1 1977.

Eaton, K J & Mayne, J R, *The measurement of wind pressures on two-storey houses at Aylesbury*. BRE CP 70/71, England 1974.

Eaton, K J, Mayne, J R & Cook, N J, *Wind loads on low rise buildings – efforts of roof geometry* CP 76, BRE, England 1976.

Engineering Sciences Data, *The response of flexible structures to atmospheric turbulence*. Item 76(01), London 1976.

Handa, K & Kärrholm, G, *Wind loads on flat roofs*. Avd för byggnadskonstruktion, Chalmers Tekniska Högskola, 1976:3.

Hellers, B G & Lundgren, S, *Vindbelastning på huskroppar av allmän form – modellprov*. Byggeforskningsrapport R22:1974.

Handa, K, *Wind induced natural ventilation*. Avd för byggnadskonstruktion, Chalmers Tekniska Högskola, 1978:14.

Handa, K, *Wind loads on building structures*. Avd för byggnadskonstruktion, Chalmers Tekniska Högskola, 1973:9.

Helliwell, N C, *Wind over London*. International conference on wind effects on buildings and structures. Tokyo 1971.

Hunt, J C R, *The effect of single buildings and structures*. Phil Trans Roy Soc London A, 269, pp 457–467, 1971.

Jensen, M & Frank, N, *Model scale tests in turbulent wind*. Part II. Phenomena dependent on the velocity pressure. Wind loads on building. The Danish Technical Press. Copenhagen 1965.

Kärrholm, G, et al, *Ofrivillig ventilation*. Byggeforskningsrapport R34:1975.

Leuthensser, H J, *Influence of architectural features on the static wind loading of buildings*. Building Science Series 30. Proceedings of technical meeting concerning wind loads on buildings and structures. NBS, November 1970.

Malinowski, H K, *Wind effect on air movements inside buildings*. International conference on wind effects on buildings and structures. Tokyo 1971.

Marshal, R D, *A study of wind pressures on a single dwelling in model and full scale*. Journal of Industrial Aerodynamics 1, 1975.

Newberry, C W & Eaton, K J, *Wind loading handbook*. Buildings Research Establishment, England 1974.

Newberry, C W, Eaton, K J & Mayne, J R, *Wind loading on a tall building in an urban environment*. Building Research Station, Garston, England 1968.

Nylund, P O, *Tjyvdrag och ventilation*. Byggeforsknings T-skrift T4:1979.

Penzes, G & Balazs, K, *Windtunnel experiments for determination of wind pressure distribution around buildings to infiltration calculations*. Intern skrift, ETI (Byggeforskningsinstitutet), Budapest, Ungern 1977.

Soliman, B F & Fricke, F R, *Effect of building grouping on wind induced natural ventilation*. University of Sheffield, England. CBI Congress, Budapest, Ungern 1974.

Taesler, R, *Klimatdataboken*. Byggeforsknings, Stockholm 1972.



Thuresson, S, *Mätning av vindkrafter på en byggnads väggar och tak*. Byggeforskningens rapport R29:1977.

Torrence, W B, *Wind profiles over a suburban site and wind effects on a half full scale model building*. *Building Science*, Vol 7, 1972.

Wise, A F, *Effect due to groups of buildings*. *Phil Trans Roy Soc London A*, 269, pp 469–485, 1971.

# Sammanfattning

De lokala vind- och temperaturförhållandena inverkar på luftväxlingen mellan en byggnad och dess omgivning. Den luft som tränger in genom klimathöljet, måste värmas upp och påverkar dessutom klimatet inomhus, dels i form av drag och dels genom effekter på ventilationssystemet. Mikroklimatet är därför av betydelse ur såväl energi- som komfortsynpunkt.

En beskrivningsmodell för en byggnads luftväxling med omgivningen återges, där mikroklimatets inverkan karakteriseras genom en referensvindhastighet samt temperaturerna inom- och utomhus. I fortsättningen redogörs för metoder som beskriver medelvindhastighetens storlek och höjdberoende samt hastighetsfluktuationernas karakterisering genom vindspektra och turbulensintensitet.

Det av vinden betingade trycket på en byggnads yttertor har hittills nästan uteslutande studerats som en stationär företeelse och utifrån behovet att definiera vindlast på en byggnads bärande delar. Litteraturuppgifter lämnas om formfaktorer som bestämmer vindtryck på väggar och tak hos byggnader med olika form. Exempel ges på inverkan av fasaddetaljer som taksprång och pilastrar liksom på inverkan av närliggande bebyggelse.

Efter en principiell diskussion om turbulensförhållandena kring en byggnad beskrivs olika mekanismer för luftströmning vid fluktuerande vindtryck. Dessa mekanismer påverkar luftväxling och klimatkomfort på ett hittills föga utrett sätt. Exempel ges på analys av en enkel modell för slumpvis varierande luftläckning.

Temperaturen inom- och utomhus påverkar luftens täthetsförhållanden och skapar därmed tryckdifferenser över klimatbarriärerna. Temperaturförhållandena i atmosfären bestämmer lufthavets stabilitet och inverkar på vindhastighetens höjdberoende. Detta förtjänar speciellt beaktande eftersom en byggnads energiförluster i motsats till dess belastningsförhållanden är mera beroende av måttliga men långvariga vindhastigheter än av höga hastigheter med kort varaktighet.

Vid bestämning av klimateffekter på en byggnads energiförluster krävs kännedom om de inverkanseffektors storlek och varaktighet. Det är emellertid också oundgängligt att känna samvariationen mellan de olika faktorerna. Detta gäller i första hand sambandet mellan vindhastighet, vindriktning och temperatur.

Mot bakgrund av den genomförda probleminventeringen lämnas en översikt över angelägna forskningsuppgifter. Av dessa är de flesta inriktade på karakterisering av vind- och temperaturförhållandena i byggnaders närhet och kan hänföras till följande grupper:

- Framtagning av samordnade meteorologiska data för vind- och temperaturförhållanden.
- Översättning av data från meteorologisk station till lämpligt valda referenspunkter för ett bebyggelseområde.
- Bestämning av formfaktorer för byggnader i områden med olika slag av bebyggelse.
- Bestämning av formfaktorer som karakteriserar effekter av fasad- och takytors detaljutformning.
- Studier av vindfluktuationernas inverkan på luftväxling, energiåtgång och klimatkomfort.

Problemet att bestämma mikroklimatets inverkan på en byggnads läckflöden är intimt knutet till kännedomen om interntrycket och faktorer som berör inneklimatet. Problemöversikten har därför kompletterats med ett antal frågor knutna till dessa faktorer.