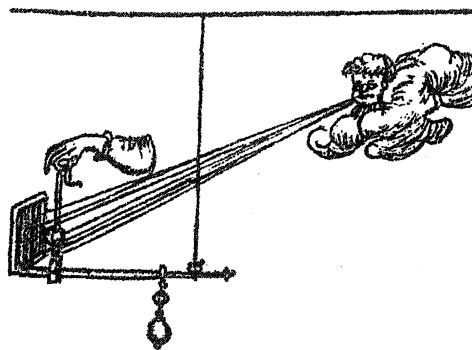


VIND

CLAES BANKVALL

PER INGVAR SANDBERG



KOMPENDIUM I BYGGNADSTEKNIK I

LUND 1972

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1. Luftrörelser, allmänt	1
1.1 Vind	
1.2 Skorstensverkan	
1.3 Ventilationssystem	
2. Genomströmning	13
3. Skydd av värmeisoleringsmaterial	20



1 LUFTRÖRELSER, ALLMÄNT

Luftrörelser och tryckförhållanden i och omkring byggnader och byggnadsdelar är väsentliga att känna till vid projektering av byggnader. I denna kompendiedel behandlas luftrörelser allmänt samt speciella problem dels vid genomblåsning av väggar och dels vid skydd av värmeisolering.

Luftrörelser och tryck inverkar på flera sätt på byggnadens funktion:

- Statiska och dynamiska belastningar. Byggnader måste dimensioneras med hänsyn till aktuella vindtryck.
- Luftläckage genom väggar kan ge upphov till drag, nedsmutsning, värmeförluster, fuktskador mm, se kap 2.
- Luftrörelser i spalter eller porösa material nedsätter värmeisoleringsförmågan, se kap 3.
- Luftrörelser parallellt med byggnadens ytterytor ökar värmeövergångstalet med större värmeförluster som följd.
- Tryckskillnader över väggar i kombination med slagregn kan ge vatteninträngning.
- Luftrörelser kan medföra uppvärmning av yttre konstruktionsdelar med snösmältning och istappsbildning som följd.
- Luftrörelser kan orsaka inblåsning av snö i vissa utrymmen.

Luftströmning orsakas av tryckskillnader och dessa tryckskillnader uppkommer vid byggnader genom vind, skorstensverkan och ventilation.

1.1 Vind

FIG 1 visar vindhastigheten på tre olika nivåer över markytan.

Av figuren framgår det hur vindhastigheten varierar med tiden. För de höga vindhastigheter som det här är fråga om räknar man med en svängning i området $\pm 20\%$ omkring medelvärdet. Vid lägre vindhastigheter går svängningarna upp till $\pm 50\%$.

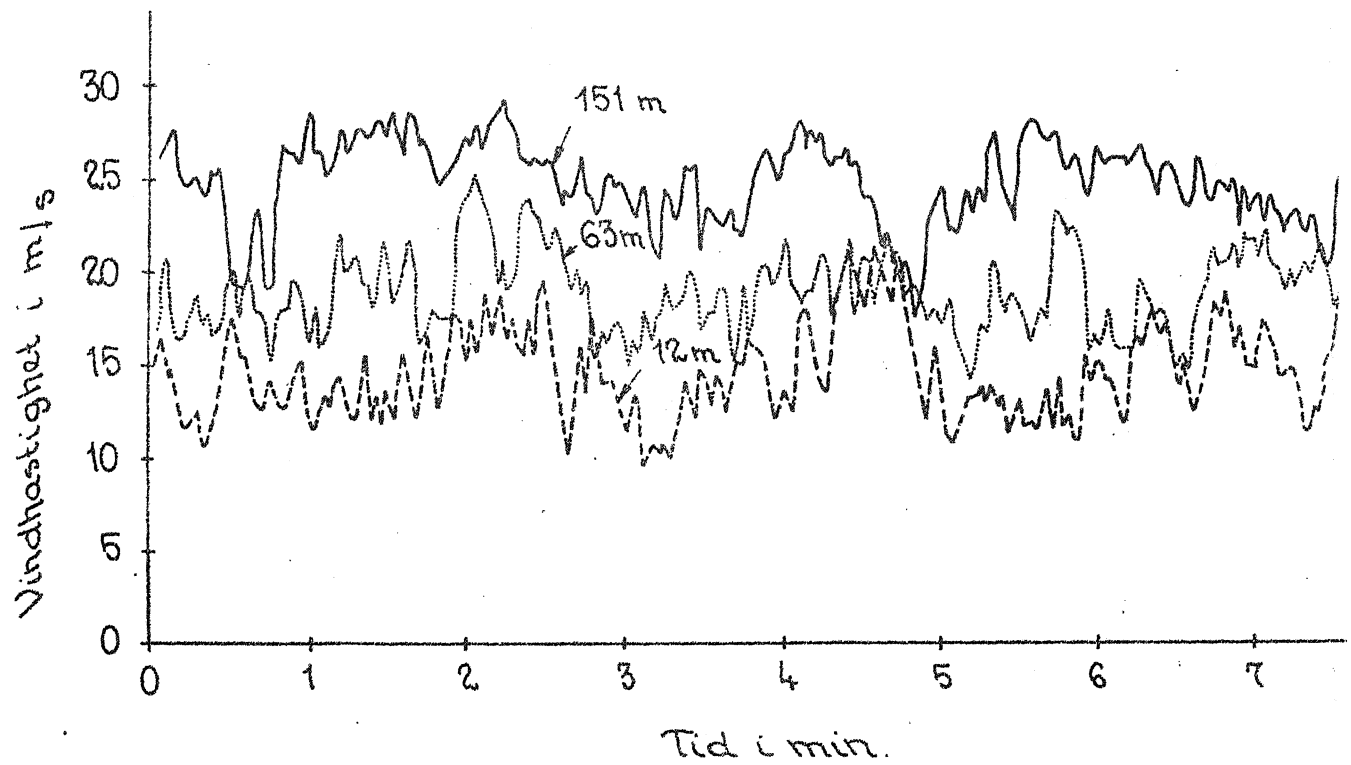


FIG 1. Från meteorologisk mast uppmätt tidsvariation av vindhastigheten på nivåer 12, 63 och 121 m.

I ett energispektrum för vinden ser man toppar vid 4 dagar och 12 h, vilka uppkommer genom makrometeorologiska fenomen (lågtrycksvandring, land- och sjöbris t ex) samt vid ca 1 min (mikrometeorologiska fenomen). Dessa senare vindbyar som kommer med ca 1 minuts intervall, uppkommer genom turbulens i luftens gränsskikt mot marken.

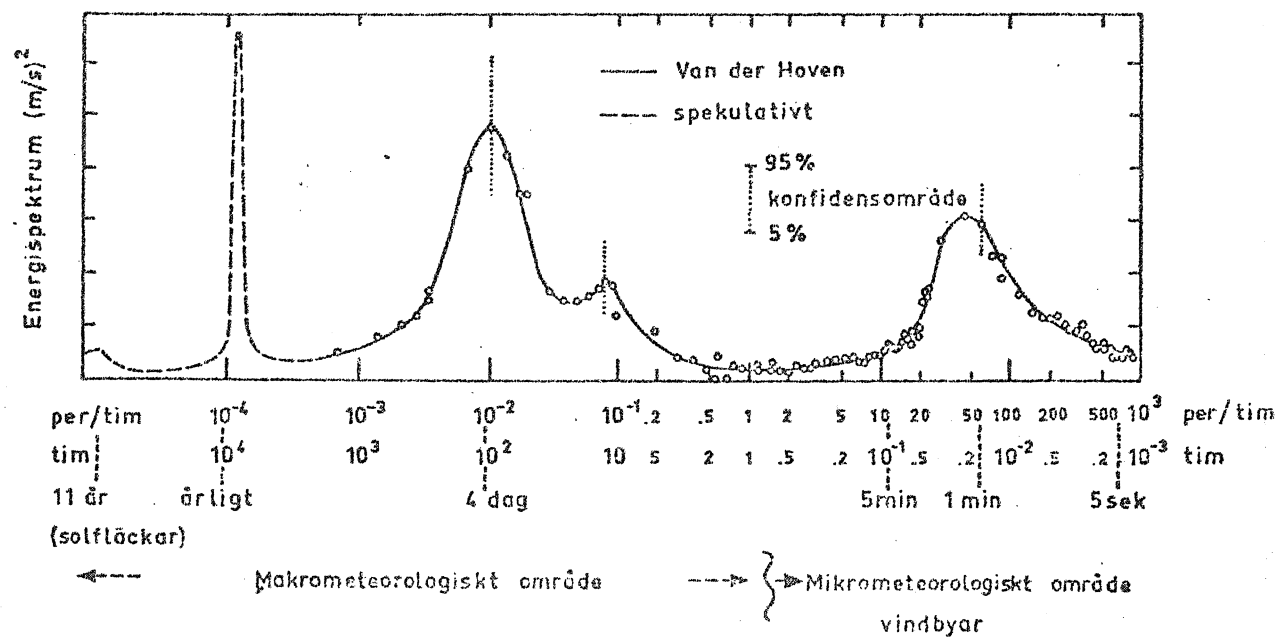


FIG 2. Horisontellt vindbyspektrum mätt på 100 meters höjd vid Brookhaven, N.Y. (efter Van der Hoven).

Med hänsyn till vindhastighetens variation i tiden anges normalt vindhastigheter som medelvärde under en 10-minutersperiod. Vindhastighet mäts på meteorologiska stationer med skålkorsanemometer.

Vindstyrkan bestäms genom uppskattning och uttrycks i Beaufortgrader.

Vindstyrka i Beaufort	Vindhastighet ¹			Namn		Vindens verkningar	
	knop	meter per sekund	km per timme	till lands	till sjöss	på land	på öppna havet
0	mindre än 1	0-0,2	mindre än 1	lugnt	stiltje	inga; röken stiger rätt upp	spegelblank sjö
1	1-3	0,3-1,5	1-5	svag vind	nästan stiltje	märkbar för känslan	små fiskfjällliknande krusningar
2	4-6	1,6-3,3	6-11	svag vind	lätt bris	lyfter en vimpel	korta småvågor, som ej bryts
3	7-10	3,4-5,4	12-19	måttlig vind	god bris	sträcker en vimpel	vågkammarna börjar brytas
4	11-16	5,5-7,9	20-28	måttlig vind	frisk bris	sträcker en flagga, sätter kvistar och tunnare grenar i rörelse	längre vågor, vita skumkammar, som försakar ett kortvarigt brus
5	17-21	8,0-10,7	29-38	frisk vind	styv bris	mindre lövträd svajar, skumkammar bildas på insjöar	överallt vita skumkammar, sjön bryter med starkare och ihållande brus
6	22-27	10,8-13,8	39-49	frisk vind	hård bris, frisk kultje	sätter stora trädgrenar i rörelse, viner i telefonträd	större vågberg, vita skumkammar över större ytor, dovt rullande brus
7	28-33	13,9-17,1	50-61	hård vind	styv kultje	hela träd svajar, man går ej obehindrat mot vinden	sjön tornar upp sig och bryter skummet i strimmor
8	34-40	17,2-20,7	62-74	hård vind	hård kultje	bryter kvistar, besvärligt att gå i det fria	vågbergens längd och höjd betydande, skummet lägger sig i tätare strimmor, sjön börjar dåna
9	41-47	20,8-24,4	75-88	halv storm	halv storm	skador på hus, taktegel blåser ned	
10	48-55	24,5-28,4	89-102	storm	storm	sällsynt i inlandet, träd rycks upp med roten, betydande skador på hus	höga vågberg med långa brottsjöar, havsytan vit av skum, sjöns dån starkare och kommer stötvis
11	56-63	28,5-32,6	103-117	svår storm	svår storm	mycket sällsynt i inlandet	fartyg försvinner bakom vågberg, havsytan täckt av vitt skum, som försämrar sikten
12	64-71	32,7-36,9	118-133	orkan	orkan	endast på fjäll samt i tromber	sällsynt, förekommer särskilt i tropiska cykloner
13 ^a	72-80	37,0-41,4	134-149				
14 ^a	81-89	41,5-46,1	150-166				
15 ^a	90-99	46,2-50,9	167-183				

¹ 10 m över slät mark, fri från hinder. För andra höjder gäller andra tabeller.

^a Enligt beslut av den internationella meteorologiska organisationen, Paris 1946, har den gamla 12-gradiga Beaufortskalan utvidgats till 17 Beaufort. I denna tabell har dock endast 15 Beaufortgrader medtagits.

Av FIG 1 framgår att vindhastigheten varierar även med höjden. Hastighetsprofilen i gränsskiktet brukar i tekniska sammanhang anges genom

$$\frac{v_z}{v_0} = \left(\frac{z}{z_0}\right)^\alpha$$

där

z = höjd över mark

v_z = vindhast på höjd z

α = konstant

v_0, z_0 = referensvärden (gradientvind och gradienthöjd)

Värdet på α och v_0, z_0 varierar med markytans beskaffenhet, jfr FIG 3.

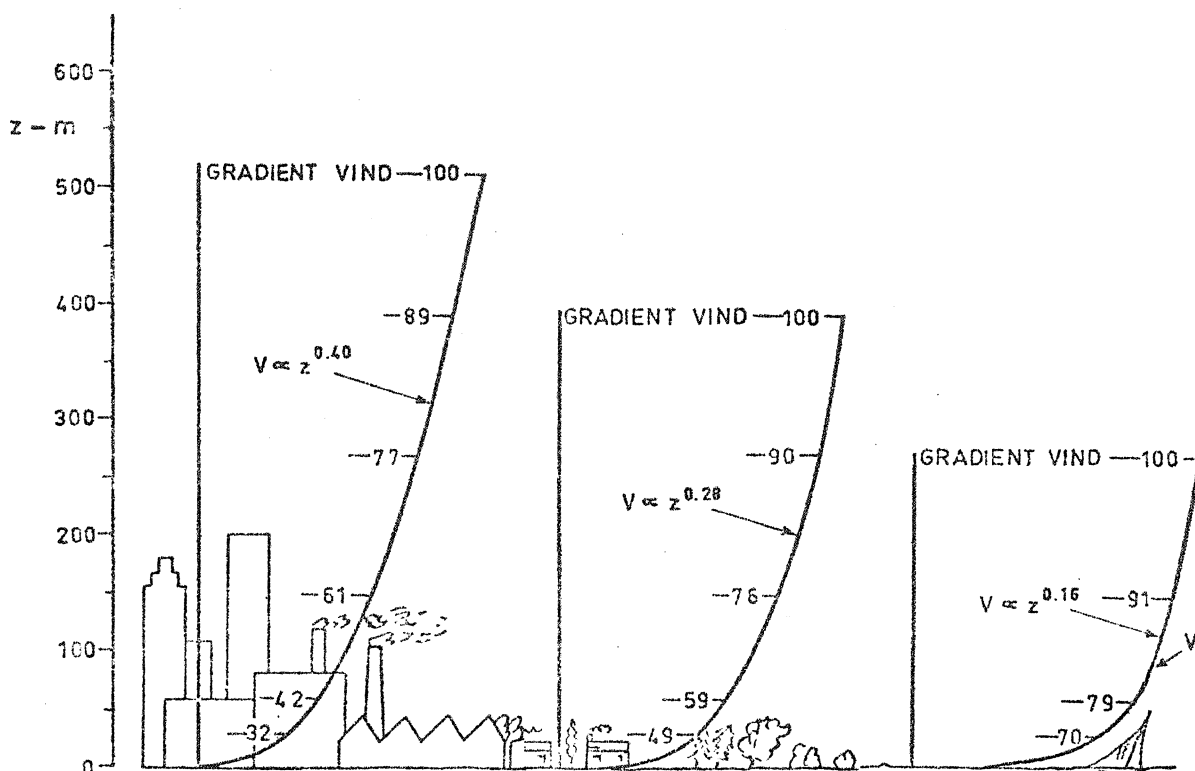


FIG 3. Markgränsskiktsprofiler för olika ytråhet.

Enligt en internationell överenskommelse skall vinden mätas på 10 m höjd över en slät, vågrät markyta fri från hinder.

När vinden träffar en byggnad ger den upphov till över- och undertryck vid byggnadens ytterytor. FIG 4-8 ger några exempel. Observera övertrycket på lovartsidan och virvelbildningen och suget på läsidan och sidor parallella med luftströmmen.

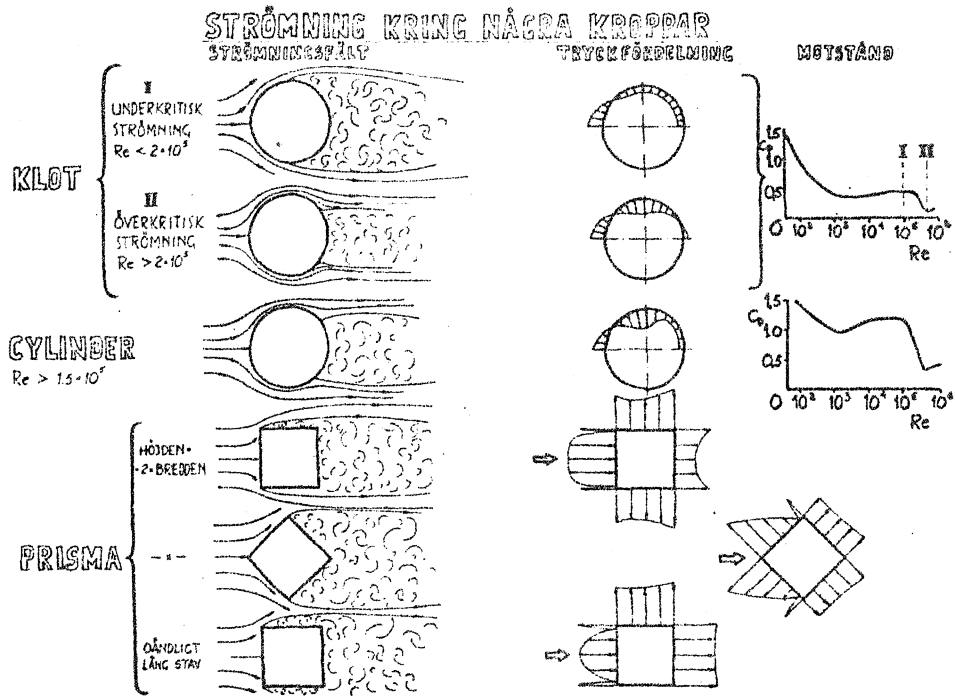


FIG 4.

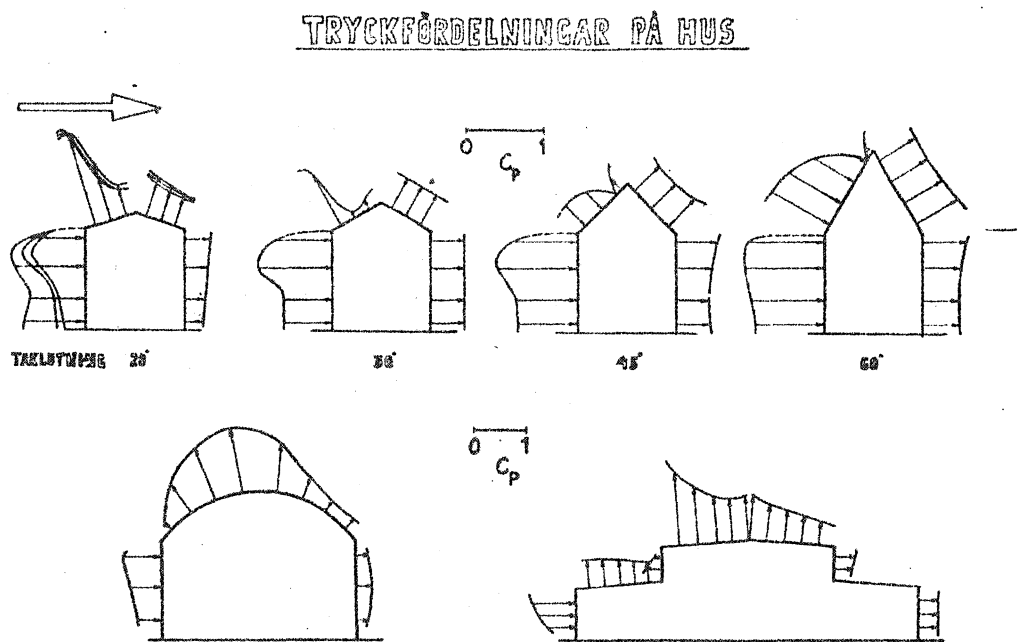


FIG 5.

SMALHUS, VARIERANDE HÖJD SADELTAK MED 30° LUTNING

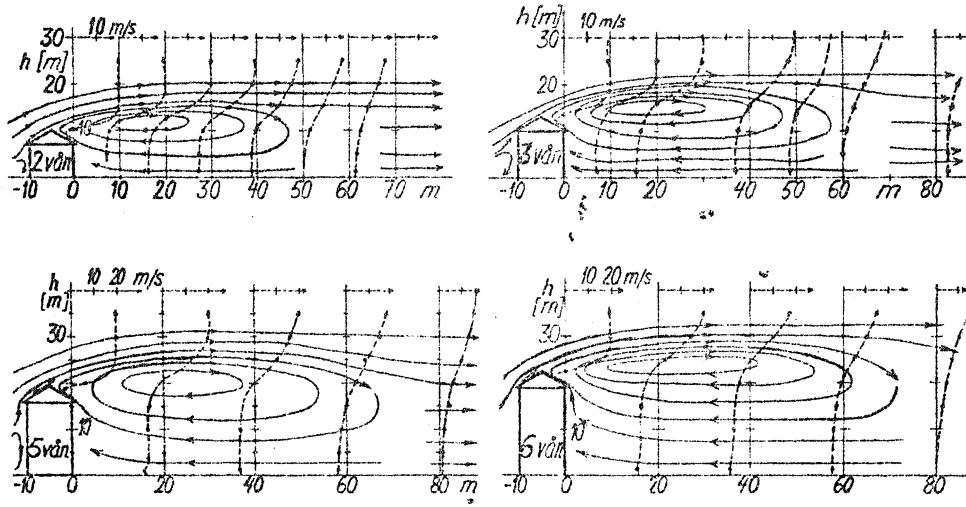


FIG 6.

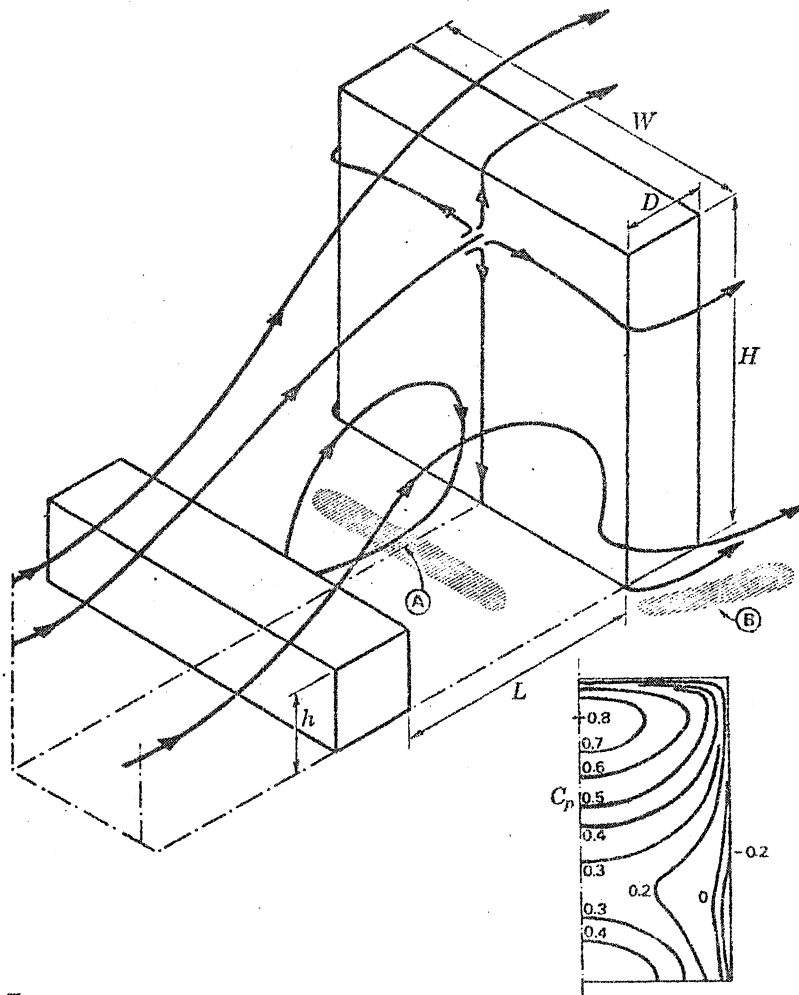


FIG 7.

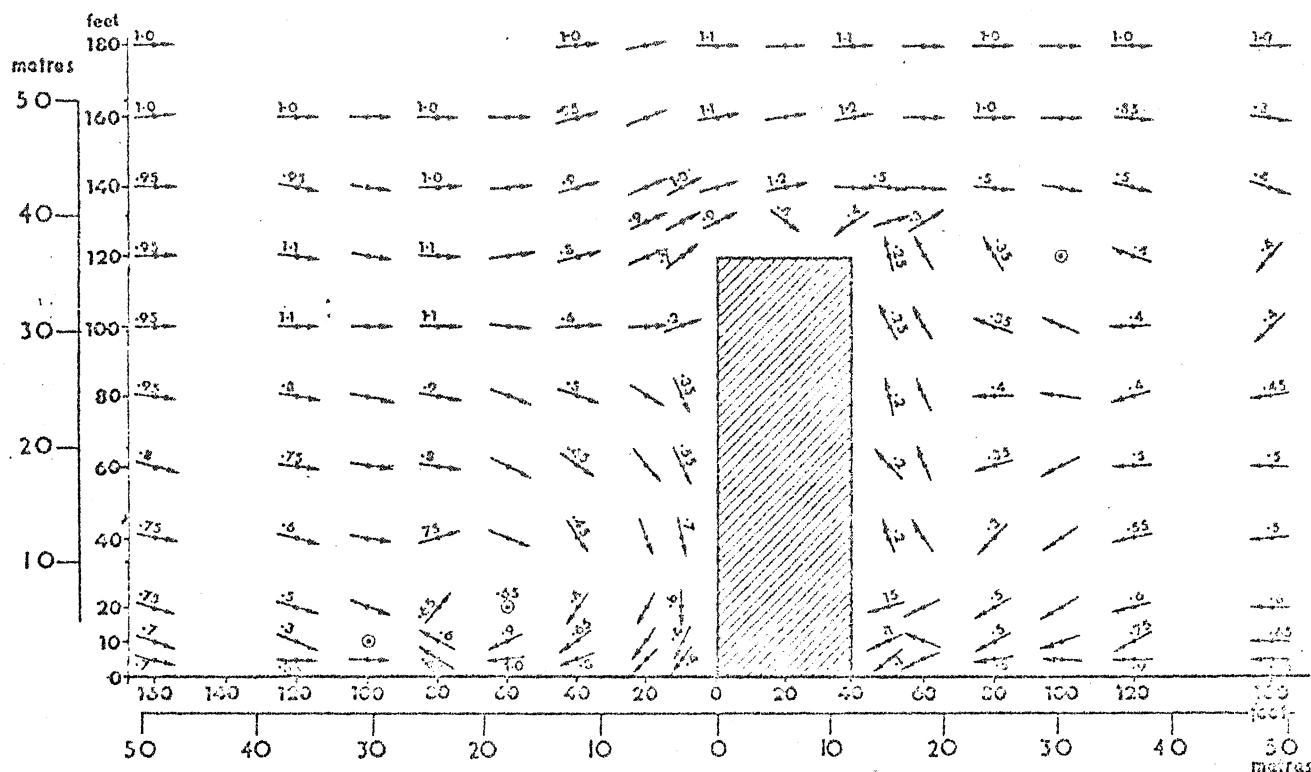


FIG 8.

Vindtrycket mot en yta brukar anges genom

$$p = c \cdot q$$

där

p = vindtrycket (N/m²)

c = formfaktor (-)

q = vindens hastighetstryck; (N/m²)

$$q = \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \quad v = \text{vindhastighet (m/s)}$$

ρ = luftens densitet ($\approx 1,2$) (kg/m³)

I "gamla" enheter är $q \approx \frac{v^2}{16}$ mmvp (kp/m²). Observera att

$$1 \text{ mmvp} = 1 \text{ kp/m}^2 \approx 10 \text{ N/m}^2.$$

Formfaktorn c bestäms oftast experimentellt i vindtunnel. Se exempel i FIG 9-11.

Eftersom större delen av en byggnads ytterytor är utsatta för sug, blir det normalt ett undertryck inomhus. Den invändiga formfaktorn brukar sättas till -0,3.

Tryckskillnaden över en lovartsfasad med $c = 0,7$ vid 15 m/s vindhastighet blir då alltså

$$\Delta p = 0,7 - (-0,3) \cdot \frac{1,2 \cdot 15^2}{2} = 135 \text{ N/m}^2$$

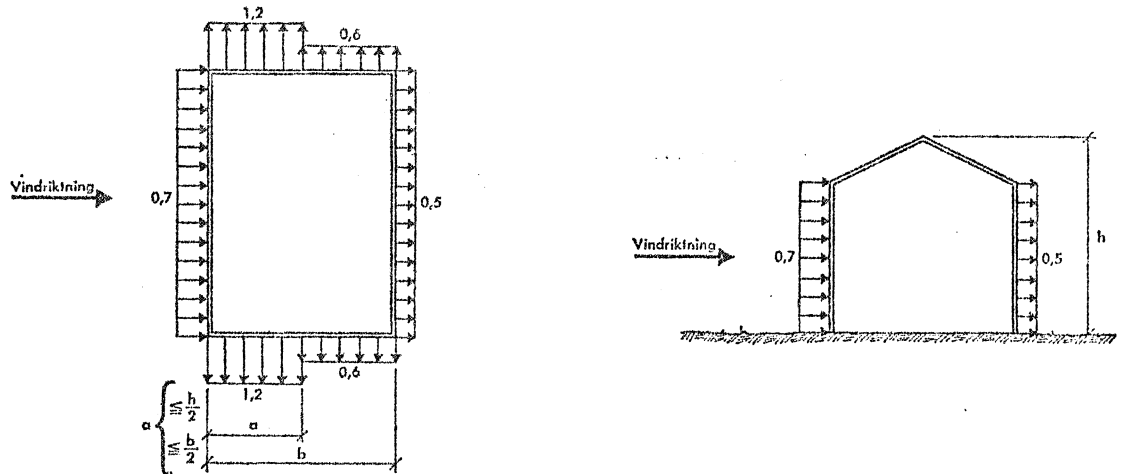
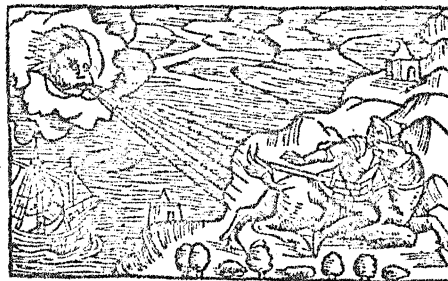


FIG 9. Formfaktor c för yttervägg enligt SBN 67



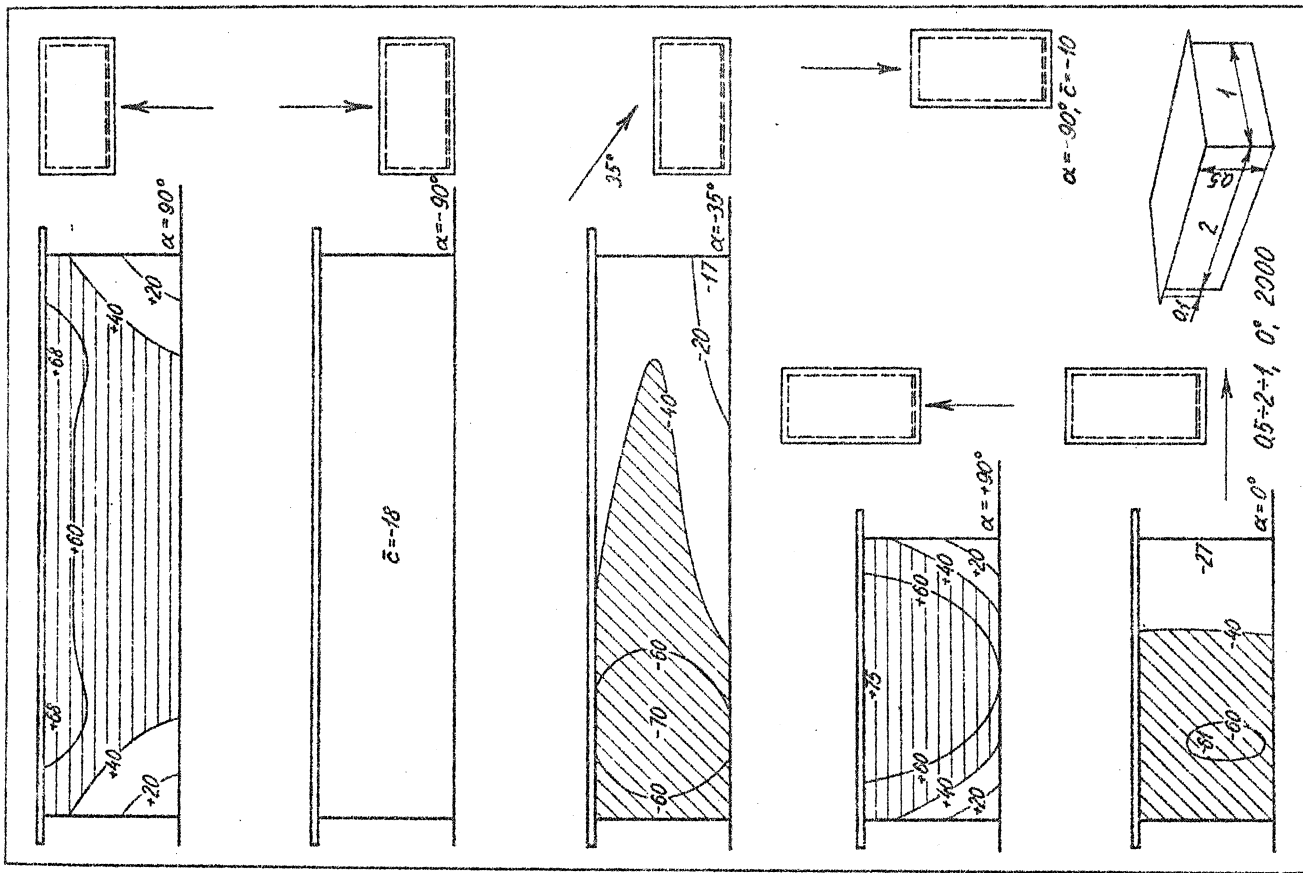


FIG 11, c angiven i %

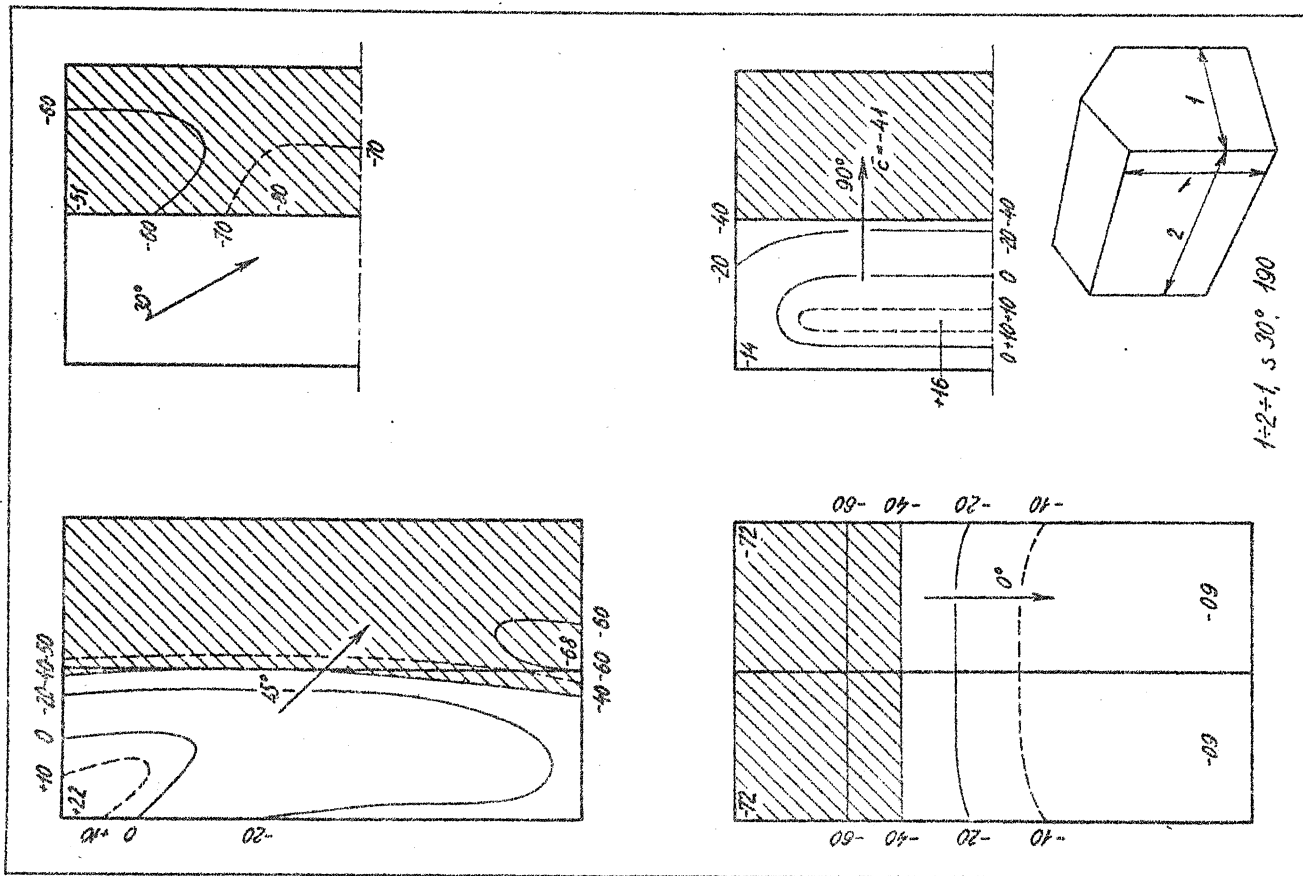


FIG 10, c angiven i %

1.2 Skorstensverkan

Skorstensverkan brukar man kalla den effekt som medför att tryckdifferenser bildas över fasader och tak på grund av att ute- och inneluften har olika densitet. I den övre delen av byggnaden uppkommer ett invändigt övertryck och i den undre delen gäller motsatsen. Om byggnadens otätheter är jämnt fördelade blir på byggnadens halva höjd (neutrala skiktet), trycket utomhus = trycket inomhus.

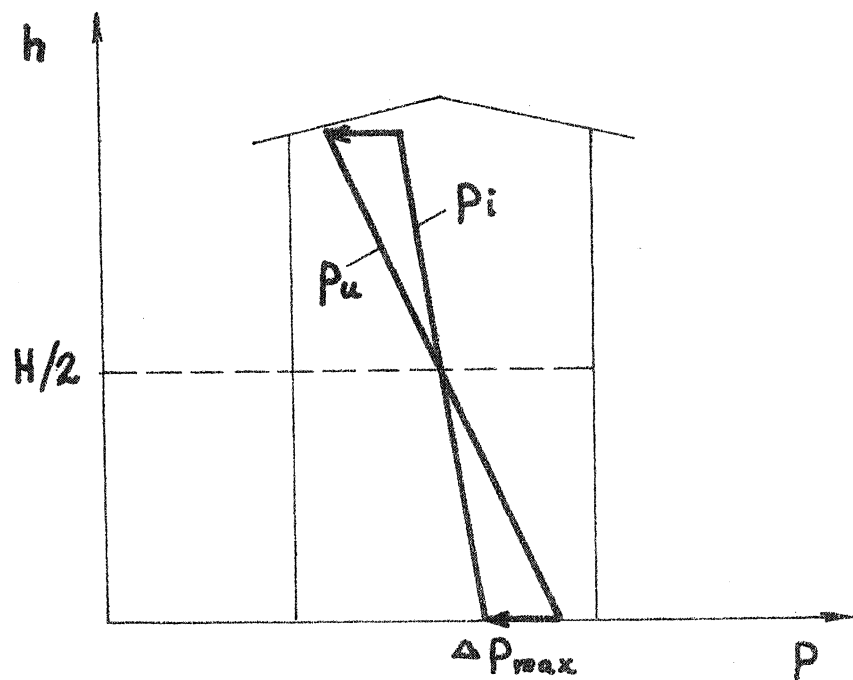


FIG 12.

Om vi vidare förutsätter att luftmotståndet i vertikalled inom byggnaden kan försummas växer tryckskillnaden linjärt till maxvärdet, se FIG 12.

$$\Delta p_{\max} = H/2 \cdot (\rho_u - \rho_i) \cdot g$$

där

$$\begin{aligned} H/2 &= \text{halva hushöjden} && (\text{m}) \\ \rho_u, \rho_i &= \text{ute- resp inneluftens densitet} && (\text{kg/m}^3) \\ g &= 9,81 && (\text{m/s}^2) \end{aligned}$$

Enligt gasernas allmänna tillståndslag är

$$\rho = \frac{pM}{RT} = \frac{10^5 \cdot 28,96}{8314 \cdot T} = \frac{347}{T}$$

$$\rho_u - \rho_i = 347 \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_i} \right) = 347 \frac{T_i - T_u}{T_i \cdot T_u}$$

Om vi sätter $T_i = T_u = 283$ i nämnaren i uttrycket ovan blir

$$\rho_u - \rho_i = 0,433 \cdot 10^{-2} \cdot (t_i - t_u) \quad \text{och alltså}$$

$$\Delta p_{\max} = 4,25 \cdot H/2 (t_i - t_u) 10^{-2} \text{ N/m}^2$$

Om luftmotstånden i vertikalled ej kan försummas eller om otätheterna i ytterväggarna är ojämnt fördelade avviker förhållandena från de i FIG 12 skisserade, jfr FIG 13.

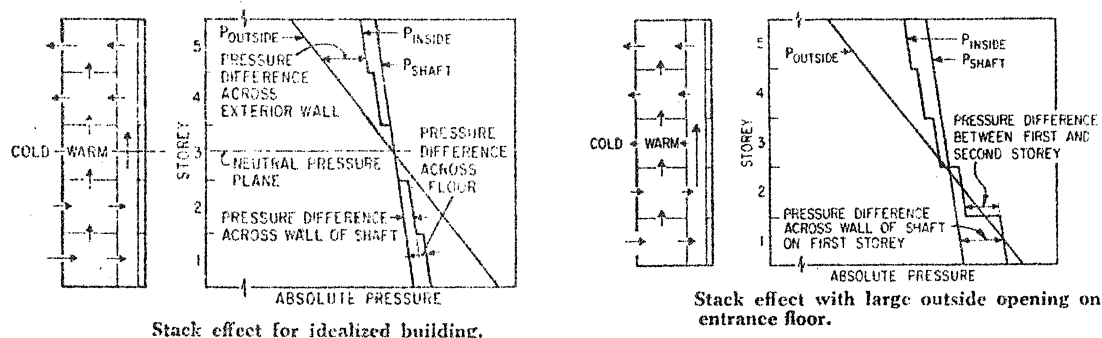


FIG 13.

1.3 Ventilationssystem

Med hjälp av fläktarna i en ventilationsanläggning skapas tryckskillnader såväl mellan rumsluft och uteluft som mellan olika lokaler inom byggnaden.

Undertryck användes i de flesta bostadshus. Utsugning sker genom kanaler anslutna till en gemensam fläkt. Friskluft tillförs genom otätheter i ytterväggarna.

Övertryck används oftast i mera speciella ventilationsanläggningar, t ex för att slippa inströmning av kall luft och därmed obehag av

drag, eller för att undvika att föroreningar sugts in med uteluf-
ten.

De avsedda tryckförhållandena i ett ventilationssystem är mycket känsliga för inverkan av t ex vinden. Varierande tryckförhållanden vid luftintag och luftutsläpp fortplantar sig genom hela ventilationsanläggningen.

Ändrade tryckförhållanden p g a skorstensverkan i höga hus vintertid kan undvikas genom en zonindelning i höjddled av ventilationssystemet och en individuell reglering av trycket i varje zon.



2 GENOMSTRÖMNING

Vid luftströmning genom byggnadsdelar gäller ofta

$$\Delta p = \sum p_i$$

där Δp = den totala tryckskillnaden över konstruktionen och $\sum p_i$ är summan av tryckförlusterna. $\sum p_i$ utgöres av friktionsförluster och in- och utströmningsförluster samt förluster vid areaändring. Ofta kan alla förluster utom friktionsförlusten försummas.

Friktionsförlusten är vid laminär strömning proportionell mot v och vid turbulent strömning mot v^2

$$p_{\text{lam}} = K_1 \cdot v$$

$$p_{\text{turb}} = K_2 \cdot v^2$$

där

v = strömningshastighet

K_1, K_2 = konstanter

Vid små flöden genom porösa material gäller Darcys lag. Om flödet är laminärt och inkompressibelt gäller

$$\frac{G}{A} = v = - \frac{B_0}{\eta} \text{ grad } p$$

dvs (medel-)strömningshastigheten v är proportionell mot tryckgradienten. G anger volymflödet per sekund över tvärsnittsytan A , η är den dynamiska viskositeten och B_0 är materialets specifika permeabilitet (m^2).

För ett material med tjockleken d och med tryckdifferensen Δp gäller alltså

$$B_0 = v \cdot \eta \frac{d}{\Delta p} \quad (\text{m}^2)$$

I byggnadstekniska sammanhang har tidigare använts det s k luftgenomsläpplighetstalet $l = B_0/\eta$, vilket angetts i $\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{mmvp}$

($1 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{mmvp} = 2,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4/\text{N} \cdot \text{s}$). För omräkning kan användas
 $B_0 (\text{m}^2) \approx 5 \cdot 10^{-10} l (\text{m}^2/\text{h mmvp})$.

Ungefärliga värden på specifik permeabilitet för några material.

Material	Densitet kg/m^3	B_0 m^2	l $\text{m}^2/\text{h} \cdot \text{mmvp}$
Tegel	1470	$10 - 100 \cdot 10^{-14}$	$2 - 20 \cdot 10^{-4}$
Lättbetong		$2,5 - 15 \cdot 10^{-14}$	$0,5 - 3 \cdot 10^{-4}$
Kalkbruk		$10 \cdot 10^{-14}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Kalkcementbruk		$0,5 - 7,5 \cdot 10^{-14}$	$0,1 - 1,5 \cdot 10^{-4}$
Cementbruk		$0,5 - 7,5 \cdot 10^{-14}$	$0,1 - 0,5 \cdot 10^{-4}$
Cellplast av polystyren	15-20	$5 - 100 \cdot 10^{-10}$	$1 - 20$
Mineralull, lätta kval.	10-50		
⊥ ytan		$15 - 75 \cdot 10^{-10}$	$3 - 15$
// ytan		$30 - 150 \cdot 10^{-10}$	$6 - 30$
Mineralull, tunga skivor	100-150		
⊥ ytan		$2,5 - 10 \cdot 10^{-10}$	$0,5 - 2$
// ytan		$5 - 20 \cdot 10^{-10}$	$1 - 4$
Kutterspån			
löst utfyllt	100	$115 \cdot 10^{-10}$	23
komprimerat	160	$10 \cdot 10^{-10}$	2
komprimerat	240	$2 \cdot 10^{-10}$	0,4
komprimerat	360	$0,5 - 1 \cdot 10^{-10}$	$0,1 - 0,2$

För materialskikt anges permeabiliteten för hela skiktet $B \text{ m}$
(specifika permeans) (resp $L \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmvp}$).

Material	Tjocklek mm	Vikt	B m	L $\frac{L^3}{m^3}$ $\frac{m^2}{h \cdot mm \cdot v_p}$
Porös träfiberskiva	12,5	260 kg/m ³	$3 \cdot 10^{-10}$	0,6
Porös "	20	280 "	$1,75 \cdot 10^{-10}$	0,35
Hård "	3,5	400 "	$0,015 \cdot 10^{-10}$	0,003
Cellulosapapp		200 g/m ²	$28,5 \cdot 10^{-10}$	5,7
Kraftpapp (uimpr. sulfat)		600 "	$0,5 \cdot 10^{-10}$	0,1
Asfaltimpregn papp		600 "	$0,02 \cdot 10^{-10}$	0,004
Asfaltbelagd under- lagspapp		800 "	$0,0075 \cdot 10^{-10}$	0,0015
Diffusionstät papp (asfaltbelagd)		400 "	$0,005 \cdot 10^{-10}$	0,001
Diffusionstät papp (foliebelagd)			$0,0015 \cdot 10^{-10}$	0,0003

Materialskiktets permeabilitet.

Ovannämnda permeabiliteter för material och materialskikt förutsätter att materialen är homogena och saknar genomgående sprickor och hål.

För en byggnadsdel beror tätheten normalt endast till en del av själva materialets täthet. Sprickor och springor vid fogar och spikhål, skedor och revor i materialet är förhållandevis otäta och släpper igenom mycket luft.

För laminär strömning i smal spalt gäller

$$\Delta p = \frac{12 \cdot \eta \cdot l}{b^2} \cdot v$$

där

η = luftens dynamiska viskositet

l = spaltens längd mätt i luftströmmens riktning

b = spaltvidd

v = lufthastighet

I praktiken följer emellertid luftflödet i smala spalter ofta sambandet

$$G = K \cdot \Delta p^\alpha$$

där K och α är konstanter. Värdet på α brukar ligga omkring 0,7, dvs strömningen blir ett mellanting mellan turbulent och laminär. Sambandet ovan är karakteristiskt för luftspringor vid fönster, fogar tätade med tex drev eller tätlistor, överlappande papp- eller folieskarvar. Se exempel i FIG 14-16.

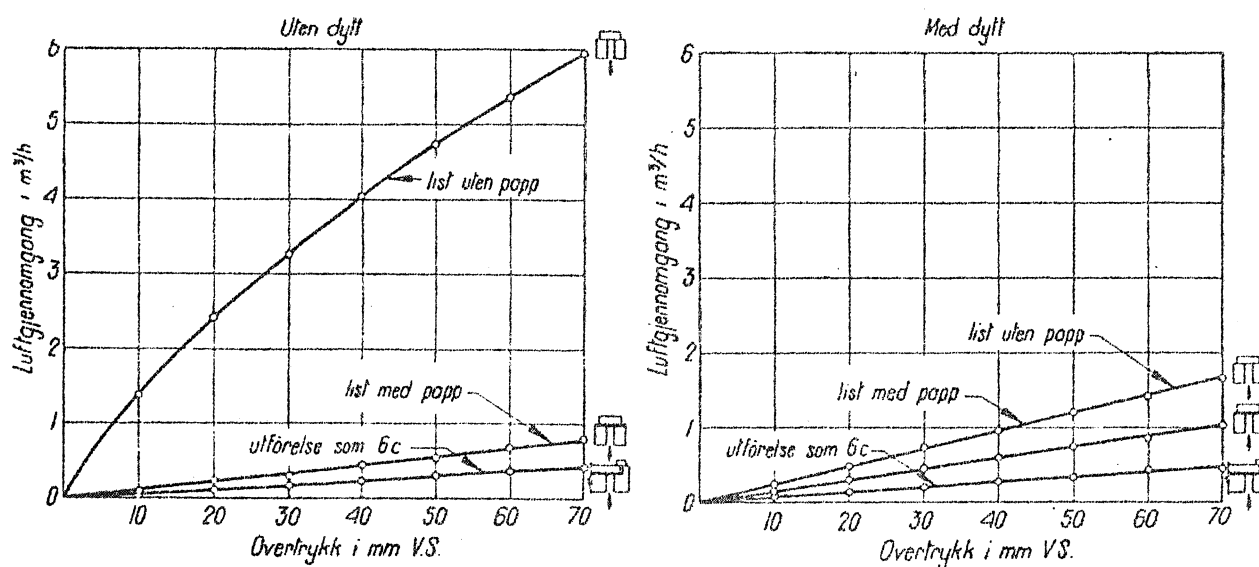


FIG 14. Luftläckning genom 1,0 m fog vid olika övertäckning av fogen och varierande överttryck. Fogbredd 15 mm och fogdjup 100 mm. Till vänster fog utan drev, till höger fog med drev.



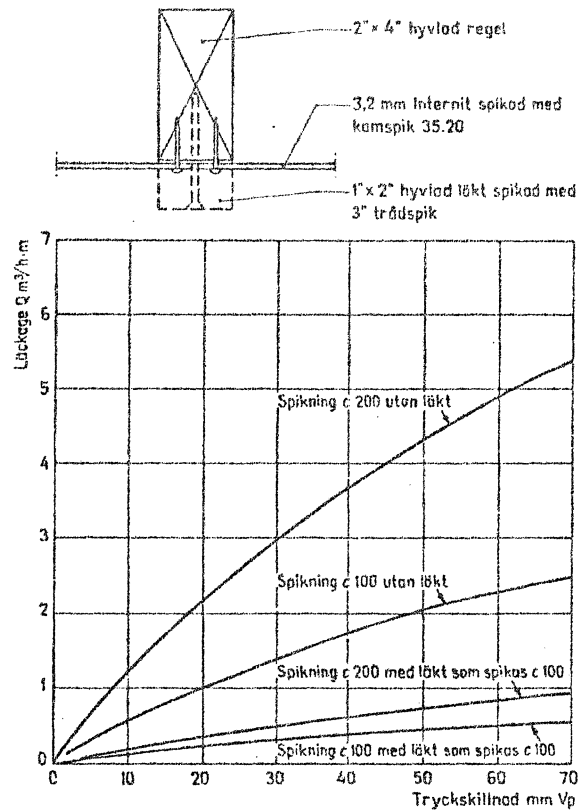


FIG 15. Täthetskurvor för en fog med 20 resp 10 cm spikavstånd, med läkt och utan läkt

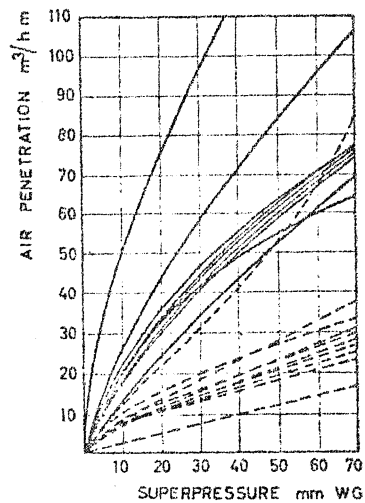


FIG 16. Luftläckage i fönster (60x120 cm) utan tätlistor (helldragna linjer) och fönster med yllelistor (streckade linjer)

Murverks täthet är till största delen beroende av murningens utförande

1/2-stens tegelmur, oputsad

Utförande G/A ($m^3/m^2 \cdot s$ vid 5 mmvp)

dålig murning	3,0
-"- + fogning	1,6
bra murning	0,8
-"- + vidhäftning	
mellan sten och bruk	0,05

I praktiken kan man räkna med $G/A = 1,2 m^3/m^2 \cdot h = 0,33 \cdot 10^{-3} m^3/m^2 \cdot s$

En putsad vägg är avsevärt mycket tätare.

Det finns inga bestämmelser som anger tillåtna luftläckage. Där-
emot har Nordiska kommittén för byggnadsbestämmelser presenterat
ett förslag till bestämmelser för lätta icke bärande ytterväggar,
se FIG 17.

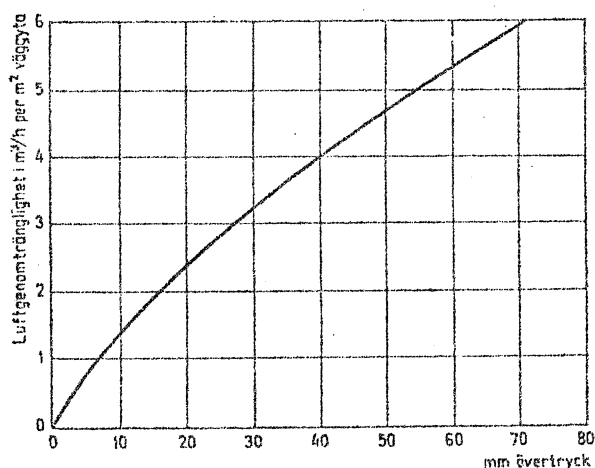


FIG 17. Kravkurva enligt förslag av Nordiska kommittén för byggnadsbestämmelser avseende läckage i den fasta delen av en vägg, innefattande de fogar som förekommer i väggkonstruktionen.

En nackdel vid genomblåsning av ytterväggar är att avsevärda mängder värme går förlorade. Denna värmeförlust kan räknas om till en korrektion av k-värdet för väggen

$$k_{\text{eff}} = k_0 + C_p \cdot \rho \cdot \frac{G}{A}$$

där

k_0 = väggens k-värde

C_p = specifika värmekapaciteten för luft $\approx 10^3 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$

G/A = luftgenomsläpplighet i $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$

ρ = luftens densitet i kg/m^3

Exempel: Tryckskillnad $100 \text{ N}/\text{m}^2 \approx 10 \text{ mmvp}$. Luftgenomsläpplighet enligt NKB:s kravkurva (FIG 17).

$$10 \text{ mmvp ger } 1,4 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h} = \frac{1,4}{3600} \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$$

Korrektionstermen blir

$$C_p \cdot \rho \cdot \frac{G}{A} = \frac{10^3 \cdot 1,2 \cdot 1,4}{3600} = 0,47 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

alltså enkorrektion i samma storleksordning som det ordinarie k-värdet.

Regelväggar förses utvändigt med ett vindskydd som hindrar genomblåsning och motsverkar luftrörelsen i värmeisoleringen (jfr kap 3).

Invändigt anbringas ett tätskikt (ångspärr) vars funktion dels är att hindra fuktdiffusion och dels att vara lufttätande för att hindra fuktkonvektion med utläckande varm luft och kondensskador som följd.

Materialet i tätskiktet kan vara papp, folie, träfiberskiva, plywood, asbestcellulosacement (Internit), spånskiva mm. Gemensamt för alla dessa material är att skarvarna är mycket ömtåliga för luftläckage. Se FIG 15 har t ex tätare spikning eller kämning av fogen med träläkt ger bättre resultat.



3 SKYDD AV VÄRMEISOLERINGSMATERIAL

Värmeisolerande konstruktioner t ex en mineralullisolerad regelvägg förses utvändigt med vindskydd dels för att hindra direkt genomblåsning (jfr kap 2) dels för att motverka luftrörelser i värmeisoleringen och eventuella luftspalter.

I ett poröst eller fibröst isoleringsmaterial t ex mineralull sker värmetransporten genom ledning i t ex fibrer, strålning i materialet och värmetransport i luften i isoleringen.

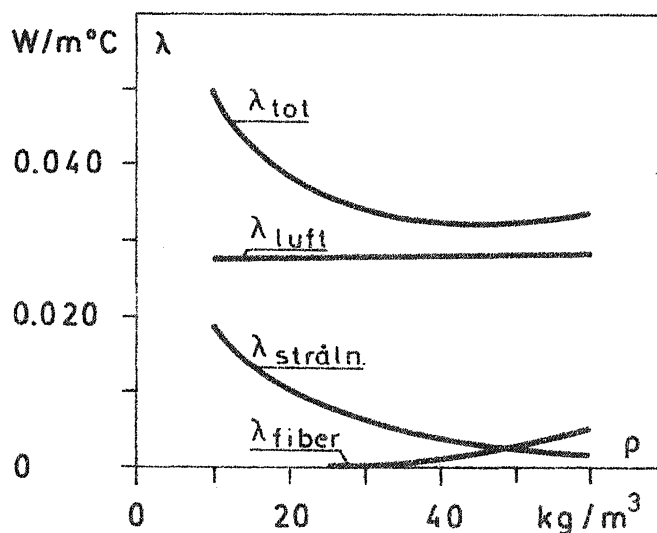


FIG 18. Värmetransportkomponenterna i mineralull.

I de fall luften är i rörelse i materialet, talar man om konvektion. Konvektionen kan uppdelas (jfr kompendium Värme) i naturlig resp påtvingad konvektion.

Den naturliga konvektionen beror på samverkan mellan temperatur- och tyngdkraftsfält och kan förorsaka t ex luftrörelse i en luftspalt och därmed ökade värmeförluster. Detta visas i FIG 19 vid olika orientering av luftspalten i förhållande till tyngdkraftsfältet.

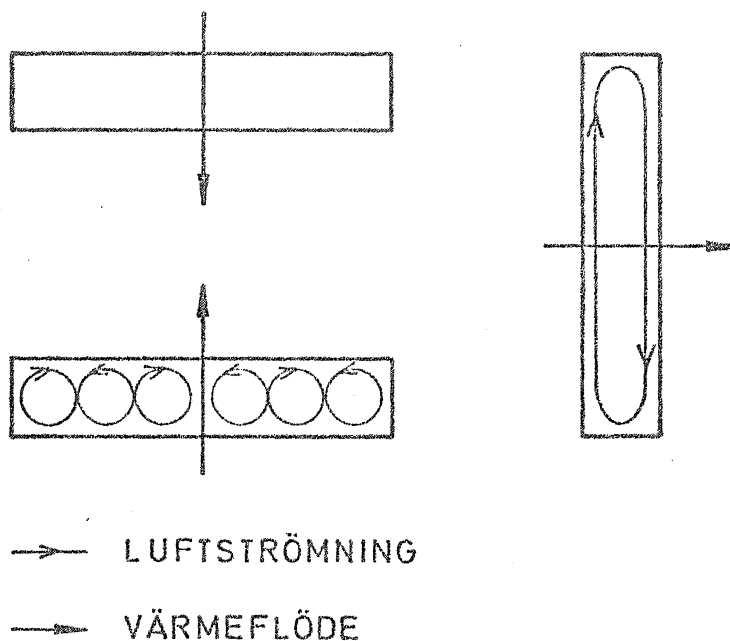


FIG 19. Naturlig konvektion i luftspalt

Om luftspalten isoleras med ett mineralullsmaterial medför detta att strömningsmotståndet ökar. Den naturliga konvektionen i materialet kan vara av betydelse om materialets specifika permeabilitet är tillräckligt stor och temperatur- och dimensionsförhållanden i övrigt är lämpliga. FIG 20 visar att sådana förhållanden endast i undantagsfall inträffar vid vanliga byggnadstekniska dimensions- och temperaturförhållanden.

Förutom naturlig konvektion i själva materialet kan motsvarande luftrörelser ske i springor och spalter kring t ex en isolerings-skiva som inte fyller ut isoleringsfacket eller i springor mellan olika konstruktionsdelar. En bristfälligt utförd isolering kan avsevärt nedsätta en konstruktions värmeisoleringsförmåga, detta är uppenbart om man betänker att ett välisolerat regelfack ofta har mer än tio gånger så stort värmemotstånd som motsvarande luftspalt (t ex ett regelfack där isoleringen bortglömts).

Den påtvingade konvektionen innebär att yttre kraften styr strömningen i en konstruktion eller i ett material. Den vanligaste kraften i detta sammanhang är vinden. Även i detta fall kan luftrörelserna inverka på värmeisoleringsförmågan dels genom strömning i

isoleringsmaterialet dels genom strömning i förekommande springor och spalter i konstruktionen. För att motverka den ogynnsamma inverkan av påtvingad konvektion föreskriver SBN att isoleringsmaterial med $B_0 > 5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$ ($l > 1 \text{ m}^2/\text{h mmvp}$) skall vindskyddas.

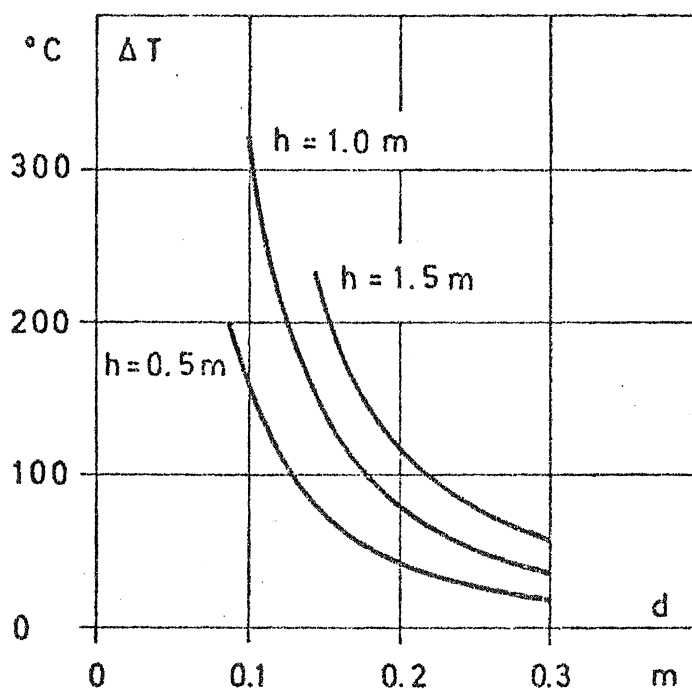
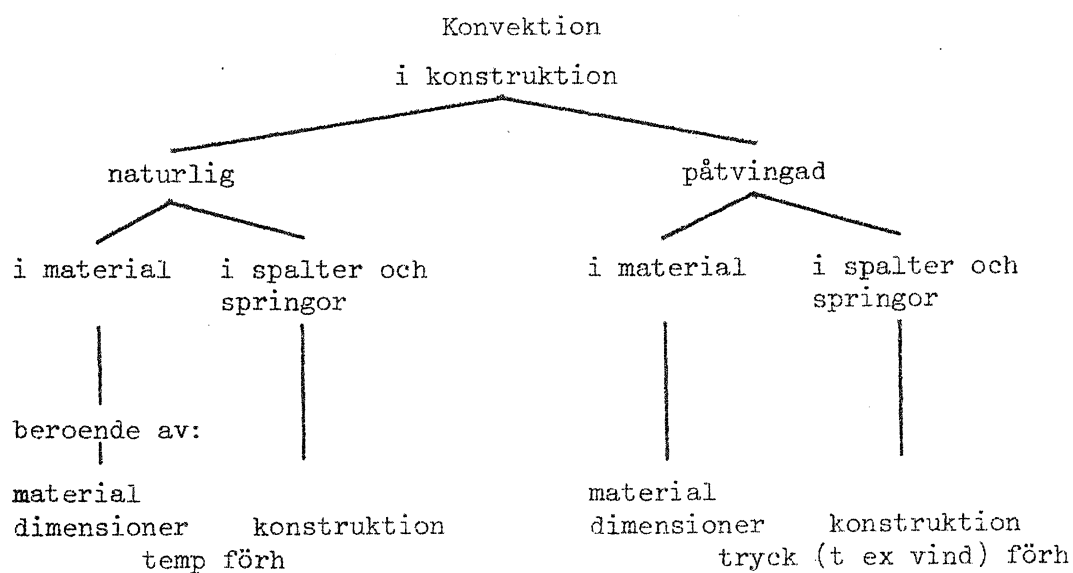


FIG 20. Minska erforderliga temperaturdifferens för inverkan av naturlig konvektion på en vertikal ($\rho \approx 10 \text{ kg/m}^3$) mineralullsisolerings värmetransport. h = höjd och d = tjocklek.

Följande schematiska bild sammanfattar konvektionens inverkan på en värmeisolerande konstruktion.



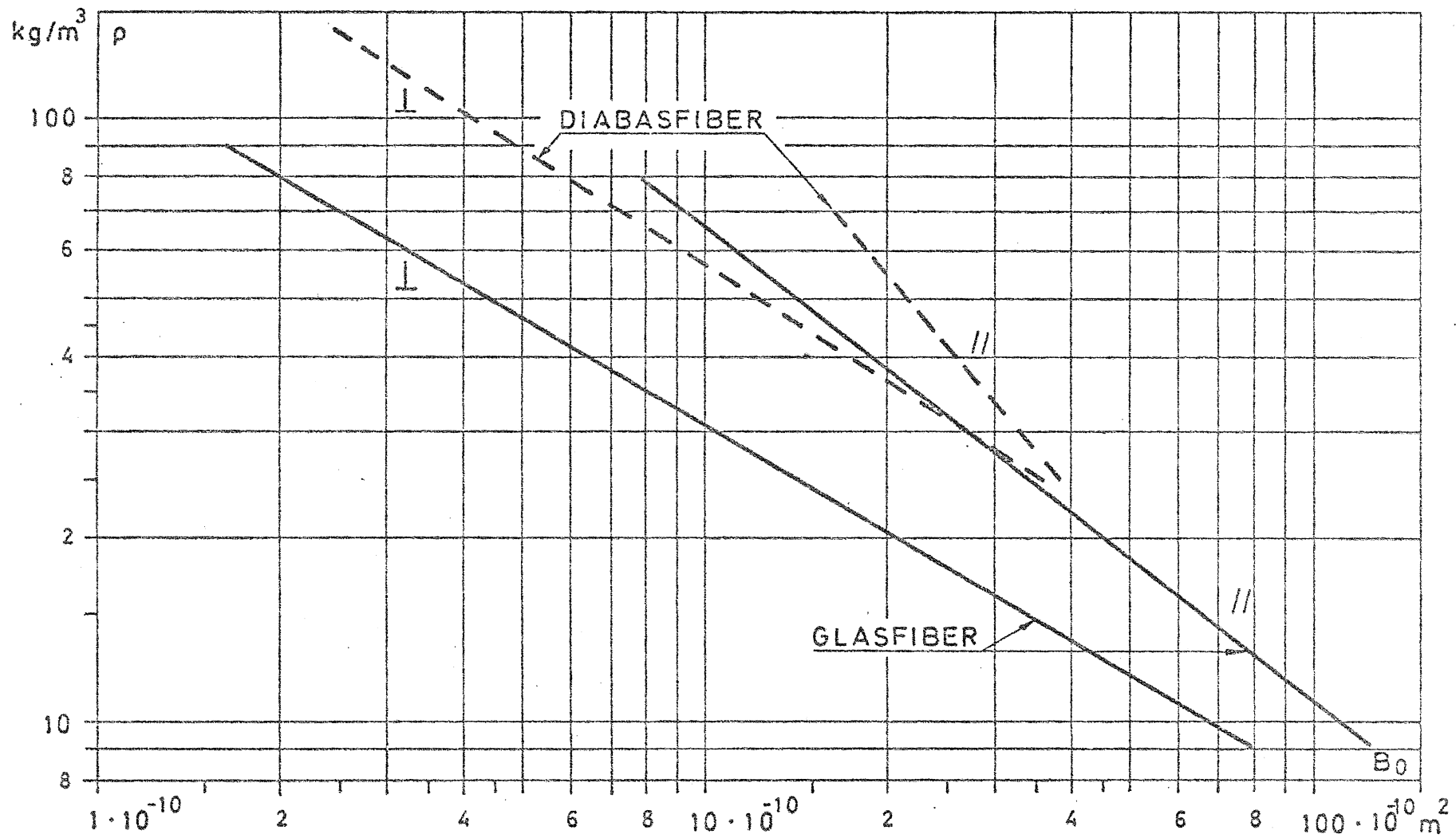


FIG 21. Den specifika permeabiliteten i mineralullsmaterial av olika typ, dels parallellt ($//$) dels vinkelrät (L) mot fiberplanen.