



# LUND UNIVERSITY

## Fukt : byggnadstekniska fuktproblem

Adamson, Bo; Ahlgren, Lennart; Bergström, Sven G.; Nevander, Lars-Erik

1970

[Link to publication](#)

### *Citation for published version (APA):*

Adamson, B., Ahlgren, L., Bergström, S. G., & Nevander, L.-E. (1970). *Fukt : byggnadstekniska fuktproblem*. (Programskrift; Vol. 12). Statens råd för byggnadsforskning. <http://www.byggnadsmaterial.lth.se/kontakt/helena-klein/projektet-arvet-efter-bfr/bfr-skannade-skrifter/>

*Total number of authors:*

4

### **General rights**

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

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

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

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

### **Take down policy**

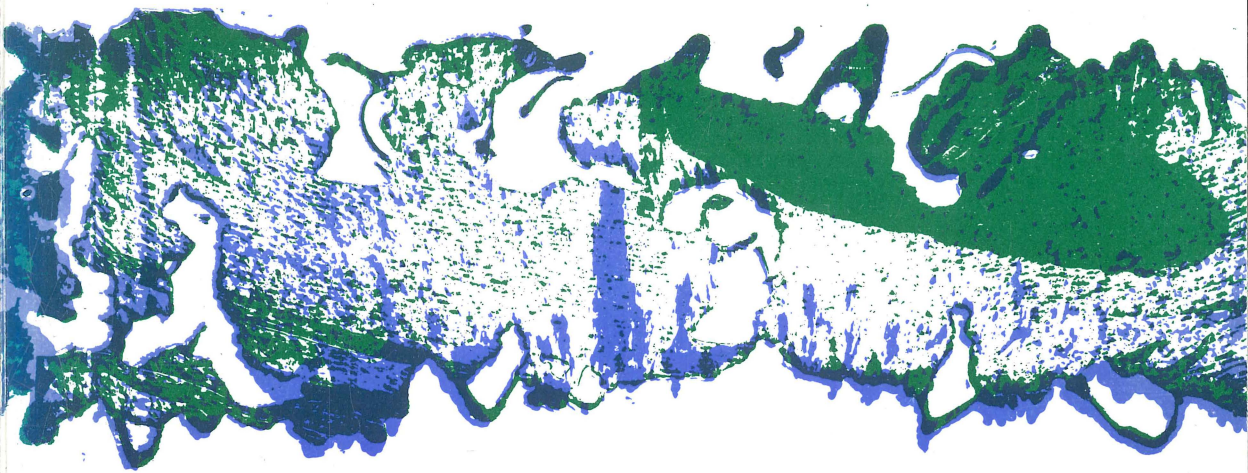
If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117  
221 00 Lund  
+46 46-222 00 00

# fukt

byggnadstekniska fuktproblem



Bo Adamson  
Lennart Ahlgren  
Sven G. Bergström  
Lars Erik Nevander

# FUKT

## Byggnadstekniska fuktproblem

Programskrift 12  
Statens råd för byggnadsforskning

Referat och sammanfattning av denna skrift utges separat  
som Byggforskningens sammanfattningar T9: 1970.  
Synopsis and summary of this publication are published  
separately in National Swedish Building Research. Summa-  
ries T9: 1970

Typografi: Margareta Sjögren

Tryck: K L Beckmans Tryckerier AB, Stockholm 1970 / ALLF 121 2 041

UDK 699.82  
532.685  
697.137

# Innehåll

<b>Förord</b> .....	5
<b>1. Inledning</b> .....	9
<b>2. Fuktkällor</b> .....	13
1. Luftfukt .....	13
2. Byggfukt .....	20
3. Regnfukt .....	21
4. Markfukt .....	25
5. Oföretsedda läckage .....	26
<b>3. Fuktmekanik</b> .....	28
1. Fuktfixering .....	28
1. Bindningsformer	
2. Jämviktsfukthalt	
2. Fukttransport, delförlopp .....	36
1. Ångtransport i luft	
2. Ångtransport i makroporer	
3. Ångtransport i mikroporer	
4. Ångtransport genom konvektion	
5. Vätsketransport genom vind- och tyngdkraft	
6. Vätsketransport genom kapillärsugning	
7. Vätsketransport genom osmos	
3. Fukttransport, totalförlopp .....	49
1. Kombinerad värme- och fukttransport	
2. Kombinerad transport av vätska och ånga	
3. Permeabilitet för vattenånga	
4. Kondensation	
5. Uttorkningsförlopp	
6. Fukttransport i luftspalter	

<b>4. Följdverkningar av fukt</b> .....	71
1. Materials fuktkänslighet .....	71
1. Beständighet	
2. Fuktbetingade rörelser	
3. Egenskapsförändringar	
2. Inomhusklimat .....	82
3. Utseende .....	84
<b>5. Dimensionering</b> .....	86
<b>6. Metoder för mätning av fukt</b> .....	89
1. Absolutbestämningsmetoder .....	89
2. Kemiska metoder .....	90
3. Hygrometriska metoder .....	90
4. Elektriska metoder .....	92
5. Termiska metoder .....	94
6. Kärnfysikaliska metoder .....	95
7. Spektrometriska metoder .....	96
<b>7. Forskning rörande tillämpade fuktproblem</b> ..	98
1. Metoder att lösa tillämpade fuktproblem .....	98
2. Några exempel .....	101
1. Bjälklag i kontakt med jord	
2. Fukt i betonggolv	
3. Kondensation i träväggar och massiva lättbetongtak	
4. Inverkan av slagregn på fuktförhållanden i fasader	
5. Frostbeständighet hos fasadmateriäl	
<b>8. Fuktforskningsprogram</b> .....	114
1. Forskningsbehov .....	114
1. Fuktkällor	
2. Fuktmekanik	
3. Följdverkningar av fukt	
4. Dimensionering	
5. Metoder för mätning av fukt	
6. Forskning rörande tillämpade fuktproblem	
2. Prioritering och forskningskostnader .....	119
<b>Referenser</b> .....	123
Bilaga. Beteckningar och definitioner .....	128

# Förord

Föreliggande programutredning om erforderlig fuktforskning ur byggnadsteknisk synvinkel har utförts i samarbete mellan tre avdelningar vid Tekniska Högskolan i Lund, nämligen byggnadskonstruktionslära (professor B. Adamson), byggnadsmateriallära (professor S. G. Bergström) och byggnadsteknik I (professor L. E. Nevander). Utredningsman och sekreterare har varit civilingenjör L. Ahlgren, avd. för byggnadsmateriallära, LTH. Utredningen har finansierats genom anslag från Statens råd för byggnadsforskning.

Att de ovan angivna tre avdelningarna tog initiativet till en programutredning om behovet av byggnadsteknisk fuktforskning är knappast förvånande. De startade nästan samtidigt vid den nya tekniska högskolan i Lund och skulle samtidigt planera sin forskning och undervisning. För samtliga tre avdelningar, liksom för byggnadstekniken i vidare bemärkelse, är fuktproblemen fundamentala. Man kom inom de tre avdelningarna till ungefär samma uppfattning om läget på detta område, nämligen att vi idag saknar de erforderliga hjälpmedlen för att med tillfredsställande säkerhet kunna förhandsberäkna fuktillståndet för given konstruktionsdel av givet material i given miljö. Det stod således omedelbart klart att ett stort forskningsbehov förelåg, men det befanns också vara nödvändigt att sammanställa behoven på ett systematiskt sätt.

Arbetet påbörjades hösten 1966 och skulle enligt de första optimistiska bedömningarna slutföras inom loppet av ett år. Det har nu gått tre år sedan denna bedömning gjordes, ett förhållande som måhända understryker att problemen är stora och kunnandet ringa i samband med byggnadsteknisk fukt-mekanik.

Författarna vill uttala sitt tack till Statens råd för byggnadsforskning för finansiellt stöd och stort tålamod. Vi vill också tacka docent Börje Löfstedt vid Statens institut för byggnadsforskning för hjälp vid utformningen av avsnittet 4.2 (Inomhusklimat).

Lund den 10 juli 1969

Bo Adamson  
Lennart Ahlgren  
Sven G. Bergström  
Lars Erik Nevander



När Statens råd för byggnadsforskning nu presenterar denna programskrift för byggnadsteknisk fuktforskning har den redan hunnit göra en hel del nytta. Som framgår av författarnas förord har arbetet med programmet gått hand i hand med uppbyggnaden av en omfattande forskning vid Lunds tekniska högskola som behandlar en rad olika fuktproblem. Den totalbild av vad man vet och inte vet som utredarna fått genom programarbetet har hjälpt dem att finna angelägna problem för sin forskning och att passa in den i ett större sammanhang.

Programmet har legat färdigt en tid och i stencilerad upplaga kunnat spridas bland intresserade forskare. Det synes ha väckt berättigad uppmärksamhet, inte minst i våra nordiska grannländer. I början på 1960-talet gjordes försök att med gemensamma insatser starta en nordisk fuktforskning. Den förlades huvudsakligen till Norge men med ekonomiskt stöd från de övriga nordiska länderna. Det är rådets förhoppning att ett nordiskt samarbete kring dessa svåra och viktiga problem nu på nytt skall komma igång. Skriften bör även ha ett betydande värde för undervisningen inom ett ganska försummat område där tillgången på lämplig kurslitteratur är obetydlig.

Programskriften är liksom den fuktforskning som sker vid Lunds tekniska högskola exempel på ett lagarbete som går ut över institutionsgränserna och t.o.m. över sektionsgränsen mellan arkitekt- och väg- och vattenbyggareutbildning. Härigenom blir det möjligt att för insatser på ett relativt begränsat område använda mycket stora resurser med förhoppning att därigenom kunna erhålla betydande resultat. En resuriskoncentration av detta slag överensstämmer med den forskningspolitik rådet i största möjliga utsträckning önskar bedriva.

Rådet vill till författarna av programskriften framföra ett varmt tack för det värdefulla arbete de utfört och önska dem framgång med de forskningsuppgifter de har tagit itu med.

Stockholm i september 1970

STATENS RÅD FÖR BYGGNADSFORSKNING

Per Holm / B. Åke Bengtsson



# 1 Inledning



Fig. 1. Kondensation av fukt i husfasad.

Fukttillståndets betydelse för byggnadsmaterialen och därmed byggnadsdelarnas funktion ifrågasätts inte av någon ansvarsmedveten byggnadstekniker, därtill är bevisen alltför överväldigande.

Fig. 1 – 10 visar en provkarta på skador och utseendemässiga defekter, alla orsakade av fukt. Dessutom finns mindre tydligt synbara effekter, sammanhängande med att många viktiga materialegenskaper förändras med fukttillståndet. I allmänhet försämras funktionsdugligheten med ökad fukthalt i materialen.

Det fukttillstånd som kommer att råda i en byggnad eller byggnadsdel bestäms av den konstruktiva utformningen, miljön och ett flertal materialegenskaper. Målet för den byggnadstekniska fuktforskningen måste vara att lära känna miljön, skapa erforderliga verktyg för att beräkna fukttillstånden i olika byggnadsdelar samt att bestämma nödvändiga materialdata. Med kännedom om materialens fuktkänslighet kan man sedan avgöra om det beräknade fukttillståndet är acceptabelt eller om konstruktionen eller materialvalet måste ändras.

Författarna anser, att vid val av konstruktionstyp och material bör fuktproblemen behandlas som ett hållfasthetstekniskt problem, där huvudmomenten i problemlösningen är:

- belastningar
- brottkriterier
- beräkningsmetoder
- dimensionering.

I analogi härmed kan fuktproblemen betraktas med utgångspunkt från indelningen:

- fuktkällor
- tillåtna fukttillstånd
- fuktmekanik
- dimensionering.

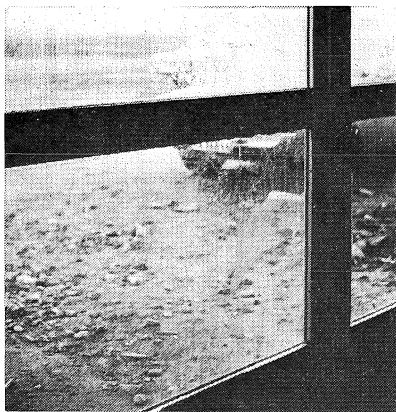


Fig. 2



Fig. 3

Fig. 4



Fig. 2. Kondensation av fukt på fönster.  
Fig. 3. Saltutslag på tegelmur.  
Fig. 4. Otillfredsställande vattenavrinning kring fönster.

Med utgångspunkt från denna indelningsgrund har den första delen av programskriften disponerats. Kap. 2 behandlar fuktkällorna. I kap. 3 har ett försök gjorts att sammanfatta och analysera de nuvarande kunskaperna om fuktfixering och fuktvandring i byggnadstekniska sammanhang. De tillåtna fuktillstånden behandlas i kapitlet »Följdverkningar av fukt». Detta avsnitt redogör för materialens fukt känslighet, fuktens inverkan på inomhusklimatet samt estetiska förändringar på grund av fukt. Efter kapitlet om dimensionering följer ytterligare två kapitel, som anses nödvändiga för en mer utförlig behandling av fuktproblemen, nämligen: »Metoder för mätning av fukt» samt »Forskning rörande tillämpade fuktproblem». I det åttonde och sista kapitlet sammanfattas därefter de forskningsbehov som framkommit i tidigare kapitel. Prioritering och kostnadsberäkning har gjorts för en tidsperiod på 5 år.

Programförfattarna har i största möjliga utsträckning strävat efter att tillämpa SI-enheter. Omräkningstal mellan dessa och andra enheter, beteckningar och definitioner återfinns i en bilaga. För att ange fuktmängden brukar man ofta använda fuktkvoten, som bör anges i kg/kg. Detta har även skett i övervägande utsträckning i denna rapport. Skäl talar dock för att i många sammanhang övergå till att använda storheten fukthalt, som har sorten  $\text{kg/m}^3$ .



Fig. 5

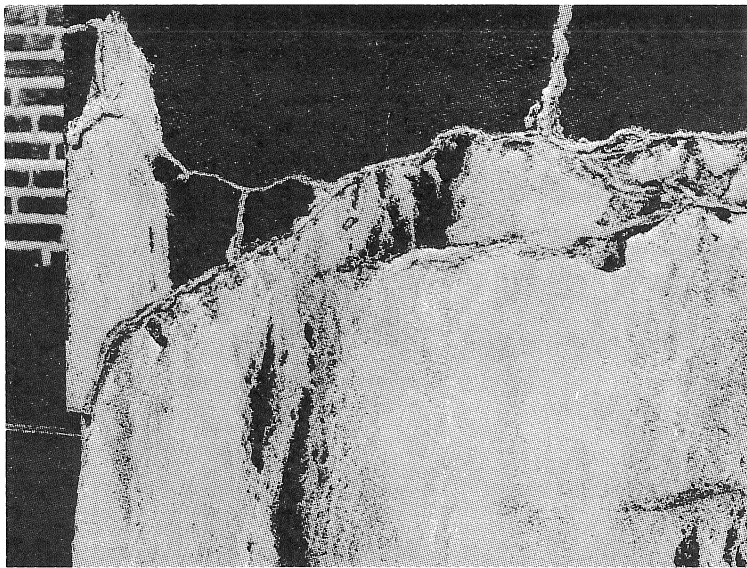


Fig. 7



Fig. 6

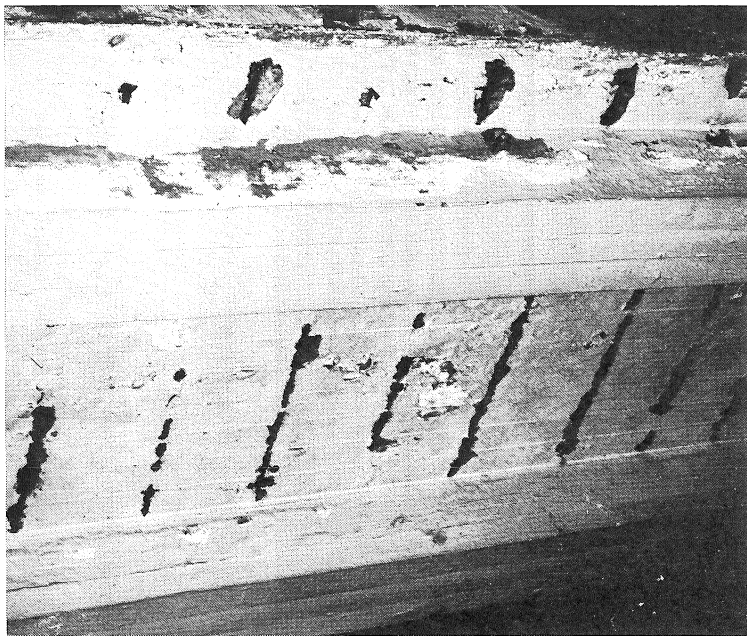


Fig. 8

Fig. 5. Frostskadad tegelmur.

Fig. 6. Svampangrepp på träbjälklag.

Fig. 7. Kalkutlösning ur betong.

Fig. 8. Korrosion på armeringsjärn i betong.

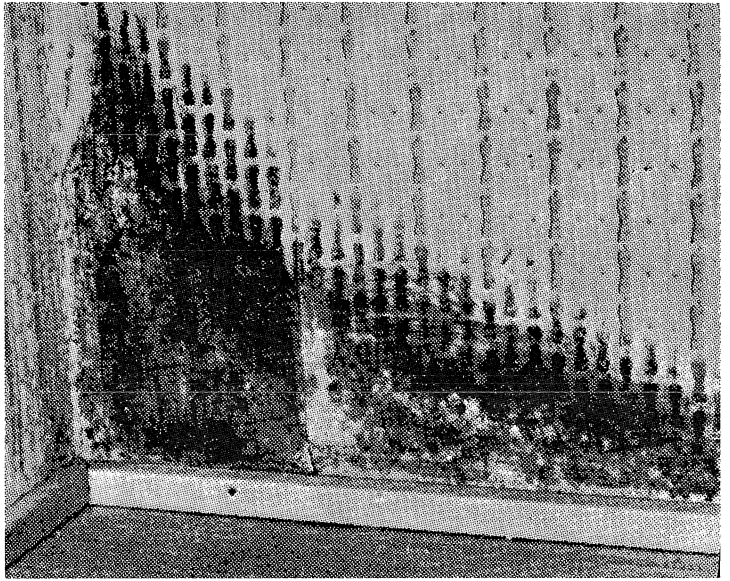


Fig. 9. Kondensation på innervägg med åtföljande rötskada.

Fig. 10. Kondensation i trävägg med åtföljande svamptillväxt.



# 2 Fuktkällor

## 2.1 Luftfukt

Luft är en gasblandning innehållande bl.a. vattenånga. Totaltrycket (barometertrycket) är summan av de olika gasernas partialtryck (Daltons lag)

$$P_{\text{tot}} = \sum p_{\text{part}} \quad (2.1)$$

För var och en av gaserna gäller (enligt gasernas allmänna tillståndslag)

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T \quad (2.2)$$

där

$p$	= gasens partialtryck	N/m <sup>2</sup>
$V$	= totala volymen	m <sup>3</sup>
$m$	= gasens massa	kg
$M$	= gasens molekylvikt	kg/kmol
$R$	= allmänna gaskonstanten	8314 J/kmol · °K
$T$	= absoluta temperaturen	°K

Härur erhålls t.ex. densiteten för torr luft ( $M_a = 28,96$ )

$$\rho_a = \frac{m_a}{V} = \frac{P_a \cdot M_a}{R \cdot T} = \frac{P_a}{T} \cdot \frac{28,96}{8314} = \frac{P_a}{287,1 \cdot T} \text{ kg/m}^3 \quad (2.3)$$

Luftens vattenånghalt som också kan kallas vattenångans densitet blir ( $M_v = 18,02$ )

$$c = \frac{m_v}{V} = \frac{p_v \cdot M_v}{R \cdot T} = \frac{p_v}{T} \cdot \frac{18,02}{8314} = \frac{p_v}{461,4 \cdot T} \text{ kg/m}^3 \quad (2.4)$$

Tab. 1. Vattenångans mätnadstryck och mättad lufts vattenånghalt vid olika temperaturer.

Temperatur °C	Vattenångans mätnadstryck		Vattenånghalt g/m <sup>3</sup>
	torr (mm Hg)	N/m <sup>2</sup>	
-20	0,77	102,6	0,89
-18	0,93	124,0	1,06
-16	1,13	150,6	1,27
-14	1,36	181,3	1,52
-12	1,63	217,3	1,81
-10	1,95	259,9	2,15
-8	2,32	309,3	2,54
-6	2,76	367,9	3,00
-4	3,28	437,2	3,53
-2	3,88	517,2	4,15
0	4,58	610,5	4,86
+1	4,93	657,2	5,18
2	5,29	705,2	5,57
3	5,69	758,5	5,96
4	6,10	813,1	6,37
5	6,54	871,8	6,79
6	7,01	934,4	7,26
7	7,51	1 001,0	7,74
8	8,05	1 073	8,27
9	8,61	1 148	8,83
10	9,21	1 228	9,40
11	9,84	1 312	10,03
12	10,52	1 402	10,67
13	11,23	1 494	11,38
14	11,99	1 598	12,05
15	12,79	1 705	12,83
16	13,63	1 817	13,66
17	14,53	1 937	14,49
18	15,48	2 063	15,36
19	16,48	2 197	16,29
20	17,54	2 338	17,3
21	18,65	2 486	18,3
22	19,83	2 643	19,4
23	21,07	2 809	20,6
24	22,38	2 983	21,8
25	23,76	3 167	23,0
26	25,21	3 360	24,4
27	26,74	3 564	25,8
28	28,35	3 779	27,2
29	30,04	4 004	28,7
30	31,82	4 242	30,4
31	33,70	4 492	32,1
32	35,66	4 753	33,8
33	37,73	5 029	35,7
34	39,90	5 319	37,6
35	42,18	5 623	39,6
36	44,56	5 940	41,7
37	47,07	6 274	43,9
38	49,69	6 624	46,2
39	52,44	6 975	48,6
40	55,32	7 414	51,1

Inom meteorologin och fysiken kallas ånghalten, mätt i kg vattenånga per m<sup>3</sup> fuktig luft, även luftens absoluta fuktighet. Ventilationstekniker anger fuktigheten i vatteninnehåll (ångkvot) –  $x$  kg/kg (kg vattenånga per kg torr luft). Sambandet mellan vatteninnehållet, ångans partialtryck och lufttrycket blir

$$x = \frac{m_v}{m_{\text{tot}} - m_v} = \frac{18,02}{28,96} \cdot \frac{p_v}{P_{\text{tot}} - p_v} = 0,622 \cdot \frac{p_v}{P_{\text{tot}} - p_v} \quad (2.5)$$

Samband mellan vatteninnehåll och ånghalt:

$$x = \frac{m_v}{m_{\text{tot}} - m_v} = \frac{c}{\rho_a} \quad (2.6)$$

Vid en given temperatur kan luft inte innehålla mer än en viss mängd vattenånga. Den maximala kvantiteten kallas mätnadsvärdet. Sålunda talar man om mätnadstrycket  $p_s$  eller ånghaltens och vatteninnehållets mätnadsvärden  $c_s$  resp.  $x_s$ .

Mätnadstryck och mätnadsånghalt är funktioner av enbart temperaturen och varierar enligt Tab. 1.

Mellan temperaturerna  $-10^\circ$  C och  $+25^\circ$  C gäller approximativt att mätnadsvärdet för ånghalten är

$$c_s = \frac{1,32}{T} [1 + 0,02 (T - 273)]^4 \text{ kg/m}^3 \quad (2.7)$$

Relativa fuktigheten,  $\phi$ , är kvoten mellan aktuell ånghalt och ånghaltens mätnadsvärde och brukar anges i %.

$$\phi = \frac{c}{c_s} \cdot 100 \quad (2.8)$$

Eftersom vid konstant temperatur vattenångans partialtryck är proportionellt mot ånghalten gäller även

$$\phi = \frac{c}{c_s} \cdot 100 = \frac{p}{p_s} \cdot 100 \quad (2.9)$$

Mätnadsgraden,  $\psi$ , anger vatteninnehållet i förhållande till mätnadsvärdet.

$$\psi = \frac{x}{x_s} \quad (2.10)$$



Sambandet med  $\phi$  blir

$$\psi = \phi \cdot \frac{\rho_a - c_s}{\rho_a - c} \approx \phi \quad (2.11)$$

Sättes  $\phi = \psi$  blir felet maximalt 0,6 % vid +20° C.

Luftens fuktinnehåll kan således karakteriseras antingen av ånghalten (partialtrycket, vatteninnehållet) eller av relativa fuktigheten och temperaturen.

Fuktigheten hos luften inomhus bestäms av uteluftens temperatur och fuktighet, inneluftens temperatur, fuktillskott inomhus och ventilationens storlek.

Förhållandena under vintertid är oftast intressantast och dessa förhållanden skall diskuteras först.

Kall vinterluft utomhus har ofta hög relativ fuktighet men eftersom mätnadskoncentrationen är låg är även vattenånghalten låg. Genom ventilationen sugas sådan luft in i byggnaderna och uppvärms till inneluftens temperatur om inte förr så vid blandningen med inneluften. Om det inte finns något fuktillskott i lokalen kommer givetvis inneluften och uteluften att ha samma ånghalt, vilket innebär att inneluftens relativa fuktighet blir låg. För att kunna beräkna denna måste man veta uteluftens temperatur och relativa fuktighet. Eftersom mätnadsvärdena är låga spelar inte relativa fuktigheten så stor roll utan man kan normalt räkna med  $\phi = 90$  % vid utetemperatur under 0° C.

Inneluftens relativa fuktighet kan direkt avläsas i Fig. 11 genom att man från uteluftens tillstånd går rakt åt höger tills man når inneluftens temperaturlinje. Några samhörande värden anges i Tab. 2.

Fuktillskott förekommer emellertid i flertalet bostadslokaler på grund av:

- a) Avdunstning från människor och djur.
- b) Disk, tvätt, bad, dusch och annan rengöring där vatten används.
- c) Matlagning inkl. avdunstning från lagrade matvaror och bildning av vatten vid gaseldning.
- d) Fuktavgivning från växter.
- e) Avsiktlig befuktning av luften.

Fig. 11. Samband mellan temperatur, ånghalt och relativ fuktighet.

Vattenånghalt,  $g/m^3$

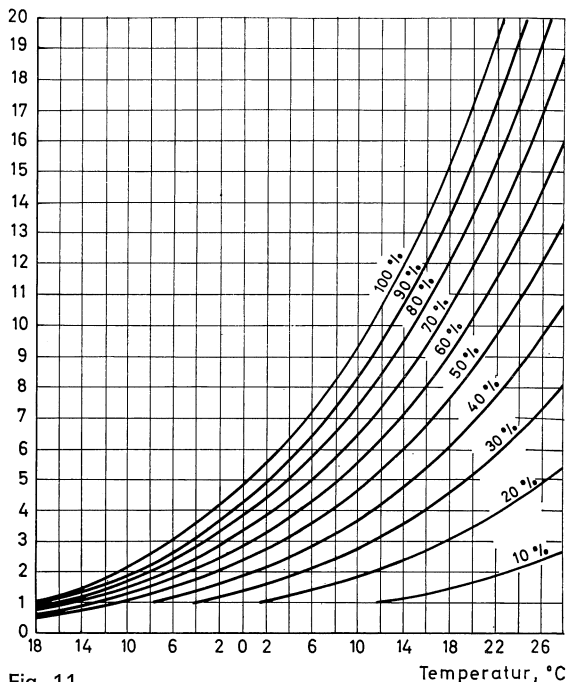


Fig. 11

Fig. 12. Vattenavdunstningen från vuxen person vid olika aktivitetsnivåer (I dans, II normalt kroppsarbete, III kontorsarbete) respektive rumstemperaturer. (Efter Heating and Ventilation Guide, 1958)

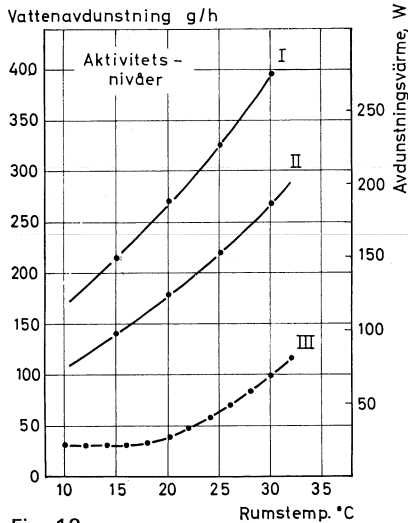


Fig. 12

Avdunstningen från människor är tämligen väl känd och beror av omgivningens temperatur och personens aktivitet, såsom framgår av Fig. 12. För sådan aktivitet som normalt förekommer i bostäder brukar man räkna med 40 g/h per person vid normal rumstemperatur. Värdet kan dock stiga vid kraftigare arbete eller annan aktivitet. Antalet personer i förhållande till rummets volym är naturligtvis av största betydelse.

Fuktavgivning på grund av punkterna b, c och d ovan är mycket litet känd. Den kan sporadiskt vara mycket hög (badrum) och dessa extremvärden kan ibland vara av intresse. Vanligtvis är emellertid medelvärdena under något längre perioder mera intressanta. Denna fuktavgivning är naturligtvis mycket beroende av de boendes levnadsvanor och beteende.

Den avsiktliga befuktningen kan också, i den mån den före-

kommer, variera avsevärt, från obetydlig avdunstning från kärl upphängda på någon radiator till fullständig luftkonditionering. Möjligheterna att befukta luften begränsas av att man inte vill driva upp luftens fuktighet så högt att man får kondens på fönstren.

Om det vid tiden  $t = 0$  påbörjas en fuktproduktion  $G$ , g/h i en lokal kan man beräkna vattenånghalten i rumsluften  $c_t$  vid tiden  $t$  enligt formeln

$$c_t = c_u + \frac{G}{n \cdot V} (1 - e^{-nt}) \quad (2.12)$$

där  $c_u$  = vattenångans koncentration i uteluften, g/m<sup>3</sup>

$n$  = ventilationen uttryckt i antal luftomsättningar per h

$V$  = rummets volym, m<sup>3</sup>

$t$  = tiden, h

Vid 1 luftomsättning per timme ( $n = 1$ ) blir parentesens värde 0,87 efter 2 h, dvs. man har uppnått 87 % av jämviktsläget.

Därtill kommer att rumsytor, möbler och textilier oftast har stor fuktabsorberande förmåga och således verkar fuktutjämnande. Av befuktningsförsök i möblerade rum utförda av Ronge [42] framgår att omkring 50 % av den tillförda fukten togs upp av ytor och föremål i rummet, särskilt av textilier och tapeter. Man får också räkna med att de egentliga byggnadsmaterialen (trä, puts, tegel, gasbetong, betong) i de omslutande konstruktionerna till följd av sin hygroskopicitet även har en fuktutjämnande effekt.

Några samhörande värden mellan å ena sidan utetemperatur och antagen relativ fuktighet utomhus och å andra sidan vattenånghalten och relativ fuktighet inomhus vid olika fukt-tillskott i förhållande till rumsvolym och ventilation  $\left(\frac{G}{n \cdot V}\right)$  anges i Tab. 2.

Det bör observeras att om inget fukt-tillskott förekommer blir koncentrationen densamma ute och inne. I sådana teoretiska fall kan det inte uppstå någon kondensation om det inte finns ytor som har lägre temperatur än uteluften, vilket kan vara fallet vid temperatursvängningar.

Tab. 2. Inneluftens vattenånghalt ( $c$ ) och relativa fuktighet ( $\phi$ ) vid olika utetemperaturer ( $\vartheta$ ) och fuktillskott ( $G$ , g/h). Innetemperatur  $+20^\circ\text{C}$ . Rumsvolym  $V$ ,  $\text{m}^3$ . Ventilation  $n$  luftomsättningar per h.

Utomhus		Inomhus							
		$\frac{G}{n \cdot V} = 0$		$\frac{G}{n \cdot V} = 1$		$\frac{G}{n \cdot V} = 2$		$\frac{G}{n \cdot V} = 4$	
$\vartheta$ ( $^\circ\text{C}$ )	$\phi$ (%)	$c$ (kg/ $\text{m}^3$ )	$\phi$ (%)	$c$ (kg/ $\text{m}^3$ )	$\phi$ (%)	$c$ (kg/ $\text{m}^3$ )	$\phi$ (%)	$c$ (kg/ $\text{m}^3$ )	$\phi$ (%)
+ 5	80	5,1	30	6,1	35	7,1	41	9,1	53
0	85	3,8	22	4,8	28	5,8	34	7,8	45
- 5	90	2,7	15	3,6	21	4,6	27	6,7	38
-10	90	1,8	10	2,8	16	3,7	22	5,7	33
-15	90	1,1	6	2,1	12	3,0	18	5,1	29
-20	90	0,7	4	1,7	10	2,7	15	4,6	27
-25	90	0,4	2	1,4	8	2,4	14	4,4	25

Även om fuktproduktionen i bostäder är ofullständigt känd tycks det vara en avsevärd fördel att relatera relativ fuktighet inomhus till temperaturen utomhus i stället för att gissa sig till en relativ fuktighet utan hänsyn till den utetemperatur som också ingår i flertalet fuktberäkningar.

Mätningar under längre tid av luftens fuktighet inomhus har endast utförts i enstaka fall. Fig. 13 visar resultat från mätningar i ett sovrum enligt Ronge [42]. Den heldragna räta linjen i  $45^\circ$  lutning anger de värden som skulle erhållas, om man inte hade någon fuktproduktion inomhus  $\frac{G}{n \cdot V} = 0$ . De uppmätta värdena ligger över linjen och tyder på en fuktproduktion  $\frac{G}{n \cdot V} = 2-4 \text{ g/m}^3$ .

Som framgår av figuren har rummet en viss buffertverkan mot låga ångtryck utomhus (som inträffar vid låga utetemperaturer), vilket förklaras av att byggnaden och dess inredning då avdunstar hygroskopiskt bundet vatten till rumsluften.

Gemmel [12] har redovisat mätningar i ett kontorshus. Av de senare framgår att faktorn  $\frac{G}{n \cdot V}$  varit ca  $2 \text{ g/m}^3$ . Croiset [10] anger ett medelvärde för bostadslägenhet till  $3 \text{ g/m}^3$ .

Om man vill relatera relativ fuktighet inomhus till utetempera-

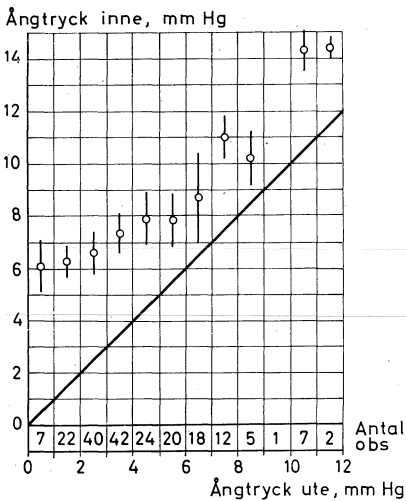


Fig. 13. Relationen mellan vattenångans partialtryck inomhus och utomhus för sovrum i betonghus. 1 mm Hg motsvarar  $133,3 \text{ N/m}^2$ .

Tab. 3. Temperaturvärden för några orter i Sverige.

Ort	Månadsmedeltemperatur för kallaste månad		DUT 1	DUT 5
	Normal 1931–60	Lägsta sedan 1901		
Kiruna	–12,4	–18,9	–30	–26
Piteå	–10,3	–18,4	–34	–27
Umeå	– 8,6	–17,2	–25	–22
Härnösand	– 6,4	–14,7	–22	–20
Östersund	– 8,4	–16,9	–28	–25
Falun	– 7,1	–16,4	–27	–23
Stockholm	– 3,1	–10,6	–18	–17
Karlstad	– 4,3	–13,3	–20	–18
Göteborg	– 1,2	– 9,6	–18	–15
Växjö	– 3,2	–11,5	–23	–19
Lund	– 1,0	– 7,6	–19	–14
Malmö	– 0,5	– 8,4	–18	–13

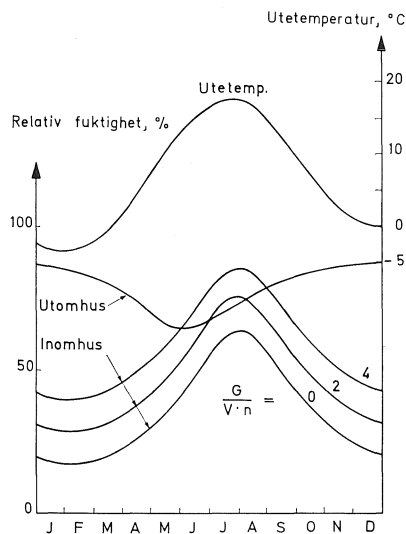


Fig. 14. Månadsmedel av temperatur och relativ fuktighet utomhus och beräknad relativ fuktighet inomhus vid olika fukttillskott,  $\frac{G}{V \cdot n}$  g/m<sup>3</sup>. Värdena avser Stockholm.

turen måste man känna till den temperatur som man skall dimensionera för. I Tab. 3 ges några karakteristiska temperaturer för några olika orter i Sverige.

För »våta industrier» såsom textilindustri, pappers- och cellulosaindustri, tvätterier m.m. samt andra speciella lokaler måste luftens fuktighet utredas särskilt.

Relativa fuktigheten sommartid kan också vara av betydelse i vissa fall. Uteluftens relativa fuktighet är normalt omkring 70 % sommartid. Om varm luft kommer in i ett kallare rum, t.ex. en källare, kommer inneluftens relativa fuktighet att stiga och man kan riskera kondens på kalla ytor samt röta, mögel och svällningsskador.

Man bör dock observera att på sommaren uppnår inneluften sin högsta relativa fuktighet även i normala lokaler. Detta har normalt inte så stor betydelse vid beräkning av fukttransport utan mera vid uppskattning av tänkbara svällningsrörelser. Månadsmedelvärden för normalår för temperatur och relativ fuktighet utomhus samt därav beräknad relativ fuktighet inomhus vid olika fukttillskott framgår av Fig. 14 som avser Stockholm.

#### Forskningsbehov:

*Beräkning av luftfuktighet i rum med hänsyn till fuktproduktion och fuktkapacitet.*

## 2.2 Byggfukt

Byggfukt tillförs materialet vid tillverkning, lagring och leverans samt under byggnadstiden.

Framför allt under byggnadstiden tillförs avsevärda mängder vatten vid betonggjutning, murning och putsning. Många material har dessutom större fukttinnehåll vid leverans än vad som motsvarar det hygroskopiska fukttinnehållet. Om materialen inte skyddas mot nederbörd under lagringen kan fukttinnehållet öka ytterligare. Medan stommen byggs kan regnvatten och smältvatten samlas på bjälklag och vid olämpliga anordningar på byggnadsplatsen få tillfälle att sugas upp av porösa material i t.ex. väggar. Ibland vattnas konstruktioner avsiktligt före vissa arbetsmoment, t.ex. putsning.

Efter en byggnads uttorkning kommer den hygroskopiska fukten att kvarstå. Den vattenmängd som skall avdunsta kallas byggfukt och utgör således skillnaden mellan fukthalten vid färdigställandet och fukthalten vid fuktjämvikt i fortvarighetstillstånd, korrigerad med kemiskt bundet eller vid kemisk reaktion bildat vatten. Vatten binds kemiskt vid t.ex. cementets hårdnande och bildas vid t.ex. kalks karbonatisering. I Tab. 4 ges några riktvärden på dessa fukthalter för olika material.

Tab. 4. Byggfukt i några material och konstruktioner.

Material	Fukthalt (kg/m <sup>3</sup> )			
	vid in- byggnad	bindes kemiskt	hygroskopisk vid 50 % rel. fuktighet	byggfukt att uttorka
Betong (för normala husbyggnader)	180	70	30	80
Lättbetong, ånghärdad	100–200	–	20	80–180
Kalkbruk	300	– 30	10	320
Kalkcementbruk (KC 11)	300	20	30	250
Tegel	10	–	10	0
Tegelmurverk	80	–	10	70
Trä	60	–	40	20

Värdena kan variera avsevärt beroende på t.ex. sandgradering och konsistens hos betong och bruk samt på lagringstid och uttorkningsmöjligheter före leverans eller på byggnadsplatsen för t.ex. lättbetong och trä.

*Forskningsbehov:*

*Inventering av byggfukt.*

### 2.3 Regnfukt

Att regn träffar horisontella delar av en byggnad såsom tak, balkonger, terrasser o.d. och därigenom utgör en fuktkälla är uppenbart för alla. Det är också uppenbart för alla att sådana konstruktioner måste vara täta mot vatten.

Normal- eller extremvärden för årsnederbörden är i sådana fall av ringa intresse. Däremot borde kännedom om regnintensiteten vara önskvärd när man skall beräkna avvattningsanordningar, t.ex. rännदार och stuprör, så att man slipper den nuvarande helt empiriska dimensioneringen.

Av större intresse är sådant regn som träffar vertikala ytor såsom väggar. När det regnar och samtidigt blåser kommer regndroppar att falla snett. Den horisontella komponenten av regnet brukar kallas slagregn. Ibland används beteckningen slagregn endast för särskilt kraftigt snett fallande regn, men det förefaller lämpligare att beteckna allt regn som passerar en tänkt vertikal yta slagregn.

Slagregsmängden beräknas ur

$$S = N \cdot \frac{v}{v_r} \quad (2.13)$$

$S$  = slagregsmängden, kg/m<sup>2</sup>

$N$  = nederbörden mätt på en horisontell yta, kg/m<sup>2</sup>

$v$  = vindhastigheten, m/s

$v_r$  = regndropparnas fallhastighet, m/s

Slagregsmängden är alltså proportionell mot nederbörden och mot förhållandet mellan vindhastighet och fallhastighet hos regndropparna. Fallhastigheten hos de största regndropparna är 7–10 m/s. Om vindhastigheten är lika stor kommer regnet att falla i 45° vinkel, vilket innebär att det faller lika mycket regn på en vertikal yta som på en horisontell.

Slagregnsmängder brukar ofta anges i mm liksom nederbörd. Man får emellertid numeriskt samma värde om de anges i  $\text{kg/m}^2$ , vilket för byggnadstekniska ändamål ofta är att föredraga.

Genom Byggforskningsinstitutets försorg pågår slagregnsmätningar på 14 olika platser i Sverige. Resultatet från perioden 1.7.1963–1.7.1968 framgår av Fig. 15.

Varnbo [52] har gjort en beräkning av slagregnsmängder för olika orter i Sverige baserad på meteorologiska data. Beräkningarna är delvis grundade på norska erfarenheter, se Hoppestad [17]. Fig. 16 visar några resultat av Varnbos utredning.

Resultat från Byggforskningsinstitutets mätningar samt Varnbos utredningar bekräftar den praktiska erfarenheten att särskilt västkusten och Skånes sydkust är kraftigt utsatta för slagregn.

De ovan redovisade resultaten av Varnbo avser årssummor. Extremvärden för månadssummor enligt Byggforskningsinstitutets mätningar ger en i viss mån annorlunda bild (Fig. 15).

För väggar som helt eller delvis absorberar slagregnet kan årssummor och månadssummor vara av stort värde att känna till. För sådana väggar är slagregnet i regel farligast på hösten då avdunstningen är minst.

Det är emellertid också av stort intresse att känna slagregnsintensiteten, dvs. maximal slagregnsmängd per timme eller möjligen per dag. För icke absorberande väggar med plåt, glasbeklädnad, fasadbetong o.d. är sådana värden nödvändiga för att man skall kunna dimensionera fogarna mellan de olika elementen, medan års- och månadssummor inte har någon relevans alls. Intensitetsvärden föreligger emellertid inte i Sverige, men mätningar på en byggnad i Göteborg pågår genom Byggforskningsinstitutets försorg.

De slagregnsvärden som hittills redovisats avser i princip regnets horisontella komponent. När vindströmmen med regnet träffar en byggnad, måste luftströmmen böja av runt och över byggnaden. Regndropparna fortsätter emellertid delvis rakt fram på grund av sin levande kraft, men i synnerhet de mindre dropparna följer lätt luftströmmen. Detta medför att det slagregn som träffar en fasad inte alls behöver vara detsamma som det fria slagregnet. För en lång fasad måste





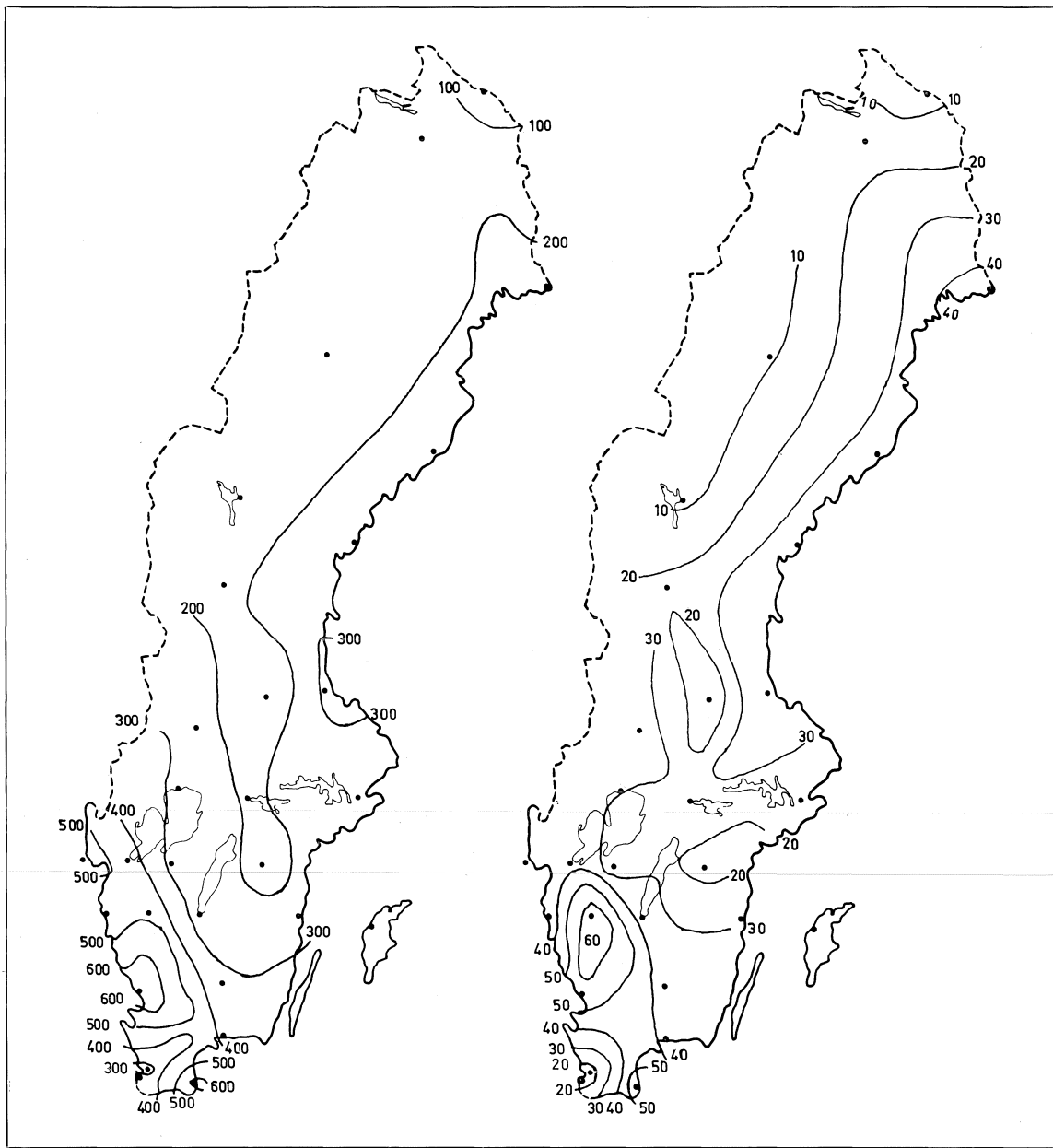


Fig. 16. Summa årlig slagregnmängd i mm i medeltal, utan hänsyn till vilken riktning slagregnet kommer ifrån. T.v. total mängd, t.h. slagregnmängd under frostperiod. Varnbo [52].

vinden böja av uppåt och i sådant fall kan taksprånget vara av stor betydelse för hur mycket slagregn som träffar fasaden. På en gavel kan luftströmmen även böja av åt sidorna. Slagregnet blir därför ofta ojämnt fördelat över fasaderna. Man kan föreställa sig att i synnerhet hörnen på en byggnad blir hårt utsatta, och därmed att fasadutformningen kan påverka slagregnspåfrestningen. Undersökningar föreligger emellertid ännu bara i mycket begränsad omfattning.

*Forskningsbehov:*

*Mängd, intensitet och frekvens hos fritt slagregn i olika delar av landet samt inverkan av lokala förhållanden.*

*Undersökning av relationen mellan fritt slagregn och fasadslagregn hos olika typer av byggnader och olika fasadutformning. Fältundersökning och vindtunnelförsök.*

## 2.4 Markfukt

Den fukt som finns i jordlagren kallas markfukt, trots att benämningen mark i regel är förbehållen markytan. Markfukten härrör från grundvatten och nederbörd. Man tänker sig gärna fuktförhållandena i jordprofilen ovan grundvattenytan likvärdiga med dem i ett rör som är fyllt med jord och som står i ett vattenkar. Härvid skulle porundertrycket (kapillärundertrycket) öka proportionellt mot höjden över vattenytan. Genom nederbörden ändras emellertid denna bild och i verkligheten har man en annan porundertrycksfördelning i den fria marken. Porundertrycket i marken påverkas också av träd och ledningsgravar, genom vilka vatten bortförs från jordlagren.

När en byggnad placeras på marken, slutar tillförseln av nederbörd, vilken bortförs från byggnadsytan genom dräneringsledning och/eller kraftigt fall på markytan. Dessutom tillkommer en värmetransport från byggnaden ned i marken.

Regnvattnet förutsätts som regel bortfört från byggnadens grund. Det är emellertid inte klart redovisat hur detta påverkar markfukten under huset. Även om man lutar marken kraftigt kommer regnvatten att infiltrera marken och kanske spridas under huset. Dräneringsledningar är visserligen inlagda på en

ritning men hur leds vattnet i dem i verkligheten? Kan de frysa och i så fall vad händer med smältvattnet på våren? Slammar dräneringsledningar igen efter hand, är en annan fråga.

Fuktförhållanden och porundertryck i mark är delvis kända genom agrikulturforskningen, men man vet inte alls hur förhållandena ändras, när marken bebyggs och blir uppvärmd. Därför kan man inte fastställa »fuktbelastningen» på de byggnadsdelar, som är i kontakt med marken.

När ett bjälklag är i kontakt med mark inverkar markens fukt-potential på detsamma. Om bjälklagets överyta är fuktspärrad, kan markfukten kapillärt sugas in i konstruktionen. Om man tänker sig isoterma förhållanden dvs. samma temperatur i markytan som i huset skulle man teoretiskt kunna få höga fuktkvoter i bjälklaget, även om man har ett kapillär-brytande skikt mellan bjälklaget och markytan. Vid tempera-turgradient med sjunkande temperatur nedåt förbättras dock förhållandena.

Om bjälklagets överyta är fuktgenomsläpplig, erhålls en fukttransport från marken upp genom bjälklaget. Fuktförhållandena i bjälklaget påverkas då av vattengenomsläpplig-heten hos marken på så sätt att en låg permeabilitet ger mindre fukttransport och därmed lägre fuktkvoter i konstruk-tionen. Därför är kunskaper om olika jordarters, kornmaterials och byggnadsmaterials permeabilitet vid porundertryck nöd-vändiga.

*Forskningsbehov:*

*Bestämning av fukttillståndet som funktion av tiden från byggandet i och kring platta på mark, källare och kryprum.*

*Vart tar ytvattnet vägen?*

*Inverkan av grundvattensänkning på fukttillståndet under grundkonstruktioner.*

## **2.5 Oförutsedda läckage**

De allvarigaste och mest påtagliga fuktskadorna vållas genom läckage på olika ställen i en byggnad. Läckage kan upp-komma i såväl vattenförande ledningar som i vattentätande skikt.

De vanligaste skadorna vållas av läckage från rörledningar i VVS-installationen. Läckaget kan uppkomma genom korrosion i ledningarna, bristfälliga kopplingar eller översvämningar vid otillräckliga avlopp. Omläggningar av hela golv och bjälklag kan bli nödvändiga för att avhjälpa de skador, som härvid uppstår.

Läckage kan uppstå på grund av skador i tätskikten i yttertak, altaner, terrasser, badrumsgolv etc. eller beroende på att tätskikten till följd av otillräcklig vattenavrinning utsatts för större vattentryck än som avsetts.

I stuprör kan läckage uppkomma på grund av korrosion eller på grund av att stupröret slammat igen eller vatten i röret frusit, så att ett vattentryck bildas inuti röret. Vattnet kan därvid spruta mot väggen och frostsador uppstå.

Läckageskador inträffar också vid avtäckningar av avrinningshinder utvändiga byggnadsdetaljer. Det är t.ex. mycket vanligt att man ser fuktfläckar på yttreväggen vid balkongens anslutning eller invid smygen vid fönsterbleck.

Flera av de ovan nämnda läckageorsakerna är svåra att undvika genom val mellan olika material eller konstruktioner. Material och konstruktioner bör emellertid vara sådana att t.ex. läckage på ett värmeledningsrör eller i ett tätskikt inte ger upphov till för stor skada. Jämfört med belastningar från övriga fuktkällor bör i de flesta fall läckagerisken inte vara avgörande vid dimensionering av en konstruktion.

*Forskningsbehov:*

*Inventering av läckageskador.*

# 3 Fuktmekanik

## 3.1 Fuktfixering

### 3.1.1 Bindningsformer

Karakteristiskt för alla de sätt på vilka fukten fixeras vid materialet är bindningsenergens storlek. Ju större bindningsenergin är, desto starkare är fukten fixerad vid materialet.

Det arbete som måste utföras för att separera en mängd fukt från ett material ges av ändringen i fri energi hos vattnet ( $\Delta F$ ). Ändringen hos den fria energin vid kondensation eller avdunstning utgör alltså ett mått på bindningsenergi. Minskningen i fri energi, när en molekyl fritt vatten eller vattenånga med ångtrycket  $p_1$  fixeras under isotermisk reversibel process och erhåller det lägre trycket  $p_2$ , ges av Thomsons ekvation

$$\Delta F = R \cdot T \cdot \ln \frac{p_2}{p_1} = R \cdot T \cdot \ln \frac{p}{p_s} = RT \cdot \ln \phi \quad (3.1.1)$$

där

$\Delta F$  = ändringen av fria energin, J/kmol

$R$  = allmänna gaskonstanten, J/kmol  $\cdot$  °K

$T$  = absoluta temperaturen, °K

$p$  = vattenångans partialtryck, N/m<sup>2</sup>

$p_s$  = vattenångans mättnadstryck, N/m<sup>2</sup>

$\phi$  = relativa fuktigheten, 1

Då temperaturen är konstant åstadkommer alltså kraftfältet från materialets molekyler en sänkning av trycket hos fukten vid fixering.

Fuktfixering sker då den fria energin hos det fria vattnet är större än hos det bundna. Olikheter hos den fria energin mellan olika delar av ett material ger upphov till transport av fukt, så att dessa olikheter utjämnas.

Det vatten som är bundet vid materialet kan indelas i följande grupper :

- 1) Strukturellt vatten
- 2) Adsorberat vatten – bundet med ytkrafter
- 3) Kapillärt vatten
- 4) Fritt vatten

Grupperna 2, 3 och 4 representerar i huvudsak det förångningsbara vattnet, dvs. det vatten som avges vid uttorkning i t.ex. värmeskåp vid 105° C.

Det strukturellt fixerade vattnet är kemiskt bundet vid materialet. Starkast blir bindningen, då vattnet reagerar med materialet, varvid en hydroxid bildas. Fukten kan även vara kemiskt bunden som kristallvatten i molekyllär form. Detta kan vara bundet på flera olika sätt. Det svagast fixerade kan t.o.m. avgå vid upphettning till 105° C.

Vid adsorption binds vatten vid den porösa kroppens inre och yttre ytor i molekyllära skikt. Den adsorberade mängden är alltså proportionell mot kroppens totala specifika yta. Bindningen uppkommer genom attraktionskrafter (van der Waals krafter) på grund av växelverkan mellan materialets ytmolekyler och vattenmolekylerna. Dessa krafter avtar med avståndet, varför det första skiktet binds starkare än nästa osv. De adsorberade molekylerna har starkt ändrade egenskaper jämfört med vanligt fritt vatten. Fryspunkt och elektrisk ledningsförmåga sänks t.ex. i betydande grad.

Då vattenånga adsorberas vid en fast kropp frigörs små värmemängder – större än de som frigörs vid ren kondensation. Detta energiöverskott motsvarar direkt bindingsenergin mellan vattenmolekylerna och materialets molekyler.

Med hänsyn till adsorptionsförmågan hos olika material skiljer man mellan hydrofila och hydrofoba. De förstnämnda har stor adsorptionsförmåga, medan de senare har liten. De flesta material intar en ställning mellan dessa extrema grupper.

Då tillräckligt många molekyllager adsorberas vid en kropp bildas krökta vätskeytor, menisker, i de fina kapillärerna och andra trånga utrymmen (se Fig. 17). Härvid utfylls porerna ytterligare genom s.k. kapillärkondensation. Detta fenomen beror på att vid en menisk skiljer sig vattenångstrycket över ytan från trycket över en plan yta. Ångtrycksreduktionen upp-

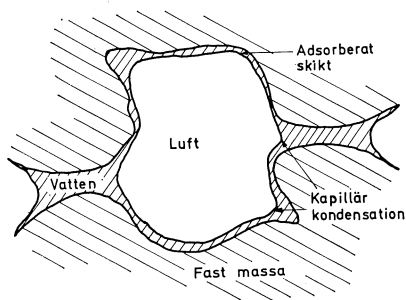


Fig. 17. Molekyllär adsorption och kapillär kondensation.

Tab. 5. Samband mellan kapillärradie och relativ fuktighet vid kapillärkondensation.

Kapillärradie $r$ (nm)	Rel. fuktighet $\phi$ (%)
1 000	99,9
100	99
10	90
5	80
2,1	60
1,2	40

Anm. 1 nm =  $10^{-9}$  m

kommer genom ytkrafter, som strävar att utjämna meniskytan. Denna spänning gör att ångtrycket blir lägre i ytan än normalt vid rådande temperatur. Ju större krökningen är hos menisken, desto större är spänningen i vattnet och således är ångtrycket lägre.

Denna ångtrycksreduktion representerar formellt bindningsenergin hos det kapillära vattnet jämfört med fritt vatten.

Enligt Thomson gäller för ångtrycket över en menisk:

$$p = p_s \cdot \exp - \frac{2 \cdot \sigma \cdot M}{\rho \cdot r \cdot T} \quad (3.1.2)$$

där

$p$  = vattenångans partialtryck, N/m<sup>2</sup>

$p_s$  = mättnadstrycket över en plan yta, N/m<sup>2</sup>

$\sigma$  = ytspänningen, N/m

$M$  = vattnets molekylvikt, kg/kmol

$\rho$  = vattnets densitet, kg/m<sup>3</sup>

$r$  = kapillärradien, m

$R$  = allmänna gaskonstanten, J/kmol · °K

$T$  = absoluta temperaturen, °K

Tab. 5 ger sambandet mellan relativ fuktighet,  $\phi$ , och kapillärradie,  $r$ , vid kondensation i densamma.

Thomsons formel har sin giltighet för kapillärer, med radier som är större än  $0,5 \cdot 10^{-9}$  m. Den undre gränsen är betingad av molekylstorleken, eftersom kapillärradien då är jämförbar med molekylradien på omkring  $10^{-10}$  m. Lykow [28] har visat att porösa material med kapillärer, vilkas radie är större än  $10^{-7}$  m, inte upptar något vatten ur den fuktiga luften utöver det som adsorberas på de inre och yttre ytorna. I praktiken kan man även räkna med en övre gräns för kapillärradien, nämligen  $10^{-7}$  m.

När en öppen kapillär eller liknande placeras i eller på annat sätt kommer i kontakt med fritt vatten, kommer vätskeytan i kapillären att uppvisa en viss krökning. Denna krökning beror på en kombination av kohesionskrafter i vätskan och adhesionskrafter mellan vätskan och kapillärväggen. Resultatet blir en ändring av trycket i vätskan. Vätskor hos vilka randvinkeln  $\theta > 90^\circ$  (se Fig. 18) kallas vätande. Dessa strävar efter att



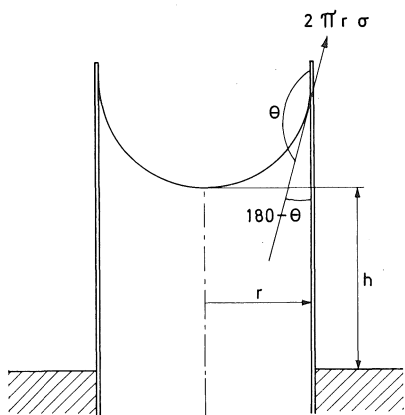


Fig. 18. Uppsigning i kapillär.

$$\pi r^2 \cdot h \cdot \rho \cdot g = -2\pi r \sigma \cos \theta$$

krypa utefter kapillärväggarna.  $\theta$  för vatten kan uppgå till  $180^\circ$ .

I en kapillär med vatten råder en tryckdepression i förhållande till den vätskeyta, från vilken vattnet sugits upp. På grund av kapillärtrycket stiger vattnet till en maximal höjd ( $h$ ), vid vilken kapillärundertrycket eller porundertrycket ( $P_k$ ) är i jämvikt med det hydrostatiska trycket. Enligt Fig. 18 gäller

$$h \cdot \rho \cdot g = -P_k = -\frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{r} \quad (3.1.3)$$

där

$h$  = stighöjd, m

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

$g$  = tyngdaccelerationen,  $\text{m/s}^2$

$P_k$  = kapillärundertrycket,  $\text{N/m}^2$

$\sigma$  = ytspänningen,  $\text{N/m}$

$\theta$  = randvinkeln, grader

$r$  = kapillärradien, m

I materialets större hålrum kan fritt vatten förekomma. Det fria vattnet är bundet till materialet med mycket svaga krafter och avlägsnas lätt. Någon markerad gräns mellan kapillärt bundet och fritt vatten finns inte.

Fukt kan även fixeras vid materialet med osmotiska krafter. Om det i materialet förekommer lösliga delar, kommer en osmotisk bindning till stånd, eftersom vattnet strävar efter att lösa lösliga delar.

*Forskningsbehov:*

*Undersökning av den fuktmekaniska betydelsen av hydrofobering.*

*Studium av giltighetsområdet för Thomsons formel.*

### 3.1.2 Jämviktsfukthalt

Mängden fukt som fixeras i ett poröst material är, som framgår av tidigare avsnitt, beroende av storleken hos de bindningskrafter, som verkar mellan material och vatten. Dessa bindningskrafter kan variera högst väsentligt från material till material. Förmågan att fixera vattenånga från omgivande luft

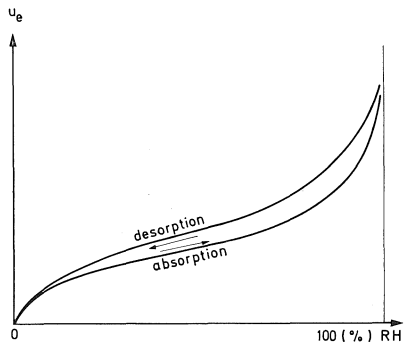


Fig. 19. Hysteresis mellan absorption och desorption.

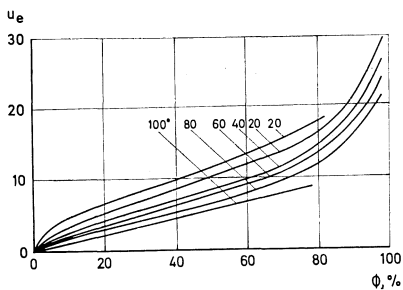


Fig. 20. Jämviktsfuktkurvor för trä vid temperaturer från  $-20$  till  $+100^\circ \text{C}$ , enligt Lykow [28].

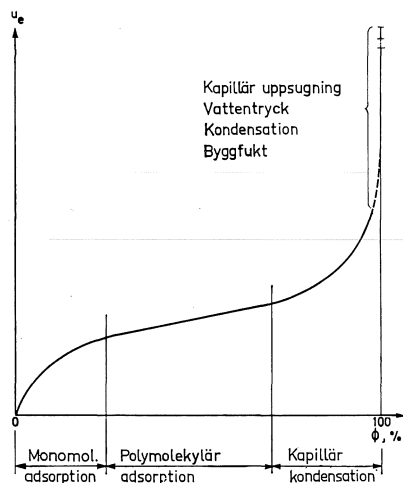


Fig. 21. Bindningen av fukt till ett material.

eller att binda vatten i vätskefas utgör värdefulla mått på storleken av materialets bindningskrafter. Jämviktstillståndet i luft kallas hygroskopisk jämviktsfuktkvot medan jämviktstillståndet i kontakt med vatten med ett visst undertryck kallas kapillär jämviktsfuktkvot. Dessa båda begrepp skall ytterligare behandlas nedan.

En porös kropps jämviktstillstånd med den omgivande luften är av stor praktisk betydelse. Vid ett tillstånd av jämvikt i fuktig luft är kroppens temperatur lika med luftens temperatur, och vattenångans tryck i materialets porer är lika med vattenångans partialtryck i luften. Fuktinnehållet i kroppen kallas härvid för jämviktsfuktkvoten ( $u_e$ ).

Jämviktsfuktkvoten hos en kropp varierar med temperaturen, fuktigheten hos den omgivande luften samt med det sätt på vilket tillståndet uppnåtts. Om kroppen avger fukt vid inställning till jämvikt, är tillståndet uppnått genom desorption eller torkning. Om kroppen absorberar fukt, nås jämviktstillståndet genom absorption eller fuktning.

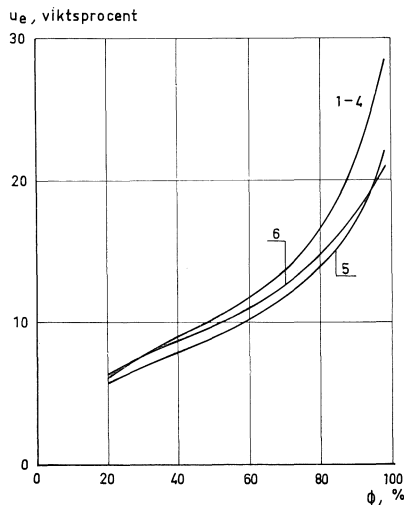
Genom att ändra luftens fuktighet vid konstant temperatur, erhålls ett samband mellan jämviktsfuktkvoten ( $u_e$ ) och relativa fuktigheten ( $\phi$ ). Den kurva, som härvid fås, kallas en hygroskopisk jämviktsfuktkurva eller sorptionsisoterm<sup>1</sup>.

Det bör påpekas att jämvikt med  $\phi = 100\%$  inte existerar. Av praktiska skäl kan man inte uppnå mer än ca 98–99%, som utgör gränsen för det hygroskopiska områdets utsträckning. För flera material (t.ex. träbaserade och cementbundna) har emellertid en tänkt övre punkt vid 100% stor betydelse.

Fenomenet med skillnad mellan absorption och desorption, som framgår av Fig. 19, kallas sorptionshysteresis. Jämviktsfuktkvoten vid absorption ligger alltid under fuktkvoten vid desorption, då relativa fuktigheten är densamma.

Ett försök att förklara hysteresis är, att den observerade jämvikten inte utgör sluttillståndet. En annan teori bygger på att vid sorption tillförs kapillärerna fukt genom adsorption på porväggarna, medan desorptionen delvis sker genom avdunstning från menisker. Man kan även tänka sig, att vissa porer verkar som fällor, där vatten hålls kvar i trånga passager

<sup>1</sup> I fortsättningen kommer uttrycket jämviktsfuktkurva att användas eftersom ordet sorptionsisoterm är något förvillande.



- |          |           |
|----------|-----------|
| 1 Balsa  | 4 Furu    |
| 2 Abachi | 5 Teak    |
| 3 Gran   | 6 Doussie |

Fig. 22. Jämviktsfuktkurvor för några olika träslag vid +20° C efter Tveit [51].

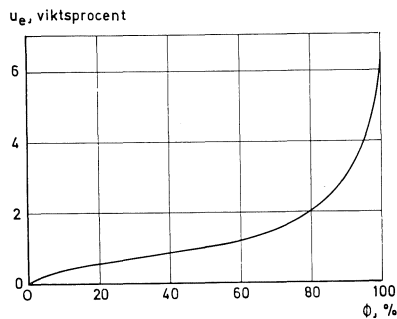


Fig. 23. Absorptionskurva för betong med cementhalten = 300 kg/m<sup>3</sup>, vattencementtalet = 0,60 och hydrataationsgraden = 0,80 enligt Bergström och Ahlgren [3].

vid desorption. En ofullständig vätning vid absorption anses av många vara en bidragande orsak till hysteresis. Vid uppsugning av vatten har kapillärväggarna ett adsorberat luftskikt. På grund härav råder ofullständig vätning ( $\cos \theta > -1$ ). Vid desorption råder i det närmaste fullständig vätning ( $\cos \theta = -1$ ). Enligt Luikow [27] har experiment visat att hysteresisen försvinner vid frånvaro av luft.

Jämviktsfuktkvoten hos porösa material varierar med temperaturen, framförallt hos de organiska (Fig. 20).

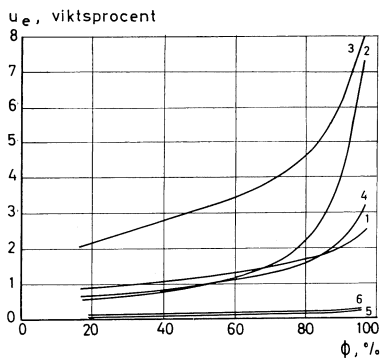
Jämviktsfuktkurvans utseende bestäms i hög grad av materialets uppbyggnad. Den första delen av kurvan karakteriseras av monomolekylär adsorption. Då relativa fuktigheten ökar inträder polymolekylär adsorption. Jämviktsfuktkvoten är alltså starkt beroende av materialets specifika yta. Vid högre relativa fuktigheter inträder kapillärkondensation. Härvid spelar porernas storlek en betydande roll för jämviktsfuktkvoten.

Fig. 21 visar hur fukten fixeras vid olika relativa fuktigheter. För de flesta material kan betydligt högre fuktkvoter erhållas än vad som motsvarar jämvikt vid  $\phi = 100$  %. Denna icke-hygroskopiska del har även lagts in i figuren.

Kännedom om de hygroskopiska jämviktsfuktkurvorna för olika material är en nödvändig förutsättning för fuktmekaniska beräkningar inom byggnadstekniken. Våra kunskaper idag är mycket bristfälliga och inte tillräckligt systematiserade. För olika träslag kan man med någorlunda god approximation ange en och samma kurva, Fig. 22. Kurvan har beräknats med ledning av Tveits [51] försök. För betong har man vissa möjligheter att beräkna jämviktsfuktkurvor, om man känner sammansättning och hydrostatationsgrad. Fig. 23 visar jämviktsfuktkurvan för betong med god kvalitet. Fig. 24 och 25 visar exempel från andra materialgrupper enligt Tveit och en sammanställning av litteraturuppgifter av Nevander.

Oberoende av det sätt på vilket fukten fixeras vid materialet är trycket hos bundet vatten lägre än hos fritt. Den trycksänkning som orsakas av bindningskrafterna kallas ofta materialets suction.

Suction eller porundertrycket kan sättas i samband med en tänkt kapillär sughöjd (se avsnitt 3.1.1). Den potential som driver kapillärtransporten av vätska i ett material har följande utseende (se avsnitt 3.2.6).



1 Mineralull	100 kg/m <sup>3</sup>
2 Glasfiberarmerad polyester	165 kg/m <sup>3</sup>
3 Mineralullsskivor	175 kg/m <sup>3</sup>
4 Mineralullsskivor	400 kg/m <sup>3</sup>
5 Tegel	1 720 kg/m <sup>3</sup>
6 Tegel	1 840 kg/m <sup>3</sup>

Fig. 24. Hygroskopiska jämviktsfukt-kurvor för några byggnadsmaterial efter Tveit [51].

$$w = \frac{P_k}{\rho} + g \cdot h \quad (3.1.4)$$

$w$  = potential, J/kg

$P_k$  = porundertryck, N/m<sup>2</sup>

$\rho$  = vattnets densitet, kg/m<sup>3</sup>

$g$  = tyngdkraftens acceleration, m/s<sup>2</sup>

$h$  = sughöjd, m

I ett jämviktstillstånd då  $w = 0$  gäller att

$$-P_k = g \cdot h \cdot \rho \quad (3.1.5)$$

Enligt Schofield [47] anges denna materialets fuktpotential i  $pF$ -enheter, vilka definieras som 10-logaritmen av materialets tänkta uppsugningshöjd i cm vid en bestämd fuktkvot och temperatur.

$$\text{Alltså är } pF = {}^{10}\log h \quad (3.1.6)$$

Eftersom porundertrycket är ett mått på bindningskrafterna eller bindningsenergin mellan fukt och material kan med hjälp av Thomsons formel (se 3.1.1) samband erhållas mellan porundertryck, ekvivalent sughöjd och relativ fuktighet.

$$P_k = -\rho \cdot g \cdot h = R_v \cdot T \cdot \rho \cdot \ln \phi \quad (3.1.7)$$

$R_v$  = gaskonstanten för vattenånga, J/kg · K

$T$  = absoluta temperaturen, °K

$\phi$  = relativa fuktigheten, 1

Dessa samband illustreras av Tab. 6.

Tab. 6. Samband mellan  $pF$ , ekvivalent sughöjd, porundertryck och relativ fuktighet.

$pF$	$h$ (m)	$P_k = -\rho \cdot g \cdot h$ (N/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (%)
$-\infty$	0	0	100
0	10 <sup>-2</sup>	9,8 · 10 <sup>1</sup>	100
1	10 <sup>-1</sup>	9,8 · 10 <sup>2</sup>	100
2	1	9,8 · 10 <sup>3</sup>	99,99
3	10 <sup>1</sup>	9,8 · 10 <sup>4</sup>	99,92
4	10 <sup>2</sup>	9,8 · 10 <sup>5</sup>	99,27
5	10 <sup>3</sup>	9,8 · 10 <sup>6</sup>	93,00
6	10 <sup>4</sup>	9,8 · 10 <sup>7</sup>	48,43
7	10 <sup>5</sup>	9,8 · 10 <sup>8</sup>	0,07

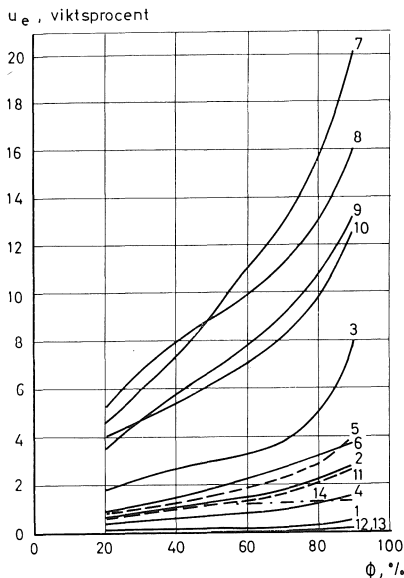
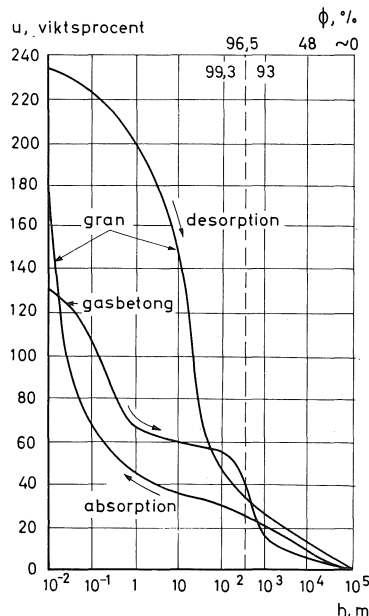


Fig. 25. (t.v.) Hygroskopiska jämviktsfuktkurvor för olika byggnadsmaterial.

- 1 Tegel (1 500)
- 2 Betong (2 100)
- 3 Högtrycksånghärdad gasbetong (1 550)
- 4 Kalkbruk (1 800)
- 5 Kalkcementbruk (1 900)
- 6 Cementbruk (2 000)
- 7 Trä (430)
- 8 Porös träfiberskiva (250)
- 9 Hård träfiberskiva (1 000)
- 10 Trällsskiva (280)
- 11 Kork (100)
- 12 Mineralull (70)
- 13 Cellplast av styrenplast (100)
- 14 Skumplast av karbamidplast (100)

Siffror inom parentes avser densitet i  $\text{kg/m}^3$ .

Fig. 26. (t.h.) Kapillära jämviktsfuktkurvor för gran (enl. Penner [37]) och högtrycksånghärdad gasbetong (enl. Adamson [1]) vid  $+20^\circ\text{C}$ .



Som framgår av tabellen är porundertrycket mycket känsligt för små ändringar av relativa fuktigheten nära mättnad. Vid höga fuktigheter är hygroskopiska jämviktstillstånd svåra att bestämma, men här kan alltså fukttillståndet beskrivas med materialets porundertryck.

Fuktkvotens variation med porundertrycket för ett material kallas kapillära jämviktsfuktkurva. Vid minskad fuktkvot ökar porundertrycket. Dessa värden är även beroende av om jämviktstillståndet uppnåtts genom desorption eller absorption (se Fig. 26). Fuktkvoten för desorptionskurvan är högre än för absorptionskurvan. Transporten av vatten i ett material från ett vått område till ett torrt upphör när porundertrycken är lika, även om deras fukttinnehåll är helt olika, till följd av hysteresis mellan absorption och desorption. Porundertrycken för två olika material i direkt kontakt med varandra kan vara sådana, att fukt transporteras från det torrare till det våtare materialet.

Flera olika metoder finns för att bestämma porundertryck.

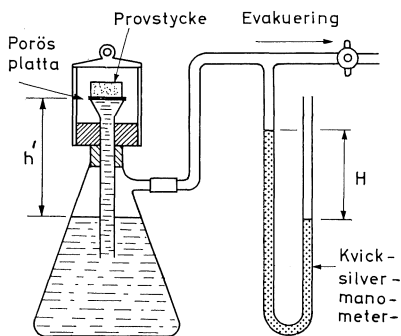


Fig. 27. Apparat för bestämning av porundertryck.

Vid hög fukthalt kan porundertrycket bestämmas med direkta metoder t.ex. i en suctionapparat (Fig. 27).

Provstycket sätts i förbindelse med den uppsugna vattenpelaren via en porös platta med så stor kapillaritet att luft inte sugs igenom. Genom att sänka trycket i flaskan kan rimliga  $h'$ -värden erhållas. Materialets sughöjd kan beräknas med hjälp av  $h = h' + 13,6 \cdot H$ .

Maximalt kan sughöjder på 10 m uppnås, vilket motsvarar vacuum. Högre värden kan uppnås genom att utrymmet kring provstycket sätts under övertryck. Denna s.k. tryckcellsmetod medger sughöjder upp emot  $10^3$  m. Man kan också uppnå så höga värden genom centrifugering. Värden mellan  $10^3$  och  $10^5$  m kan erhållas ur hygroskopiska jämviktsfuktkurvan, dvs. jämviktsfuktkvoten vid olika relativa fuktigheter i omgivande luft.

#### Forskningsbehov:

*Studium av fuktfixering i närheten av 100 % relativ fuktighet.*

*Bestämning och systematisering av hygroskopiska och kapillära jämviktsfuktkurvor för olika byggnadsmaterial.*

*Studium av jämviktsstillstånden hos olika material i kontakt med varandra.*

## 3.2 Fukttransport, delförlopp

Transporten av fukt genom ett material är ofta resultatet av en mängd olika transportmekanismer, som samtidigt är verk-samma. Fukten kan främst transporteras som ånga och vätska, men även förflyttning av is genom ett material är möjlig. Stor betydelse för fuktighetens transport har temperatur- och fukt-fördelning i materialet, omgivningens tryck, temperatur och fuktighet, olikheter i fuktens bindning samt materialets struktur. De olika förekommande transportmekanismerna kommer nedan att behandlas var för sig.

### 3.2.1 Ångtransport i luft

Den slumpartade rörelsen hos vattenmolekylerna i luft strävar att utjämna olikheter i temperatur och koncentration. Om vattenånghalten är olika i olika delar av ett system, så sker en utjämning (Fig. 28).

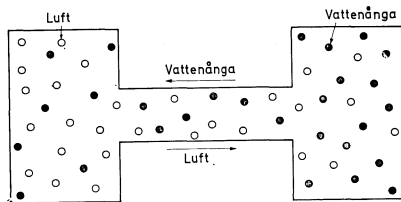


Fig. 28. Diffusion mellan två behållare med koncentrationsskillnader.

Denna process kallas diffusion och beskrivs under isoterma förhållanden av Ficks lag:

$$g = -D \cdot \frac{dc}{dx} \quad (3.2.1)$$

$g$  = fuktflödestätheten, den per tidsenhet och ytenhet diffunderande mängden,  $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$

$D$  = diffusionskonstanten för vattenånga i luft,  $\text{m}^2/\text{s}$

$c$  = vattenånghalten i luft,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$x$  = längdkoordinat i diffusionsriktningen,  $\text{m}$

I Ficks lag kan koncentrationsgradienten bytas mot en partialtrycksgradient med hjälp av allmänna gaslagen, som gäller med god approximation vid de låga tryck som vattenånga normalt har i luft.

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot RT \quad (3.2.2)$$

där

$p$  = vattenångans partialtryck,  $\text{N}/\text{m}^2$

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

$R$  = allmänna gaskonstanten,  $\text{J}/\text{kmol} \cdot ^\circ\text{K}$

$T$  = absoluta temperaturen,  $^\circ\text{K}$

$m$  = vattenångans vikt,  $\text{kg}$

$M$  = vattenångans molekylvikt,  $\text{kg}/\text{kmol}$

När processen är isotermisk, varvid  $c = \frac{m}{V}$ , fås

$$g = - \frac{D}{R_v \cdot T} \cdot \frac{dp}{dx} \quad (3.2.3)$$

$R_v$  = gaskonstanten för vattenånga,  $\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}$

Diffusionskonstanten ( $D$ ) varierar med temperatur och totaltryck, beroende på att vattenångmolekylernas rörlighet härvid ändras. Enligt Schirmer [46] gäller i området  $20-90^\circ \text{C}$  att

$$D = 0,083 \cdot \frac{P_o}{P} \cdot \left( \frac{T}{273} \right)^{1,81}, \text{ m}^2/\text{h} \quad (3.2.4)$$

$P_o$  = referensnivå för atmosfärtrycket ( $P_o = 98100 \text{ N}/\text{m}^2$ )

$P$  = aktuellt tryck,  $\text{N}/\text{m}^2$

Då en temperaturgradient är rådande sker i luften en separeringsprocess, s.k. termodiffusion. De lättare vattenångmolekylerna samlas vid den varmare sidan medan de tyngre kväve- och syremolekylerna vandrar mot den kallare. Termodiffusionen har betydelse endast vid relativt stora temperaturgradienter.

*Forskningsbehov:*

*Diffusion under inverkan av samtidig koncentrations- och temperaturgradient.*

### 3.2.2 Ångtransport i makroporer

De i föregående kapitel behandlade diffusionsteorierna kan även användas vid transport i porösa byggnadsmaterial. Porerna får emellertid inte vara fyllda med fritt vatten utan måste huvudsakligen innehålla luft. Materialets fuktkvot måste befinna sig i det hygroskopiska området. Vidare måste porerna vara sådana att fria medelvåglängden ( $l$ ) för vattenångmolekylerna är mycket mindre än radien ( $r$ ) hos de porer, i vilka diffusionen skall ske (se avsnitt 3.2.3) dvs.  $l/r \ll 1$ .

Vid beräkning av vattenångdiffusion i eller genom ett material används antingen vattenånghalten  $c$  eller vattenångans partialtryck  $p$  som drivande potential. En övergång till att i större utsträckning använda ånghalten bör ske, framför allt vid konvektions- och diffusionsberäkningar samt vid beräkning av kondensation i en konstruktion.

Vid användning av de i avsnitt 3.2.1 redovisade sambanden för beräkning av diffusion i porösa material, blir naturligtvis diffusionskonstanten en annan än i luft. Med vattenånghalten som potential gäller enligt (3.2.1) att

$$g = -k_{vc} \cdot \frac{dc}{dx} = \frac{k_{vc}}{d} \cdot (c_1 - c_2) \quad (3.2.5)$$

$k_{vc}$  = permeabiliteten för vattenånga,  $m^2/s$

$d$  = materialets tjocklek, m

Med partialtrycket som potential används uttrycket (3.2.2). I stället för  $D/R_v T$  införs då permeabiliteten för vattenånga, varvid fås



$$g = -k_{vp} \cdot \frac{dp}{dx} = \frac{k_{vp}}{d} \cdot (p_1 - p_2) \quad (3.2.6)$$

$k_{vp}$  som har sorten  $[\text{kg} \cdot \text{m}/\text{N} \cdot \text{s}]$  eller  $[\text{g}/\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}]$  kallas ibland fuktdiffusionstalet. Vid omräkning från  $k_{vp}$  - värden till  $k_{vc}$  - värden gäller att

$$1,0 \text{ g/m} \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg} = \begin{cases} 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s} & \text{vid } +10^\circ\text{C} \\ 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s} & \text{vid } +20^\circ\text{C} \end{cases} \quad (3.2.7)$$

Permeabiliteten för vattenånga varierar med temperaturen och framför allt fukttinnehållet hos materialet. Permeabiliteten är definierad i det hygroskopiska området och anges ofta i diagramform som funktion av relativa fuktigheten. Fig. 38 illustrerar de olika kurvtyper, som förekommer. Vid höga relativa fuktigheter innehåller många material sådana fukt-mängder, att fukttransporten sker i både ång- och vätskefas. Permeabiliteten för olika material representerar alltså inte enbart vattenångdiffusion. De ovan behandlade teorierna kommer därför att diskuteras ytterligare i kapitel 3.3.3, där även permeabilitetstal återfinns för olika material.

För tunna skikt, såsom papp, folier och liknande låter man vattenångtransporten karakteriseras av permeansen för vattenånga, som bestäms av  $K_{vc} = k_{vc}/d$ ,  $[\text{m}/\text{s}]$  eller  $K_{vp} = k_{vp}/d$ ,  $[\text{kg}/\text{N} \cdot \text{s}$  eller  $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}]$ . Permeanser för några olika material återfinns i kapitel 3.3.3.

Under inverkan av en temperaturgradient sker i makrokapillärerna en makroskopisk rörelse hos vattenångskiktet längs väggen. Liksom i mikrokapillärerna sker denna transport i riktning mot högre temperatur. Denna krypning kallas för termisk glidning. Lykow [28] förklarar fenomenet med att kapillärväggarnas molekyler erhåller en resulterande impuls riktad mot lägre temperatur. Denna impuls erhålls vid kollisioner med molekyler, som kommer från det inre av kapillären. Den resulterande impulsens riktning beror på att molekyler, som kommer från den varmare delen, har större rörelseenergi än de från den kallare. Enligt Newtons tredje lag om verkan och motverkan överförs impulsen till ångskiktet närmast väggen. Detta erhåller således en rörelse mot den högre temperaturen.

### 3.2.3 Ångtransport i mikroporer

De lagar som uppställts i föregående kapitel gäller inte, då radien hos de kapillärer, i vilka transporten sker, är av samma storleksordning som eller mindre än vattenångmolekylernas fria medelvägslängd ( $l$ ). Vid porer med  $r < 0,1 \mu\text{m}$  bestäms inte molekylnas rörelse av sammanstötningar med grannmolekylerna utan av sammanstötningar med porväggarna. På grund av de upprepade kollisionerna med porväggarna kommer vattenångmolekylerna i termisk jämvikt med materialets molekyler. En sådan molekylär rörelse kallas effusion.

Den mängd per tidsenhet och ytenhet som effunderar under inverkan av en tryckgradient och en temperaturgradient ges av

$$g = \frac{8r}{3d} \cdot \sqrt{\frac{M}{2R}} \cdot \left( \frac{p_1}{T_1} - \frac{p_2}{T_2} \right) \quad (3.2.8)$$

$r$  = porradien

Vid samma partialtryck och inverkan av enbart temperaturen sker transporten mot högre temperatur, jämför termodiffusion.

Som framgår av ovanstående formel varierar den genomströmmande gasmängden med molekylvikten.

### 3.2.4 Ångtransport genom konvektion

Under inverkan av en totaltrycksgradient kan luft pressas genom porösa material. Eftersom luften normalt innehåller vattenånga sker därigenom även en fukttransport. Denna typ av fukttransport kan i analogi med värmetransport kallas fuktkonvektion (konvektion = medbringande).

De luftmängder, som strömmar genom ett material, kan beräknas med hjälp av Darcys lag

$$L = -k_a \cdot \frac{dP}{dx} \quad (3.2.9)$$

$L$  = luftmängden,  $\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$

$k_a$  = specifika luftgenomsläppligheten,  $\text{m}^4/\text{N} \cdot \text{s}$

$dP/dx$  = totaltrycksgradienten,  $\text{N}/\text{m}^3$

För att dessa beräkningar skall bli korrekta måste luftgenomsläppligheten avse själva materialet. Avsevärt större luft-

Tab. 7. Ungefärliga värden på specifika luftgenomsläpplighetstal för några material.

Material	Densitet kg/m <sup>3</sup>	Specifika luftgenomsläpplighetstal	
		m <sup>4</sup> /N · s	m <sup>2</sup> /h · mmvp
Tegel	1 470	0,6 – 6 · 10 <sup>-8</sup>	2 – 20 · 10 <sup>-4</sup>
Lättbetong		0,15 – 0,8 · 10 <sup>-8</sup>	0,5 – 3 · 10 <sup>-4</sup>
Kalkbruk		0,6 · 10 <sup>-8</sup>	2 · 10 <sup>-4</sup>
Kalkcementbruk		0,03 – 0,4 · 10 <sup>-8</sup>	0,1 – 1,5 · 10 <sup>-4</sup>
Cementbruk		0,03 – 0,15 · 10 <sup>-8</sup>	0,1 – 0,5 · 10 <sup>-4</sup>
Cellplast av poly- styren	15 – 20	0,3 – 6 · 10 <sup>-4</sup>	1 – 20
Mineralull, lätta kval.	10 – 50		
⊥ ytan		0,8 – 4 · 10 <sup>-4</sup>	3 – 15
// ytan		1,7 – 8 · 10 <sup>-4</sup>	6 – 30
Mineralull, tunga skivor	100 – 150		
⊥ ytan		0,15 – 0,6 · 10 <sup>-4</sup>	0,5 – 2
// ytan		0,3 – 1,1 · 10 <sup>-4</sup>	1 – 4
Kutterspån			
löst utfyllt	100	6,5 · 10 <sup>-4</sup>	23
komprimerat	160	0,6 · 10 <sup>-4</sup>	2
komprimerat	240	0,1 · 10 <sup>-4</sup>	0,4
komprimerat	360	0,03 – 0,06 · 10 <sup>-4</sup>	0,1 – 0,2

mängder kan många gånger strömma genom fogar, springor, sprickor och andra hål. Materialdata saknas även i stor utsträckning. Några ungefärliga värden framgår av Tab. 7.

Totaltrycksskillnaden kan erhållas genom termisk drivkraft (skorstensverkan), inverkan av ventilationsanläggning eller genom vindtryck.

Den strömmande luften innehåller fuktighet. Om luften strömmar från hög vattenånghalt kan stora mängder fukt transporteras. Om luftmassans temperatur samtidigt ändras, kommer också dess maximala ånghalt att ändras, varför kondensation kan ske om luftströmmen går mot lägre temperatur, alternativt luftens fuktupptagande förmåga ökas om luftströmmen går mot högre temperatur. Luftens maximala ånghalt kan lätt avläsas i Tab. 1.

Vid ventilationsanläggningar med enbart frånluft (system F och S enligt SBN 67) har man i regel ett undertryck inomhus. Detta medför vid luftgenomsläpplig konstruktion att kall ute-

luft suges in genom ytterkonstruktionen, varvid luften värms upp och härigenom kan innehålla större mängd fuktighet. Ett sådant förlopp motverkar den normala diffusionen och verkar uttorkande på konstruktionen. Omvänt gäller att övertryck inomhus kan ge risk för kondensation.

Diffusion av fukt är i regel en långsam process och de diffunderande fuktmängderna är ofta små. De genom fuktkonvektion transporterade vattenmängderna kan ofta bli betydligt större, särskilt om det förekommer sprickor, springor eller andra otätheter. Detta illustreras i Tab. 8 hämtad från Nevander [35]. I tabellen har beräknats fukttransporten genom konvektion och diffusion. Förutsättningarna är ett vinterklimat i Mellansverige, befuktad luft till  $\phi = 50\%$  samt invändigt övertryck  $50 \text{ N/m}^2$  ( $= 5 \text{ mm vp}$ ). För att renodla effekten har beräkningarna gjorts för väggar utan ytbehandling.

Av tabellen framgår att den diffunderande fuktmängden inte märkbart påverkas av sprickor och otätheter. För homogen gasbetong dominerar diffusionen fullständigt. För obehandlat murverk av staplad gasbetongstav som är luftgenomsläpplig, blir konvektionen dominerande.

Redan vid en sprickvidd av  $0,2 \text{ mm}$  mellan element blir konvektionen av samma storleksordning som diffusionen. Vid sprickvidden  $1 \text{ mm}$  dominerar konvektionen även vid mycket mindre tryckskillnader än  $50 \text{ N/m}^2$ .

Av räkneexemplet kan man dra följande slutsatser:

För homogena och tämligen lufttäta material utan sprickor är det tillräckligt att endast räkna med diffusion.

För material och konstruktioner med sprickor eller otätheter är det nödvändigt att ta hänsyn till konvektionen. Diffusionen är ofta utan betydelse för fukttransporten, och denna bestäms istället av lufttryckskillnaderna.

Erfarenheter visar att fuktkonvektionen genom luftläckage inifrån och ut måste beaktas särskilt vid befuktad luft. Även byggnader som f.n. inte utrustas med luftbefuktning kan ju tänkas få sådan i framtiden, varför man bör ta hänsyn till möjlig fuktkonvektion vid projektering av alla byggnader. Den erforderliga byggnadstekniska åtgärden är i teorin mycket enkel. Insidan görs lufttät. I praktiken är detta emellertid svårt, särskilt vid elementbyggeri.

Tab. 8. Jämförelse mellan fukttransport p.g.a. diffusion och konvektion.

Konstruktion (ej ytbehandlade väggar)	Transporterad kon- denserbar fukt- mängd, ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ )	
	Diffu- sion	Konvek- tion
1. Homogen gasbetong	$13 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$
2. Murverk av staplad gas- betongstav	$13 \cdot 10^{-8}$	$406 \cdot 10^{-8}$
3. 50 cm breda gasbetong- element med sprickor mellan elementen, sprickvidd:		
0,2 mm	$13 \cdot 10^{-8}$	$11 \cdot 10^{-8}$
1 mm	$13 \cdot 10^{-8}$	$920 \cdot 10^{-8}$

*Forskningsbehov:*

*Bestämning av luftgenomsläpplighetstal för beräkning av ångtransporten genom konvektion i olika material och konstruktioner.*

*Undersökning av strömmande lufts fuktavgivande och fuktupptagande förmåga, samt av dess inverkan på temperaturfältet.*

*Undersökning av effekter vid samtidig konvektion och diffusion.*

### 3.2.5 Vätsketransport genom vind- och tyngdkraft

Förflyttning av vatten kan ske genom inverkan av yttre krafter och tyngdkraften. Vid slagregn på en fasad blir denna utsatt för ett vindtryck, som pressar vattnet in i väggen (kap. 2.3). En grundkonstruktion kan utsättas för ett direkt vattentryck om denna ligger under grundvattenytan men även av dagvatten, som genom tyngdkraftens inverkan kan komma i kontakt med grundmurar och källargolv (kap. 2.4).

De vattenmängder som kan pressas igenom ett material under inverkan av yttre tryck kan approximativt beräknas med hjälp av Darcys lag:

$$g = -\frac{k}{\eta} \cdot \frac{dP}{dx} \quad (3.2.10)$$

$g$  = fuktflödestäthet,  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$

$k$  = permeabilitetskoefficient,  $\text{kg/m}$

$\eta$  = viskositeten hos vatten,  $\text{Ns/m}^2$

$dP/dx$  = tryckgradient,  $\text{N/m}^3$

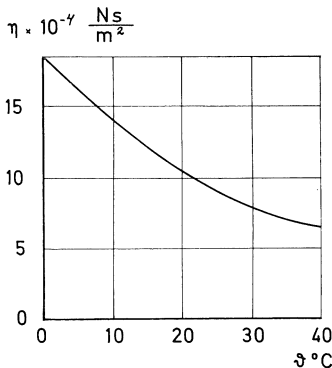


Fig. 29. Viskositet hos vatten som funktion av temperaturen.

Genomströmningshastigheten varierar alltså med viskositeten, som i sin tur är beroende av temperaturen (Fig. 29). Tab. 9 anger några olika  $k$ -värden.

Till de olika krafter som kan verka på vattnet i porösa media kommer alltid inverkan av tyngdkraftfältet. Effekten av gravitationen beror på porstorlekarna i materialet eller med andra ord på hur starka de krafter är, som binder vattnet till materialet. Enligt Luikow [27] kan gravitationen negligeras om porerna är mindre än 0,01 mm. I samband med uttorkning av högtrycksånghärdad gasbetong har en viss effekt av tyngdkraften

Tab. 9. Ungefärliga permeabilitetskoefficienter,  $k$ , för olika material vid +20° C. Enligt Ruettgers, Vidal & Wing [44].

Material	$k$ (kg/m)
Granit, provkropp	0,006– 0,03
Betong & bruk, vct 0,5–0,6	0,003– 0,9
Betong & bruk, vct 0,6–0,7	0,03 – 2
Betong & bruk, vct 0,7–0,8	0,09 – 5
Betong & bruk, vct 0,8–1,0	0,45 – 7,5
Betong & bruk, vct 1,0–1,2	3 – 210
Sandsten, provkropp	20 –1 500
Fasadtegel	300 –3 000
Vattenfylld sand	3 000 000

kunnat märkas (Nielsen [36]). Någon klart påvisbar effekt har inte observerats hos betong. Tyngdkraften har sin största inverkan vid fukttransport i sand och jord. Krischer [23] nämner att man kan bortse från inverkan av tyngdkraften vid uttorkning av en sandbädd om partikelstorleken i medeltal är mindre än 0,2 mm.

*Forskningsbehov:*

*Undersökning av fukttransporten i fogar och sprickor på grund av övertryck.*

*Bestämning av materialkoefficienter vid vätsketransport på grund av övertryck för vattenmättat material och material med varierande fuktillstånd.*

### 3.2.6 Vätsketransport genom kapillärsugning

Vätsketransporten i ett poröst material kan beskrivas med hjälp av en potentialgradient. Den strömmande mängden per tids- och ytenhet blir enligt Darcys lag

$$g = -k_w \text{ grad } w \quad (3.2.11)$$

$k_w$  [m<sup>2</sup>/s] är en proportionalitetskoefficient relaterad till potentialen  $w$  [J/kg].

Potentialen ( $w$ ) består av två delar

$$w = w_{\text{kap}} + w_g \quad (3.2.12)$$

Kapillärpotentialen ( $w_{\text{kap}}$ ), som är oberoende av om det

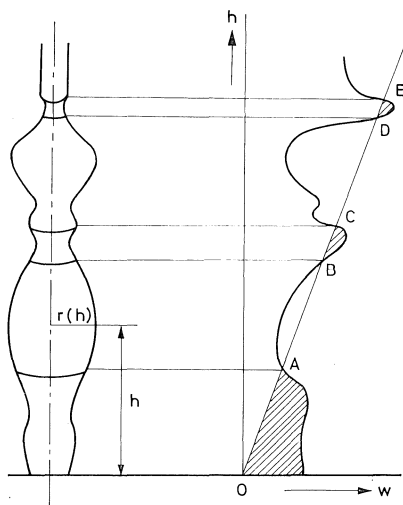


Fig. 30. Potentialen som funktion av sughöjden enligt Minnen och Vos [32].

finns vatten eller inte i porerna, erhålls genom kapillärtryckskillnaderna i det porösa materialet medan tyngdkraftspotentialen ( $w_g$ ) erhålls genom inverkan av gravitationsfältet. Då blir

$$w = \frac{P_k}{\rho} + g \cdot h \quad (3.2.13)$$

$P_k$  = porundertrycket eller kapillärundertrycket, N/m<sup>2</sup>

$\rho$  = vattnets densitet, kg/m<sup>3</sup>

$g$  = tyngdkraftens acceleration, m/s<sup>2</sup>

$h$  = sughöjden, m

I en kapillär med radien  $r$  (se Fig. 18) gäller

$$w_{\text{kap}} = \frac{P_k}{\rho} = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \cdot \theta}{\rho \cdot r} \quad (3.2.14)$$

$\sigma$  = vattnets ytspänning, N/m

$\theta$  = randvinkeln, radianer

Genom att betrakta enkla elementarkapillärer kan en mängd formler härledas som beskriver olika förlopp. Dessa lagar är emellertid föga användbara i samband med byggnadsmaterial. Vad beträffar t.ex. maximal sughöjd, för vilken  $w_g = -w_{\text{kap}}$  vid jämvikt, kan ofta mer än ett värde vara möjligt. Tag som exempel den i och för sig enkla kapillären i Fig. 30, där även de båda potentialerna prickats som funktion av höjden. Punkterna A, C och E representerar verkliga jämviktslägen. Vid B och D kan menisken inte inställa sig. Den övre punkten E gäller som jämviktsläge, då kapillären töms. Vid uppsugning uppnås punkten A. Fenomenet med olika jämviktslägen vid uppsugning och tömning kallas kapillärhysteresis.

För verkliga material finns dock approximativa samband, i vilka ingår materialkonstanter, som kan variera inom vida gränser. Dessa samband grundar sig på uppsugning från en fri vattenyta, där vattenmängden är tillräckligt stor för att medge maximal uppsugning.

Den tid ( $t$ ) vid vilken vattnet sugits upp av en porös kropp till höjden ( $h$ ) ges av

$$t = m \cdot h^2 \quad (3.2.15)$$

där  $m$  kallas motståndstalet. Några ungefärliga värden på olika motståndstal finns i Tab. 10.

Tab. 10. Ungefärliga värden på motståndstalet  $m$ .

Material	$m$ (s/m <sup>2</sup> )
Tegel, genomsnitt	$5 \cdot 10^5$
variationsområde	$2-30 \cdot 10^5$
Högtrycksånghärdad gasbetong ( $\rho = 560$ kg/m <sup>3</sup> )	$110 \cdot 10^5$
Kalkbruk	$7-12 \cdot 10^5$
Kalkcementbruk	$20 \cdot 10^5$
Cementbruk	$25-40 \cdot 10^5$

Tab. 11. Ungefärliga värden på kapillaritetstalet  $C_1$ .

Material	$C_1$ (kg/m <sup>2</sup> · s <sup>1/2</sup> )
Tegel, genomsnitt	0,3
variationsområde	0,06–0,6
Högtrycksånghärdad gasbetong	
( $\rho = 560$ kg/m <sup>3</sup> )	0,08
Kalkbruk	0,25
Cementbruk	0,08

Den uppsugna vattenmängden per ytenhet ( $G$ ) som funktion av tiden beskrivs av

$$G = C_1 \cdot \sqrt{t} \quad (3.2.16)$$

$C_1$  kallas kapillaritetstalet (se Tab. 11).

Genom att derivera detta uttryck med avseende på tiden erhålles uppsugningshastigheten.

$$\frac{dG}{dt} = \frac{C_1}{2\sqrt{t}} \quad (3.2.17)$$

Det måste påpekas att de ovan redovisade sambanden endast gäller kapillär sugning från en fri vattenyta, där vattenmängden alltid är tillräckligt stor för att medge maximal uppsugning. Denna maximala uppsugning kan bli ännu större om den luft som innesluts i materialet ges möjlighet att tränga ut. Med utgångspunkt från (3.2.11) fås

$$g = -k_w \cdot \frac{dw}{dx} = -k_w \cdot \frac{du}{dx} \cdot \frac{dw}{du} \quad (3.2.18)$$

Genom att sätta  $k_w \cdot \frac{dw}{du} = \rho \cdot k_u$  erhålles

$$g = -\rho \cdot k_u \cdot \text{grad } u = -\rho \cdot k_u \cdot \frac{du}{dx} \quad (3.2.19)$$

$k_u$  är en till fuktkvoten relaterad proportionalitetskoefficient, som ibland brukar benämnas fuktledningstalet (m<sup>2</sup>/s). Detta samband för beräkning av väsketransporten har ingående behandlats av Krischer [23] och Vos [56].

Den drivande kraften utgörs av fuktkvotsskillnader mellan olika delar av materialet. Enligt ekvationen skall vattnet i vätskefas »diffundera» (se avsnitt 3.2.1) så, att hela materialet har samma fuktkvot efter någon tid. Detta sker emellertid inte i verkligheten. En droppe vatten på t.ex. en tegelsten breder först ut sig snabbt till en viss gräns, men sprider sig sedan inte mer.

Trots att tydliga fuktkvotsskillnader kan föreligga sker inte någon väsketransport. Under ett visst fukttinnehåll, den kritiska fuktkvoten ( $u_k$ ), minskar transporten i vätskeform.



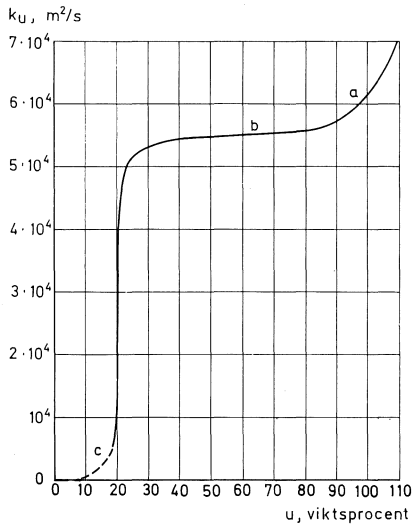


Fig. 31. Fuktledningstalet  $k_u$  som funktion av fuktkvoten för gasbetong ( $\rho = 650 \text{ kg/m}^3$ ) enligt Krischer [23].

Fuktledningstalet varierar alltså med fuktkvoten. Fig. 31 visar enligt Krischer  $k_u$ -värdet som funktion av fuktkvoten för gasbetong ( $\rho = 650 \text{ kg/m}^3$ ). Denna kurva är emellertid typisk för de flesta porösa material. Man ser att vid ungefär 25 viktprocent faller  $k_u$ -värdet snabbt. Detta är tydligen den kritiska fuktkvoten för materialet i fråga.

Man ser att det i det närmaste helt gäller att

$$\begin{cases} u < u_k \\ k_u = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} u > u_k \\ k_u = \text{konstant} \end{cases}$$

När materialet är helt mättat med vatten ökar  $k_u$ -värdet åter.

Den kritiska fuktkvoten förklarar Vos [56] med följande modeller:

Betrakta ett poröst material uppbyggt av sfärer. Mellan dessa bildas ett nätverk av porer. I begynnelsestadiet är materialet mättat med vatten, som efter hand transporteras bort. Detta illustreras av att  $k_u$ -värdet förflyttas från område a till område b i Fig. 31. Först töms de större porerna varvid tillståndet i Fig. 32 a kommer att råda. Så småningom uppnås tillståndet i Fig. 32 b, då vattnet inte längre bildar något sammanhängande system, som gör vätsketransport möjlig.  $k_u$  antar värden i område c. Gränstillståndet då vattnet inte bildar något sammanhängande system definierar den kritiska fukt-

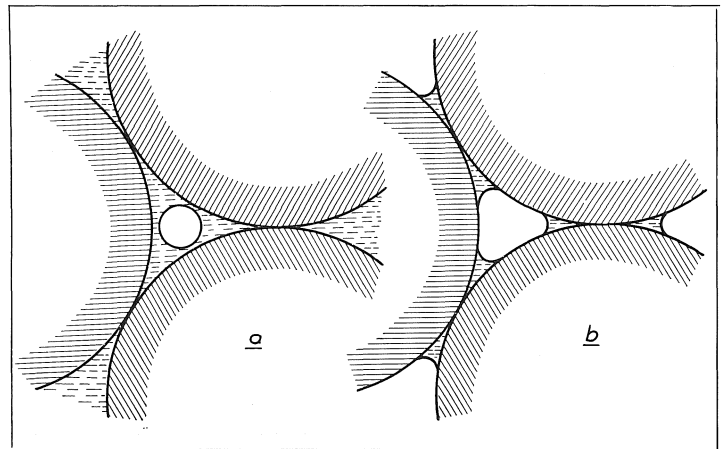


Fig. 32. Uttorkning av poröst material.

Tab. 12. Ytspänningens beroende av temperaturen hos vatten.

Temperatur ° C	Ytspänning N/m
0	0,076
20	0,073
40	0,069
60	0,066

kvoten. Samma resonemang använder Beskow [5] som förklaring på kapillariteten hos jordarter, och det verkar troligt att kritisk fuktkvot i detta fall kan sättas lika med jämviktsfuktkvoten vid det porundertryck som motsvarar kapillariteten.

En annan modell av ett poröst material visas i Fig. 33. Vid vätsketransport från A till B kan många olika vägar väljas. Alla dessa kapillärer har en största diameter någonstans utefter vägen. Ett avbrott av vätsketransporten sker vid denna största diameter, då fuktkvoten efter hand avtar. Detta sker så småningom för alla kapillärer mellan A och B. Vätsketransporten upphör när den kritiska fuktkvoten har nåtts.

Under icke-isoterma förhållanden kan vätsketransport ske genom inverkan av en temperaturgradient. Fuktledningstalet  $k_u$  och potentialen  $w_{\text{kap}}$  ökar med temperaturen, därför att ytspänningen  $\sigma$  avtar med ökande temperatur (se Tab. 12).

Kapillärpotentialens ändring blir:

$$\Delta w_{\text{kap}} = \frac{2\Delta\sigma}{\rho \cdot r} = \frac{2 \cdot \epsilon \cdot \Delta\vartheta}{\rho \cdot r} \quad (3.2.20)$$

vid fullständig vätning ( $\cos \theta = -1$ ) samt då densitetsvariationerna hos vattnet som funktion av temperaturen kan försummas. Ytspänningens temperaturkoefficient är  $\epsilon = \frac{d\sigma}{d\vartheta}$ .

Under inverkan av en temperaturgradient sker alltså i ett material en vätsketransport i värmeströmmens riktning.

Analogt med den termiska glidningen har en teori utvecklats om vätsketransport i ett skikt vid kapillärväggen med temperaturgradienten som drivande kraft. Denna s.k. termoosmotiska effekt driver vätskan mot värmeströmmen.

*Forskningsbehov:*

*Studium av lagar och beräkningsmodeller för kapillärtransport vid begränsad och obegränsad vattentillförsel.*

*Studium av kritisk fukthalt vid vätsketransport i material.*

*Utveckling av provningsmetoder och bestämning av materialdata i samband med vätsketransport genom kapillärsugning.*

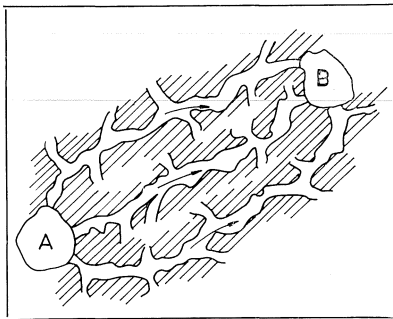


Fig. 33. Vätsketransport i ett poröst material från A till B.

### 3.2.7 Vätsketransport genom osmos

En molekylär transport av vatten sker på grund av osmotiska krafter. I material med vattenlösliga beståndsdelar kan olikheter i koncentrationen råda mellan olika delar. Den härvid uppkomna osmotiska tryckdifferensen är upphov till en transport som utjämnar koncentrationsskillnaderna.

*Forskningsbehov:*

*Grundläggande utredning beträffande inverkan av osmos vid fukttransport i material.*

### 3.3 Fukttransport, totalförlopp

Många av de i kapitel 3.2 redovisade lagarna behandlar endast en enda transportmekanism. Eftersom flera av de separata processerna försiggår samtidigt, måste man söka sig andra vägar. Mer eller mindre approximativa metoder för beräkning av fuktvandringen måste härvid tillgripas.

En fullständig lösning av fukttransportproblemet måste inte bara ta hänsyn till en samtidig förflyttning av vätska och ånga utan även den transport av värme, som ofta förekommer. Det första avsnittet nedan behandlar några teorier som framlagts. I det andra avsnittet presenteras teorier där fukten transporteras som vätska och ånga vid varierande temperatur, men utan inverkan av temperaturgradient. Avsnitt 3 heter »Permeabilitet för vattenånga», och behandlar transport av vattenånga genom ett material i det hygroskopiska området vid olika temperaturnivåer. Därefter redogörs för kondensation på ytor och i material. Uttorkningsförlopp behandlas i ett särskilt avsnitt, liksom även inverkan av luftspalter.

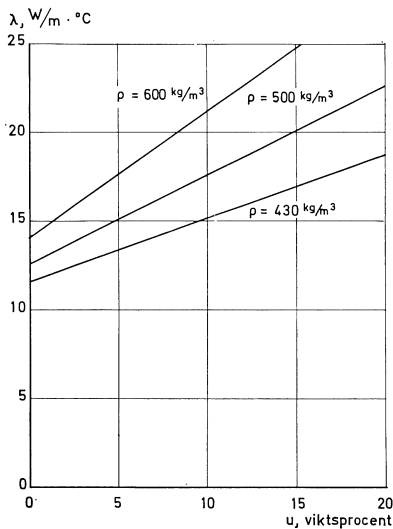


Fig. 34. Värmeledningstalet som funktion av fuktkvoten för högtrycksånghärdad gasbetong enligt Saare & Jansson [45].

#### 3.3.1 Kombinerad värme- och fukttransport

Transporterna av värme och fukt i ett material är nära förknippade med varandra. Den ena är beroende av den andra och båda måste beaktas samtidigt.

Det är känt att närvaro av fukt vid en temperaturgradient vanligen ökar värmeflödet jämfört med ett torrt material vid samma temperaturgradient. Fig. 34 visar samband mellan  $\lambda$ -värden och fuktkvot för gasbetong som illustrerar detta.

Vid temperatur under  $0^\circ \text{C}$  kommer en del av vattnet att

frysa till is, varvid  $\lambda$ -värdet för vattnet ändras från 0,5 till 1,5 med motsvarande verkningar även hos det fuktiga materialet. Denna effekt framgår av Fig. 35.

Storleken av värmeflödet beror emellertid inte endast av fukttinnehållet utan även av den fuktttransport som sker samtidigt.

Bl.a. Lykow [28] har uppställt ekvationer för beräkning av värmetransport samt transport av fukt i både vätske- och ångfas. I det stationära fallet ger han följande två samband

$$\begin{cases} g = -k_u \cdot \rho \cdot \text{grad } u - k_u \cdot \rho \cdot \delta \cdot \text{grad } \vartheta \\ q = -\lambda \cdot \text{grad } \vartheta - C_{pv} \cdot k_u \cdot \rho \cdot \delta \cdot \text{grad } \vartheta - C_{pw} \cdot k_u \cdot \text{grad } u \end{cases} \quad (3.3.1)$$

$k_u$  är fuktledningstalet (se 3.2.6).  $\delta$  betecknar den s.k. temperaturledningsfaktorn.  $C_{pv}$  och  $C_{pw}$  är specifika värmet hos fukten i ång- resp. vätskefas.

Första termen i den första ekvationen tar hänsyn till vätske-transporten i materialet. Den andra återspeglar den transport, som sker under inverkan av temperaturgradienten. Denna senare fuktttransport, som sker i värmeströmmens riktning, sker framför allt i form av vattenånga.

Den andra ekvationen skiljer sig från värmeledningsekvationens klassiska form genom de två sista termerna som tar hänsyn till den fuktttransport som samtidigt sker i materialet. Trots att det inte sker någon fuktttransport *genom* materialet kan fuktttransport ändå ske *i* materialet, då en temperaturgradient föreligger. Ångan rör sig i materialet i värmeströmmens riktning. Utefter sin väg avger den värme till materialet och kondenserar. Härigenom ökar grad  $u$  och en vätske-transport blir möjlig i motsatta riktningen. Det gäller således här att  $g = 0$ , men värmetransporten ökar ändå på grund av fuktttransport i materialet. I det icke-stationära fallet uppställer Lykow [28] följande differentialekvationer för beräkning av samtidig värme- och fuktttransport:

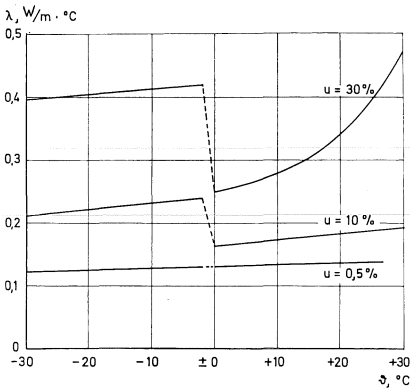


Fig. 35. Värmeledningstalet som funktion av temperaturen vid olika fuktkvoter för högtrycksånghärdad gasbetong ( $\rho = 530-540$ ) enligt Saare & Jansson [45].

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vartheta}{\partial t} &= a \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \epsilon \cdot \frac{r}{C_{pv}} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \\ \frac{\partial u}{\partial t} &= k_u \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + k_u \cdot \delta \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} \end{aligned} \quad (3.3.2)$$

där

$a$  = temperaturlledningstalet,  $m^2/s$

$r$  = specifika ångbildningsvärmets,  $J/kg$

$\epsilon$  kallas fasomvandlingstalet och anger hur stor del som transporteras i form av ånga. Vid endast vätsketransport är  $\epsilon = 0$ .

Liknande teorier har framlagts av andra, bl.a. Krischer [23]. Vos [56] har undersökt det stationära fallet och använder sig av en ekvation mycket snarlik Lykows.

$$g = -k_g \cdot \text{grad } \vartheta - k_u \cdot \rho \cdot \text{grad } u \quad (3.3.3)$$

Vos finner emellertid vid vätsketransport att den första termen kan strykas, då  $k_g$  vanligen är liten.

*Forskningsbehov:*

*Studium av möjligheterna att i olika beräkningsfall separera värme- och fukttransport.*

### 3.3.2 Kombinerad transport av vätska och ånga

Som beskrivits i kap. 3.3.1 kan under inverkan av en temperaturgradient cirkulation av fukt ske i ett poröst material. Vattenånga transporteras från den varma sidan till den kalla. Ångan kondenserar och genom kapillärsugning sker en återtransport i vätskefas.

Enligt kap. 3.2.6 gäller att då materialet har ett fuktinnehåll, som överstiger den kritiska fuktkvoten är vätsketransporten helt dominerande. Då man kommer ned under den kritiska fuktkvoten bildar inte vattnet i vätskefas ett sammanhängande system i materialet. Den rena vätsketransporten med sammanhängande transportvägar upphör härvid. I de finare porerna, som sammanbinder de grövre, samlas vätska, medan de grövre innehåller vattenånga. Tillståndet kan åskådliggöras med en modell som i Fig. 36.

Om en partialtrycksgradient är verksam, sker emellertid ändå en fukttransport. En förångning sker vid den ena menisken, och vattenånga diffunderar genom hålrummet till den andra menisken, där den kondenserar. Detta vattentillskott gör att

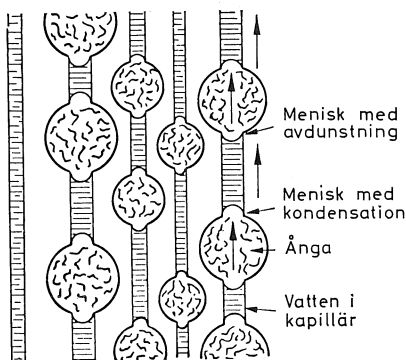


Fig. 36. Fukttransport genom kapillärer med varierande genomsnittsytta enligt Voigt, Krischer & Schauss [53].

vätskepelaren rör sig under inverkan av kapillärkrafterna, en vätsketransport sker. Menisken i andra änden av denna vätskepelare får så småningom en sådan krökningsradie, att förångning kan ske från denna ände av vätskepelaren. Resultatet blir en transport av fukt genom materialet i vätske- och ångfas samtidigt. Helt bestämmande för transporthastigheten blir nu ångdiffusionen.

För att beskriva denna samtidiga transport av ånga och vätska ansätter bland andra Krischer [23] och Johansson [18] den resulterande transporten som summan av ångtransporten och vätsketransporten. Alltså

$$g = g_v + g_w \quad (3.3.4)$$

Man kan i detta samband sätta in olika uttryck för de båda komponenterna. Johansson använde sig av följande:

$$g = -k_{vp} \cdot \frac{dp}{dx} - k_u \cdot \rho \cdot \frac{du}{dx} \quad (3.3.5)$$

$k_{vp}$  är permeabiliteten för vatteånga (se 3.2.2).

Ekvation (3.3.5) används ofta vid beräkningar av kondensation i väggar med fuktspärr. En temperaturgradient läggs på väggen så att kondensation sker vid den täta sidan. Hanson [16] har utfört sådana beräkningar på ytterväggar och yttertak. Han har behandlat det icke-stationära fallet vid uppbyggandet av en fuktfördelning i väggen samt det därefter kommande stationära förhållandet då  $g = 0$  i ekvationen ovan. Hanson har även studerat det icke-stationära fallet med periodiskt varierande tillstånd hos omgivningen. Sambandet ovan samt kontinuitetsekvationen

$$\rho \cdot \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial g}{\partial x} = 0 \quad (3.3.6)$$

ger följande differentialekvation

$$\rho \cdot \frac{\partial u}{\partial t} = k_{vp} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + k_u \cdot \rho \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (3.3.7)$$

Det ovan beskrivna kondensationsproblemet har även be-

handlats av Vos [56]. I de delar av väggen där fuktkvoten är under den kritiska, räknar han endast med ångdiffusion och där den är över den kritiska, endast med vätsketransport.

### 3.3.3 Permeabilitet för vattenånga

Permeabiliteten för vattenånga utgör ett sammanfattande begrepp för de transportmekanismer, som samverkar då vattenånga transporteras genom ett material i det hygroskopiska området. I själva materialet sker transport i både ång- och vätskefas. Vattenångpermeabiliteten skulle alltså kunna ha behandlats i föregående kapitel men dess stora praktiska användning gör det motiverat att behandla den i ett särskilt avsnitt.

Den fuktmängd ( $g$ ) som transporteras genom materialet vid stationära förhållanden kan beräknas med något av följande uttryck om övergångsmotståndet vid materialets ytor försummas (se 3.2.2).

$$g = -k_{vc} \cdot \frac{dc}{dx} = \frac{k_{vc}}{d} \cdot (c_1 - c_2) \quad (3.3.8)$$

$$g = -k_{vp} \cdot \frac{dp}{dx} = \frac{k_{vp}}{d} \cdot (p_1 - p_2) \quad (3.3.9)$$

där

$g$  = transporterad mängd per tidsenhet och ytenhet, kg/s · m<sup>2</sup> eller g/h · m<sup>2</sup>

$k_{vc}$  = permeabiliteten för vattenånga, m<sup>2</sup>/s

$d$  = materialets tjocklek, m

$c$  = vattenånghalten, kg/m<sup>3</sup>

$k_{vp}$  = permeabiliteten för vattenånga i kg · m/N · s eller g/m · h · mmHg

$p$  = partialtrycket för vattenånga, N/m<sup>2</sup> eller mmHg

För många material framför allt tunna skikt som folier, papp och liknande anges permeabiliteten för skiktet. Den härvid erhållna storheten, kallad permeans för vattenånga, blir

$$K_{vc} = \frac{k_{vc}}{d} \quad \text{eller} \quad K_{vp} = \frac{k_{vp}}{d}$$

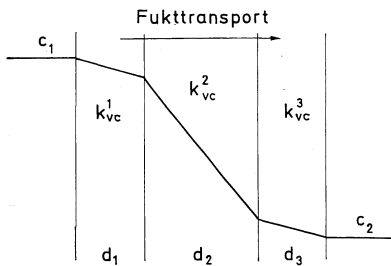


Fig. 37. Transport av vattenånga genom en konstruktion bestående av olika material.

Vid permeabilitetsberäkningar på en väggkonstruktion bestående av flera olika material, är det lämpligt att införa permeabilitetsmotståndet  $Z_{vc} = \frac{d}{k_{vc}}$  för de olika delarna (se

Fig. 37).

Med hjälp av

$$Z_{vc}^{\text{tot}} = \sum_i Z_{vc}^i \quad (3.3.10)$$

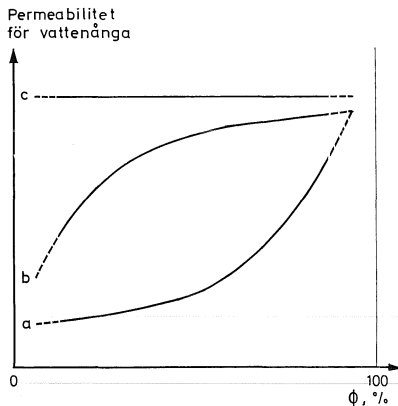
kan den transporterade mängden  $g = \frac{c_1 - c_2}{Z_{vc}^{\text{tot}}}$  beräknas.

Permeabiliteten för vattenånga är beroende av materialets fukttinnehåll. Eftersom vattenånghalten och vattenångans partialtryck varierar i materialet inställer sig, vid stationära förhållanden, en viss fuktfördelning i materialet. Permeabiliteten antar alltså olika värden längs transportvägen. Vid beräkningar ansätts ett medelvärde för materialet.

För att åskådliggöra permeabilitetsstalets variation med fuktnivån, anges denna som funktion av luftens relativa fuktighet. Härvid erhålls, som framgår av Fig. 38, tre olika typkurvor, sammanställda på basis av kurvor bestämda av Tveit [51].

Kurva a representerar s.k. hygrokopiska material. Den kraftiga ökningen hos permeabiliteten vid stigande relativ fuktighet beror på att dessa material vid höga relativa fuktigheter innehåller förhållandevis stora mängder fukt, varvid transport i vätskefas blir möjlig. De icke-hygrokopiska materialen representeras av kurva c. Transporten sker här uteslutande som diffusion. Dessa material är de enda, hos vilka man kan se ett samband mellan vattenångpermeabilitet och luftpermeabilitet eller luftgenomsläpplighet.

Temperaturens inverkan är något oklar. Man kan emellertid säga, att den är ringa. För de icke-hygrokopiska materialen ökar permeabiliteten med temperaturen. Detta är helt i linje med vad som gäller för diffusionskonstanten för vattenånga i luft (kap. 3.2.1). Då transporten sker även i vätskefas, som i de hygrokopiska materialen, blir tendensen inte lika klar. Tveit [51] har emellertid vid sina bestämningar i medeltal kunnat konstatera en svag minskning hos permeabiliteten vid ökande temperatur.



- Bruk, betong, kalksandsten, gasbetong, träfiberplattor, gipsplattor, cellulosapapp, linoleum och trä  $\perp$  fiberriktningen.
- Trä // fiberriktningen och skumplast (olika plaster).
- Kork, tegel, mineralull och polyesterbunden glasfiber.

Fig. 38. Permeabiliteten för vattenånga som funktion av relativa fuktigheten, typkurvor för olika material.



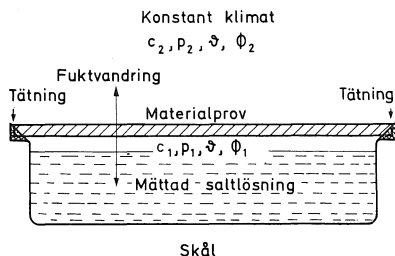


Fig. 39. »Skålmetoden» för bestämning av permeabiliteten för vattenånga.

Vid experimentell bestämning av permeabiliteten för vattenånga används den s.k. skålmetoden. Materialet läggs som lock på en skål, vilken innehåller en mättad saltlösning för att hålla konstant relativ fuktighet i luftspalten mellan saltlösning och material (Fig. 39). Skålen placeras i ett klimatrums eller en klimatlåda med konstant fuktighet och temperatur. Den genom materialet transporterade mängden fukt bestäms genom vägning. Vid noggranna bestämningar av permeabiliteten bör ångmotståndet hos luftspalten under provstycket samt övergångsmotstånden vid saltlösningens yta och de båda materialytorna tas med i beräkningen. Följande uttryck kan härvid användas:

$$k_{vc} = \frac{d}{\frac{\Delta c \cdot A \cdot \Delta t}{\Delta m} - \frac{d_a}{D} - \frac{1}{\beta_1} - \frac{1}{\beta_2} - \frac{1}{\beta_2}}, \text{ m}^2/\text{s} \quad (3.3.11)$$

där

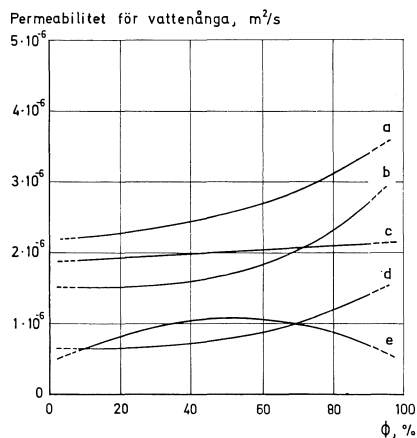
- $d$  = materialets tjocklek, m
- $\Delta c$  =  $c_1 - c_2$ ,  $\text{kg}/\text{m}^3$
- $A$  = materialets yta,  $\text{m}^2$
- $\Delta t$  = tiden, s
- $\Delta m$  = viktändringen, kg
- $d_a$  = luftspaltens tjocklek, m
- $D$  = diffusionskonstanten för vattenånga i luft,  $\text{m}^2/\text{s}$
- $\beta$  = övergångstalet,  $\text{m}/\text{s}$

Övergångstalen (se avsnitt 3.3.4) är emellertid dåligt kända och försummas ofta.

Permeabiliteten avsåts i diagram som funktion av medelvärdet mellan de båda relativa fuktigheterna, som råder på ömse sidor om materialet.

Tveit [51], bland andra, har bestämt vattenångpermeabiliteten vid varierande relativa fuktigheter och temperaturer. Några av dessa bestämningar framgår av Fig. 40.

I de flesta praktiska fall sker fukttransporten under icke-stationära förhållanden. Detta problem behandlas delvis i nästa kapitelavsnitt. Dessutom är en temperaturgradient och en vattenånghaltsgradient samtidigt verksamma. De försök, som gjorts med endast temperaturgradient visar, att inverkan av



- a. Gasbetong ( $\rho = 510 \text{ kg}/\text{m}^3$ ).
- b. Träfiberskiva ( $\rho = 610$ ).
- c. Tegel ( $\rho = 1840$ ).
- d. Kalksandsten ( $\rho = 2120$ ).
- e. Expanderad polystyren ( $\rho = 17,2$ ).

Fig. 40. Permeabilitet för vattenånga som funktion av relativ fuktighet enligt Tveit [51] för:

densamma är försumbar i praktiska fall, såvida inte kondensation inträffar.

*Forskningsbehov:*

*Studium av permeabilitetstal för vattenånga vid hög relativ fuktighet.*

### 3.3.4 Kondensation

*Ytkondensation.* Luftens vattenånga kondenserar på en yta om dennas temperatur,  $\vartheta_v$ , är lägre än mättnadstemperaturen (daggpunkten),  $\vartheta_s$ , för vattenångan i den omgivande luften.

Om vattnet väter ytan bildas en vattenfilm och man talar om filmkondensation. Om vattnet inte väter ytan, bildas droppar och man får s.k. droppkondensation. Värmetransporten är större vid droppkondensation än vid filmkondensation. Vid filmkondensation tillförs byggnadsdelen emellertid mera vatten och därför räknar man i byggnadstekniska sammanhang med denna typ av kondensation. Om  $\vartheta_v < 0^\circ \text{C}$  kan vattenångan fällas ut som rimfrost eller is.

Vid en plan vägg med en-dimensionell värmeströmning är inre väggytans temperatur,  $\vartheta_{vi}$ , under stationära förhållanden:

$$\vartheta_{vi} = \vartheta_i - \frac{k}{\alpha_j} (\vartheta_i - \vartheta_u) \quad (3.3.12)$$

där

$\vartheta_i$  = inneluftens temperatur,  $^\circ \text{C}$

$\vartheta_u$  = uteluftens temperatur,  $^\circ \text{C}$

$k$  = väggens värmeegenomgångstal,  $\text{W/m}^2 \cdot \text{grad}$

$\alpha_j$  = värmeövergångstalet vid innerväggytan,  $\text{W/m}^2 \cdot \text{grad}$

Villkoret för att kondensation inte skall inträffa är att

$$\vartheta_{vi} > \vartheta_s.$$

Villkoret kan också skrivas

$$k < \alpha_j \frac{\vartheta_i - \vartheta_{vi}}{\vartheta_i - \vartheta_u} \quad (3.3.13)$$

Av ovanstående framgår det att vid en given konstruktion är

värmeövergångstalet vid väggytan av betydelse för ytans temperatur och alltså för kondensrisken.

Värmeövergångstalet sammansätts av en strålnings- och en konvektionsandel (inklusive ledning):

$$\alpha_j = \alpha_{sj} + \alpha_{kj} \quad (3.3.14)$$

För värmetekniska beräkningar antas vanligen:

$$m_j = \frac{1}{\alpha_j} = 0,13, \text{ m}^2 \cdot \text{grad/W} \quad (= 0,15 \text{ m}^2 \cdot h \cdot \text{grad/kcal}) \quad (3.3.15)$$

dvs.

$$\alpha_j = 7,7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{grad}$$

Detta värde är ett genomsnittsvärde som ofta används vid värmetransportberäkningar. Vid kondensationsberäkningar är det emellertid nödvändigt att ta hänsyn till lokala variationer i  $\alpha_j$ -värdet.

Om en väggyta vetter mot andra ytterväggsytor eller mot ytor med ännu lägre yttemperatur, t.ex. fönster, ändras strålningsutbytet och  $\alpha_s$  minskar. Ibland kan även  $\alpha_k$  förändras om speciella förhållanden gäller för konvektionen vid ytan.

Vid två- eller tredimensionell värmeströmning i en konstruktion, t.ex. vid köldbryggor och hörn, gäller inte sambandet (3.3.12) utan yttemperaturen måste beräknas eller uppskattas noggrannare.

Yttemperaturen kan också tidvis bli lägre vid icke-stationära förhållanden. Den påverkas även av värmeöverföringstalet på utsidan och av fukthalten i konstruktionen.

Bakom möbler, tavlor o.d. som är placerade intill en vägg kan väggens yttemperatur också vara lägre beroende på att sådana föremål kan fungera som en tilläggsisolering, vanligen dock utan att kunna hindra luftens fuktighet att tränga fram till väggytan. Man kan därför få kondensation bakom sådana föremål.

Lufttemperaturen i ett rum kan variera, vilket kan påverka kondensationsrisken. Varm uppåtstigande luft från en radiator under ett fönster minskar risken för kondensation på fönsterytan.

Vid fukttransport mellan en yta och den omgivande luften används ett diffusionsövergångstal,  $\beta$  [m/s], (i analogi med värmetransporten) som definieras av

$$g = \beta(c_i - c_{vi}) \quad (3.3.16)$$

där

$$\begin{aligned} c_i &= \text{innetluftens ånghalt, kg/m}^3 \\ c_{vi} &= \text{ånghalten vid väggytan, kg/m}^3 \end{aligned}$$

Om vattenånga kondenserar på ytan frigörs värme och väggytans temperatur höjs.

Värmetransporten vid kondensation blir:

$$q_{\text{kond}} = g \cdot r = \beta \cdot r (c_i - c_{vi}) \quad (3.3.17)$$

där  $r$  = ångbildningsvärmets, J/kg

Man kan därför definiera ett värmeöverföringstal på grund av kondensation  $\alpha_{\text{kond}}$  i analogi med övriga värmeöverföringstal

$$q_{\text{kond}} = \alpha_{\text{kond}} (\vartheta_i - \vartheta_{vi}) \quad (3.3.18)$$

Det totala värmeöverföringstalet blir då:

$$\alpha = \alpha_s + \alpha_k + \alpha_{\text{kond}} \quad (3.3.19)$$

Av (3.3.17) och (3.3.18) följer:

$$\alpha_{\text{kond}} = \beta \cdot r \cdot \frac{c_i - c_{vi}}{\vartheta_i - \vartheta_{vi}} \quad (3.3.20)$$

Till följd av förloppens likformighet finns det ett samband mellan  $\beta$  och  $\alpha_k$ . Flera sådana samband anges i litteraturen varvid  $\beta$  anges vara direkt proportionellt mot  $\alpha$ . Ett vanligen använt samband för filmkondensation har angetts av Lewis [24]:

$$\beta = \frac{\alpha_k}{\rho_a C_{pa}} \quad (3.3.21)$$

där

$$\begin{aligned} \rho_a &= \text{luftens densitet, kg/m}^3 \\ C_{pa} &= \text{luftens specifika värme, J/kg} \cdot \text{grad} \end{aligned}$$

Man får således :

$$\alpha_{\text{kond}} = \alpha_k \cdot \frac{r}{\rho_a C_{po}} \cdot \frac{c_1 - c_{vi}}{\vartheta_i - \vartheta_{vi}} \quad (3.3.22)$$

och ur (3.3.19) :

$$\alpha = \alpha_s + \alpha_k \left[ 1 + \frac{r}{\rho_a C_{pa}} \cdot \frac{c_i - c_{vi}}{\vartheta_i - \vartheta_{vi}} \right] \quad (3.3.23)$$

Detta uttryck för  $\alpha$  måste användas för beräkning av yttemperaturen  $\vartheta_{vi}$ . Men eftersom  $\vartheta_{vi}$  även ingår i (3.3.23) måste yttemperaturen lösas genom passning.

När yttemperaturen bestämts kan den kondenserade vattenmängden beräknas ur (3.3.16) varvid  $c_{vi}$  förutsättes vara ångans mätningsvärde vid ytans temperatur.

Normalt fordrar man att en ytterkonstruktions värmeisoleringsförmåga skall vara så god att kondensation på innerytan inte förekommer ens under årets kallaste dagar.

Tillfällig ytkondensation kan dock accepteras om antingen kondensatet kan sugas upp av ytan och sedan avdunsta utåt eller inåt utan att anrikas, eller ytan är ogenomtränglig för vatten och inte skadas av kondensatet, t.ex. målade eller på annat sätt behandlade väggar i kök och badrum.

*Kondensation inne i konstruktioner.* I en konstruktion sker utfällning av vatten om ånghalten i porluften beräknad enligt (3.2.2) och (3.2.4) på något ställe är högre än dess mätnadshalt på samma ställe. För att bedöma risken för kondensation måste man därför även beräkna temperaturfördelningen i konstruktionen, eftersom temperaturen bestämmer vattenångans mätnadshalt.

Om den beräknade ånghaltskurvan överallt ligger under mätnadskurvan, bör beräkningsmässigt ingen kondensation ske.

Om den beräknade ånghaltskurvan emellertid delvis ligger över mätnadskurvan innebär detta dels att kondensation bör äga rum i konstruktionen, dels att den beräknade ånghaltskurvan inte kan vara riktig, eftersom ånghalten inte kan vara större än mätnadsvärdet.

Kondensation kan bero på ångtransport genom diffusion och konvektion. Tidigare har man endast tagit hänsyn till

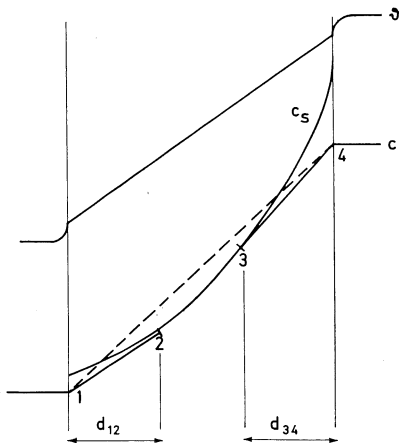


Fig. 41. Kondensation p.g.a. diffusion i en homogen konstruktion under stationära förhållanden.

diffusionen, men konvektionen tycks i många fall vara avgörande. Vanligen räknas kondensation p.g.a. diffusion och konvektion var för sig. Det är emellertid f.n. oklart hur dessa två fenomen samverkar och man kan därför inte ännu beräkna den samlade effekten av diffusion och konvektion.

För att beräkna kondensationen p.g.a. diffusion i en homogen konstruktion under stationära förhållanden enligt Fig. 41 bestäms först temperaturfördelningen och med hjälp av denna konstrueras mätnadskurvan för ånghalten,  $c_s$ . Ånghaltskurvan,  $c$ , skulle beräkningsmässigt enligt (3.2.2) bli en rät linje (1–4), men eftersom denna inte uppfyller villkoret  $c < c_s$  måste kurvan få ett annat förlopp. Glaser [13] anser kurvan 1–2–3–4 vara den riktiga, varvid 1–2 och 3–4 är tangenter till mätnadskurvan.

I skiktet 2–3 är  $c = c_s$  och vattenånga kondenserar. Kondensmängden beräknas som skillnaden mellan vad som diffunderar in i och ut ur kondensationszonen

$$g_{\text{kond}} = k_{vc} \frac{c_4 - c_3}{d_{34}} - k_{vc} \frac{c_2 - c_1}{d_{12}} \quad (3.3.24)$$

Det bör observeras att detta gäller stationära yttre förhållanden men det innebär inte fuktjämvikt i konstruktionen, eftersom vatten hela tiden fälls ut inne i konstruktionen. Härigenom ändras värmeisoleringsförmågan och därmed temperaturfördelningen och mätnadskurvan. Om materialet är kapillärsugande kan fukten sprida sig så att ett annat slutligt jämviktsläge för ånghaltskurvan erhålls.

I den homogena konstruktionen beror kondensationen på att mätnadskurvan »hängor».

I konstruktioner med flera skikt kan kondensation p.g.a. diffusion ske om skikt med liten permeabilitet för vattenånga ligger utanför skikt med större permeabilitet, särskilt om de senare även har bättre värmeisoleringsförmåga. Fig. 42 visar ånghaltskurvor i en sandwichkonstruktion.

Den streckade  $c$ -kurvan är beräknad utan hänsyn till kondensation, medan den heldragna  $c$ -kurvan visar det troliga förloppet av ånghalten i början av kondensationen enligt Glaser. Slutläget blir beroende av om kondensatet kan sugas upp av det yttre skiktet eller av värmeisoleringsmaterialet eller om det eventuellt kan dräneras bort.

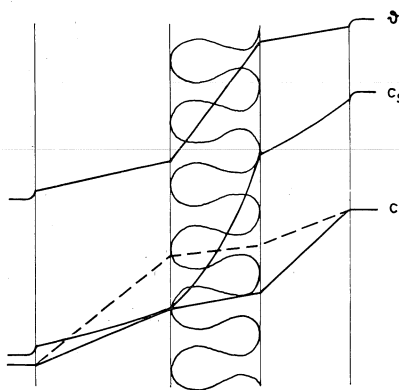


Fig. 42. Kondensation i en sandwichkonstruktion.

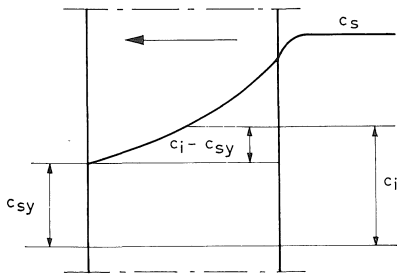


Fig. 43. Kondensation i vägg vid konvektion. Fukttransport inifrån och ut.

I flerskiktskonstruktioner sker kondensation i regel i någon skiktgräns.

Om de i en konstruktion ingående materialens jämviktsfukthalt är starkt beroende av relativa fuktigheten (är »hygroskopiska»), måste under insvängningsförloppet en fukthaltsskurva byggas upp parallellt med ånghaltskurvan. Till detta åtgår en del av den indiffererande ångan varför kondensationens början blir fördröjd. Denna fördröjning på grund av materialens fuktkapacitet medför att beräkning av kondensation inuti konstruktioner inte behöver baseras på extrema yttre förhållanden.

Kondensation p.g.a. konvektion kan ske vid invändigt övertryck om inneluftens vattenånghalt,  $c_i$ , är högre än ytterytans mättnadsånghalt  $c_{sy}$ . Om den genomströmmande luftmängden är  $L$ ,  $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ , blir den kondenserade vattenmängden utan hänsyn till samtidig diffusion

$$g_{\text{kon}} = L \cdot [c_i - c_{sy}], \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \quad (3.3.25)$$

Luftens ånghalt som ju inte kan överstiga mättnadsvärdet sänks från  $c_i$  till  $c_{sy}$ . Luften lämnar alltså konstruktionen mättad.

Samtidig diffusion medför att ånghaltskurvan måste bli anorlunda, men denna kombinerade effekt kan f.n. inte beräknas.

I kondensationsberäkningar försummas normalt ett flertal faktorer såsom termodiffusion, värmestillskott genom att ångbildningsvärme frigörs, förändring av värmeledningstal vid ändrad fukthalt, kapillärsugning i materialet, isbildning vid temperaturer under  $0^\circ \text{C}$ , permeabilitetens beroende av relativ fuktighet. Därtill kommer att beräkningarna utförs för stationära yttre förhållanden, vilket knappast kan vara tillåtligt för material med stor fuktkapacitet. Resultatet av konventionella kondensationsberäkningar måste därför användas med mycket stor försiktighet.

Beräkningsmässig kondensation inuti en konstruktion behöver inte vara skadlig om kondensatet kan sugas upp och avdunsta utåt, dräneras bort eller magasineras i konstruktionen för att avdunsta när temperatur- och fuktförhållanden ändras t.ex. under sommaren.

### Forskningsbehov:

Bestämning av yttemperaturen med hänsyn till värmeöverföringstal för att bedöma risken för ytkondensation.

Fenomenologisk studie av kondensationsförloppet i konstruktioner vid stationära och icke-stationära yttre förhållanden. Kondenszonens utsträckning. Kondensatets utbredning genom kapillärsugning. Kondensation i områden med temperatur under  $0^{\circ}\text{C}$ .

Kondensationsfenomen vid strömmande luft.

### 3.3.5 Uttorkningsförlopp

En byggnadsdel kan, genom någon av de fuktkällor, som behandlas i kap. 2, ha tillförts ett överskott på vatten. Överskottets storlek bestäms av värdet hos desorptionskurvan (se 3.1) för materialet ifråga vid den omgivande luftens relativa fuktighet och temperatur. Det icke-stationära sambandet mellan reduktionen av byggnadsdelens fukttinnehåll och tiden brukar benämnas uttorkningsförlopp.

Enligt Krischer kan sambandet mellan uttorkningshastighet och tid för ett poröst, hygroskopiskt material åskådliggöras av Fig. 44. Uttorkningsförloppet indelas, som framgår av figuren, i tre faser.

Under den första fasan är uttorkningshastigheten konstant. Materialet är härvid fuktigt på ytan, och hastigheten förblir konstant så länge vatten genom kapillärtransport tillförs ytan och håller den fuktig. Man kan anse, att materialets yta är ekvivalent med en fri vattenyta.

Då erhålls

$$g_1 = \beta \cdot (c_s - c) \quad (3.3.26)$$

där

$\beta$  = fuktövergångstalet för vattenånga, m/s

$c_s$  = ånghalten vid mättnad,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$c$  = ånghalten hos den omgivande luften,  $\text{kg}/\text{m}^3$

Fuktövergångstalet  $\beta$  beror av den omgivande luftens hastighet och temperatur (se Fig. 45 och 46).

Vid tiden  $t_1$  har materialets ytskikt kommit ned till det tidi-

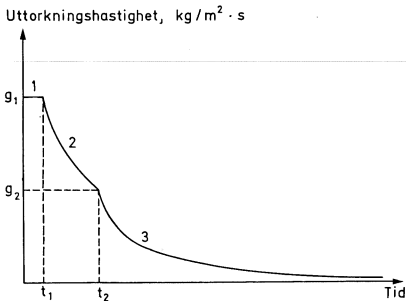


Fig. 44. Uttorkningshastigheter som funktion av tiden för ett poröst material.



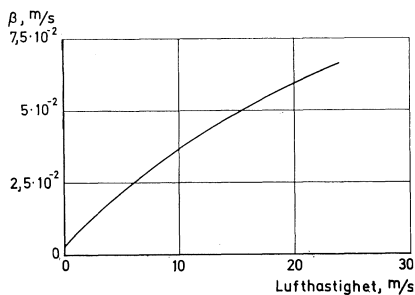


Fig. 45. Fuktövergångstalet för vattenånga som funktion av lufthastigheten enligt Vos [57].

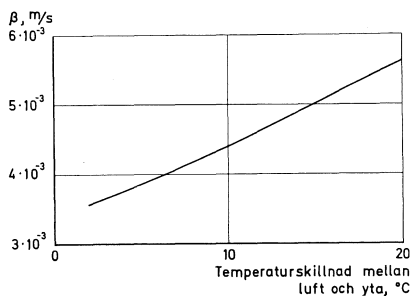


Fig. 46. Fuktövergångstalet för vattenånga som funktion av temperaturen enligt Cammerer [8].

gare i kap. 3.2.6 omtalade kritiska fukttillståndet ( $u_k$ ). Detta fukttillstånd förflyttar sig sedan som en front in i materialet.

Under den andra fasen sker uttorkningen som en kombination av kapillärtransport och vattenångdiffusion. Uttorkningshastigheten konvergerar mot ett värde  $g_{2r}$  vid vilket kapillärtransporten upphört.

Vid tiden  $t_2$  har alla delar av materialet kommit ned under det kritiska fukttillståndet.

Under tredje fasen är det huvudsakligen ångtransporten, som bestämmer uttorkningshastigheten. Materialet uppnår härvid så småningom jämvikt med den omgivande luftens relativa fuktighet.

Det bör tilläggas, att det ovan angivna sambandet mellan uttorkningshastighet och tid är teoretiskt. Gränserna mellan de olika faserna är i praktiken inte så skarpa, i synnerhet gränsen mellan 2:a och 3:e faserna, som för många material flyter samman. En del av 2:a och hela 3:e fasen äger rum i det hygroskopiska området.

I framställningen nedan förutsätts materialet vara i temperaturjämvikt med omgivningen. Detta gäller med god approximation under de båda sista faserna där teorierna nedan är giltiga. Uttorkningshastigheterna här är sådana, att man kan bortse från den värmetransport som måste ske för att åstadkomma förångning av vattnet. Man kan räkna med i det närmaste isoterma förhållanden.

Endast de en-dimensionella uttorkningsförloppen behandlas. Utvidgning av lösningar till att gälla i två eller tre dimensioner innebär ingen principiell skillnad. Vi betraktar alltså plattor enligt Fig. 47 med tjockleken  $2d$  och avdunstning från båda sidor eller plattor med tjockleken  $d$  och avdunstning från ena sidan.

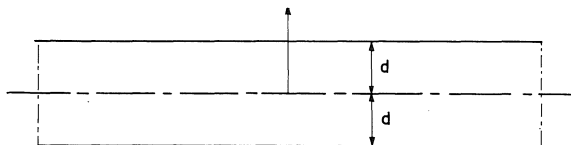


Fig. 47. Platta med oändlig utsträckning.

Genom att sätta  $k_u = 0$  i ekvation (3.3.7) fås

$$\frac{\partial u}{\partial t} = k_{vp} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (3.3.27)$$

som, om man känner materialets hygroskopiska jämviktsfuktkurva vid desorption ( $u = f(\phi)$ ), kan användas för att beräkna uttorkningsförloppet under tredje fasen, men som även kan utsträckas till att gälla för stora delar av andra fasen.

Genom att sätta  $k_{vp} = 0$  i ekvation (3.3.7) fås

$$\frac{\partial u}{\partial t} = k_u \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (3.3.28)$$

Pihlajavaara [38] utgår från denna differentialekvation, när han beräknar uttorkningsförloppen. Han inför i stället för  $u$  den dimensionslösa fuktpotentialen

$$C(x, t) = \frac{u - u_e}{u_o - u_e} \quad (3.3.29)$$

där

$$0 \leq C \leq 1$$

$t$  = tiden, s

$u$  = variabla fuktkvoten, kg/kg

$u_o$  = fuktkvoten vid  $t = 0$ , kg/kg

$u_e$  = fuktkvoten då  $t \rightarrow \infty$  (vid jämvikt med omgivningen), kg/kg

Pihlajavaara [38] inför även ett nytt s.k. fuktledningstal,  $k_p$ .

Vi antar till en början att  $k_p$  är konstant, vilket gäller i ett litet intervall. Differentialekvationen får då följande utseende:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = k_p \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3.3.30)$$

För att kunna lösa denna behövs begynnelse- och randvillkor. Begynnelsevillkoret är

$$\begin{cases} C(x, t) = 1 \\ t = 0 \end{cases} \quad (3.3.31)$$

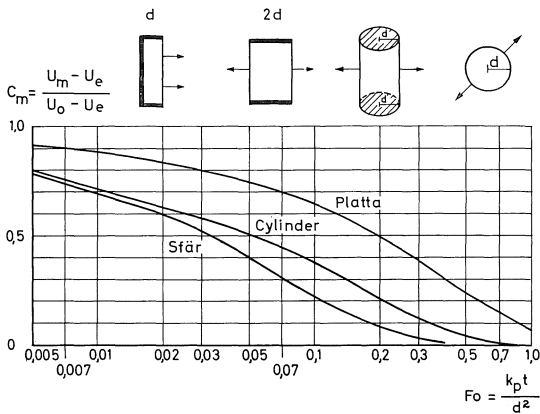


Fig. 48

Fig. 48. Medelfuktninnehållet som funktion av tiden.

Fig. 49. Medelfuktninnehållet som funktion av tiden  $(Fo = \frac{k_p \cdot t}{d^2})$  för olika B-värden  $(B = \frac{\beta \cdot d}{k_p})$ .

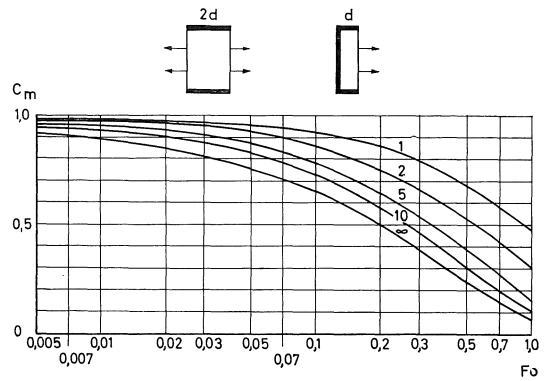


Fig. 49

Pihlajavaara m.fl. ansätter följande randvillkor:

$$\begin{cases} C(x, t) = 0 \\ x = \pm d \end{cases} \quad (3.3.32)$$

Man förutsätter härvid att vattnet förångas från ytan så snabbt som det kan nå densamma. Lufthastigheten har ringa effekt. Ett tunt ytskikt befinner sig i jämvikt med omgivningen.

Medelfuktkvotens variation med tiden för några olika geometriska figurer med ovanstående begynnelsevillkor och randvillkor till ekvation (3.3.30) framgår av Fig. 48.

Genom att införa fuktövergångstalet  $\beta$  och ansätta randvillkoret

$$\begin{cases} \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} = \pm \frac{\beta}{k_p} \cdot C(x, t) \\ x = \pm d \end{cases} \quad (3.3.33)$$

vilket bl.a. gjorts av Bergström & Wastesson [4], kan bättre anpassning erhållas till olika uttorkningsförlopp.

Lösningar till differentialekvationen med detta randvillkor framgår av Fig. 49.

I teorierna ovan har fuktledningstalet ansetts vara en konstant. I praktiken varierar emellertid fuktledningstalet med fuktkvoten hos materialet. Med hjälp av dessa teorier kan emellertid uttorkningstiden beräknas tillfredsställande.

### 3.3.6 Fukttransport i luftspalter

I föregående avsnitt har behandlats fukttransport i porösa material och därmed förknippade randvillkor i fråga om temperatur- och fuktillstånd. Fukttransporten har därvid i huvudsak ansetts vara endimensionell men i princip kan ekvationerna lätt utvidgas till två- eller tredimensionell strömning i poröst material.

Många konstruktioner utförs emellertid med luftspalter eller luftkanaler för att ventileras bort fukt som annars kunde bedömas kondensera i konstruktionen. Som exempel på sådana konstruktioner kan nämnas tak och terrassbjälklag med spårad isolering eller med luftspalt, tak av lätta trapetskorrugerade stålprofiler med ventilation i korrugeringarna, tak med luftspaltbildande papp, hålmurar av olika slag, väggar med fasadbeklädnad av natursten, plåt, glas, asbestcement e.d. utanför en luftspalt, bjälklag på mark med trägolv på reglar samt fönster.

En luftspalt kan principiellt verka på tre olika sätt.

1. *Sluten, icke ventilerad luftspalt.* Om luftspalten är vertikal kommer luften att cirkulera i spalten p.g.a. egenkonvektion. Någon fukt bortförs då inte, men luftrörelsen kan medföra kondensation lokalt där den varmare luften träffar den kallare yttreväggen. Hagman [14] rapporterar ett sådant fall från långtidsundersökningar av en frysrumsvägg vid Norges Tekniska Högskola (Fig. 50). Väggen var isolerad med mineralull, varför konvektionen bör ha varit mindre än i en luftspalt. Vid försöken konstaterades en kraftig isavlagring i isoleringsskiktet högst upp i väggen mot kalla sidan och denna växte undan för undan under försökstiden som rörde sig om två år.

Detta problem är svårt att behandla matematiskt i fråga om värmetransporten och blir ännu mera komplicerat om även fukttransporten skall ingå. För att minska kondensationsrisken är emellertid denna konstruktion av mindre intresse.

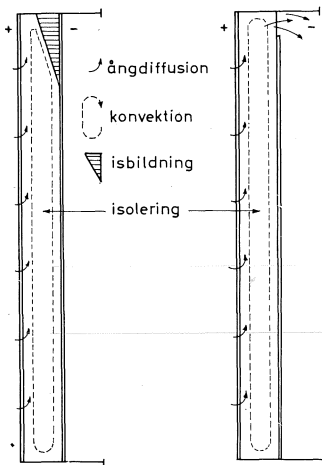


Fig. 50. Konvektion och fuktvandring vid isolering med mineralull enligt undersökningar vid Norges Tekniska Högskola. Sektionen till vänster visar vägg utan och den till höger vägg med ventilationsspalt under tak.

2. *Luftspalt öppen endast åt ett håll.* Man kan därvid tänka sig två olika funktionssätt, dels att egenkonvektion förekommer och att ett visst fuktutbyte äger rum vid öppningen, dels att fukten endast diffunderar igenom luftmassan mot öppningen. I verkligheten torde alltid en kombination förekomma. Man får också räkna med att spaltens väggar inte är helt lufttäta och att det därför kan uppstå luftströmningar genom spalten som kan påverka fuktförhållandena, om det förekommer tryckskillnader mellan öppningen och endera av konstruktionens sidor. En kraftig luftströmning, t.ex. orsakad av vind, förbi öppningen kan också medföra luft rörelser i spalten p.g.a. ejektorverkan.

I den tidigare refererade undersökningen vid Norges Tekniska Högskola konstaterade man, att om man omedelbart under taket tog upp en öppning i väggens beklädnad mot frysrummet, erhöles ingen isbildning inuti väggen.

En luftspalt, som endast är öppen åt ett håll kan transportera fukt på flera olika sätt, men detta beror ofta på okontrollerbara faktorer såsom egenkonvektion, lufttäthet och lokala förhållanden vid öppningen, varför en sådan luftspalt knappast torde kunna användas som ett fukttekniskt konstruktionselement.

3. *Ventilerad luftspalt.* En konstruktion med ventilerad luftspalt visas schematiskt i Fig. 51.

Under förutsättning att det finns en tryckskillnad mellan intagsöppning och utsläppsöppning kommer luften i spalten att få en viss hastighet  $v$ . Vanligen tas luften in från den kalla sidan och släpps ut på antingen den kalla eller varma sidan. Den kalla luften värms upp vid sin passage genom spalten och får därigenom möjlighet att ta upp fukt från spaltens väggar.

Om lufthastigheten är känd kan såväl värme- som fukttransport beräknas under vissa förenklade förutsättningar.

En sådan beräkning har gjorts av Vos [55]. Temperaturen hos luften i luftspalten liksom yttemperaturen i luftspalten bestäms då av följande formel:

$$\vartheta = \vartheta_{\infty} - A \cdot e^{-\frac{B \cdot x}{C_p \cdot \rho \cdot d \cdot v}} \quad (3.3.34)$$

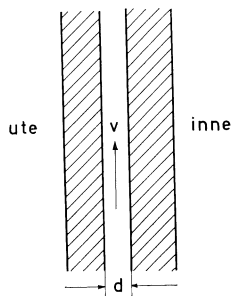


Fig. 51. Ventilerad luftspalt.

där  $\vartheta_{\infty}$  är temperaturen på stort avstånd från intagsöppningen eller, vilket är detsamma, temperaturen i luftspalt utan ventilation.  $A$  och  $B$  är konstanter som beror av väggdelarnas värmemotstånd, värmeöverföringstal på väggens in- och utsida, värmeöverföringstal p.g.a. konvektion och strålning inuti spalten samt temperaturen ute och inne.  $C_p$  är luftens specifika värme och  $\rho$  dess densitet.

Med de små lufthastigheter som man vanligen har i dessa luftspalter kommer temperaturen ganska snabbt att anta sitt slutvärde, vanligen efter 0,5–1,5 m, varvid värmeförlusten blir ganska liten.

Med kännedom om temperaturförhållandena i spalten och under förutsättning att man behärskar fuktmekaniken i de omgivande väggdelarna kan fuktillståndet i spalten och omgivande väggdelar beräknas. För att förenkla den matematiska härledningen baserar Vos sin beräkning på temperaturens slutvärde.

Lufthastigheten i spalten beror som tidigare nämnts på tryckskillnaden mellan intags- och utsläppsöppning och på strömningsmotstånden i dessa och i luftspalten.

Tryckskillnader kan uppstå av tre orsaker:

a. Termisk drivkraft (skorstensverkan)

När luften uppvärms blir den lättare och man får därigenom en tryckskillnad  $\Delta p$  som beror av temperaturdifferensen och höjdskillnaden,  $H$ , mellan öppningarna enligt formeln

$$\Delta p = (\rho_1 - \rho_2) \cdot H \cdot g, \text{ N/m}^2 \quad (3.3.35)$$

där  $\rho_1$  och  $\rho_2$  är densiteten för luft vid de olika temperaturerna. Med hänsyn till att temperaturskillnaden  $\Delta \vartheta$  är liten kan formeln med godtagbar noggrannhet skrivas

$$\Delta p = \rho_0 \cdot H \cdot g \cdot \frac{\Delta \vartheta}{273}, \text{ N/m}^2 \quad (3.3.36)$$

där  $\rho_0$  är luftens densitet vid 0° C.

b. Vindtryck

När vinden blåser mot en byggnad kan det uppstå olika vindtryck vid öppningarna till spalten. För att kunna beräkna

denna tryckskillnad fordras en detaljerad kännedom om vindtrycken i olika punkter på en byggnad.

Eftersom både vindriktning och vindstyrka varierar fordras någon form av statistisk bearbetning; möjligen kan man komma fram till några genomsnittsvärden som kan läggas till grund för beräkningar.

Vindtrycket kan omväxlande samverka med eller motverka den termiska drivkraften.

### c. Fläktventilation

Genom mekanisk ventilation kan man behärska lufthastigheten i spalten, i varje fall medelhastigheten, under längre tid. Vid fläktventilation är det vanligt att luften sugas in i byggnaden och därvid utgör en del av tilluften i det totala ventilationssystemet.

Strömningssmotstånden kan ofta beräknas teoretiskt, men laboratiemätningar torde även vara nödvändiga i många fall.

Med kännedom om tryckskillnad och strömningssmotstånd kan lufthastigheten lätt beräknas. Vid luftspalter med stor utbredning kan det bli nödvändigt att räkna med tvådimensionell strömning.

I många fall används inte luftspalter utan ventilationen sker genom kanaler eller spår vanligen i isoleringsmaterialet. Om dessa ligger tätt kan man nog tillämpa ovanstående principer och lösningar om de på ett förnuftigt sätt approximeras till en sammanhängande luftspalt. Vid större avstånd mellan kanalerna blir både värme- och fuktströmning genom materialen tvådimensionella och avsevärda beräkningssvårigheter torde uppstå.

En luftspalt kan i princip antingen placeras på den kalla eller den varma sidan av värmeisoleringen. Om den placeras på den kalla sidan blir luftens uppvärmning liten och därmed blir också den termiska drivkraften liten. Samtidigt blir luftens fuktupptagande förmåga liten. Placeras luftspalten på den varma sidan blir uppvärmningen kraftig samt den termiska drivkraften och den fuktupptagande förmågan stora. Värmeförlusterna blir också större och risk för ytkondensation på konstruktionens insida kan föreligga beroende på konstruktionen på den varma sidan av luftspalten. Förvärmning av ventilationsluften har tillämpats i några fall.

Ett särskilt problem utgör utsläppsöppningarna om dessa vetter mot ytterluften. Om luftspalten verkligen fungerar som fuktupptagande finns stor risk att fukten kondenserar i ut-sugningshuvar eller liknande eftersom dessa är kallare.

*Forskningsbehov:*

*Detaljstudier av vindtryck på sådana ställen där öppningar till ventilationskanaler normalt kan finnas, t.ex. vid takfot.*

*Undersökning av strömningsmotstånd i spalter och kanaler av olika slag liksom i öppningar.*

*Fältstudier av funktioner hos luftspalter och luftkanaler, omfattande mätning av temperatur, fuktighet och hastighet hos ventilationsluften.*

*Noggrann kartläggning av luftspaltsproblemen från teoretisk synpunkt.*



# 4 Följdverkningar av fukt

Den fukt som på olika sätt tillförs materialet i byggnader eller transporteras inom och genom konstruktionsdelarna kan orsaka olägenheter av skilda slag. Materialen är mer eller mindre fuktkänsliga, varför deras funktion i byggnaden förändras med fukttillståndet. Klimatet i lokaler inuti byggnader påverkas direkt eller indirekt av omgivande konstruktionsdelars fukttillstånd. Även utseendet kan påverkas av fukttillståndet.

## 4.1 Materials fuktkänslighet

De flesta materialegenskaper och materialfunktioner påverkas av fukt i materialen. Inverkan kan vara av större eller mindre betydelse. Fuktens inverkan på materialens beständighet är t.ex. ett mycket allvarligt problem. Fuktbetingade rörelser måste beaktas vid konstruktionsarbetet, eftersom fukt påverkar värmeisoleringsförmåga, hållfasthet, deformation under last och flera andra materialegenskaper.

I några fall sker förstöringen eller förändringen vid en viss fukthalt i materialet. Det är då berättigat att tala om ett kritiskt fukttillstånd, som i analogin statisk dimensionering skulle motsvara brottspänning eller brottlast. Ett typexempel på förekomst av kritiskt fukttillstånd finner vi i samband med de porösa och spröda materialens nedbrytning av frost, en nedbrytning som kan ske endast om en bestämd del av por-systemet är fylld med frysbart vatten.

I andra fall sker förändringarna gradvis. Som exempel kan nämnas den med ökad fukthalt successivt försämrade värmeisoleringsförmågan. Nedan redovisas endast exempel på fuktbetingad nedbrytning av material och på fuktbetingade

egenskapsförändringar. Det är inte möjligt att i detta sammanhang ge en fullständig katalog.

Författarna vill dock redan här starkt understryka hur nödvändigt det är att man noggrant undersöker och redovisar byggnadsmaterials fuktkänslighet. Det kan inte vara rimligt att de enskilda byggnadsobjekten skall utgöra materialleverantörens laboratorium och att byggnadsobjektets ägare skall betala försökskostnaderna.

#### **4.1.1 Beständighet**

Beroende på förstöringens huvudmekanism kan man generellt tala om följande angreppsformer:

- kemiskt angrepp
- elektrokemiskt angrepp
- fysikaliskt angrepp
- biologiskt angrepp
- strålningsangrepp

Kombinationer av de olika angreppsformerna kan förekomma.

Vid de flesta angreppsformer med undantag av strålningsangrepp är närvaro av vatten en väsentlig förutsättning för angrepp.

Vatten kan verka:

- som medium vid kemiska reaktioner mellan i vattnet lösta ämnen och materialet (kemiska angrepp)
- som transportmedium för salter, vilka förorsakar sprängande krafter i materialet (saltvittring, kemiskt angrepp)
- som elektrolyt vid korrosion på metaller (elektrokemiskt angrepp)
- som expanderande porfyllnad vid frostangrepp (fysikaliskt angrepp)
- som medium och förutsättning för verksamhet av materialförstörande organismer (t.ex. svampangrepp på trä, biologiskt angrepp)

I det följande behandlas ett begränsat antal förstöringstyper, som alla har hög aktualitet i byggnadssammanhang och som alla är fuktbetingade.

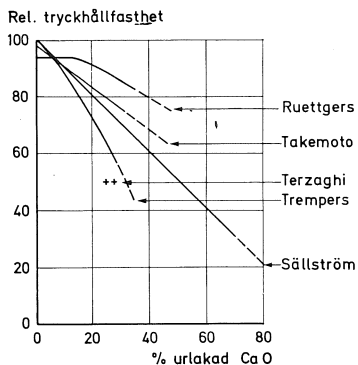


Fig. 52. Samband kalkurlakning – tryckhållfasthet. Sammanställning av resultaten från olika undersökningar. Halvorsen [15].

### Exempel 1

*Kalkutlösning ur betong (kemiskt angrepp).* Vid cementreaktionerna bildas betydande mängder kalciumhydroxid. Ett normalt cement producerar vid fullständig reaktion med vatten ca 28 vikttdelar kalciumhydroxid per vikttdel cement. Kalciumhydroxiden är i och för sig inte det bindemedel som eftersträvas men utgör en nödvändig förutsättning för existensen av det egentliga bindemedlet, kalciumsilikathydraterna. Om vatten genomströmmar betong löses kalciumhydroxiden och transporteras bort. Silikathydraterna avspaltar då mer kalciumhydroxid, som löses och transporteras bort osv., varigenom bindemedlet successivt nedbryts. Fig. 52 visar samband mellan hållfasthetsnedgång och urlakad mängd kalk (CaO). Vid ensidigt vattentryck måste därför vattentät betong användas.

Att göra vattentät betong kan i dag anses vara rutin, varför denna relativt snabba nedbrytningsform inte borde vara aktuell. Men kalkutlösning sker även vid läckande sprickor och fogar, låt vara i långsammare tempo. Fig. 53 visar exempel från en ca 10 år gammal kraftverksdamm. Hastigheten är i denna form av kalkutlösning ännu inte utredd. Kalken utlöses från sprick- eller fogväggarna, och ny kalk förs fram till ytan från inre delar av konstruktionen.

Kalkutlösning medför även estetiska olägenheter. I extrema fall bildas veritabla kalkridåer på luftsidan (Fig. 54) där kalciumhydroxiden ombildas till karbonat. Inom husbygget är ridåbildningen betydligt beskedligare men dock fortfarande en estetisk olägenhet (Fig. 55).

### Exempel 2

*Korrosion på stål i betong och lättbetong (elektrokemiskt angrepp).* Fig. 56 visar den principiella uppbyggnaden hos ett korrosionselement. En elektronström går från anod till katod och upptas av en elektronacceptor i elektrolyten, vanligen syre. Samtidigt lämnar metallkationer anoden, som sålunda angrips. Tre förutsättningar måste samtidigt uppfyllas, om ett element skall fungera, nämligen förekomst av:

- potentialdifferens
- elektrolyt
- elektronacceptor

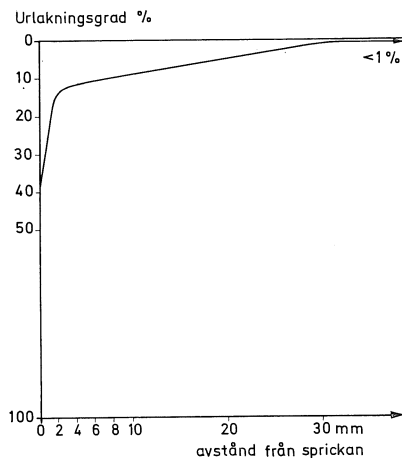
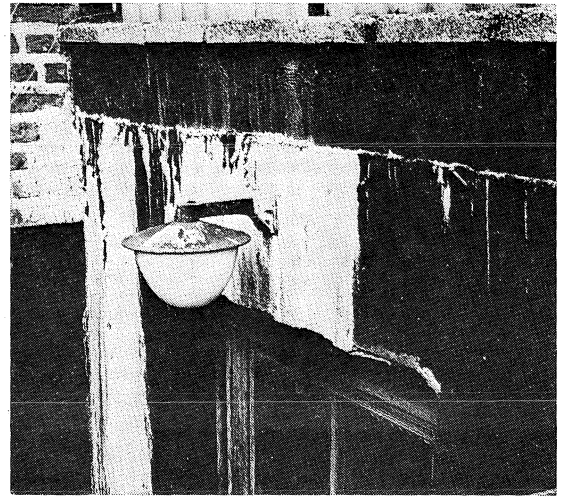
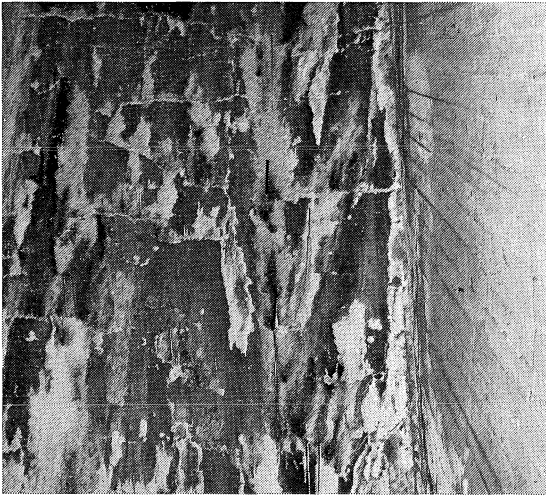


Fig. 53. Urlakningsgrad vid den undersökta sprickan. 100 % motsvarar total urlakning av cementets ursprungliga halt CaO. Halvorsen [15].



Elektrolyten tillhandahålles av fukt i materialet. En viss balans existerar mellan tillgång på elektrolyt och tillgång på elektronacceptor (syre). Vid hög fuktkvot är syretillgången och korrosionsrisken låg. Vid låg fuktkvot är syretillgången god, men elektrolyttillgången ringa.

Sneck [48] citerar källor, enligt vilka den maximala korrosionsfaran för stål föreligger i ett fuktkvotsområde motsvarande jämvikt med 60 och 95 % relativ fuktighet.

Vid givet fukttillstånd bestäms angreppet på stål i betong av :

- miljön (temperatur, aggressiva ämnen som  $\text{SO}_2$  och klorider)
- betongens kvalitet (uttryckt med porositeten, vari inkluderas håligheter av dålig ingjutning)
- täcksikt
- sprickbildning

I armerade produkter av högtrycksånghärdad gasbetong är porositeten hos gasbetongen för hög för att stålet skall kunna skyddas av materialet i fråga. Armeringen förses därför med ett särskilt korrosionsskyddande skikt. Detta utgör emellertid inte ett tillräckligt skydd, om hög fuktkvot långvarigt kommer att råda i materialet. Vid leverans har gasbetongen en fukt-

Fig. 54. Kalkutlösning ur kraftverksdamm.

Fig. 55. Kalkutlösning ur husvägg.

kvot av nivån  $u = 30$  viktprocent och vid ca 98 % relativ fuktighet är jämviktsfuktkvoten ca 20 viktprocent. För att korrosionsskyddet skall vara tillräckligt måste materialet relativt snabbt torka till väsentligt lägre fuktkvot än ovan angivna 20 %. Samspelet mellan fuktkvot och varaktighet är dock inte känt eller redovisat.

### Exempel 3

*Frostangrepp på porösa och spröda material (fysikaliskt angrepp).* Alla porösa och spröda material kan skadas av frysning, om de innehåller tillräcklig mängd vatten. Sådana material är betong, lättbetong, asbestcement, tegel och andra keramiska material, kalksandsten m.fl.

Primär orsak är vattnets expansion vid isbildning (9 % volymökning). Om skador inte skall uppstå måste porsystemet ge utrymme för denna expansion.

Med

$$W_f = \text{frysbar vattenmängd, m}^3/\text{m}^3$$

$$I = \text{lufffylld porvolym, m}^3/\text{m}^3$$

kan man definiera en vattenmättnadsgrad

$$s = \frac{W_f}{W_f + I} \quad (4.1)$$

I en av de äldsta teorierna ansågs följande kriterium för frostbeständighet gälla:

$$\frac{\text{is}}{\text{utrymme}} = \frac{1,09 W_f}{W_f + I} \leq 1 \quad (4.2)$$

Härav erhålls

$$s = \frac{W_f}{W_f + I} \leq 0,917 \quad (4.3)$$

I modernare teorier beaktar man även hur tillgängligt utrymme är för det undanträngda vattnet. Ett hydrauliskt tryck uppstår vid vattnets inpressning i porsystemet. Tryckets storlek beror på permeabiliteten, deformationsegenskaperna, isbildningshastigheten, vattenmättnadsgraden m.m.

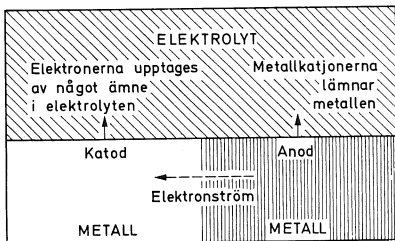


Fig. 56. Principiella uppbyggnaden i en korrosionscell. Sneek [48].

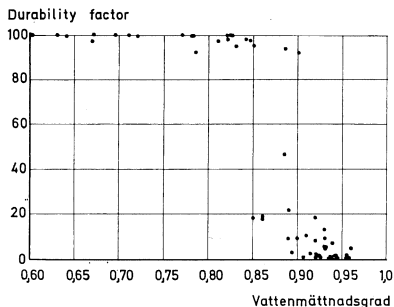


Fig. 57. Vattenmättnadsgradens inverkan på »durability factor» enligt Whiteside & Sweet [59].

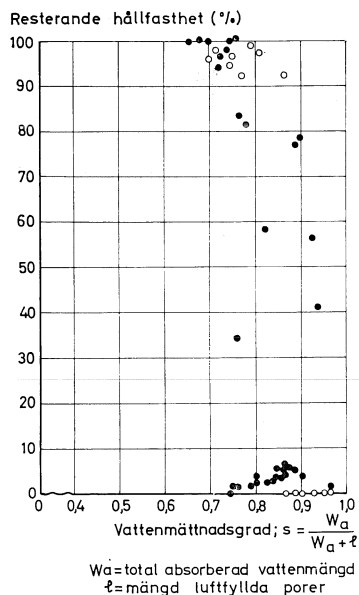


Fig. 58. Vattenmättnadsgradens inverkan på frostbeständigheten hos två tegelsorter enligt Fagerlund.

Man kan tala om en kritisk vattenmättnadsgrad, inte nödvändigtvis 0,917, som är karakteristisk för varje material och materialvariant. Med kännedom om dennas värde samt med tillräckligt fuktmekaniskt kunnande skulle man sedan kunna dimensionera konstruktionen så att den blir frostbeständig.

Såväl laboratorieexperiment som fälterfarenheter har klart visat att vattenmättnadsgraden är en primär variabel i frostbeständighetsproblemet. Dess inverkan är vidare av sådan art att man med rätta kan tala om ett kritiskt fuktillstånd. Fig. 57 visar ett klassiskt exempel enligt Whiteside och Sweet [59], avseende frostresistens (»durability factor») för en viss betong som funktion av vattenmättnadsgraden. Vid en vattenmättnadsgrad omkring 0,88 faller frostresistensen hastigt från nära 100 % till nära 0.

Den kritiska vattenmättnadsgraden kan för olika porösa och spröda material i olika varianter och fabrikat betraktas som en materialegenskap, även om den egentligen är en funktion av många materialegenskaper. När den kritiska vattenmättnadsgraden är känd måste materialet byggas in på sådant sätt, att den slutliga vattenmättnadsgraden aldrig blir så hög som den kritiska i lägen där frysning kan förekomma. Om t.ex. vattenmättnadsgraden till följd av kapillärsugning skulle bli lika hög som eller högre än den kritiska, tycks materialet inte vara lämpligt för utomhuskonstruktioner.

Warris [58] har i en studie av betongs frostbeständighet framhållit, att man som en första approximation kan kräva, att den kritiska vattenmättnadsgraden är högre än den som uppnås vid kapillärsugning från fri vattenyta.

#### Exempel 4

*Rötsvampsangrepp på trä och träbaserade produkter (biologiskt angrepp.)* Rötsvampsangrepp kräver i regel hög fuktkvot (fiberfukt eller däröver). Angreppet kan normalt stoppas med torkning, dock inte beträffande den farligaste rötsvampen – den äkta hussvampen (*Merulius lacrymans*). Den äkta hussvampen kan fortsätta att existera vid så låg fuktkvot som ca 17 % beroende på att vatten alstras vid svampens angrepp på cellulosan.

Väsentliga skyddsåtgärder mot denna form av materialförstöring är i första hand att välja rätt konstruktion ur fukt-

mekanisk synpunkt. Trä eller träbaserade produkter får inte byggas in på sådant sätt att fuktanrikning kan ske. Är man tveksam om möjligheterna att åstadkomma en från denna synpunkt sett säker konstruktion, bör man tillgripa bestrykning eller impregnering.

*Forskningsbehov:*

*Kartläggning av den kritiska vattenmättnadsgraden med hänsyn till frostbeständighet hos porösa, spröda material.*

*Kartläggning av de fukttillstånd vid vilka biologiskt angrepp riskeras i organiska material.*

*Tillåtna gränser för fukttillståndet i porösa material med hänsyn till korrosion på metaller i kontakt med materialet.*

*Nedbrytning av polymera material i fuktig miljö vid olika pH-värden.*

#### 4.1.2 Fuktbetingade rörelser

Många byggnadsmaterial ändrar sin volym vid ändrad fukthalt, de genomgår s.k. fuktbetingade rörelser. Dessa rörelser tar sig uttryck i svällning, när materialets fuktkvot ökar, krympning när den minskar. Fuktbetingade rörelser finns hos alla cementbundna material (betong, lättbetong, asbest-cement). Hos trä är rörelserna speciellt stora och dessutom starkt anisotropa, hos keramiska material är de obetydliga. Fuktbetingade rörelser finns också hos plaster, där de kan variera starkt med bl.a. plastens och fyllnadsmedlets art. Tab. 13 ger exempel på krympningsvärden för några material.

De fuktbetingade rörelserna brukar anges som funktioner av materialets fuktkvot eller omgivande lufts relativa fuktighet. I allmänhet utspelas förloppet i det hygroskopiska området. Det gäller t.ex. för trä, Fig. 59, där rörelserna avstannar vid

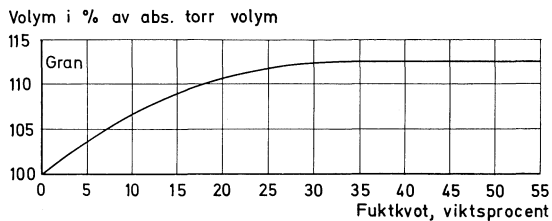


Fig. 59. Svällning hos gran som funktion av fuktkvoten. Thunell [49].

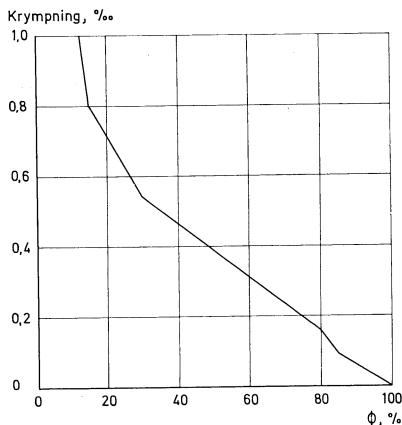
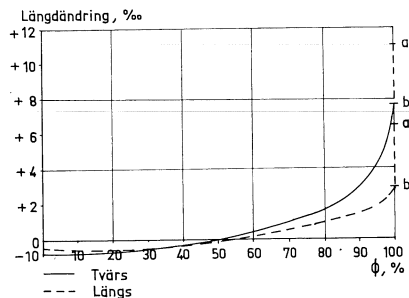


Fig. 60. Krympning hos gasbetong ( $\rho = 650 \text{ kg/m}^3$ ) som funktion av relativa fuktigheten enligt Purins [41].



a. Vatten  
b.  $\phi = 100\%$

Fig. 61. Fuktbedingade rörelser hos PVC-matta.

Tab. 13. Ungefärliga uppgifter om krympning hos olika byggnads-material.

Material	Krympning %	Anmärkning
Trä // fiber	0,1 – 0,35	Från vått till absolut torrt tillstånd
Trä radiellt	2,0 – 8,5	»
Trä tangentiellt	4,0 – 14,0	»
Trä, volym	7,0 – 21,0	»
U-plywood, 7 mm längdändring	~ 0,25	Från $\phi = 90\%$ till $\phi = 0$
tjockleksändring	~ 6	»
Spånskiva, 10 mm längdändring	~ 0,4	»
tjockleksändring	~ 6,5	»
Byggboard, 12 mm längdändring	~ 0,5	»
tjockleksändring	~ 9,5	»
Hård board, 1/4" längdändring	~ 0,5	»
tjockleksändring	~ 9	»
Betong	0,03 – 0,06	Från vattenmättad till $\phi \approx 50\%$
Högtrycksånghärdad gasbetong	0,02 – 0,06	Från vattenmättad till $\phi = 43\%$
Tegel	0,0005 – 0,001	Från vattenmättad till rumsluft

fuktkvot över fibermättnadspunkten. För högtrycksånghärdad gasbetong sker ävenledes större delen av rörelsen i det hygrokopiska området. Speciellt markant är för detta material rörelsernas kraftiga ökning vid låga värden hos relativa fuktigheten, Fig. 60. För andra material kan rörelserna i stället utspelas huvudsakligen i den »våta» änden. Fig. 61 visar ett exempel på detta avseende en typ av PVC-matta.

Krympning och svällning är i allmänhet approximativt reversibla förlopp. Hur förhållandena är för betong belyses av Fig. 62 (enligt Meyer & Nielsen [31]). Innan massan uppnått en av ökande strukturbildning orsakad styvhet sker en kontraktion (A–B). Om betongen därefter förvaras i vatten, sväller den (B–C–D). Om vattenlagringen avbryts och betongen tas upp i luft sker en krympning (C–E). Efterföljande vattenlagring ger en svällning (E–F), som dock är något mindre än den tidigare krympningen. Senare svällnings- och



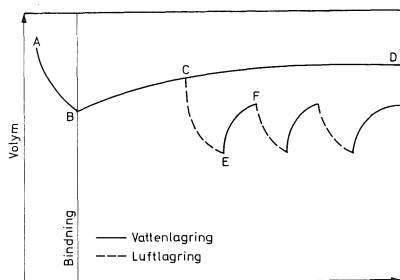


Fig. 62. Svällnings- och krympningscykler hos betong. Meyer & Nielsen [31].

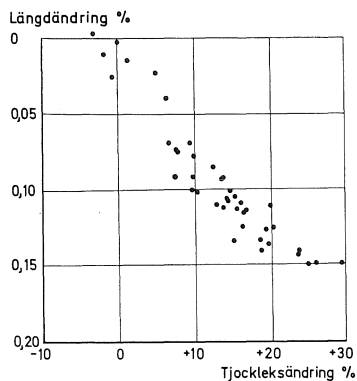


Fig. 63. Samband mellan irreversibla längd- och tjockleksändringar hos träfiberskivor enligt Lundgren [25].

krympningsrörelser är i stort sett reversibla. Avgörande är i första hand volymandelen cementpasta och därefter vikt-förhållandet vatten—cement (vct). När båda dessa ökar så ökar de fuktbetingade rörelserna.

För träfiberskivor är en betydande del av rörelserna irreversibla, sammanhängande med bl.a. en resning av fibrerna i materialet vid uppfuktning. Fig. 63 (enligt Lundgren [25]) visar ett exempel.

Den hastighet med vilken rörelserna utspelas beror på materialets art (tätt—poröst) och av konstruktionens dimensioner. Ju klenare de senare är, desto snabbare går förloppet. Förloppet kan beräknas med en diffusionsmetod av samma typ som visats för uttorkningsförlopp i avsnitt 3.3.5. Fig. 64 visar ett exempel, avseende krympningsförlopp hos betongväggar med tjocklek 10 och 40 cm.

Man bör observera att krympningsvärden enligt normer, broschyrer, datablad m.m. avser uttorkning mellan standardiserade fuktkvotsgränser, som inte nödvändigtvis gäller i det aktuella fallet. I det hypotetiska fallet enligt Fig. 65 är  $\epsilon_0$  krympning enligt provning. Krympningen i aktuell konstruktion är

$$\epsilon_0 - \epsilon_1 + \epsilon_2$$

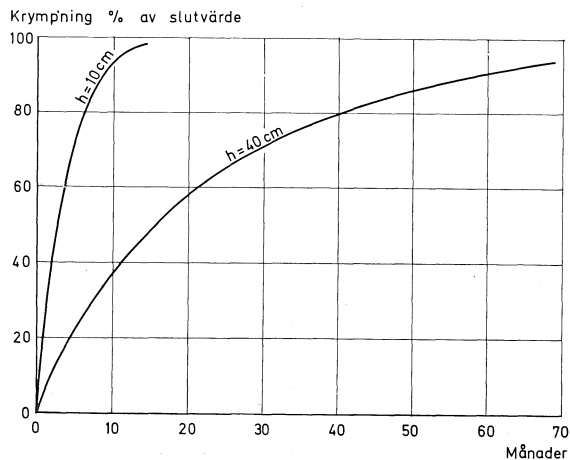


Fig. 64. Krympningsförloppen hos två betongväggar med olika tjocklekar.

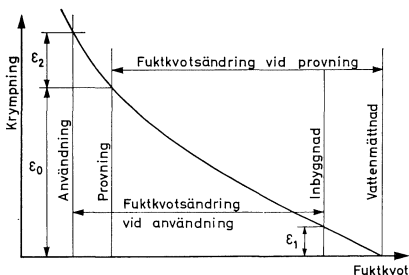


Fig. 65. Krympningen hos en konstruktion vid olika tidpunkter.

*Forskningsbehov:*

*Utveckling av metoder för beräkning av de fuktbetingade rörelsernas tidberoende under hänsynstagande till konstruktionens dimensioner.*

*Kartläggning av de fuktbetingade rörelserna hos plaster och plastbaserade material.*

### 4.1.3 Egenskapsförändringar

Som redan tidigare har framhållits påverkas de flesta materialegenskaperna av materialets fuktkvot. I allmänhet är denna påverkan sådan att materialets funktion blir sämre när fuktkvoten blir högre. Sålunda försämrans hållfastheten, ökar deformationerna (såväl momentana som tidsberoende), minskar resistensen mot avnötning och ökar värmeledningstalet när fuktkvoten ökar. Några betydande exempel visas i det följande.

Fig. 66 visar en välkänd bild av hållfastheten i olika riktningar hos trä som funktion av fuktkvoten. Man finner, att effekten i stort sett gäller det hygroskopiska området. Från fiber-mättnadspunkten (fuktkvot 25–30 viktprocent) och uppåt är hållfastheten oförändrad. Även träbaserade skivor har som Lundgren [25] påvisat ett mycket kraftigt fuktberoende hos hållfastheten, Fig. 67. För dessa material sker också en stark ökning av såväl momentan deformation som krypdeformation vid höjning av den relativa luftfuktighet i vilken materialen konditionerats till jämvikt, Fig. 68.

Fig. 69 visar hållfastheten hos högtrycksånghärdad gasbetong som funktion av fuktkvoten.

Fig. 70 visar inverkan på betongs krypning av omgivande lufts relativa fuktighet när krypning sker under uttorkning. Generellt gäller beträffande krypdeformationer hos porösa material att krypningen blir större om materialets fuktillstånd ändras under krypningens gång.

Beträffande fuktillståndets betydelse för de porösa materialens värmeledningstal hänvisas till avsnitt 3.3.1.

*Forskningsbehov:*

*Genomgående kartläggning av materialegenskapernas beroende av fuktillståndet. De mest intressanta egenskaperna är hållfasthet, deformation under last, fuktbetingade rörelser och värmeledningstal.*

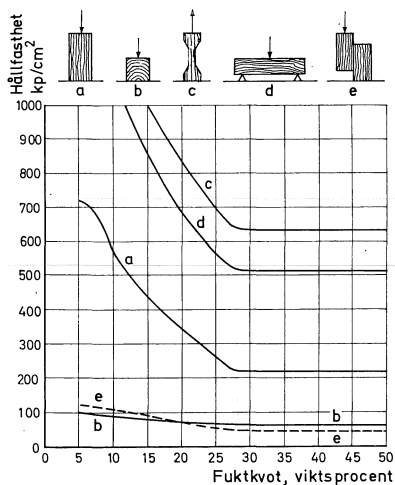
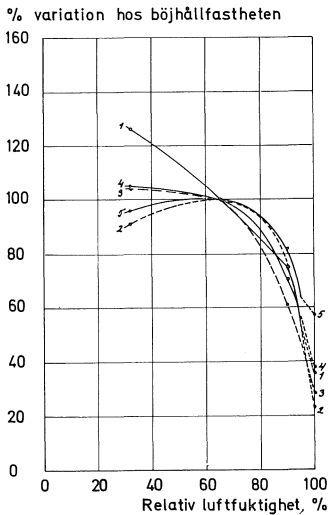


Fig. 66. Hållfastheten hos trä i olika riktningar som funktion av fuktkvoten. Thunell [49].



- 1 7 mm U-plywood
- 2 10 mm spånskiva
- 3 12 mm byggboard
- 4 1/4" hård board
- 5 1/4" oljehärdad board

Fig. 67. Luftfuktighetens inverkan på böjhållfastheten. Lundgren [25].

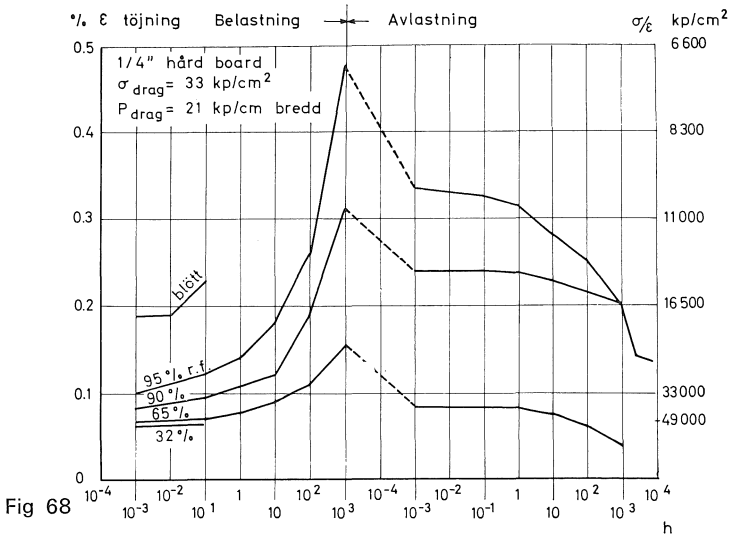


Fig 68

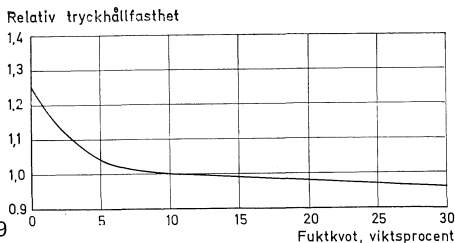


Fig. 69

Fig. 68. Krypningen hos 1/4" hård board vid varierande fukttillstånd. Lundgren [25].

Fig. 69. Approximativt samband mellan fuktkvot och tryckhållfasthet för högttrycksånghärdad gasbetong. Purins [40].

Fig. 70. Krypningen hos betong som funktion av den omgivande luftens fuktighet. Davis & Davis [11].

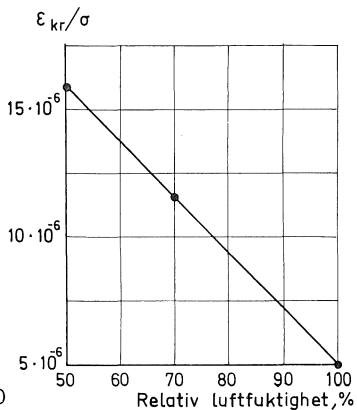


Fig. 70

## 4.2 Inomhusklimat

Följdverkningar av fukt inskränker sig inte endast till de byggnadsdelar i vilka den transporteras eller befinner sig. Vid uttorkning av byggfukten i nybyggda hus eller vid fukttransport in genom väggar, golv och tak tillförs den omgivande luften fuktighet. Rumsluften tillförs även vattenånga från människor, växter, arbete med fritt vatten samt genom konstgjord befuktning. Då så är möjligt överförs även fukt från den omgivande luften till först och främst möbler, textilier, tapeter och träinredningar.

Extrema ändringar av luftfuktigheten i ett rum måste av olika skäl kunna kontrolleras. Måttliga variationer hos luftfuktigheten klaras av ett eventuellt förekommande ventilationssystem.

Det är brukligt att tillskriva luftfuktigheten en väsentlig betydelse för såväl temperaturupplevelse som för respirationsorganens hälsotillstånd. En sedan många år tillämpad praxis rekommenderar sålunda relativa fuktighetsvärden mellan 30 à 40 och 60 procent. Denna praxis är emellertid grundad på en ospecificerad erfarenhet och saknar tillräcklig experimentell verifikation.

En övre gräns är dock motiverad av tekniska och hygieniska skäl. Alltför hög luftfuktighet i inomhusutrymmen kan medföra kondensation vid kalla ytor. Fuktskador i väggar och golvmaterial kan härvid ge allvarliga hygieniska konsekvenser till följd av minskad värmeisolering samt mögel- och svamptillväxt med åtföljande dålig lukt.

Beträffande luftfuktighetens termiska verkningar visar utförliga undersökningar att vid förhållanden där synlig svettning inte förekommer, dvs. för oss normala inomhusförhållanden, den termiska betydelsen av luftfuktigheten är minimal. Så snart en väsentlig del av värmetransporten sker genom svettavdunstning får däremot luftfuktigheten en avgörande betydelse för värmebalansen. Goda möjligheter finns att ur tillgängliga data bedöma den fysiologiska värmebalansen med hänsyn till luftfuktighet. De väsentliga forskningsproblemen på detta område består i en bedömning av hur stor del av producerad svettning som kommer att avdunsta i en given klimatsituation. Fördelningen mellan avdunstning från

hudytan och avdunstning genom diffusion genom hudens hornbarriär är också ett viktigt forskningsproblem. Den avmattning av svettproduktionen som inträder efter långvarig svettning, s.k. sweat suppression, är för bedömning av varma klimats uthärdlighet ytterst väsentlig men ännu otillfredsställande känd.

Den väsentligaste motiveringen för hygieniska gränsvärden för luftfuktigheten under vanliga inomhusförhållanden är dess inverkan på andningsvägarnas slemhinnor. De i vårt klimat förekommande låga luftfuktigheterna antas förorsaka uttorkning av slemhinnorna, vilken framför allt tros medföra nedsatt motståndskraft mot infektioner, s.k. förkylningssjukdomar. Beträffande den ökande infektionskänsligheten står uppgift mot uppgift och en oemotsäglich och förutsättningslös studie häröver vore av grundläggande betydelse. Moderna respirationsfysiologiska undersökningar har visat att nässlemhinnan fungerar som en värme- och fuktväxlare med vanligtvis hög verkningsgrad. Efter näspassagen är sålunda inandningsluften ganska nära mättnadspunkten oavsett den omgivande luftens fuktighetsgrad. Härigenom skulle man vänta sig att luftfuktigheten vore en relativt oväsentlig faktor i omgivningen. Emellertid kommer fuktväxlarmekanismen att sättas ur funktion om omgivningstemperaturen är för hög. Ett flertal undersökningar har också visat att klagomål över torr luft korrelerar snarast bättre med höga rumstemperaturer än med låga luftfuktighetsvärden. En mera fullständig undersökning över dessa förhållanden vore uppenbarligen av väsentlig betydelse. Lika väsentlig vore en undersökning av hur vanliga sådana sjukdomstillstånd är som genom att tvinga till munandning kommer att sätta fuktväxlarmekanismen ur funktion. Munslemhinnan är nämligen väsentligt mindre effektiv som fuktväxlare, och man kan därför vänta att låga luftfuktigheter är mera ogynnsamma för »munandare». Vidare studier över luftfuktighetens inverkan på dammbildning och dammuppvirvling som kan besvara framför allt allergiska personer vore också av värde, eftersom en väsentlig klagomålsorsak här kan väntas föreligga.

*Forskningsbehov:*

*Experimentell verifiering av lämplig relativ fuktighet i olika lokaler.*

*Hur stor del av den producerade svettmängden avdunstar i ett givet klimat?*

*Undersökning av effekter vid alltför låg relativ fuktighet ur fysiologiska och hygieniska aspekter.*

### **4.3 Utseende**

De kanske mest påtagliga följdverkningarna av fukt är de synliga. Fuktens inverkan på materialens beständighet och fuktrörelser ger ofta mycket iögonfallande förändringar av utseendet hos olika byggnadsdelar. Estetiska synpunkter kan alltså i många fall framföras vid studium av fel och skador på grund av fukt.

Fula fuktfläckar kan uppträda på väggar och tak både utomhus och inomhus. I källare kan dessa härröra från inträngande grund- och ytvatten. Läckage i t.ex. tätskikt kan ge upphov till fuktfläckar inomhus på tak och väggar men även på väggar utomhus. Fuktfläckar på väggar utomhus kan även uppträda som följd av fuktvandring genom väggen med åtföljande kondensation i ytterskiktet.

Fuktiga fasadytor utsätts för en ökad nedsmutsning. Fritt rinnande vatten tvättar vissa partier och gör ytan flammig.

Från läckage härrörande fritt rinnande vatten kan utefter en fasad, vid balkongräcken och andra metallkonstruktioner ge upphov till rostfläckar.

Kalkutlösning ur betong och ur andra material utlösta salter (saltutslag) ger svåra missfärgningar av fasader. Dessa saltutslag är en följd av, att de lösliga salterna som finns i materialet transporteras med fukten till ytan vid uttorkning.

Bortsprängning av ytterskiktet hos t.ex. en tegelvägg till följd av frostangrepp förändrar väggens utseende. Förutsättningen för att dessa skador skall uppstå är bl.a. att tillräcklig mängd fukt tillförts fasaden på något sätt.

Alltför stor mängd byggfukt som stängts in kan ge upphov till många olika förändringar av utseendet. Färgen lossnar t.ex. från en för tidigt målade träkonstruktion. En linoleummatta för tidigt lagd på ett undergolv av betong släpper och

bubblar sig till följd av svällning hos mattan. Vattenlösliga produkter från betongen ger en alkalisk miljö vilken gör att klistret släpper.

Rötsvampsangrepp på oorganiska material till följd av alltför hög fuktkvot ger många gånger mycket ofördelaktiga förändringar av utseendet.

Förändringar av fukttinnehållet ger hos många material relativt stora variationer av volymen. Materialen krymper eller sväller, vilket kan förorsaka sprickbildning, skevhet eller buktighet.

*Forskningsbehov:*

*Nedsmutsning av fasader. Orsaker, förebyggande åtgärder och rengöring.*

# 5 Dimensionering

När man talar om dimensionering leds tankarna i regel till hållfasthetsteknisk dimensionering. Alla byggnader skall hållfasthetsberäknas och beräkningarna underställas statliga myndigheter, eftersom samhället känner ansvar för medborgarnas säkerhet och hälsa. Valet av belastningsdata och tillåtna värden på konstruktionsmaterialets spänning är noga reglerat i normer liksom ofta även själva dimensioneringsmetoden. Såväl förväntade belastningar som aktuella hållfastheter är emellertid stokastiska storheter som endast kan anges som medelvärden och spridningskurvor och de normerade värdena på belastningar och hållfastheter kan i ett aktuellt fall tänkas överskridna. Sannolikheten härför skall emellertid vara mycket liten. Johnson [19] visade 1953 en statistisk-ekonomisk metod att med hjälp av medelvärden och spridningar dimensionera konstruktioner från hållfasthetssynpunkt. Det är emellertid svårt att inom rimlig tid få fram spridningskurvor för de extremt låga sannolikheter som det här är fråga om, och metoden har hittills inte använts i någon större utsträckning.

Vid den normerade hållfasthetsdimensioneringen har man alltså byggt in delsäkerhet i både belastningsdata och hållfasthetsvärden. I den mån beräkningsmetoden är normerad innehåller även denna en delsäkerhet eftersom det är naturligt att en normerad approximativ beräkningsmetod är på säkra sidan. Alla beräkningsmetoder är nämligen större eller mindre approximationer av verkligheten, och vid valet av normerad metod prefereras den metod som inte ger underdimensionering i något fall eller åtminstone endast i yttersta undantagsfall.

Fuktteknisk dimensionering kan betraktas på liknande sätt som den hållfasthetstekniska. Belastningarna är fuktkällorna



och de tillåtna spänningarna är tillåtna fuktkvoter. Det finns emellertid vissa skillnader. Hållfasthetstekniskt innebär ett överskridande av hållfastheten att man erhåller brott eller deformationer som äventyrar konstruktionens bestånd. Från fuktsynpunkt kan tillåtna fuktkvoter bestämmas av ett flertal kriterier nämligen högsta fuktkvot för undvikande av t.ex. korrosion, deformation, missfärgningar och stora värmeförluster. I vissa fall kan ett överskridande av tillåten fuktkvot vara förenat med fara för medborgarnas säkerhet och hälsa. I andra fall är emellertid så inte fallet. Flera av fuktkällorna är stokastiska storheter t.ex. utomhusklimatet, medan andra är mera statiska som inomhusklimatet. Det senare kan emellertid ändras i framtiden och man måste då antingen förutspå en sådan ändring eller vidtaga åtgärder för att förhindra att fuktkällan ändras utan att konstruktionen förändras – jämför angivande av tillåten last på hissanordningar.

I förhållande till normal hållfasthetsberäkning föreligger emellertid vid fuktberäkningen en väsentlig skillnad. I det senare fallet måste man nästan alltid räkna med att någon eller några av fuktkällorna varierar och att man har ett dynamiskt förlopp där hänsyn måste tas till fuktmagasinerings i konstruktionen. I detta hänseende är fuktberäkningar mera att likna vid värmeberäkningar.

Således är det mindre intressant att fukt kan samlas t.ex. inifrån i en takkonstruktion eller utifrån i en väggkonstruktion än att veta hur mycket som samlas under en nerfuktningsperiod och hur mycket som försvinner under en följande uttorkningsperiod och fastställa om den samlade fuktmängden är acceptabel. Därför är de traditionella kondensationsriskberäkningarna otillräckliga för bedömning av en konstruktions funktionsduglighet. Även i ett annat avseende skiljer sig fuktberäkningar från hållfasthets- och värmeberäkningar, nämligen de ekonomiska konsekvenserna av ett ökat skydd. En reduktion av tillåten påkänning eller värmetransport medför omedelbart påtagligt ökade anläggningskostnader, medan en rätt anbringad fuktspärri ofta ger stor effekt för ringa kostnad, dock inte alltid. Detta medför att man i många fall anbringar fuktspärri »för säkerhets skull» och att man i vissa konstruktioner kan ställa fuktkravet högt, t.ex. att kondensation inte får förekomma. Detta är emellertid en farlig inställ-

ning, eftersom den kan få stora ekonomiska konsekvenser om resonemanget tillämpas på konstruktioner där förhindrande av fukttransport är förenat med stora åtgärder. Det är nödvändigt att utveckla metoder att fuktdimensionera konstruktioner. Det gäller då att för olika principiella dimensioneringsfall ange vilka fuktbelastningar man skall förutsätta vid beräkningar, hur beräkningen av fuktkvoter skall ske och vilka fuktkvoter som skall tillåtas i aktuella situationer.

Det är idag inte ens möjligt att systematiskt ange vilka dimensioneringsfall som bör behandlas och hur dessa skall kombineras. Fuktdimensionering av konstruktioner är ett helt oarbetat forskningsfält, vilket som grund behöver forskningsresultat rörande fuktkällor, fuktmekanik och följdverkningar av fukt. Detta forskningsfält bör naturligtvis hellre bearbetas på bred front och med mindre krav på noggrannhet i början än med punktinsatser med krav på stor noggrannhet hos resultaten. Efter hand bör statliga normer utarbetas även för denna typ av dimensionering.

*Forskningsbehov:*

*Studium av möjligheterna att uppbygga rationella dimensioneringsregler baserade på fuktkällor, fuktfixering, fuktmekanik, tillåtna fukttillstånd, statistisk spridning, säkerhetsfrågor och ekonomisk optimering.*

# 6 Metoder för mätning av fukt

De mätmetoder som finns kan sorteras in under följande rubriker:

1. Absolutbestämningsmetoder
2. Kemiska metoder
3. Hygrometriska metoder
4. Elektriska metoder
5. Termiska metoder
6. Kärnfysikaliska metoder
7. Spektrometriska metoder

Metoderna är direkta eller indirekta, förstörande eller icke-förstörande. Dessutom kan flera av metoderna karakteriseras som rena laboratoriemetoder, som i nuvarande utformning inte har någon direkt praktisk användning. Av större betydelse är de icke-förstörande metoder, som möjliggör in situ-mätningar. Dessa metoder är oftast indirekta och kräver kalibrering för varje material.

## 6.1 Absolutbestämningsmetoder

Dessa metoder är förstörande. Provstycken uttages från den aktuella byggnadsdelen, vägs, torkas och vägs åter, varefter fuktkvoten kan beräknas. I många byggnadsmaterial är provtagningen svår att utföra. Prov tas ofta endast i ytan varvid missvisande resultat erhålles. Värmeutvecklingen vid provtagningen reducerar materialets fukttinnehåll. Det förångningsbara vattnet kan elimineras på flera olika sätt. Den vanligaste metoden är uttorkning genom uppvärmning, oftast i ett torkskåp. Torkning på värmeplatta förekommer. För särskilt snabb fuktbestämning används strålningsuppvärmning med ultra-

och infrarödstrålar. Många material torkas vid 103–105° C. Stor försiktighet måste iakttas med många material, som inte tål alltför höga temperaturer, eftersom de utsätts för nedbrytning. Torkningen kan i dessa fall i stället ske i en exicator med torkmedel, som t.ex. konc. svavelsyra, blågel eller fosforpentoxid. Uttorkningen tar då emellertid mycket lång tid. Tiden förkortas dock om exicatorn samtidigt hålls under vakuum.

Metoderna har god precision, om temperaturerna vid uppvärmningen är de riktiga. Nackdelar är att bestämningen tar lång tid och att provtagningen i många fall är svår att utföra.

## 6.2 Kemiska metoder

Kemiska förfaranden vid fukttinnehållsbestämning grundar sig på att det fuktiga provet blandas med speciella kemikalier, som reagerar endast med vattnet i materialet. Ur reaktionsprodukten eller kemikalieförbrukningen kan provets fukt-mängd bestämmas. Den metod som oftast används av byggnadstekniker är kalciumkarbidmetoden.

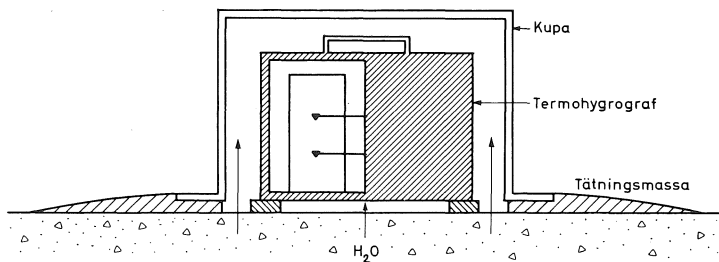
Komplett utrustning för tillämpning av kalciumkarbidmetoden finns i marknaden. Metoden lämpar sig bäst för kornformiga material och många andra måste i regel sönderdelas. En viss bestämd materialmängd vägs upp. Storleken av denna bestäms av materialets ungefärliga fukttinnehåll. Provet läggs i en gastät flaska tillsammans med några stålkulor och en glasampull med kalciumkarbid i överskott. Flaskan tillsluts väl och omskakas, varvid ampullen krossas och karbiden reagerar med vattnet i materialet. Härvid bildas acetylen, som ger upphov till ett övertryck i flaskan. Detta övertryck kan avläsas på en manometer. Med hjälp av en tabell kan fukttinnehållet sedan bestämmas.

En del vatten kan förloras vid sönderdelningen. Även här är provtagningen många gånger svår att utföra och gradienter svåra att bestämma. En fördel är emellertid att metoden är snabb.

## 6.3 Hygrometriska metoder

Innesluts ett fuktigt material i en behållare inställer sig så småningom ett jämviktstillstånd mellan luften i behållaren

Fig. 71. Mätning av relativa fuktigheten över ett betonggolvet.



och materialet (se kap. 3.1.2). Genom att mäta den instängda luftens relativa fuktighet erhåller man ett mått på materialets fuktillstånd, när detta befinner sig i det hygroskopiska området. I många fall är det den relativa fuktigheten man behöver. För att erhålla fuktkvoten krävs kännedom om materialets hygroskopiska jämviktsfuktkurvor.

Ett sätt att bestämma fuktillståndet i ett material, t.ex. golvbetong, är att placera en kupa på materialets yta (Fig. 71). Kupan innehåller någon form av instrument för mätning av den relativa fuktigheten, t.ex. termohygrograf eller någon typ av elektrisk givare, varvid kupan kan göras liten. Kupan skall ställas tätt intill materialet och ytan bör tätas runt om kupan. Viktigt är att kupan står så länge att jämvikt verkligen uppnås.

Genom att borra hål i materialet kan man med hjälp av olika typer av luftfuktighetsgivare bestämma fuktillståndet på olika djup enl. Fig. 72. Efter borrningen måste hålet slutas till vid ytan, så att luften i hålet kommer i jämvikt med materialet.

Ett flertal olika metoder för att mäta relativa fuktigheten finns i marknaden till skiftande priser och precision samt med varierande storlekar hos avkänningskroppen. Ofta använda är hygrometrar av instickstyp. Dessa har en precision av  $\pm 3\%$  relativ fuktighet, men kräver då täta kalibreringar. Även givare som utnyttjar längdändringen hos polyestertrådar finns. I en konstruktion av Monfore [33] omformas sedan dessa längdändringar till en elektrisk signal via en tråd som är förbunden med polyestertråden och vars resistans härigenom ändras vid varierande luftfuktighet. Givarna har en diameter på 3 mm och en precision av  $\pm 2\%$  relativ fuktighet.

Givare av s.k. Dunmore-typ är även vanliga för mätning av relativ luftfuktighet. Dessa givare bygger på elektrisk

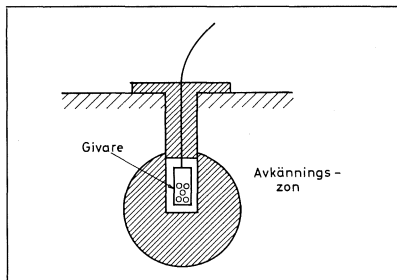


Fig. 72. Mätning av relativa fuktigheten i ett material.

resistansändring hos litiumklorid inbakat i polyvinylacetat. Givaren är så utformad att ett eller flera gap i en strömkrets överbrygges av litiumkloriden, som är mycket hygroskopisk. Givare av olika storlekar, precision och prislägen finns tillgängliga. De minsta är 3 mm i diameter och 25 mm långa. Givare som endast klarar intervall på 15–20 % kan man få med en precision av  $\pm 0,5$ –1 % relativ fuktighet. Normalt ligger precisionen på  $\pm 1,5$ –2 % relativ fuktighet. Dessa utrustningar är ofta försedda med möjlighet till temperaturmätning, vilket behövs då kalibreringen är temperaturberoende.

#### 6.4 Elektriska metoder

De elektriska metoderna för mätning av fukt i material baserar sig på mätning antingen av elektrisk ledningsförmåga eller kapacitans. Ledningsförmågan hos de flesta material ökar starkt med ökande fuktinnehåll. Den med fuktinnehållet ökande kapacitansen hos en kondensator med materialet som dielektrikum beror på att dielektricitetskonstanten för de flesta icke-metalliska material är 3–6 medan den för vatten är 75–80.

Elektriska ledningsförmågan eller resistansen mäts mellan två elektroder eller par av elektroder som slås, skruvas eller gjuts in i materialet. Med hjälp av en kalibreringskurva för just det aktuella materialet kan resistansen översättas till fuktkvot. Varierande resistanser hos samma material kan även orsakas av varierande temperatur, densitet, homogenitet och sist men icke minst av i materialet lösta salter. För att erhålla entydiga resultat är det väsentligt att elektroderna slås in lika djupt vid varje mättillfälle. Högst varierande kontakresistans mellan elektrod och material, vilket gäller bl.a. för betong, kan ge upphov till stor spridning hos mätvärdena. Detta förhållande kan man förbättra något genom att tillföra ledningspasta mellan elektrod och material. Bland byggnadsmaterialen har trä och träbaserade produkter givit de bästa resultaten vid användning av denna metod. Metoden används även på betong och bruk. Många av de ovan nämnda svårigheterna kommer då emellertid med i bilden.

Med materialet som dielektrikum kan kapacitansen hos olika

kondensatorutformningar mätas och sedan översättas till en fuktkvot. Jämförelsen mellan de båda elektriska metoderna kan sammanfattas i följande punkter:

1. Kapacitansmetoden kräver ett mera komplicerat mätinstrument.
2. Resistansmetoden har större känslighet.
3. Resistansmetoden är mer känslig för variationer i materialets sammansättning.
4. Kapacitansmetoden har större mätområde, klarar i stort sett hela området.
5. Kapacitansmetoden kräver inte kontakt med materialet.
6. Resistansmetoden har ett större temperaturberoende.
7. I motsats till resistansmetoden är kapacitansmetoden relativt okänslig för eventuell fiberriktning.
8. Kapacitansmetoden är inte lika känslig som resistansmetoden för salter och syror i materialet.
9. Vid resistansmätning dominerar det fuktigaste stället mellan elektroderna, medan kapacitansmetoden registrerar ett medeltal.
10. Missvisande resultat erhålls med resistansmetoden med torrt material intill elektroderna men fuktigt material däremellan.

Av stor betydelse vid kapacitansmätningar är frekvensen hos mätspänningen. Genom att använda en så hög frekvens som 100 MHz reduceras de elektriska ledningsförlusterna till ett minimum. Härigenom kan ett samband erhållas mellan kapacitans och fukttinhåll, som är oberoende av materialtyp. Denna typ av utrustning har ännu så länge endast använts i laboratorieförsök, där fuktkvoten hos betong i området 0–6,5 viktprocent har kunnat bestämmas med en precision av  $\pm 0,25$  viktprocent enligt Wormald & Britch [60].

Genom att gjuta in elektroderna i ett poröst, hygroskopiskt material har resistans- och kapacitansmetoderna förbättrats och många av de ovan nämnda nackdelarna eliminerats. Härvid erhålls en givare som kan gjas in eller genom ett borrhål placeras i materialet. Givaren inställer sig i ett jämviktstillstånd med det omgivande materialet. Givaren är oftast tillverkad av gips, men även kalciumaluminat, bränd lera, bruk, betong, nylon med flera material har använts. Kalibre-

ringen är tidsödande. Vid noggrann kalibrering kan i bästa fall en precision av  $\pm 2$  viktprocent erhållas. En nackdel är hysteresis mellan torkning och fuktning. En fördel är, att metoden är snabb. Dessutom är givarna robusta och har använts i mätserier som sträckt sig över 5 år.

Snabb, icke-förstörande fuktmätning kan ske med elektromagnetisk strålning med mycket höga frekvenser (300–300 000 MHz), s.k. mikrovågor. Dessa radiovågor påverkas starkt av materialets dielektriska egenskaper, vilka i sin tur som framgått av ovanstående, är beroende av fukttinnehållet. De höga frekvenserna gör att inverkan av lösta salter minimeras.

Två olika metoder har utvecklats. Den ena metoden registrerar absorptionen av mikrovågsenergi i materialet. Härvid arrangeras en sändare och en mottagare på ömse sidor om materialet. Storleken av absorptionen avläses på ett instrument. Kalibreringskurva krävs för varje material för att omvandla absorptionen till fuktkvot. Vid mätningar som gjorts på betong har en noggrannhet av  $\pm 30$  % av avläst värde erhållits.

Den andra metoden använder en resonatorkavitet som givare. Enkelt uttryckt utgörs kaviteten av en burk med ena sidan öppen. Resonansfrekvensen inställs, varefter kaviteten anbringas med sin öppna sida mot materialet. Härvid ändras resonansfrekvensen. Ändringen av resonansfrekvensen är beroende av mängden fukt i materialet inom avkänningsområdet. Fuktkvoten bestäms med hjälp av en kalibreringskurva för varje material.

## 6.5 Termiska metoder

Av kapitel 3.3.1 framgår att den termiska ledningsförmågan hos ett material ökar med ökande fukttinnehåll. En metod att bestämma den termiska ledningsförmågan i olika material är att införa en känd värmemängd och sedan mäta temperaturökningen på bestämda avstånd från värmekällan med termoelement eller termistorer. Bestämningen av ledningsförmågans variation med fuktkvoten är nödvändig för varje material och konstruktion.

Vid mätningar utförda av Vos [54] har emellertid fuktkvoten bestämts med en precision av  $\pm 1$  volymprocent i punkter



med 2 cm intervall i en tegelvägg. Metoden är okänslig för lösta salter i materialet.

## 6.6 Kärnfysikaliska metoder

De kärnfysikaliska metoderna använder sig av gamma- eller neutronstrålning, men även betastrålning har använts. Dessa metoder utmärks av relativt god noggrannhet samt en snabb och icke-förstörande fuktkvotsbestämning. De kräver emellertid separat kalibrering för varje material och är även dyra att anskaffa.

Gammastrålningen växelverkar med materialets elektroner, varvid strålningen absorberas eller sprids i materialet med lägre energi. Strålningskällan utgörs oftast av ett Cesium 137-preparat med en halveringstid på 33 år. Detektorn utgörs vanligtvis av en scintillationskristall i vilken  $\gamma$ -strålarna ger ljusblixtar. Dessa ljusblixtar omvandlas i en fotomultiplikator till elektriska impulser, som räknas. Det vanligaste mätsättet är s.k. genomstrålningsmätning, då preparat och detektor placeras på ömse sidor om materialet eller då preparatet gjuts eller borras in i materialet (Fig. 73). Härvid registreras intensitetsminskningen hos strålning med ursprunglig energi. De strålar, som sprjts i materialet, men ändå träffar detektorn, diskrimineras bort och ger inte upphov till några räkneimpulser. Intensitetsminskningen är beroende av materialets densitet. Ett ökat fukttinnehåll i ett bestämt material ger härför upphov till en större intensitetsminskning. En noggrannhet av ungefär  $\pm 0,5$  viktprocent har erhållits vid mätningar.

Neutronerna växelverkar huvudsakligen med väteatomer och ger en direkt mätning av vatteninnehållet per volymenhet. Genom kollisioner med materialets atomer bromsas snabba neutroner ned. De blir termiska (deras kinetiska energi motsvarar den termiska energin hos atomer vid rumstemperatur). Nedbromsningen blir kraftigast, då neutronerna kolliderar med atomer av samma storleksordning som de själva. Härigenom blir de särskilt känsliga för väteatomer. Neutronkällan utgöres av ett radium-berylliumpreparat. Radium emitterar  $\alpha$ -partiklar, som växelverkar med beryllium varvid snabba neutroner sändes ut. De i materialet nedbromsade

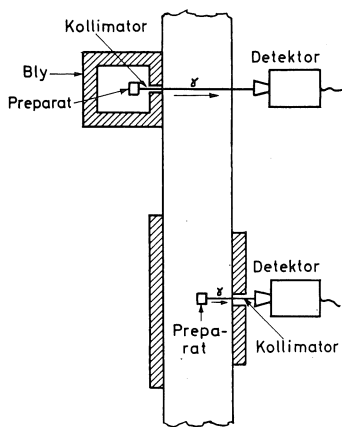


Fig. 73. Fuktmätningssätt med  $\gamma$ -strålning.

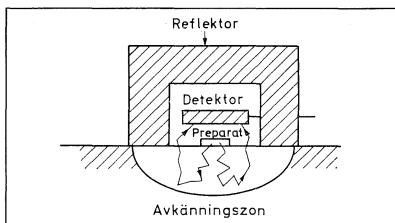


Fig. 74. Ytsond för fuktmätning med neutronstrålning.

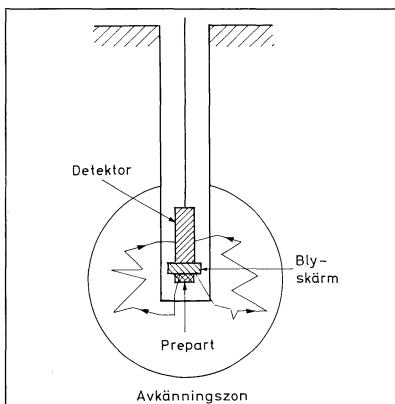


Fig. 75. Hålsond för fuktmätning med neutronstrålning.

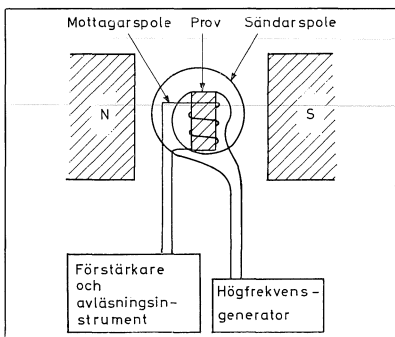


Fig. 76. Fuktmätning med hjälp av kärnspinresonansspektroskopi.

neutronerna registreras av en detektor, som är känslig endast för nedbromsade neutroner. Antalet sådana som träffar detektorn registreras av en räknare. Det antal neutroner, som återvänder nedbromsade till detektorn per tidsenhet, ökar med ökande mängd väteatomer i materialet, alltså i det närmaste med den mängd vatten, som finns i materialet. Två olika sondtyper finns i marknaden, en ytsond (Fig. 74), som har ett avkänningsdjup på ungefär 15–35 cm och en hålsond (Fig. 75), som har en avkänningszon med en diameter på  $\sim 15$  cm. De stora avkänningsområdena gör det svårare att bestämma fuktgradienter i materialet. En annan nackdel är att neutronerna känner av allt väte. Det kemiskt bundna vattnet i t.ex. betong påverkar alltså även mätningarna liksom väte bundet i organiska material. Neutronmetoden mäter fuktinnehållet i materialet per volymenhet. Med en hålsond erhålls en noggrannhet av ungefär  $\pm 1$  volymprocent.

## 6.7 Spektrometriska metoder

Mängden vatten i ett material kan mätas med hjälp av infrarödspektroskopi och kärnspinresonansspektroskopi. Dessa båda metoder är rena laboriemetoder och de erforderliga utrustningarna är dyra i inköp.

Med infrarödmetoden mäts absorptionen av elektromagnetisk strålning. I infrarödområdet uppvisar vatten utpräglade absorptionsband. Strålning med en frekvens, som ligger i sådant band, träffar materialets yta och absorberas olika mycket beroende på hur fuktigt detta är. Metoden förmår endast mäta fuktinnehållet några mm ned i materialet.

Kärnresonansmetoden (Fig. 76) bygger på att väteatomen har ett karakteristiskt kärnspin. Detta ger väteatomen ett typiskt rörelsemoment och ett bestämt magnetiskt moment. Man kan betrakta vätekärnan (protonen) som en liten magnet. I ett starkt magnetfält inrättar sig alla dessa små magneter i en viss riktning och utför här en omlopps rörelse med en viss frekvens. Genom att i det stationära magnetfältet inducera ett magnetiskt högfrekvensfält med samma frekvens som protonernas omlopps rörelse, ändras rörelseriktningen hos denna omlopps rörelse. Ändringen av rörelseriktningen medför att energi tas ifrån högfrekvensfältet. Denna energiabsorption är

proportionell mot antalet väteatomer i materialet, alltså i stort sett proportionell mot volymen vatten i materialet. Med denna metod har fuktkvoter med en precision på  $\pm 1$  volymprocent uppmätts.

*Forskningsbehov :*

*Utveckling av fuktmätningametod genom mätning av kapacitans vid höga frekvenser.*

*Utveckling av metod för mätning av fukt med hjälp av  $\gamma$ -strålning.*

# 7 Forskning rörande tillämpade fuktproblem

## 7.1 Metoder att lösa tillämpade fuktproblem

Det yttersta målet för den byggnadstekniska fuktforskningen är självfallet att producera erforderliga verktyg för att lösa förekommande tillämpade fuktproblem. Liksom ifråga om de flesta andra tillämpade forskningsproblem kan man nalkas uppgiften från två principiellt olika utgångspunkter, den teoretiska och den empiriska.

I fallet tillämpade fuktproblem skulle den teoretiska lösningsmetoden vara följande, som uppbyggs helt efter dispositionen i denna rapportens tidigare avsnitt. Med utgångspunkt från de fysikaliska lagar som gäller för de fuktmekaniska delförloppen och för samverkan mellan flera delförlopp uppställs en för det aktuella fallet gällande beräkningsmodell. Med insatta uppgifter om fuktkällor och andra klimatdata samt med införda materialkoefficienter ger beräkningsmodellen fukttillståndet i konstruktionsdelen. Gällande kriterier (tillåtna fukttillstånd) säger om det beräknade fukttillståndet kan tillåtas. Detta är en dimensionering av konstruktionsdelen med hänsyn till fuktbelastning. Schemat i Fig. 77 illustrerar tankegången.

Den empiriska lösningsmetoden (Fig. 78) utgår från byggnaden. Genom fältinventeringar, systematiskt upplagda eller i form av lång tids erfarenhet inom facket, införskaffas upplysningar om hur fukttillståndet har blivit hos vissa typer av konstruktionsdelar i byggnader. Man kompletterar ibland dessa erfarenheter med laboratorieförsök, där klimatförhållanden och andra relevanta förutsättningar så vitt möjligt efterliknas. Resultaten utnyttjas för dimensionering av nya konstruktionsdelar av studerad typ.

Den teoretiska metoden har naturligtvis stora förtjänster. Den ger möjlighet att bedöma de ingående variabelernas relativa betydelse, den kan tillämpas på nya konstruktionstyper med nya material och materialkombinationer, den kompenserar genom valet av fuktbelastning för olika geografisk lokalisering av byggnadsverken etc. Å andra sidan är det uppenbarligen orealistiskt att räkna med att fuktdimensioneringen inom överskådlig tid skall kunna genomföras helt teoretiskt. De svårigheter man har att överbrygga innan

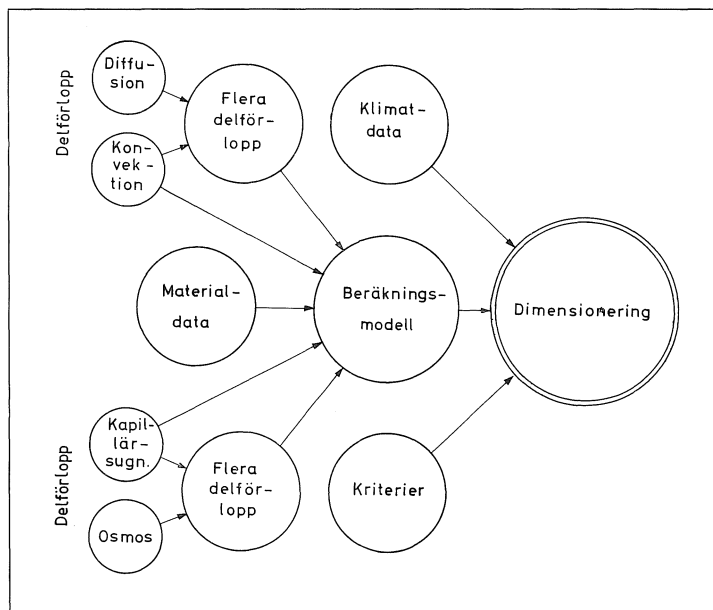


Fig. 77. Teoretisk lösning av tillämpade fuktproblem.

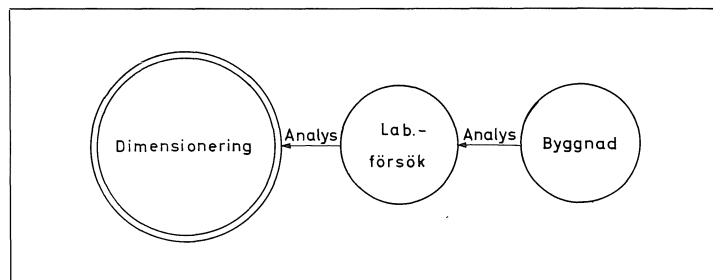
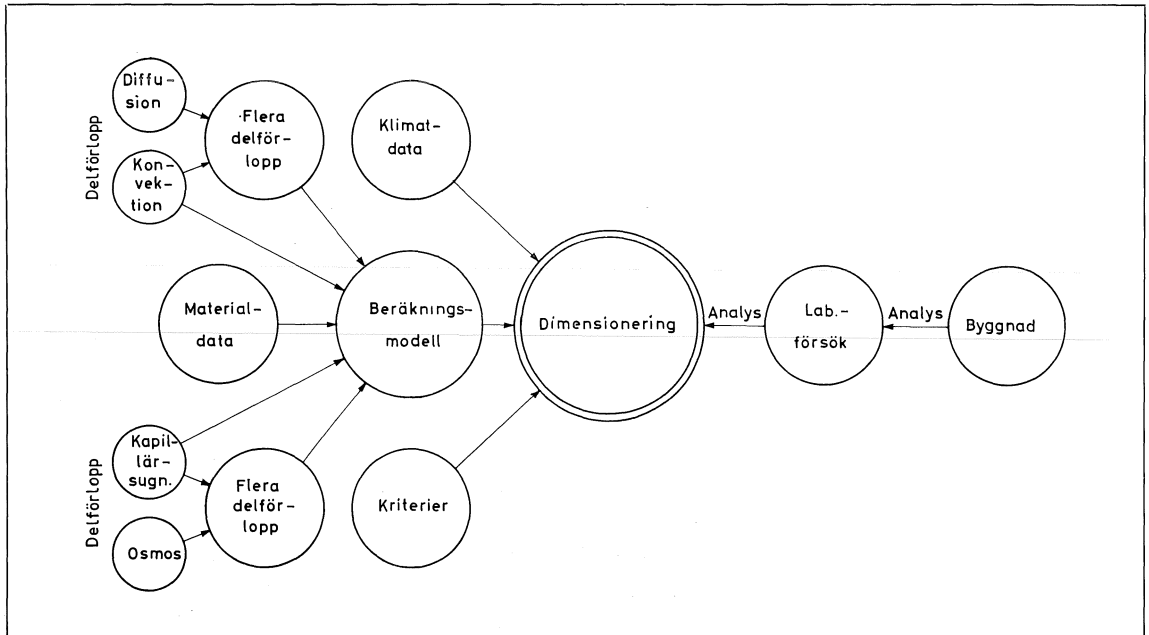


Fig. 78. Empirisk lösning av tillämpade fuktproblem.

användbara beräkningsmodeller för olika fall uppställts är mycket stora, vartill kommer helt otillräckligt underlag ifråga om materialkoefficienter, kriterier och statistik för dimensionering. Byggnadstekniken kommer därför att under mycket lång tid vara beroende av empiriska metoder för att lösa fuktproblemen. Härtill kommer att ännu så länge varje teoretisk lösning av dimensioneringsproblemet måste kontrolleras med känt erfarenhetsmaterial innan den kan accepteras. Det centrala problemet att dimensionera byggnadsdelar med hänsyn till fukt måste sålunda lösas med utgångspunkt från såväl teori som empiri enligt schemat i Fig. 79.

I avsnitt 7.2 nedan ges några exempel på tillämpade fuktproblem. I samtliga fall saknas idag i stor utsträckning underlag för en teoretisk dimensionering och man är sålunda på kort sikt hänvisad till erfarenheter och bedömningar på empiriskt underlag. En lösning enligt den teoretiska metoden borde dock vara möjlig i de behandlade fallen, och i några fall borde en sådan lösning ligga inom räckhåll.

Fig. 79. Lösning av tillämpade fuktproblem.



## 7.2 Några exempel

### 7.2.1 Bjälklag i kontakt med jord

Konstruktionen, som även kallas »platta på mark», innebär att byggnaden grundläggs så att bottenbjälklaget är i kontakt med jord och direkt kan överföra belastningar till denna. Konsekvensen är naturligtvis då att bjälklaget även står i direkt värme- och fuktkontakt med jorden.

Benämningen »platta på mark» är att hänföra till de konstruktionstyper, som var aktuella när konstruktionen introducerades för småhus i början av 1950-talet. Bjälklaget bestod då i regel av en bärande, ofta kantförstyvad betongplatta på ett dräneringslager på jord. Betongplattans översida var oftast värmeisolerad med ett undergolv av träreglar och mineralullsisolering. I samband med golvuppvärmning genom varmvattenslingor i betongplattan utelämnades oftast värmeisolerings på större delen av bjälklaget.

Eftersom teoretiskt underlag saknades var man hänvisad till erfarenheter framför allt i USA. I flera avseenden är inte dessa erfarenheter applicerbara på svenska förhållanden, och skador blev resultatet. Detta gällde i synnerhet de s.k. värmda golven, där korrosion på varmvattenslingorna ibland fick ödesdigra följder.

Under de 20 år som gått har man naturligtvis skaffat sig stor erfarenhet av denna konstruktion men denna erfarenhet är oftast av typen »det gick bra där» eller »det blev skador där». Möjligheterna att relatera resultatet till klimat, jord och konstruktionsvarianter har varit mycket små. Dessutom är bra eller dåligt ett alldeles för grovt mätinstrument för fukt. Likväl upplever man ofta bestämda uppfattningar om konstruktionsutförande, vilkas underbyggnad är milt sagt bristfällig. – »Det skall vara en plastfolie här.»

Vårt erfarenhetsmaterial är således bristfälligt och mestadels bundet till mer eller mindre outhärliga skadefall. Detta är naturligt, eftersom det innebär stora ingrepp i ett bjälklag om man skall bestämma fuktkvoten i dess olika skikt och i marken.

Vilka möjligheter har man då att teoretiskt förutse fuktförhållanden i denna typ av konstruktioner och hur stämmer teori och verklighet? Först bör man från fuktsynpunkt skilja

mellan bjälklag med

- a. vätske- och ångspärrande material på ovansidan
- b. vätske- och ånggenomsläppligt material på ovansidan.

Det förutsätts då att alt. b inte används vid vätsketillförsel ovanifrån. Alt. a förekommer som regel vid golvbeläggning med linoleum- eller plastmatta. Man kan emellertid inte diskutera fuktförhållanden utan att samtidigt studera värmeförhållanden. I detta avseende kan man skilja mellan

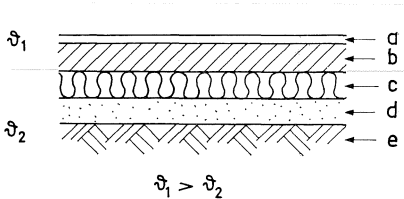
1. isoterma förhållanden dvs. ingen temperaturgradient genom bjälklag och jord
2. temperaturgradient med fallande temperatur från rum mot jord
3. temperaturgradient med stigande temperatur från rum mot jord.

Alt. 1 förekommer ofta i de zoner av bjälklaget, där värmeströmningen endast i liten utsträckning påverkas av yttre klimatförhållanden t.ex. husets centralare delar när bjälklaget där lämnas utan värmeisolering. Alt. 2 är vanligt vid bjälklag utan intern värmeförsel, där värmeströmningen sker från rummet och ut under praktiskt taget hela året. Alt. 3 förekommer periodvis vid bjälklag med intern värmeförsel (värmde golv) och vid bjälklag med underliggande värme-kulvert.

För att belysa vilka teoretiska möjligheter man har att förutsäga fuktförhållanden vid bjälklag på jord och visa vad som återstår i forskningshänseende skall här ett fall (Fig. 80) behandlas, nämligen alt. a i kombination med alt. 2 dvs. det vanliga fallet vid »platta på mark». Vi skall även studera fallet utan värmeisolering dvs. vid små temperaturgradienter och vi närmar oss då alt. 1.

I byggstadiet innehåller betongplattan betydande mängder byggfukt. Plattans överyta torkar emellertid ut mot rummet, se avsnitt 7.2.2, och i ett visst stadium anbringas golvbeläggningen. Fuktfördelningen i konstruktionen har då styrts av byggfukten och uttorkningsförloppet och man kan förvänta sig fortsatt fuktvandring i samma riktning en viss tid även om överytan fuktspärrets.

Därefter kommer fuktfördelningen efter hand att anpassas



- a Golvbeläggning (tät)
- b Bärande skikt (betong)
- c Värmeisolerande skikt
- d »Kapillärbrytande» skikt
- e Jord

Fig. 80. »Platta på mark».



till ett jämviktstillstånd bestämt av att konstruktionen genom jorden står i kontakt med en grundvattenyta. Teoretiska beräkningar av fuktfördelningens förändringar från byggstadiet till jämviktstillståndet är en komplicerad forskningsuppgift helt utanför ett normalt konstruktionsarbete. Man har dock vissa möjligheter att bedöma jämviktstillståndet.

Om man först betraktar isoterma förhållanden dvs.  $\vartheta_1 = \vartheta_2$ , så kan som nämnts detta fall representeras av en konstruktion utan värmeisoleringsskikt och där avståndet för värme-strömningen genom jorden ut i det fria är stort, dvs. en byggnads centralare delar. Värmemotståndet i jorden är då stort och temperaturfallet över bjälklaget ringa. Jämviktstillståndet för fuktfördelningen bestäms då av materialens jämviktsfukt-kurvor och grundvattenytans läge. Som visats i avsnitt 3.1.2 har varje material en jämviktsfukt-kurva angivande jämvikts-fuktkvoten vid olika porundertryck eller sughöjd.  $P$ , undertrycket uttryckt i cm vattenpelare, är lika med material-skiktets avstånd  $h$ , dvs. sughöjden ovanför grundvattenytan (Fig. 81).

Jämviktsfuktkvoten kan emellertid uppnås genom absorption eller desorption och man måste således känna till från vilket håll jämvikten uppnåtts. Gör man det skulle det således vara möjligt att med hjälp av jämviktsfuktkurvorna för materialen och dess avstånd till grundvatten bestämma det slutliga jämviktstillståndet. Sådana kurvor saknas praktiskt taget idag och man behöver bl.a. genom försök verifiera teoriernas till-

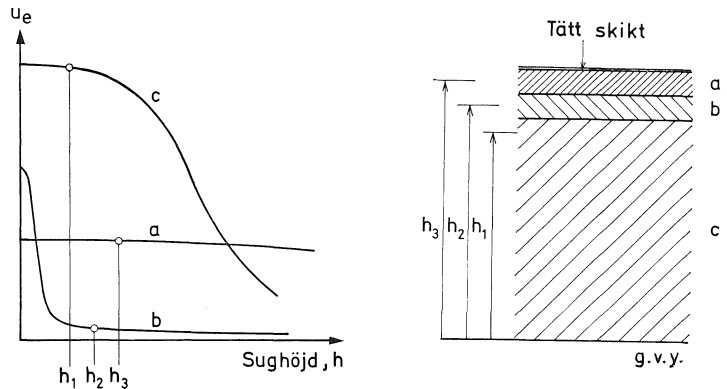
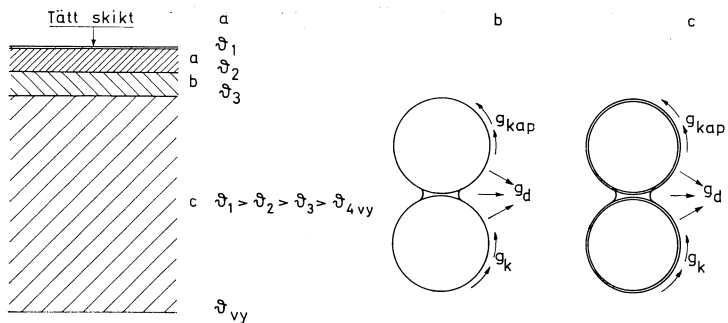


Fig. 81. Fuktkvoten i olika materialskikt som funktion av sughöjden.

Fig. 82. Temperaturfördelning i ett bjälklag på mark och fukttransport i materialets porer.



lämplighet i detta fall. Ovanstående resonemang förutsätter dessutom att alla skikt har kapillärkontakt med grundvattnet. Frågan inställer sig då om man kan införa ett kapillärbrytande skikt som verkligen bryter kapillärkontakten med grundvattnet och hur ett sådant skikt skall vara beskaffat.

Om bjälklaget värmeisolerats så erhåller man en temperaturgradient genom detsamma. Temperaturskillnaden över bjälklaget bestäms förutom av skillnaden mellan ute- och innetemperaturen, av bjälklagets resp. jordens värmemotstånd. Man får, som Fig. 82 a visar, en temperaturfördelning med fallande temperatur. Man kan då, (Fig. 82 b), tänka sig dels en kapillärtransport  $g_{kap}$  uppåt längs porväggarna p.g.a. meniskernas undertryck, dels en avdunstning till porluften och ångdiffusion i porerna. Vid fallande temperaturgradient nedåt kan då en kapillärtransport uppåt kompenseras av en ångdiffusion nedåt.

Laboratorieförsök vid Institutionen för Byggnadskonstruktionslära, LTH har bekräftat ovanstående teori. Dessa har utförts i plaströr med 30 cm diameter (Fig. 83). Grundvattenytan har lagts 5 cm under det undersökta materialet A:s undersida. Material B är grovmo, i vars porer den relativa fuktigheten är  $\phi_2 = 100\%$ . Om materialet A icke är kapillärsugande blir ånghalten i materialets övre och undre del lika, men om vatten kan kapillärtransporteras uppåt blir ånghalten högre i dess övre delar.

Relativa fuktigheten  $\phi_1$  har bestämts och för några material avsatts som funktion av  $\vartheta_2 - \vartheta_1$  i Fig. 84. Kurvan för  $\phi_1$  vid konstant ånghalt (ingen kapillärtransport) har inritats. Ett

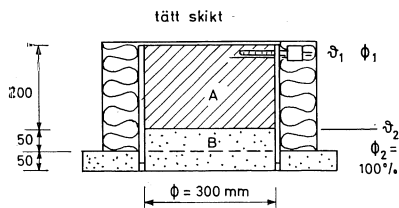
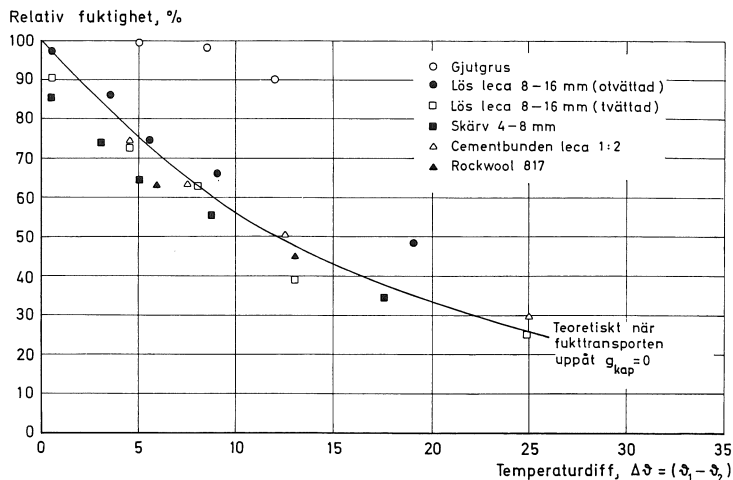


Fig. 83. Försöksuppställning för bestämning av  $\phi_1$  vid olika temperaturdifferenser.

Fig. 84.  $\phi_1$  som funktion av  $\Delta\vartheta$  för några olika material.



närmare studium av detta fenomen liksom kontrollerande praktiska försök bör ge möjligheter till konstruktionsanvisningar för bjälklag på mark.

## 7.2.2 Fukt i betonggolv

Fig. 85 visar en vanlig golvkonstruktion med ett vanligt fuktproblem. På ett undergolv av betong läggs en utjämnande spackelmassa, på vilken en plastmassa limmas.

Man vet av erfarenhet att om undergolvet är alltför fuktigt lossnar mattan från underlaget och blåsor uppstår.

En vanlig metod att indikera om läggning får ske (om undergolvet är tillräckligt torrt) är att man bestämmer fuktkvoten hos en flisa ur betongens överyta.

Denna indikeringsmetod tycks vara helt otillfredsställande. Man kan för det första konstatera att metoden ger fuktkvoten i underbetongens överyta och ingenting mer. Den ger ingen upplysning om det totala fukttillståndet i underbetongen, inte heller om det fukttillstånd som efter någon tid kommer att inställa sig i gränzonen mellan plastmatta och underlag, när mattan lagts på. Vid provtagningen ifråga råder med största sannolikhet en ojämn fuktfördelning i underbetongen, t.ex. enligt Fig. 86.

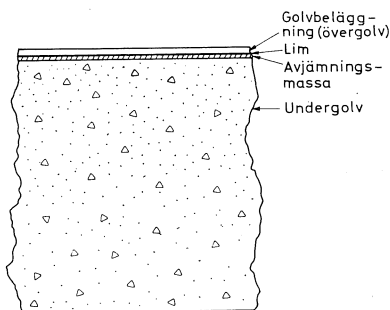


Fig. 85. Golvkonstruktion.

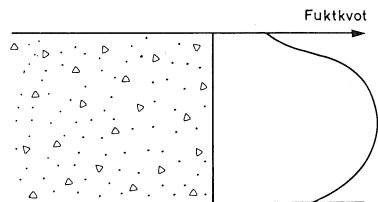


Fig. 86. Exempel på fuktfördelning i underbetong.

Fördelningen är symmetrisk eller osymmetrisk beroende på likheter eller olikheter mellan uttorkningsförhållanden vid de två ytorna. Skillnaden mellan fuktkvot vid yta och inre delar varierar med konstruktionens dimensioner, luftens relativa fuktighet, betongens kvalitet m.m. Ett prov taget vid ytan ger en missvisande bild av underbetongens fuktillstånd; detta är den första invändningen mot indikeringsmetoden. När överytan tillslutits kommer en utjämning att ske och fuktkvoten i överytan att stiga. Efter ytterligare tid, troligtvis lång tid, kommer fuktkvoten åter att minska om avdunstning kan ske genom underbetongens underyta. Denna effekt har gissningsvis liten betydelse vid sidan om effekten vid mattans påläggning.

Man kan bemöta invändningen genom provtagning på olika djup så att underbetongens genomsnittliga fuktkvot bestäms. Detta ger en bättre uppfattning om underbetongens fuktillstånd men ger ändå inte tillräcklig upplysning om vad som kommer att hända när plastmattan läggs på. När mattan har lagts på, varvid ytan blir tät, inställer sig efter en tid i gränsskiktet mellan matta och betong ett högre fuktillstånd på grund av fuktvandring från betongens inre. Detta fuktillstånd kan karakteriseras med relativa fuktigheten hos luften i hårum. Vid höga värden på relativa fuktigheten strävar mattan att utvidga sig, se Fig. 61. Samtidigt kan limmet eller spackelmassans funktionsduglighet nedsättas, vidhäftningen blir otillräcklig och mattan lossnar eller bucklar upp.

Mot bakgrund av denna problemställning är även bestämning av underbetongens genomsnittliga fuktkvot en otillfredsställande metod. Det är nämligen inte fuktkvoten hos betongen som primärt intresserar utan den mot denna fuktkvot svarande relativa fuktigheten. Beroende på betongens sammansättning (cementhalt och vct) och hydratationsgrad svarar ett och samma värde på fuktkvoten mot olika värden på relativa fuktigheten. Man måste därför känna hygroskopiska jämviktsfuktkvuran för ifrågavarande betong och med hjälp av denna översätta fuktkvot till relativ fuktighet.

En mer direkt mätmetod illustreras i Fig. 71. Man mäter härvid den relativa fuktighet som uppstår när överytan tillsluts. Om denna relativa fuktighet vid tänkt lägsta temperatur

understiger den för lim och spackelmassa högsta tillåtna, kan läggning göras.

Ett problem med denna metod är tidsförloppet, dvs. hur snabbt den mot fuktillståndet i betongen svarande relativa fuktigheten i kupan uppnås. Sedan en temporär jämvikt uppnåtts inom en troligen relativt kort tidrymd sker en långsam förändring av relativa luftfuktigheten, dels på grund av fortskridande hydratisering i betongen och dels på grund av fuktavgång eller fukttiliförsel genom underbetongens underyta.

För att man skall kunna förhandsberäkna tidpunkten för påläggning fordras kännedom om metoder att beräkna icke-stationära förlopp, i detta fall uttorkningsförlopp. För beräkning av detta förlopp krävs naturligtvis kännedom om de styrande materialkoefficienterna och om hygroskopiska jämviktsfuktkurvan för betong. Lämplig tidpunkt avgörs sedan av spackelmassans och limmets fukt känslighet och känslighet för påverkan av betongens alkali samt av plastmattans fukt-betingade rörelser.

Preliminära beräkningar och mätningar i laboratorium och fält indikerar att man normalt inte för läggning kan invänta ett fuktillstånd motsvarande  $\phi < 90 \%$ . Höga krav måste troligen därför ställas på fuktresistens hos lim och spackel-massa.

I princip samma problemställning gäller vid målning på betonggolv. Även här är man primärt intresserad av det fukt-tillstånd som kommer att uppstå omedelbart under färgfilmen, vidare av färgfilmens fukt- och alkalibeständighet. I detta fall har dock även fuktillståndet hos betongens överyta vid målningstillfället betydelse för vidhäftningsbildningen.

### **7.2.3 Kondensation i träväggar och massiva lättbetongtak**

*Träväggar.* Den numera vanligaste träväggen utgörs av en regelstomme med mellanliggande värmisolerung oftast av mineralull, invändig beklädnad av något skivmaterial eventuellt på panel och utvändigt något skivmaterial. Fasadmaterialet förutsätts i denna tillämpning utgöra en öppen beklädnad som fungerar som »regnkappa» utan att inverka på diffusionen.

Värmisolerungen måste skyddas mot blåst och mot andra

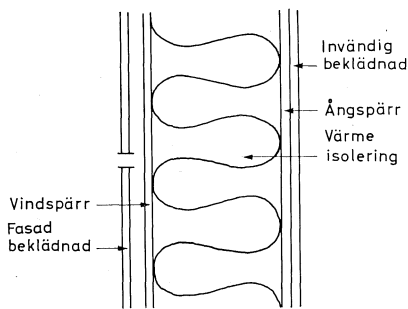


Fig. 87. Väggekonstruktion.

former av konvektion med ett vindskydd som kan utgöras av en träfiberskiva, asbestcellulosacementskiva eller papp. Detta vindskydd medför också ett visst motstånd mot diffusion, och om inga ytterligare åtgärder vidtas skulle det kunna uppstå kondensation mot vindskyddet. Man måste därför sätta en ångspärr på den varma sidan av värmeisoleringen. Konstruktionen får då det principiella utseendet enligt Fig. 87.

Ångspärren utförs vanligen av asfaltimpregnerad, ytbelagd papp eller plastfolie. Enligt SBN 67 skall ångspärren ha minst 5 ggr större diffusionsmotstånd än vindskyddet och dess permeans skall vara högst  $0,01 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$ .

Med denna konstruktion riktigt utförd har så vitt bekant inga kondensationsskador inträffat. Frågan är emellertid om säkerhetsfaktorn är onödigt stor så att den särskilda ångspärren skulle kunna slopas. Som motiv för detta har ibland åberopats att man förr gjorde träväggar med samma sorts impregnerande papp på båda sidor om värmeisoleringen utan att skador kunde konstateras. Därvid är emellertid att märka att värmeisoleringen då ofta utgjordes av kutterspån eller annat träbaserat material, som har förmågan att magasinera avsevärda kondensmängder som sedan kunde avdunsta när förhållandena blev gynnsammare.

Vidare råder det normalt undertryck inomhus i byggnader med självdragsventilation, varför uteluft med låg ånghalt sugts in genom ytterkonstruktionerna vilket motverkar diffusionen. I Norge har man byggt ett experimenthus med evakueringsfläkt. När denna kördes normalt fick man ingen kondensation i väggarna, men när fläkten kördes »åt fel håll» uppstod avsevärd kondensation. Väggarna torkade emellertid snart ut när fläkten åter kördes normalt.

Norska erfarenheter av kondensationsskador i trähus visar också att kondens oftare uppträder i den översta våningen i ett tvåvåningshus än i bottenvåningen, vilket har direkt samband med tryckförhållandena.

Ofta utförs kondensationsberäkningar med sällan förekommande kombination av låg utetemperatur och hög relativ fuktighet inomhus. De verkliga förhållandena är ofta gynnsammare, vilket kan förklara att kondensation inte förekommit i träväggar så ofta som man kunnat tro med ledning av beräkningarna.

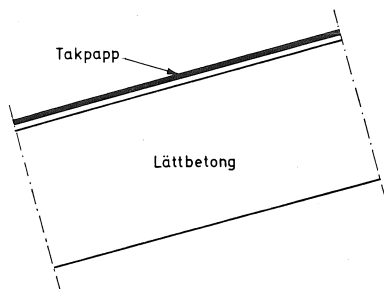


Fig. 88. Massivtak av lättbetong.

Detta talar för att den vanliga konstruktionen med ångspärr kan tänkas innebära en onödigt hög säkerhetsfaktor. Med de krav på luftkomfort som nu börjar göra sig gällande får man emellertid räkna med att allt fler byggnader kommer att utrustas med någon form av luftbefuktning. Eftersom byggnaderna byggs för att fungera ca 50 år är det därför mycket rimligt att förse träväggarna med en ångspärr, i synnerhet då kostnaden för denna är låg.

Ångspärren fungerar också som en lufttätning, vilket kan vara nödvändigt om det yttre vindskyddet skulle vara otillfredsställande utfört.

*Massiva lättbetongtak.* Lättbetongtak utförs oftast av en homogen, armerad lättbetongplatta av gasbetong eller av lättklinkerbetong, som beläggs med 2 eller 3 lag takpapp. Konstruktionen framgår av Fig. 88.

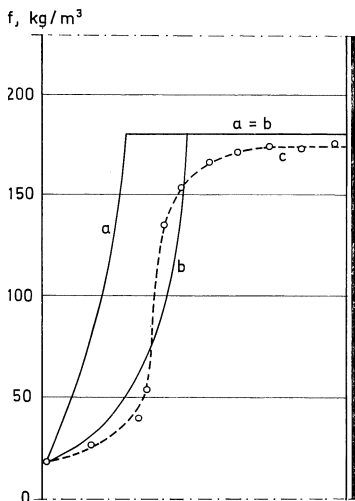
Av erfarenhet vet man att denna konstruktion fungerar väl om relativa fuktigheten i lokalen inte är alltför hög. Man vet också att takplattorna ofta levereras med tämligen hög fukthalt och att man inte får förse innerytan med någon tät beläggning som kan förhindra att byggfukten avdunstar.

Fukttekniskt kan konstruktionens verkningssätt förklaras kvalitativt på följande sätt. Takpappen kan anses vara helt tät mot vatten både i ång- och vätskefas. Under vintern får man därför räkna med att diffunderande vattenånga kan kondenseras i området under takpappen. Sommartid kommer man ofta att få högre temperatur på takets översida bl.a. beroende på sol- och himmelstrålning, varvid diffusionen går åt motsatt håll och taket torkar ut.

Det har visat sig att fukthaltsvariationerna mellan sommar och vinter är betydligt mindre än man tidigare trott. Detta torde bero på att de diffunderande ångmängderna är förhållandevis små samtidigt som materialets — åtminstone gasbetongens — fuktkapacitet är stor. En stor del av den diffunderande vattenångan binds därför hygroskopiskt och kondensationen fördröjs.

Av erfarenhet vet man också att byggfukten avgår inåt och att denna uttorkning även kan ske vintertid till en viss gräns.

Om takpappen är helklistrad direkt mot överytan blir konstruktionen även lufttät och man behöver inte räkna med



- a Teoretiskt jämviktstillstånd
- b Teoretiskt tillstånd efter 20 mån
- c Experimentella värden efter 20 mån.

Fig. 89. Fuktfordelning i gasbetongtak med tät utsida enligt Vos [56].

någon fuktkonvektion. Om man – som nu vanligen sker – använder luftspaltsbildande papp måste man på något sätt hindra den fuktigare inneluften att tränga ut, vilket annars kan medföra risk för kondensation.

För stationära yttre förhållanden – vinterförhållanden – har experimentella och teoretiska undersökningar utförts av Hansson [16] och Vos [56]. Fig. 89 visar beräknade och experimentellt funna fuktkvoter vid fuktjämvikt enligt Vos. Det tar emellertid lång tid, storleksordning år, innan denna fuktjämvikt inställer sig.

En kvantitativ beräkning för normala byggnader måste därför alltid avse icke-stationära förhållanden och sådana beräkningar kan f.n. inte utföras. Man kan därför inte säkert säga vilken relativ fuktighet inomhus som kan tillåtas. Om konstruktionen avviker från det vanliga eller om man använder material med andra egenskaper kan man inte utgå från erfarenheter utan måste kunna bedöma konstruktionen med ledning av beräkningar eller försök.

För att kunna utföra kvantitativa beräkningar måste man först känna temperaturerna inomhus och utomhus, inverkan av solstrålning samt relativa fuktigheten inomhus. Om man vidare behärskade fuktmekniken skulle man kunna förutsäga fuktillståndet i konstruktionen vid godtycklig tidpunkt.

#### 7.2.4 Inverkan av slagregn på fuktförhållanden i fasader

Slagregn på fasader kan medföra dels direkta skador i form av regngennomslag, fuktfläckar o.d., dels indirekta skador i form av försämrad värmeisolering, röta, frostsador m.m. Ojämn nedsmutsning av en fasad är vidare ofta en följd av slagregnets verkan.

Vid slagregn på fasader kan man skilja på två principiellt olika fall nämligen när fasaden består av kapillärsugande material såsom fasadtegel, puts m.m. och när den är utförd av icke kapillärsugande material, såsom plåt, glas, asbest-cement m.m.

När regn träffar en fasad av kapillärsugande material kommer först allt vatten att absorberas av fasaden.

Absorptionshastigheten minskar undan för undan och när



den blir mindre än slagregnsintensiteten kommer vatten att börja rinna utefter fasaden. Det rinnande vattnet kan nå sprickor och håligheter i fasaden, t.ex. i fasadtegelmurverk, och tränga in i detta och igenom väggen.

För att kunna bedöma fuktförhållandena i en vägg utsatt för slagregn måste man känna slagregnmängder och -intensiteter. Det räcker emellertid inte att känna normal- eller extremvärden för dessa utan man måste också känna uttorkningsbetingelserna mellan slagregnsperioderna för att kunna beräkna avdunstningen och därmed kunna bedöma fasadens fuktbalans. Fuktbelastningen är således mycket komplicerad.

Man måste vidare behärska fuktmekaniken, framförallt fukttransporten i vätskefas och uttorkningsmekanismen. Om vatten kommer att rinna utefter fasaden och tränga in i sprickor o.d. blir de geometriska förhållandena för fukttransporten mycket komplicerade.

Kriteriet på om en vägg är bra eller dålig är ganska enkelt att formulera, om man endast beaktar själva regngenomslaget. Däremot kan det vara betydligt svårare att ange vilka fuktillstånd som kan tillåtas för att undvika andra skadliga följdverkningar.

Vid fasader av icke-kapillärsugande material utgörs i regel fasadmaterialet av någon sorts skiva med mellanliggande fogar. Dessa skivor är ofta helt vattentäta och det är fogarna som utgör problem. Vatten kommer att rinna utefter skivorna till fogarna och regndropparna kan träffa och tränga in i öppna fogar.

Fogar kan i princip göras som enstegs- eller tvåstegstätningar, men kombinationer förekommer också.

Enstegstättningen kännetecknas av att regn- och vindtätning åstadkoms i samma skikt. Ofta används fogmassor eller tätningsskikt för detta ändamål. De misslyckanden som förekommit med dessa tätningar har oftast berott mera på kemisk och mekanisk förstörelse eller brister i arbetstekniken än på fuktförhållandena, även om dessa medverkat.

I en tvåstegstättning skiljer man på den regntätande och vindtätande funktionen, oftast så att man har en öppen fog utvändigt som skall avvisa vattnet och en inre lufttätning dit vatten inte får tränga in.

För att kunna utforma en sådan fog riktigt måste man känna

slagregnspårestningen. I detta fall räcker det att känna till den största slagregnsintensiteten i kombination med vindtryck samt hur vattnet rinner ned utefter fasaden.

Vattnets eventuella inträngning i fogen beror här inte så mycket på de ingående materialens fuktegenskaper utan på fogens geometriska utformning och på förekommande lufttrycksskillnader inom fogområdet. Särskild uppmärksamhet måste ägnas åt fogkryssen.

### 7.2.5 Frostbeständighet hos fasadmateri

Ytterskikten hos en fasad anrikas av fukt utifrån genom slagregn och åtföljande kapillär insugning av vatten samt inifrån genom vandring av byggfukt och av driftförhållandenas fuktproduktion. Även andra fuktanrikningsmekanismer kan förekomma. Om t.ex. fasadens ytterskikt ytbehandlas så dämpas den av slagregn orsakade fuktanrikningen. I stället kan – om ytbehandlingen är tät – kondensation inträffa mot den täta ytterytan. Kondensationen kan orsakas av inifrån kommande fukt eller av fukt som kapillärt insugits genom sprickor i ytbehandlingen i samband med slagregn.

I fasaden uppstår en fuktprofil, där fukthalten från beständighetssynpunkt lämpligen karakteriseras med begreppet vattenmättnadsgrad. Denna är enligt avsnitt 4.1.1

$$s = \frac{W_f}{W_f + I}$$

dvs. förhållandet mellan frysbar vattenmängd och tillgängligt utrymme. För fasadmaterialet finns en kritisk vattenmättnadsgrad  $s_{\text{krit}}$ , vars värde preliminärt beror på de karakteristiska egenskaperna hos materialets porsystem men även på hållfasthet och deformationsegenskaper. Den kritiska vattenmättnadsgraden kan bestämmas experimentellt, se t.ex. Fig. 57 och 58. Om nu vattenmättnadsgraden i fasaden uppgår till eller överstiger  $s_{\text{krit}}$  i ett skikt av tillräcklig tjocklek och om frysning inträffar så skadas fasadmaterialet. Beträffande skiktjtjockleken gäller att ett mycket tunt materialskikt inte skadas av frysning även om  $s \geq s_{\text{krit}}$ , eftersom is och vatten då kan avgå ur materialet vid frysning. Man kan därför även tala om en kritisk skiktjtjocklek,  $d_{\text{krit}}$ .

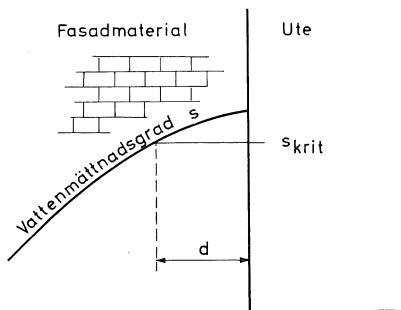


Fig. 90. Principskiss över vattenmättnadsgradens variation i en fasad. Villkor för sönderfrysning att  $s \geq s_{\text{krit}}$  i ett område  $d \geq d_{\text{krit}}$ .

Fig. 90 illustrerar en hypotetisk vattenmättnadsgradkurva i en fasad av ett poröst och sprött material. Om i detta fall  $d \geq d_{\text{krit}}$  kommer materialet i fasadytan att skadas vid frysnings.

En behandling av detta problem med den teoretiska lösningsmetoden skulle innebära att man med kännedom om aktuella temperaturförhållanden och fuktkällor, bl.a. intensitet och frekvens hos slagregn, beräknar vattenmättnadskurvan för tidsperioden senhöst–vår och undersöker om under denna tid de tre villkoren nedan gäller samtidigt

$$s \geq s_{\text{krit}}$$

$$d \geq d_{\text{krit}}$$

$$\partial_y \leq 0$$

och då föreligger en uppenbar risk för frostskada.

En enklare mer direkt metod att lösa problemet är följande.

För aktuella fasadmaterial bestäms  $s_{\text{krit}}$ . Man undersöker därefter vilken vattenmättnadsgrad  $s$  som uppnås i materialet i olika situationer. Det ligger nära till hands att bestämma  $s$  vid en längre tids kapillär sugning från fri vattenyta,  $s_{\text{kap}}$ . Om

$$s_{\text{kap}} \geq s_{\text{krit}}$$

bör materialet inte användas i fasader eller andra utsatta utomhuskonstruktioner.  $s_{\text{kap}}$  skulle med viss säkerhetsmarginal motsvara den vattenmättnadsgrad som orsakas av slagregn. Däremot ger kondensation mot tät ytteryta möjligheter till högre värden på vattenmättnadsgraden. Om man därför endast använder det enklare kriteriet ovan så måste kriteriet kompletteras med att konstruktionen inte får ge upphov till kondensation i fasadens ytterskikt.

Båda de ovan angivna metoderna förutsätter att man känner den kritiska vattenmättnadsgraden hos porösa, spröda material, vilket sålunda är en angelägen forskningsuppgift.

# 8 Fuktforskningsprogram

## 8.1 Forskningsbehov

### 8.1.1 Fuktkällor

För att kunna dimensionera en konstruktion krävs kännedom om de belastningar som konstruktionen utsätts för. Dimensionering med hänsyn till fukt fordrar därför kunskaper om de fuktpåfrestningar, som konstruktionen utsätts för från undersidan, utsidan samt insidan. En fullständig kalkyl förutsätter även att de fuktmängder som tillförs under byggnadstiden är kända. De mest komplexa belastningarna är de som verkar på byggnadens utsida. Här är inte bara de rena fuktpåfrestningarna såsom regn, slagregn och luftfuktighet utan även andra faktorer som temperatur, strålning och vind av intresse. Hela klimathöljet som omger byggnaden och dess variation med tiden är således av största betydelse.

#### *A. Direkta fuktkällor*

- a. Beräkning av luftfuktighet i rum med hänsyn till fuktproduktion och fuktkapacitet.
- b. Utveckling av metoder att förutsäga fuktillståndet i våta industrilokaler.
- c. Inventering av byggfukt.
- d. Mängd, intensitet och frekvens hos fritt slagregn i olika delar av landet samt inverkan av lokala förhållanden.
- e. Undersökning av relationen mellan fritt slagregn och fasdslagregn hos olika typer av byggnader och olika fasadutformningar. Fältundersökning och vindtunnelförsök.
- f. Bestämning av fuktillståndet som funktion av tiden från byggandet i och kring platta på mark, källare och kryp- rum.
- g. Vart tar ytvattnet vägen?

- h. Inverkan av grundvattensänkning på fuktillståndet under grundkonstruktioner.
- i. Inventering av läckageskador.

*B. Övriga erforderliga klimatdata.* Stationer bör upprättas för samtidig bestämning av alla relevanta klimatdata. Redan ett fåtal sådana stationer kan ge erforderliga upplysningar om landets klimat. I gengäld bör registrering ske mycket tätt under dygnet. Dessa data bör finnas tillgängliga på hålkort eller magnetband så att önskade upplysningar lätt kan erhållas.

### 8.1.2 Fuktmekanik

*A. Fuktfixering.* Kännedom om materialens jämviktstillstånd är nödvändig för att man skall kunna bedöma materialens egenskaper i olika miljöer. Uppgifter härom bör ingå i egenskapsredovisningen av materialet ifråga. Denna redovisning bör lösas i samarbete med berörd materialindustri.

Å andra sidan torde det vara uppenbart att man inte kan sammanställa och ajourföra jämviktsfuktkurvor för alla materialsammansättningar, materialvarianter och materialfabrikat som utbjuds på byggnadsmarknaden. En systematisk forskning bör därför utföras, syftande till utveckling av metoder att beräkna det sammansatta materialets jämviktsfuktkurva, när de ingående delmaterialens enskilda jämviktsfuktkurvor och inbördes proportioner är kända.

- a. Undersökning av den fuktmekaniska betydelsen av hydrofobering.
- b. Studium av giltighetsområdet för Thomsons formel.
- c. Studium av fuktfixering i närheten av 100 % relativ fuktighet.
- d. Bestämning och systematisering av hygroskopiska och kapillära jämviktsfuktkurvor för olika byggnadsmaterial.
- e. Studium av jämviktstillstånden hos olika material i kontakt med varandra.

*B. Fuktransport, delförlopp.* Även om transporten av fukt i ett material ej kan ses som resultatet av en enda transportmekanism är dock kännedom om de olika delförloppen nöd-

vändig för förståelsen av vad som sker. Fysiker och kemister bör därför stimuleras till grundläggande forskning om delförloppen samt samverkan mellan ett fåtal av dessa. Ökade kunskaper behövs om förlopp såsom diffusion, effusion, termidiffusion, termisk glidning, termoosmos, osmos, konvektiv ångtransport, väsketransport på grund av övertryck samt på grund av kapillärsugning.

Samverkan konvektion–diffusion, effusion–diffusion och kapillärsugning–diffusion utgör exempel på sammansatta förlopp som bör studeras ingående. Den grundläggande forskningen bör studera lagar och beräkningsmodeller, utveckla provningsmetoder för bestämning av materialkoefficienter samt bestämma dessa.

Bland forskningsbehoven om delförloppen kan ett flertal problem framläggas med direkt praktisk anknytning. Nedan anges några sådana.

- a. Diffusion under inverkan av samtidig ånghalts- och temperaturgradient.
- b. Bestämning av luftgenomsläpplighetstal för att kunna beräkna ångtransporten genom konvektion i olika material och konstruktioner.
- c. Undersökning av strömmande lufts fuktavgivande och fuktupptagande förmåga samt av dess inverkan på temperaturfältet.
- d. Undersökning av effekter vid samtidig konvektion och diffusion.
- e. Undersökning av fukttransporten i fogar och sprickor på grund av övertryck.
- f. Bestämning av materialkoefficienter vid väsketransport på grund av övertryck för vattenmättat material och material med varierande fuktillstånd.
- g. Studium av lagar och beräkningsmodeller för kapillärtransport vid begränsad och obegränsad vattentillförsel.
- h. Studium av kritisk fukthalt vid väsketransport i material.
- i. Utveckling av provningsmetoder och bestämning av materialdata i samband med väsketransport genom kapillärsugning.
- j. Grundläggande utredning beträffande inverkan av osmos vid fukttransport i material.

*C. Fukttransport, totalförlopp.* Lagar och beräkningsmodeller som sammanfattar ett flertal olika samverkande delförlopp måste uppställas. Dessa modeller bör vara så beskaffade att en fukttransportberäkning kan ske från det ena klimatet till det andra genom ett material eller en konstruktion oberoende av vad som i detalj sker i dessa.

Den fullständiga lösningen till fukttransportproblemet skall inte bara ta hänsyn till en samtidig förflyttning av vätska och ånga, vilket kan ske på flera olika sätt, utan även en transport av värme. I ett flertal olika fall kan emellertid förenklade lagar och beräkningsmodeller uppställas där approximativa lösningar kan erhållas genom att någon eller några variabler försummas.

- a. Studium av olika beräkningsmetoder, experimentell verifiering samt utarbetande av provningsmetoder och bestämning av materialkoefficienter.
- b. Studium av möjligheterna att i olika beräkningsfall separera värme- och fukttransport.
- c. Studium av permeabilitetstal för vattenånga vid hög relativ fuktighet.
- d. Fenomenologisk studie av kondensationsförloppet i konstruktioner vid stationära och icke-stationära yttre förhållanden. Kondenszonens utsträckning. Kondensatets utbredning genom kapillärsugning. Kondensation i områden med temperatur under  $0^{\circ}\text{C}$ .
- e. Bestämning av yttemperaturen med hänsyn till värmeöverföringstal för att bedöma risken för ytkondensation.
- f. Kondensationsfenomen vid strömmande luft.
- g. Studium av uttorkningsförlopp samt bestämning av materialdata.
- h. Detaljstudier av vindtryck på sådana ställen där öppningar till ventilationskanaler normalt kan finnas t.ex. vid takfot.
- i. Undersökning av strömningsmotstånd i spalter och kanaler av olika slag liksom i öppningar.
- j. Fältstudier av funktioner hos luftspalter och luftkanaler, omfattande mätning av temperatur, fuktighet och hastighet hos ventilationsluften.
- k. Noggrann kartläggning av luftspaltsproblemen från teoretisk synpunkt.

### 8.1.3 Följdverkningar av fukt

För att kunna utföra en meningsfull fuktkalkyl krävs kännedom om kriterier för fuktbelastningar hos material och konstruktioner samt hos luften i olika typer av lokaler.

*A. Materials fukt känslighet.* Det är av mycket stor vikt att fukt känsligheten hos alla byggnadsmaterial kartläggs och att fukt känsligheten testas, när nya material eller materialkombinationer förs ut på marknaden. Undersökningar skall avse materialens beständighet mot angrepp av olika slag, fukt betingade rörelser samt egenskapernas förändring med ändringar i fukt tillståndet.

- a. Kartläggning av den kritiska vattenmättnadsgraden med hänsyn till frostbeständighet hos porösa, spröda material.
- b. Kartläggning av de fukt tillstånd vid vilka biologiskt angrepp riskeras i organiska material.
- c. Tillåtna gränser för fukt tillståndet i porösa material med hänsyn till korrosion på metaller i kontakt med materialet.
- d. Nedbrytning av polymera material i fuktig miljö vid olika pH-värden.
- e. Utveckling av metoder för beräkning av de fukt betingade rörelsernas tidberoende under hänsynstagande till konstruktionens dimensioner.
- f. Kartläggning av de fukt betingade rörelserna hos plaster och plastbaserade material.
- g. Genomgående kartläggning av materialegenskapernas beroende av fukt tillståndet. De mest intressanta egenskaperna är hållfasthet, deformation under last, fukt betingade rörelser och värmeledningstal.

#### *B. Inomhusklimat*

- a. Experimentell verifiering av lämplig relativ fuktighet i olika lokaler.
- b. Hur stor del av den producerade svettmängden avdunstar i ett givet klimat?
- c. Undersökning av effekten vid alltför låg relativ fuktighet ur fysiologiska och hygieniska aspekter.

#### *C. Utseende*

- a. Nedsmutning av fasader. Orsaker, förebyggande åtgärder och rengöring.



### 8.1.4 Dimensionering

- a. Studium av möjligheterna att uppbygga rationella dimensioneringsregler baserade på fuktkällor, fuktfixering, fuktmekanik, tillåtna fukttillstånd, statistisk spridning, säkerhetsfrågor och ekonomisk optimering.

### 8.1.5 Metoder för mätning av fukt

Fuktforskningen har stort behov av lämpliga mätmetoder. Sådana metoder saknas i dag i stor utsträckning såväl för mätningar i laboratorier som i fält. Arbete bör komma till stånd för att utveckla en icke-förstörande metod för in situ-mätningar. Nedan har ett par vägar angivits som har möjlighet att ge resultat.

- a. Utveckling av fuktmätningssmetod genom mätning av kapacitans vid höga frekvenser.
- b. Utveckling av metod för mätning av fukt med hjälp av  $\gamma$ -strålning.

### 8.1.6 Forskning rörande tillämpade fuktproblem

En omfattande kartläggning är önskvärd av normal- och extremvärden hos fukttillståndet i olika byggnadskonstruktioner samt hos klimatet, som omger dessa konstruktioner. Studium av olika konstruktionstyper bör ske i fält och laboratorier. Det har emellertid ansetts onödigt att göra en katalog över alla de konstruktioner där tillämpade fuktproblem finns. Dessa problem anses för den skull inte mindre viktiga än de s.k. teoretiska problemen bland vilka det för övrigt finns ett stort antal med direkt praktisk anknytning.

## 8.2 Prioritering och forskningskostnader

I kap. 8.1 har de olika forskningsprojekt sammanfattats som anses vara angelägna och viktiga. Bland dessa har ett antal projekt eller grupper av projekt prioriterats för att utföras eller påbörjas under en första femårsperiod. Denna prioritering har gjorts med hänsyn till angelägenhetsgraden hos de olika projekten och naturligtvis med utgångspunkt från dagens kunskapsläge. I vissa fall har även sådana bedömningsgrun-

Tab. 14. Fördelning av kostnader på projekt som prioriterats till *första 5-årsperioden i miljoner kronor*.

Projekt	Kostnad
2. Fuktkällor	
A. Direkta fuktkällor	
a. Beräkning av luftfuktighet i rum under hänsyn- tagande till fuktproduktion och fuktkapacitet	0,4
d. Mängd, intensitet och frekvens hos fritt slagregn i olika delar av landet samt inverkan av lokala för- hållanden	0,5
e. Undersökning av relationen mellan fritt slagregn och fasadslagregn hos olika typer av byggnader och olika fasadutformningar	0,3
f. Bestämning av fuktillståndet som funktion av tiden från byggandet i och kring platta på mark, källare och kryprum	0,2
B. Klimatdata	
Stationer bör upprättas för samtidig bestämning av alla relevanta klimatdata	1,3
3. Fuktmekanik	
A. Fuktfixering	
c. Studium av fuktfixering i närheten av 100 % relativ fuktighet	0,4
C. Fukttransport, totalförlopp	
c. Studium av permeabilitetstal för vattenånga vid hög relativ fuktighet	
A. Fuktfixering	
d. Bestämning och systematisering av hygroskopiska och kapillära jämviktskurvor för olika byggnads- material	0,4
e. Studium av jämviktstillstånden hos olika material i kontakt med varandra	0,2
B. Fukttransport, delförlopp	
a. Diffusion under inverkan av samtidig ånghalts- och temperaturgradient	0,2
b. Bestämning av luftgenomsläpplighetstal för att kunna beräkna ångtransporten genom konvektion i olika material och konstruktioner	0,4
c. Undersökning av strömmande lufts fuktavgivande och fuktupptagande förmåga samt av dess inverkan på temperaturfältet	
d. Undersökning av effekter vid samtidig konvektion och diffusion	
e. Undersökning av fukttransporten i fogar och spric- kor på grund av övertryck	
C. Fukttransport, totalförlopp	
f. Kondensationsfenomen vid strömmande luft	0,4
B. Fukttransport, delförlopp	
f. Bestämning av materialkoefficienter vid vätske- transport på grund av övertryck för vattenmättat material och material med varierande fuktillstånd	

Tab. 14. (Forts.)

g. Studium av lagar och beräkningsmodeller för kapillärtransport vid begränsad och obegränsad vattentillförsel	}	0,8
h. Studium av kritisk fukthalt vid vätsketransport i material		
i. Utveckling av provningsmetoder och bestämning av materialdata i samband med vätsketransport genom kapillärsugning		
C. Fukttransport, totalförlopp		
a. Studium av olika beräkningsmetoder, experimentell verifiering samt utarbetande av provningsmetoder och bestämning av materialkoefficienter		0,3
b. Studium av möjligheterna att i olika beräkningsfall separera värme- och fukttransport		0,2
d. Fenomenologisk studie av kondensationsförloppet i konstruktioner vid stationära och icke-stationära yttre förhållanden. Kondenszonens utsträckning. Kondensatets utbredning genom kapillärsugning. Kondensation i områden med temperatur under 0° C.		0,3
e. Bestämning av yttemperaturen med hänsyn till värmeöverföringstal för att bedöma risken för ytkondensation		0,1
g. Studium av uttorkningsförlopp samt bestämning av materialdata		0,2
h. Detaljstudier av vindtryck på sådana ställen där öppningar till ventilationskanaler normalt kan finnas t.ex. vid takfot	}	0,3
i. Undersökning av strömningssmotstånd i spalter och kanaler av olika slag liksom i öppningar		
j. Fältstudier av funktioner hos luftspalter och -kanaler, omfattande mätning av temperatur, fuktighet och hastighet hos ventilationsluften		
k. Noggrann kartläggning av luftspaltproblemen från teoretisk synpunkt		
4. Följdverkningar av fukt		
A. Materials fukt känslighet		
a. Kartläggning av den kritiska vattenmättnadsgraden med hänsyn till frostbeständighet hos porösa, spröda material		0,3
b. Kartläggning av de fukttillstånd vid vilka biologiskt angrepp riskeras i organiska material		0,3
c. Tillåtna gränser för fukttillståndet i porösa material med hänsyn till korrosion på metaller i kontakt med materialet		0,3
d. Nedbrytning av polymera material i fuktig miljö vid olika pH		0,1
B. Inomhusklimat		0,4
C. Utseende		0,2
5. Dimensionering		0,5
6. Metoder för mätning av fukt		0,4
7. Forskning rörande tillämpade fuktproblem		2,0

Tab. 15. Fördelning av kostnader på olika huvudrubriker och underrubriker för en första 5-årsperiod i miljoner kronor.

Rubriker	Under- rubrik	Huvud- rubrik
2. Fuktkällor		2,7
A. Direkta fukt- källor	1,4	
B. Klimatdata	1,3	
3. Fuktmekanik		3,8
A. Fuktfixering	1,0	
B. Fukttransport, delförlopp	1,4	
C. Fukttransport, totalförlopp	1,4	
4. Följdverkningar		1,6
A. Materials fukt- känslighet	1,0	
B. Inomhusklimat	0,4	
C. Utseende	0,2	
5. Dimensionering		0,5
6. Metoder för mät- ning av fukt		0,4
7. Tillämpade fukt- problem		2,0
<b>Totalsumma för 5 år</b>		<b>11,0</b>

der inverkat som tillgången på forskare och institutioner, där forskningen kan bedrivas. Den uppgjorda prioriteringen får inte bromsa andra forskningsprojekt, som kan visa sig vara angelägna.

Ändrade förutsättningar, ändrad tillgång på kvalificerade forskare samt ny mätutrustning kan t.ex. aktualisera en viss forskningsuppgift vid en tidigare tidpunkt.

De prioriterade projekten återfinns i Tab. 14, där även ett försök har gjorts till en realistisk bedömning av kostnaderna för femårsperioden. Felbedömningar, även grova sådana, kan naturligtvis förekomma i de olika delbeloppen. Det synes oss emellertid som om summorna i Tab. 15 för de olika huvudrubrikerna är tämligen realistiska.

Det bör påpekas att vi valt att inte göra någon fördelning av forskningsuppgifterna på olika institutioner.

Beträffande rubriken »2.B Klimatdata» har det ansetts att två klimatstationer bör byggas under den första femårsperioden och ytterligare två snarast möjligt. I resonemangen i kap. 7 anses det vidare att en mer omfattande satsning på de tillämpade fuktproblemen bör ske först då bättre kunskap föreligger om de mera teoretiska delarna. Detsamma gäller även beträffande kap. 5 »Dimensionering», som egentligen innehåller de praktiskt mest viktiga forskningsuppgifterna.

# Referenser

- 1 Adamson, B, 1968, Fukt i bjälklag i kontakt med mark. (Tekniska högskolan i Lund, Institutionen för byggnads-konstruktionslära.) Icke publicerad rapport.
- 2 Ahlgren, L, 1966, Grundläggande lagar för fuktvandring i porösa byggnadsmaterial. (Tekniska högskolan i Lund, Institutionen för byggnadsteknik.) Intern rapport nr 2.
- 3 Bergström, S, G & Ahlgren, L, 1969, Beräkning av absorptionsisotermer för betong. (Nordiska betongförbundet.) Nordisk Betong nr 2. Stockholm.
- 4 Bergström, S, G & Wastesson, A, 1954, Cement- och Betonginstitutets ocrateringsundersökning. Studium av torkförlopp, fuktfördelning och ocrateringsdjup. (Cement- och Betonginstitutet.) Icke publicerad rapport.
- 5 Beskow, G, 1930, Om jordarters kapillaritet. (Statens väginstitut.) Meddelande nr 25. Stockholm.
- 6 Bomberg, M, 1969, Research on waterflow through building materials under isothermal conditions. (Tekniska högskolan i Lund. Institutionen för byggnadsteknik.) Preliminary report.
- 7 Cammerer, J, S, 1938, Der Wärme- und Kälteschutz in der Industrie. (Springer Verlag.) Berlin.
- 8 Cammerer, J, S, 1957, Die Berechnung der Durchfeuchtungsgefahr der Wände von Räumen mit hoher Luftfeuchtigkeit. Feuchtigkeitsregelung, Durchfeuchtung und Wärmeleitsfähigkeit bei Baustoffen und Bauteilen. (Wilhelm Ernst & Sohn.) Berlin.
- 9 Cammerer, J, S, 1963, Die kapillare Flüssigkeitsbewegung in porösen Körpern. (VDI.) Forschungsheft 500, Ausgabe B, Band 29. Düsseldorf.

- 10 Croiset, M, 1968, L'hygrotechnique dans le bâtiment. (Eyrolles.) Paris.
- 11 Davis, R, E & Davis, H, E, 1931, Flow of concrete under the action of sustained loads. (American Concrete Institute.) Proceedings vol. 27. Detroit.
- 12 Gemmel, C, 1961, En undersökning av rumsluftens relativa fuktighet. Från byggforskningens front. (Chalmers Tekniska Högskola.) Festskrift till Hjalmar Granholm. Göteborg.
- 13 Glaser, H, 1959, Graphisches Verfahren zur Untersuchung von Diffusionsvorgängen. (Verlag C. F. Müller), Kältetechnik nr 10. Karlsruhe.
- 14 Hagman, F, 1957, Icke traditionella ytterväggar i hyreshus. (Statens nämnd för byggnadsforskning.) Rapport 41. Stockholm.
- 15 Halvorsen, U, A, 1966, Korrosion och kalkurlakning vid sprickor i betongkonstruktioner. (Tekniska högskolan i Lund. Institutionen för byggnadsteknik.) Bulletin 1. Lund.
- 16 Hansson, R, 1957 och 1958, Fukt i ytterväggar och yttertak. (Byggmästarens förlag.) Byggmästaren 36: 1957 och 37: 1958. Stockholm.
- 17 Hoppestad, S, 1955, Slagregn i Norge. (Norges Byggnadsforskningsinstitut.) Rapport nr 13. Oslo.
- 18 Johansson, C, H, 1944, Fuktighetens absorption och vandring i byggnadsmaterial. (Ingenjör förlaget.) Teknisk Tidskrift, okt. Stockholm.
- 19 Johnson, A, I, 1953, Strength, Safety and Economical Dimensions of Structures. (Statens nämnd för byggnadsforskning.) Stockholm.
- 20 Joy, F, A & Wilson, A, G, 1965, Standardization of the dish method for measuring water vapour transmission. (Reinhold publishing corporation.) Humidity and Moisture. Vol. 4. New York.
- 21 Krischer, O & Rohnalter, H, 1940, Wärmeleitung und Dampfdiffusion in feuchten Gütern. (VDI.) Forschungsheft 402. Düsseldorf.
- 22 Krischer, O, 1941, Wärmeleitung und Dampfdiffusion in Kälteschutzstoffen. (Verein Deutscher Ingenieure), Wärme- und Kältetechnik nr 1, årg. 3. Düsseldorf.

- 23 Krischer, O, 1963, Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. (Springer Verlag.) Berlin.
- 24 Lewis, W, K, 1922, The evaporation of a liquid into gas. (American society of mechanical engineers.) Transactions 44. New York.
- 25 Lundgren, S, Å, 1967, Träskivor som byggnadsmaterial. Del 1. Akademisk avhandling vid Tekniska högskolan i Lund (LTH.) Nyköping.
- 26 Lund-Hansen, P, 1967, Fukttransport i byggmaterialer. (Danmarks tekniske højskole. Laboratoriet for varmeisolering.) Meddelelse nr 15. Köpenhamn.
- 27 Luikow, A, V, 1966, Heat and Mass Transfer in Capillary-porous Bodies. (Pergamon Press Ltd.) Oxford.
- 28 Lykow, A, W, 1958, Transporterscheinungen in kapillarporösen Körpern. (Akademie Verlag.) Berlin.
- 29 Lück, W, 1964, Feuchtigkeit. (R Oldenburg.) München-Wien.
- 30 Löfstedt, B, E, 1965, Inomhusklimatets fysiologi och hygien. (Statens institut för byggnadsforskning.) Rapport 24. Stockholm.
- 31 Meyer, F, V & Nielsen, K, F, C, 1957, Svind hos beton. (Nordiska betongförbundet.) Nordisk Betong 2. Stockholm.
- 32 van Minnen, J & Vos, B, M, 1965, Distribution and transport of water in porous materials. (Institute TNO for building materials and building structures.) Report No. II-8.
- 33 Monfore, G, E, 1963, A small Probe-Type Gage for Measuring Relative Humidity. (PCA.) Journal of the PCA Research and Development Laboratories. Skokie, Ill.
- 34 Nevander, L, E, 1964, Fuktproblem. (Byggmästarens förlag.) Handboken. Bygg 3:e uppl. Band IV, kap. 612. Stockholm.
- 35 Nevander, L, E, 1968, Fuktproblem i byggnader med befuktad luft. (AB Lättbetong.) Lättbetong 3. Stockholm.
- 36 Nielsen, A, 1968, Krypning hos högtrycksånghärdad gasbetong. (Tekniska högskolan i Lund. Institutionen för byggnadsteknik.) Bulletin 4. Lund.

- 37 Penner, E, 1965, Suction and its use as measure of moisture contents and potentials in porous materials. (Reinhold publishing corporation.) Humidity and Moisture. Vol. 4. New York.
- 38 Pihlajavaara, S, E, Notes on the drying of concrete. (State institute for technical research.) Report. Series III-Building 74. Helsinki.
- 39 Philip, J, R & de Vries, D, A, 1957, Moisture movement in porous materials. (The American geophysical union.) Transactions 38. Washington.
- 40 Purins, E, 1964, Lättbetong, bestämning av hållfasthet och några inverkanse faktorer. (Chalmers tekniska högskola. Institutionen för byggnadsteknik.) Göteborg.
- 41 Purins, E, 1969, Jämviktsfukten vid olika relativa luftfuktigheter och av fuktändringen i materialet orsakade deformationer hos olika byggnadsmaterial. (Chalmers tekniska högskola. Institutionen för byggnadsteknik.) Göteborg.
- 42 Ronge, H, 1961, Bostadsklimat i murverkshus och betonghus. (Statens råd för byggnadsforskning.) Handlingar 38. Stockholm.
- 43 Rose, D, A, 1963, Water movement in porous materials. Part 2. (British Journal of applied physics 14.) London.
- 44 Ruettgars, A, Vidal, E, N & Wing, S, P, 1935, An investigation of the permeability of mass concrete with particular reference to Boulder Dam. (ACI.) Proceedings vol. 31. Detroit.
- 45 Saare, E & Jansson, I, 1961, Measurement of thermal conductivity of moist porous building materials. (RILEM.) Symposium on light weight concrete. Göteborg.
- 46 Schirmer, R, 1938, Die Diffusionszahl von Wasserdampf-Luftgemischen und die Verdampfungsgeschwindigkeit. (Z VDI.) Beiheft Verfahrenstechnik 6. Düsseldorf.
- 47 Schoefield, R, K, 1935, The pF of water in soil. (Transaction of 3rd international congress of soil science.) No. 2. Oxford.
- 48 Sneek, T, 1961, Korrosion av järn och stål ingjutet i betong. (Nordiska betongförbundet.) Nordisk Betong 1. Stockholm.



- 49 Thunell, B, 1960, Trä, dess byggnad och felaktigheter. 2 uppl. (Byggstandardiseringen.) Stockholm.
- 50 Tveit, A, 1964, Fukt og fukttransport i poröse materialer. (Norges byggforskningsinstitut.) Rapport 39. Oslo.
- 51 Tveit, A, 1966, Measurement of moisture sorption and moisture permeability of porous materials. (Statens institut för byggnadsforskning.) Rapport 8. Stockholm.
- 52 Varnbo, B, 1966, Slagregn. (Svenska Riksbyggen.) Handling nr 14. Stockholm.
- 53 Voigt, H, Krischer, O & Schauss, H, 1940, Die Feuchtigkeitbewegung bei der Verdunstungstrocknung von Holz. (Springer Verlag.) Holz als Roh- und Werkstoff 3, p. 305–311. Berlin.
- 54 Vos, B, H, 1965, Non-steady-state method for the determination of moisture content in structures. (Reinhold publishing corporation.) Humidity and Moisture. Vol. 4. New York.
- 55 Vos, B, H, 1965, Theoretical and experimental investigation into the termo-hygric behaviour of a cavity wall. Moisture problems in buildings. (RILEM/CIB.) Proceedings from symposium. Helsinki.
- 56 Vos, B, H, 1967, Condensation in structures. (TNO.) Report BI-67-33. Delft.
- 57 Vos, B, H & Tammes, F, 1968, Flow of water in liquid phase. (TNO.) Report BI-68-38. Delft.
- 58 Warris, B, 1963, The influence of air-entrainment on the frost-resistance of concrete. (Svenska forskningsinstitutet för cement och betong.) Handlingar 35. Stockholm.
- 59 Whiteside, T, M & Sweet, 1950, Effect of water saturation in concrete freezing and thawing tests. (Highw. Res. Board.) Proc. Washington.
- 60 Wormald, R & Britch, A, L, 1969, Methods of measuring moisture content applicable to building materials. Building Science 3. Oxford.

Be- teck- ning	Benämning och definition	SI-enhet	Annan enhet och omräk- ningstal
<i>a</i>	temperaturledningstal	m <sup>2</sup> /s	3600 m <sup>2</sup> /h
<i>A</i>	yta	m <sup>2</sup>	
<i>B</i>	Biots tal, $B = \frac{\beta \cdot d}{k_p}$		
<i>c</i>	vattenånghalt, $c = \frac{m_v}{V}$	kg/m <sup>3</sup>	1000 g/m <sup>3</sup>
<i>C</i>	fuktpotential, $C = \frac{u - u_e}{u_o - u_e}$	1	
<i>C</i>	kapacitans	F	
<i>C<sub>p</sub></i>	specifikt värme vid konstant tryck	J/kg · grad	239 · 10 <sup>-6</sup> kcal/ kg · grad
<i>C<sub>1</sub></i>	kapillaritetstal, $G = C_1 \cdot \sqrt{t}$	kg/m <sup>2</sup> · s <sup>1/2</sup>	3,6 · 10 kg/m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup>
<i>d</i>	tjocklek	m	
<i>D</i>	diffusionskonstant för vattenånga i luft	m <sup>2</sup> /s	
<i>f</i>	fukthalt, $f = \frac{m_w}{V_{\text{torr}}}$	kg/m <sup>3</sup>	
<i>F</i>	fri energi	J	0,239 kcal
<i>Fo</i>	Fouriers tal, $Fo = \frac{k_p \cdot t}{d^2}$	1	
<i>g</i>	fuktfloedestäthet	kg/m <sup>2</sup> · s	3,6 · 10 <sup>6</sup> g/m <sup>2</sup> · h
<i>g</i>	tyngdkraftens accelera- tion	m/s <sup>2</sup>	

(Forts.)

Be- teck- ning	Benämning och definition	SI-enhet	Annan enhet och omräk- ningstal
$G$	fuktproduktion	kg/s	$3,6 \cdot 10^6$ g/h
$G$	fuktmängd per ytenhet	kg/m <sup>2</sup>	$10^3$ g/m <sup>2</sup>
$h$	sughöjd, stighöjd	m	
$H$	höjdskillnad	m	
$k$	permeabilitetskoefficient för vatten, $g = -\frac{k}{\eta} \cdot \frac{dP}{dx}$	kg/m	
$k$	värmegenomgångstal	W/m <sup>2</sup> · grad	0,86 kcal/m <sup>2</sup> · h · grad
$k_a$	luftgenomsläpplighet, $L = -k_a \cdot \frac{dP}{dx}$	m <sup>4</sup> /N · s	$3,54 \cdot 10^4$ m / h · mm vp
$k_p$	proportionalitetskoeffi- cient relaterad till potentialen C	m <sup>2</sup> /s	3600 m <sup>2</sup> /h
$k_u$	proportionalitetskoeffi- cient relaterad till fuktkvoten $g = -k_u \cdot g \cdot \frac{du}{dx}$	m <sup>2</sup> /s	3600 m <sup>2</sup> /h
$k_{vc}$	permeabilitet för vatten- ånga, $g = -k_{vc} \cdot \frac{dc}{dx}$	m <sup>2</sup> /s	3600 m <sup>2</sup> /h
$k_{vp}$	permeabilitet för vatten- ånga, $g = -k_{vp} \cdot \frac{dp}{dx}$	kg · m/N · s	$4,8 \cdot 10^8$ g/m <sup>2</sup> · h · mmHg
$k_w$	proportionalitetskoeffi- cient relaterad till potentialen w, $g = -k_w \cdot \frac{dw}{dx}$	m <sup>2</sup> /s	3600 m <sup>2</sup> /h
$K_{vc}$	permeans för vattenånga	m/s	3600 m/h
$K_{vp}$	permeans för vattenånga	kg/N · s	$4,8 \cdot 10^8$ g/m <sup>2</sup> · h · mmHg

(Forts.)

Be- teck- ning	Benämning och definition	SI-enhet	Annan enhet och omräk- ningstal
$l$	molekylens fria medel- väglängd	m	
$l$	luftfylld porvolym	$\text{m}^3/\text{m}^3$	
$L$	genomströmmande luftmängd	$\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$	$3600 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$
$m$	massa	kg	
$m$	motståndstalet vid kapillärtransport, $t = m \cdot h^2$	$\text{s}/\text{m}^2$	$0,28 \text{ h}/\text{m}^2$
$M$	molekylvikt	kg/kmol	
$n$	ventilation		1/h
$N$	nederbörden på horisontell yta	kg/ $\text{m}^2$	
$p$	vattenångans partial- tryck	$\text{N}/\text{m}^2$	$7,5 \cdot 10^{-3} \text{ mmHg}$
$P$	tryck	$\text{N}/\text{m}^2$	$10,2 \cdot 10^{-6}$ $\text{kp}/\text{cm}^2$
$P_o$	atmosfärtryck	$\text{N}/\text{m}^2$	
$P_k$	porundertryck, kapillär- undertryck	$\text{N}/\text{m}^2$	
$q$	värmeflöde	$\text{W}/\text{m}^2$	$0,86 \text{ kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$
$r$	kapillärradie	m	
$r$	ångbildningsvärme	J/kg	$0,24 \cdot 10^{-3}$ $\text{kcal}/\text{kg}$
$R$	allmänna gaskonstanten	J/kmol · K	$0,24 \cdot 10^{-3}$ $\text{kcal}/\text{kmol} \cdot \text{K}$
$R$	elektrisk resistans	$\Omega$	
$s$	vattenmättnadsgrad $s = \frac{W_f}{W_f + 1}$	1	
$S$	slagregnmängd	kg/ $\text{m}^2$	
$t$	tid	s	h
$T$	absolut temperatur	K	
$u$	fuktkvot, $u = \frac{m_w}{m_{\text{tot}} - m_w}$	kg/kg	viktprocent

(Forts.)

Be- teck- ning	Benämning och definition	SI-enhet	Annan enhet och omräk- ningstal
$v$	hastighet	m/s	
$V$	volym	m <sup>3</sup>	
$w$	kapillärpotential, $w = \frac{P_k}{\rho} + g \cdot h$	J/kg	0,24 · 10 <sup>-3</sup> kcal/kg
$W$	vattenmängd	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	1000 l/m <sup>3</sup>
$x$	längdkoordinat		
$x$	vatteninnehåll, ångkvot, $x = \frac{m_v}{m_{\text{tot}} - m_v}$	kg/kg	
$\alpha$	värmeövergångstal	W/m <sup>2</sup> · grad	0,86 kcal/m <sup>2</sup> · h · grad
$\beta$	fuktövergångstal	m/s	3600 m/h
$\delta$	temperaturledningsfaktor	J/kg · grad	0,24 · 10 <sup>-3</sup> kcal/kg · grad
$\epsilon$	töjning	1	%
$\epsilon$	ytspänningens tempera- turkoefficient, $\epsilon = \frac{d\sigma}{d\theta}$	N/m · grad	10 <sup>3</sup> dyn/cm · grad
$\eta$	dynamisk viskositet	Ns/m <sup>2</sup>	10 dyn · s/cm <sup>2</sup>
$\vartheta$	temperatur	° C	
$\theta$	randvinkel	rad	57,4 grader
$\lambda$	värmeledningstal	W/m · grad	0,86 kcal/m · h · grad
$\rho$	densitet	kg/m <sup>3</sup>	10 <sup>-3</sup> g/cm <sup>3</sup>
$\sigma$	ytspänning	N/m	10 <sup>3</sup> dyn/cm
$\sigma$	spänning	N/m <sup>2</sup>	10,2 · 10 <sup>-6</sup> kp/cm <sup>2</sup>
$\phi$	relativ fuktighet, $\phi = \frac{c}{c_s}$	1	100 %
$\psi$	mättningsgrad, $\psi = \frac{x}{x_s}$	1	

(Forts.)

---

Index

---

<i>a</i>	luft
<i>a</i>	absorberad
<i>d</i>	diffusion
drag	dragning
<i>e</i>	jämvikt
<i>f</i>	frysbar
<i>g</i>	tyngdkraft
<i>i</i>	inne
<i>k</i>	konvektion
<i>k</i>	kritisk (i samband med fukt)
kap	kapillär
kond	kondensation
kr	krypning
krit	kritisk (i samband med frost)
<i>m</i>	medeltal
<i>o</i>	begynnelsestillstånd
part	partial
<i>r</i>	regn
<i>s</i>	mättnad
<i>s</i>	strålning
torr	torr (vid 105° C)
tot	total
<i>u</i>	ute
<i>v</i>	ånga
<i>v</i>	vägg
<i>w</i>	vatten
<i>y</i>	ytteryta

---

Institutionerna för byggnadskonstruktionslära, byggnadsmateriallära och byggnadsteknik I skulle ungefär samtidigt planera sin forskning och undervisning vid den nya Tekniska Högskolan i Lund. Initiativet togs till föreliggande programutredning om behovet av byggnadsteknisk fuktforskning. Utredningen har finansierats genom anslag från Statens råd för byggnadsforskning.

I utredningen behandlas fuktproblemen i analogi med hållfasthetstekniska problem. Huvudmomenten i skriften är fukt-källor, fuktmekanik, tillåtna fuktillstånd och dimensionering. Vidare behandlas metoder för mätning av fukt samt kortfattat några tillämpade fuktproblem.

Programskriften innehåller slutligen en förteckning över forskningsuppgifter och beräknade kostnader för de projekt som ansetts vara så angelägna att de bör igångsättas under den närmaste femårsperioden.

Pris 18 kronor

Distribution: Svensk Byggtjänst  
Box 1403, 111 84 Stockholm

**Programskrift 12**

Statens råd för byggnadsforskning