



LUND UNIVERSITY

Putsens inverkan på fasadens fuktbalans

Sandin, Kenneth

1980

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Sandin, K. (1980). *Putsens inverkan på fasadens fuktbalans*. [Doktorsavhandling (monografi), Avdelningen för Byggnadsmaterial]. Avd Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola.

Total number of authors:

1

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.

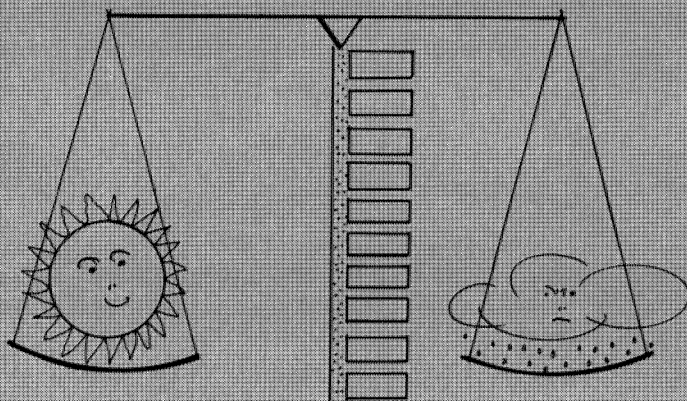
LUND UNIVERSITY

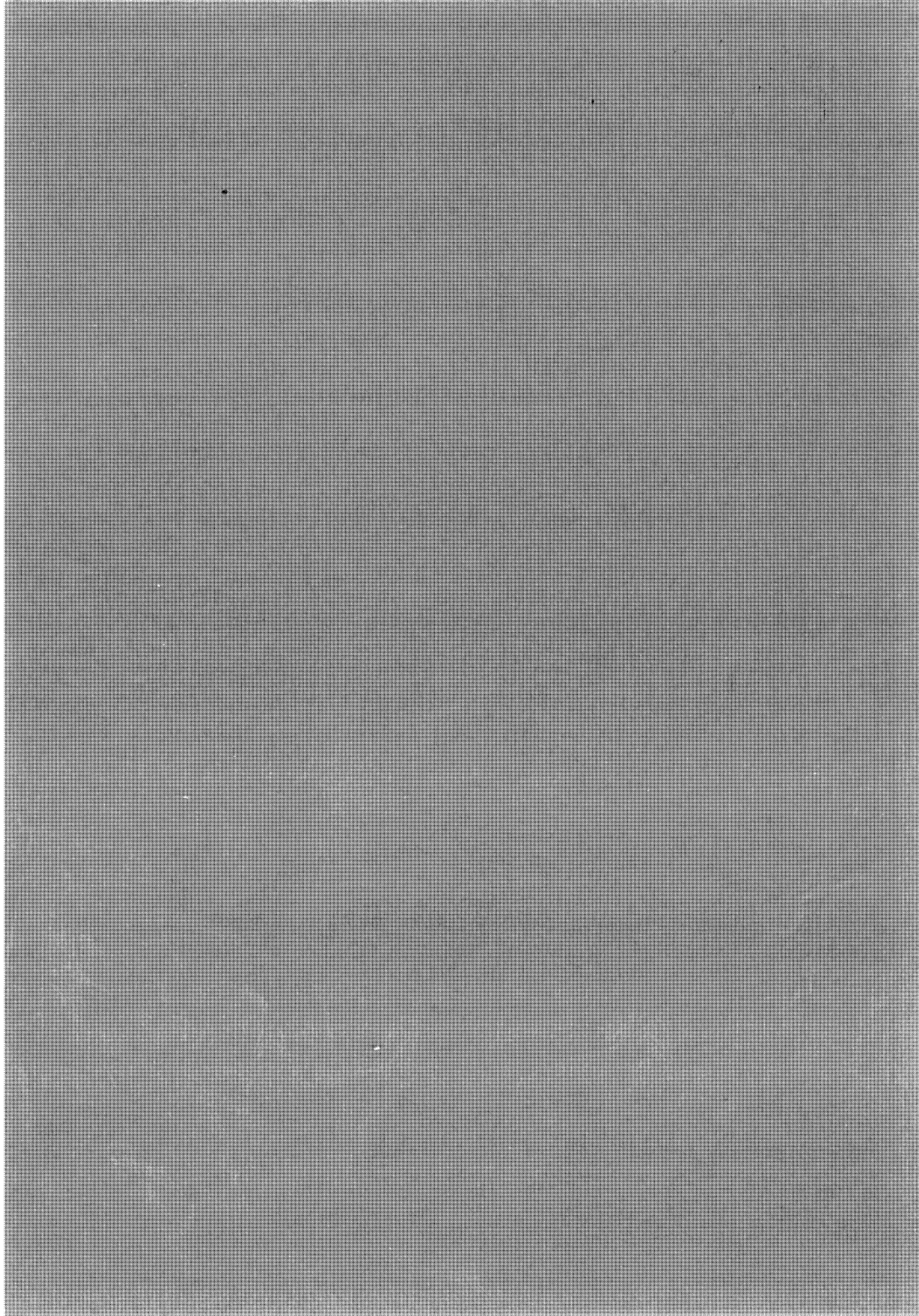
PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

PUTSENS INVERKAN PÅ FASADENS FUKTBALANS – DELRAPPORT I-VIII

THE EFFECT OF THE RENDERING ON THE MOISTURE BALANCE OF THE FACADE – SUB REPORT I-VIII

KENNETH SANDIN

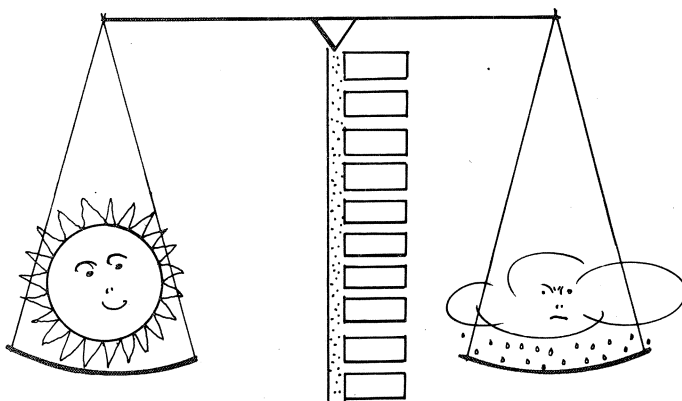




PUTSENS INVERKAN PÅ FASADENS FUKTBALANS – DELRAPPORT I-VIII

THE EFFECT OF THE RENDERING ON THE MOISTURE BALANCE OF THE FACADE – SUB REPORT I-VIII

KENNETH SANDIN



Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 740269-8 från Statens råd för byggnadsforskning till avdelningen för byggnadsmateriallära, Tekniska högskolan i Lund.

I N N E H Å L L

BETECKNINGAR/LIST OF SYMBOLS	2
FÖRORD	5
SAMMANFATTNING	7
SUMMARY	9
Delrapport I : LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR Syfte, variabler och material	
Delrapport II : FUKTMÄTNINGSMETODER	
Delrapport III : FUKTJÄMVIKT	
Delrapport IV : FUKTTRANSPORT I ÅNGFAS	
Delrapport V : FUKTTRANSPORT I VÄTSKEFAS	
Delrapport VI : UTTORKNING	
Delrapport VII : FUKTMEKANIK I SAMBAND MED SLAGREGN	
Delrapport VIII : FUKTENS INVERKAN PÅ ENERGIFÖRLUSTERNA	

BETECKNINGAR / LIST OF SYMBOLS

I största möjliga utsträckning har SIS-normerade symboler använts. I brist på sådana har traditionella eller nya symboler använts. Tyvärr leder detta till att samma symbol i vissa fall används för att beteckna olika saker.

B	kapillaritetstal / water absorption coefficient	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{s}})$
D	diffusionskoefficient / diffusivity	m^2/s
F	kraft / force	N
G	uppsugen vattenmängd / water absorbed	kg/m^2
I	strålning / radiation	W/m^2
K	flödeskoefficient, allmänt / coefficient of flow	-
M	molekylvikt / weight of molecule	kg/kmol
M	specifikt flödesmotstånd i ett poröst material / specific resistance of flow in a porous material	$\text{Ns}/(\text{kg} \cdot \text{m})$
M_0	flödesmotstånd i kapillärrör / resistance of flow in a capillary tube	$\text{Ns}/(\text{kg} \cdot \text{m})$
P	tryck / pressure	N/m^2
P_c	porvattenundertryck / suction	N/m^2
P_v	ånggenomsläpplighet / vapour permeability	m/s
R	elektrisk resistans / electrical resistance	Ω
R_1, R_2	krökningsradie / curvature radius	m
T	temperatur / temperature	K
Z_v	ånggenomgångsmotstånd / diffusion resistance	s/m
a	fuktgradient / moisture gradient	$\text{vikt-\%}/\text{m}$
a	vattentillförsel (slagregns-) intensitet / water supply intensity	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
a	elektrodradie / radius of electrodes	m

c	koncentration, allmänt / concentration, general	kg/m ³
d	tjocklek / thickness	m
d	avstånd mellan elektroder / distance between electrodes	m
g	fuktfloedestäthet / density of moisture flow rate	kg/(m ² ·s)
g	avdunstnings (uttorknings-) hastighet / intensity of evaporation (drying out)	kg/(m ² ·s)
g	tyngdacceleration / acceleration of free fall	9.81 m/s ²
h	kapillär stighöjd / capillary rise	m
i	infallsvinkel / inclination angle	-
l	längd / length	m
n	antal / number	-
p	vattenfylld porandel / waterfilled porosity	-
p	partialtryck / partial pressure	N/m ²
p _s	mättnadstryck / pressure at saturation	N/m ²
q	energiflödestäthet / density of energi flow rate	W/m ²
r	radie / radius	m
r	reflexionsfaktor / factor of reflection	-
r	ångbildningsvärme / heat of evaporation	Ws/kg
s	vattenmättnadsgrad / degree of water saturation	-
t	tid / time	s
t _{film}	tid tills vattenfilm bildas / time until a water-film is formed on a surface	s
u	fuktkvot / moisture content	vikts-%
u _{kap}	fuktkvot vid kapillärmättnad / moisture content at capillary saturation	vikts-%
u _{kr}	kritisk fuktkvot med avseende på kapillärtransport / critical moisture content with respect to capillary flow	vikts-%
v	hastighet / velocity	m/s

v	ånghalt / vapour concentration	kg/m ³
v _S	mättnadsånghalt / maximum vapour concentration	kg/m ³
w	fukthalt / moisture content	kg/m ³
x	längdkoordinat / coordinate of length	m
z	längdkoordinat / coordinate of length	m
α	absorptans / absorption coefficient	-
α	värmeövergångskoefficient / surface coefficient of heat transfer	W/(m ² ·°C)
β	ångövergångskoefficient / surface coefficient of mass transfer	m/s
δ	diffusionskoefficient i poröst material / coefficient of diffusion in a porous material	m ² /s
δ _v	ånggenomsläpplighetskoefficient / coefficient of vapour conductivity	m ² /s
η	dynamisk viskositet / dynamic viscosity	Ns/m ²
ϑ	temperatur / temperature	°C
φ	randvinkel / angle of contact	-
λ	värmeledningsförmåga / coefficient of thermal conductivity	W/(m·°C)
μ	diffusionsmotståndsfaktor / diffusion resistance factor	-
ρ	densitet / density	kg/m ³
ρ _w	vattens densitet / density of water	kg/m ³
σ	ytpänning / surface tension	N/m
σ	elektrisk konduktivitet / electrical conductivity	1/(Ω·m)
τ	friktionskraft/ytenhet / friction force/unit area	N/m ²
φ	relativ luftfuktighet (RF) / relative humidity (RH)	%
ψ	potential, allmänt / potential, general	-

FÖRORD

Föreliggande rapport är en redovisning av ett forskningsprojekt, som bedrivits vid avdelningen för Byggnadsmateriallära vid Lunds Tekniska Högskola under tiden 1975-80. Projektet har i huvudsak finansierats av Statens Råd för Byggnadsforskning genom BFR-anslaget 740269-8 "Putsens samverkan med underlag och ytskikt ur fuktsynpunkt".

Under 1974 genomfördes ett mindre programarbete för att försöka systematisera forskningsbehovet. Härvid framkom att fuktproblemet ansågs vara det helt dominerande i samband med putser och ytskikt. Med utgångspunkt från detta programarbete beslöts att problemet "fukt i samband med putser och ytskikt" skulle studeras.

I ett tidigt skede visade det sig att det skulle vara praktiskt taget omöjligt att studera de direkta följdverkningarna av fukten utan att först i detalj analysera de grundläggande fuktmekaniska sambanden för putsade väggar. Projektet har därför främst inriktats på dessa grundläggande fuktmekaniska samband. Med utgångspunkt från dessa studier blir det sedan förhoppningsvis enklare att i framtiden studera de direkta och ofta skadliga följdverkningarna av fukten, exempelvis fröst- och saltvittring.

För att slutredovisningen skall bli så användbar som möjligt för olika läsarkategorier är den uppdelad på två rapporter, dels en huvudrapport (Sandin, K, 1980, Putsens inverkan på fasadens fuktbalans - Huvudrapport. (Avd. f. byggnadsmateriallära. Tekniska högskolan i Lund.) Rapport TVBM-1004, Lund.) och dels en sammanställning av ett antal delrapporter (föreliggande publikation). Huvudrapporten är en allmän redogörelse av problemet med fukt i samband med putsade fasader. Där ges inga detaljbeskrivningar av utförda försök eller teoretiska resonemang. Detta görs i stället i föreliggande rapport.

Föreliggande publikation består av åtta olika delrapporter. I den första delrapporten beskrivs bland annat olika material som använts i de egna laboratorieundersökningarna. I den andra delrapporten beskrivs ett antal praktiskt användbara fuktmätningssmetoder. I de övriga delrapporterna behandlas olika fuktmekaniska delproblem i samband med putsade fasader.

När nu forskningsprojektet slutredovisas i samlad form vill jag framföra ett varmt tack till ett stort antal personer som deltagit i projektet på olika sätt. Först och främst tackar jag professor Arne Hillerborg, avdelningschef vid Byggnadsmateriallära. Trots att jag ideligen har utvidgat den ursprungliga projektplanen, med tillhörande tidsfördröjning, har han hela tiden bistått med ett mycket aktivt stöd och givande diskussioner.

Under senare delen av projektet har en referensgrupp varit knuten till projektet. Referensgruppen, som består av Anders Engwall, Arne Hillerborg, Lars-Erik Nevander, Sven Person, Vitold Saretok och Lars-Erik Wargsjö, har lagt ned ett förtjänstfullt arbete vid projektets genomförande, vilket jag är mycket tacksam för. Det är min förhoppning att referensgruppen kvarstår och engagerar sig på samma sätt i den fortsatta putsforskningen.

Hela personalstyrkan vid Byggnadsmateriallära har på ett eller annat sätt deltagit i forskningsprojektet. Leif Erlandsson och Sture Sahlén har, förutom att de svarat för utveckling och tillverkning av all utrustning, på ett mycket inspirerande sätt deltagit i diskussioner och planläggning av olika försök. De har alltid funnits till hands, oberoende av veckodag och klockslag.

Större delen av de praktiska laboratorieundersökningarna har utförts av Lennart Andersson, Ingemar Larsson och Bo Johansson.

Vid figurritning och utskrift av föreliggande rapport har ett stort antal medarbetare varit engagerade. Huvuddelen av rapporten har gjorts av Britt Andersson (figurritning), Mona Hammar (figurritning och utskrift), Birgitta Hellström (figurritning och utskrift), Anni-Britt Nilsson (utskrift) och Birgit Olsson (utskrift).

Till alla ovanstående och till många andra, både medarbetare vid LTH och utomstående, framför jag mitt mycket varma tack.

Lund, mars 1980

Kenneth Sandin

SAMMANFATTNING

Detta arbete behandlar putsens inverkan på fasadens fuktbalans. Huvudvikten är lagd på det fuktmekaniska händelseförloppet i samband med olika fukt-källor.

Arbetet redovisas i två rapporter. I föreliggande rapport, som är en sammanställning av åtta olika delrapporter, ges detaljbeskrivningar av olika laboratorieförsök och teoretiska resonemang. I den andra rapporten ges en allmän beskrivning av hela problemområdet puts-fukt.

I delrapport I redovisas syftet med de egna laboratorieundersökningarna, använda material och randvillkor.

I delrapport II diskuteras först olika sätt att mäta fukt. Därefter beskrivs ett antal mätmetoder som är praktiskt användbara i samband med putsade fasader.

I delrapport III behandlas fuktjämvikt, d v s fukttinnehållets beroende av omgivningen. Bland annat diskuteras porstrukturens betydelse för jämviktsfukttinnehållet. Vidare redovisas ett antal jämviktsfuktkurvor

I delrapport IV behandlas fukttransport i ångfas. Först beskrivs olika transportmekanismer och en beräkningsmetod för bedömning av kondensrisk. Därefter diskuteras olika metoder att mäta ånggenomsläpligheten. Slutligen redovisas ett antal egna mätningar, varvid den stora inverkan av använd provnings- och utvärderingsmetod poängteras.

I delrapport V behandlas fukttransport i vätskefas. En stor del av delrapporten ägnas åt teoretiska resonemang om fuktflöde i olika enkla porer och i praktiska material, både enskilda och sammansatta. Även förhållandena vid sprickor i täta ytskikt diskuteras. Härefter diskuteras olika sätt att mäta kapillärsugningsegenskaperna hos putser. Slutligen redovisas ett antal egna mätningar.

I delrapport VI behandlas uttorkningsförloppet. Först diskuteras uttorkningen ur teoretisk synvinkel, både för enskilda material och materialkombinationer. Härefter redovisas ett antal mätningar av uttorkningsförloppet. Mätningarna avser både medelfukttinnehåll och fuktprofiler under uttorkningen. Slutligen diskuteras inverkan av uttorkningsklimat och putsens egenskaper.

I delrapport VII behandlas fuktförhållandena i samband med slagregn. Först beskrivs det totala fuktmeکانiska händelseförloppet, med utgångspunkt från den teoretiska behandlingen i övriga delrapporter. Den stora betydelsen av sambandet mellan egenskaperna hos puts och underlag betonas. En viss puts på två olika underlag ger helt olika resultat. I delrapporten beskrivs vidare en slagregnsapparat och en elektrisk fuktmätningmetod, vilka använts i ett antal mätningar av fuktförhållandena vid slagregn. Dessa mätningar har gjorts både vid enstaka slagregn och vid flera cykliskt återkommande slagregn. Mätningar har gjorts av både medelfukttinnehåll och fuktprofil. Delrapporten avslutas med en diskussion om inverkan av olika putser och underlag samt klimat. Härvid konstateras bland annat att sambandet mellan egenskaperna hos puts och underlag har en avgörande betydelse. Som exempel kan nämnas att tegel och gasbetong ger ett likartat resultat så länge de är oputsade. Med puts, till exempel en kalkcementputs, får gasbetongen ett högre fukttinnehåll vid cykliskt återkommande slagregn. Tegel får däremot ett lägre fukttinnehåll .

I delrapport VIII behandlas ett exempel på följdverkning av fukten, nämligen det ökade energiflödet genom en fuktig yttervägg. Avdunstningsenergin, dvs den energi som åtgår för att torka ut väggen efter ett slagregn, och som normalt inte beaktas vid energibalansberäkningar, ägnas stor uppmärksamhet. Ett antal beräkningsexempel redovisas och kommenteras.

SUMMARY

This work deals with the effect of renderings on the moisture balance in facades. The main theme is the moisture mechanism concerning with different moisture sources.

The work is published in two reports. In this report, which is a summary of eight different sub-reports, all laboratorial investigations and theoretical discussions are described in detail. The other report is a general description of the subject "Moisture in connection with renderings".

Sub-report I deals with the purpose of the laboratorial investigations and with different materials and climates used in these investigations.

Sub-report II deals with different methods of measuring moisture in situ and in the laboratorium.

Sub-report III deals with moisture equilibrium. The effect of pore structure on the moisture equilibrium is discussed and some moisture equilibrium curves are shown.

Sub-report IV deals with moisture transport in the vapour phase. Different mechanisms of vapour transport and a method for estimating the risk of condensation are described. Different methods of measuring vapour permeability are discussed. Finally some results from measurements of vapour permeability are given. The great effect of the test- and evaluation-methods in connection with this is emphasized.

Sub-report V deals with moisture transport in the liquid phase. Theoretical considerations regarding moisture flow in different pores and materials are described in detail. The effect of cracks in a tight surface coating is also discussed. Finally some results from the laboratorial tests are shown.

Sub-report VI deals with drying out. Theoretical discussions and different kind of measurements are described. Results from measurements of mean moisture content and moisture profile during drying out are shown. Finally the effect of different climates and renderings are discussed.

Sub-report VII deals with the moisture conditions in connection with driving rain. In the first sections the total course is described from a theoretical point of view. This is done with references to the results in sub-report III-VI. The great effect of the relationship between the properties of the rendering and the underlayer is accentuated. A certain rendering on two different underlayers can produce quite different results. In a later section

a driving rain machine and an electrical method for measuring moisture conditions, used in the laboratorial tests, are described. Measurements have been carried out during single periods of rain and during cyclic rains. Both mean moisture content and moisture profile have been measured during and after the rains. Finally the effect of different renderings, underlayers and climates are discussed. This is exemplified with rendering on aerated concrete and on clay brick. Without any rendering these underlayers are similar where driving rain is concerned. When applying a LC-rendering to them, they will become quite different. The moisture content increases in aerated concrete whereas it decreases in clay brick.

Sub-report VIII deals with the effect of moisture on the energy losses through an outer wall. Great attention is paid to the energy needed to dry the wall. Some calculations are carried out.

Avdelningen för Byggnadsmateriallära
Tekniska Högskolan i Lund

PUTSENS INVERKAN PÅ FASADENS FUKTBALANS

Delrapport I : LABORATORIEUNDERSÖKNINGAR
Syfte, variabler och material

Lund i mars 1980

Kenneth Sandin

Denna delrapport hänför sig till forskningsanslag 740269-8 från Statens Råd för Byggnadsforskning till avdelningen för Byggnadsmateriallära, Tekniska Högskolan i Lund. Hela projektet slutredovisas i en huvudrapport och åtta delrapporter.

INNEHÅLL

1	INLEDNING.....	I:2
2	SYFTE.....	I:3
3	PRINCIPIELL DISKUSSION AV VARIABLER.....	I:4
3.1	Putser och ytskikt.....	I:4
3.2	Underlag.....	I:4
3.3	Slagregnsbelastning och uttorkningsklimat.....	I:5
4	MATERIAL OCH PROVKROPPSTILLVERKNING.....	I:6
4.1	Underlag.....	I:6
4.2	Putser/ytskikt.....	I:6
	LITTERATUR.....	I:8
	TABELLER.....	I:9
	FIGURER.....	I:11

1. INLEDNING

I aktuellt projekt har ett stort antal laboratorieundersökningar genomförts, vilka redovisas i de övriga delrapporterna.

I denna delrapport beskrivs först det övergripande syftet med alla laboratorieundersökningar. Därefter diskuteras valet av olika material och randvillkor. Slutligen detaljredovisas de material som använts i laboratorieundersökningarna.

I de övriga delrapporterna ges inga materialbeskrivningar. Där används endast en "identifierande" beteckning, vilken refererar till beskrivningen i denna delrapport. Med begreppet KC-bruk avses alltså enbart det kalkcementbruk som definieras i denna delrapport. Med begreppet gasbetong avses på samma sätt enbart den gasbetong som definierats här, d.v.s. Siporex utan vattenavvisande tillsats, densiteten 510 kg/m^3 och tillverkad i Dalby 1975.

2 SYFTE

Syftet med de egna undersökningarna är att fylla en del av de kunskapsluckor som finns i samband med putser/ytskikt. Enligt projektbeskrivningen är projektets målsättning "att klargöra hur puts och ytskikt påverkar väggens fuktillstånd". Litteraturstudier och diskussioner innan projektet fick sin slutliga utformning visade att de största kunskapsbristerna fanns i samband med slagregn. Av denna anledning har huvuddelen av undersökningarna inriktats på just fuktillståndet under och efter ett eller flera slagregn.

Exempel på frågor som försöken skulle ge svar på var

- Hur mycket vatten tas upp under ett regn?
- Hur snabbt torkar detta vatten ut?
- Hur långt in i väggen tränger vattnet?
- Hur ser fuktprofilen ut?
- Är de traditionella provningsmetoderna riktiga?

Även om undersökningarna är gjorda för att studera förhållandena vid slagregn så skall resultaten vara användbara även i samband med andra fukt-källor, exempelvis byggfukt, markfukt och inifrån kommande vattenånga.

För att uppfylla målsättningen enligt ovan har stor vikt lagts vid fuktmekniken i samband med puts/ytskikt och underlag, samt vid analysen av vilka faktorer som har stor betydelse för fuktförhållandena.

Syftet med undersökningarna var alltså ej att bestämma materialdata för en mängd olika putser och underlag utan snarare att kunna bedöma uppträdande fuktillstånd om material- och klimatdata var kända. I samband härmed skulle även relevanta provningsmetoder anvisas. Med utgångspunkt från erhållna resultat blir det sedan förhoppningsvis enklare att i framtiden studera de direkta följdverkningarna av fukten.

Den grundläggande filosofin bakom ovanstående inriktning av laboratorieundersökningarna var att man måste börja med en analys av de fuktmekaniska sambanden, innan man kan anvisa riktiga provningsmetoder eller studera konsekvenserna av fukten. När de fuktmekaniska sambanden är kända, kan man sedan utarbeta provningsmetoder, som tillämpas på ett stort antal putser.

3 PRINCIPIELL DISKUSSION AV VARIABLER

3.1 Putser och ytskikt

Det avgörande vid valet av puts/ytskikt var att fuktegenskaperna skulle vara (eller förväntas vara) olika. Detta gäller både de enskilda materialen och kombinationen av olika material. Vidare fanns kravet att putserna skulle vara av den typ som används i praktiken.

Ovanstående krav gav omedelbart två olika grupper av putser/ytskikt, nämligen organiska tunnputser respektive oorganiska tjockputser. Bland de organiska tunnputserna valdes med utgångspunkt från ER-blad två organiska tunnputser med olika fuktegenskaper.

För tjockputserna var antalet tänkbara varianter mycket stort. För att begränsa antalet varianter, beslöts att enbart brukstyp och i viss mån putsuppbyggnad skulle varieras. Någon variation av blandningsproportionerna för samma brukstyp har inte gjorts. För att renodla inverkan av olika brukstyper har främst enskiktsbehandlingar med respektive brukstyp använts. De brukstyper som använts är K-, KC-, C- och M-bruk. För att studera inverkan av putsuppbyggnad användes även grundning och KC-puts samt en traditionell treskiktsbehandling med grundning, utstockning och rivputs.

För att studera inverkan av en lokal skada på de organiska putserna har på vissa provkroppar en konstgjord spricka gjorts. Denna gjordes genom att med kniv skrapa bort putsen till en bredd av ca 1 mm längs hela provkroppen.

Exakta data för putser/ytskikt redovisas i kap 4.

3.2 Underlag

Vid val av underlag uppställdes samma krav som för puts/ytskikt, nämligen olika fuktegenskaper och vanligt förekommande. Med samtidig hänsyn till strävan att begränsa antalet underlag valdes endast två olika underlag med stora skillnader i fuktegenskaper, nämligen tegel och gasbetong. Tegel har stora porer och suger vatten snabbt men har liten "sugkraft". Gasbetong är finporöst (bortsett från de inaktiva luftblåsorna) och suger vatten sakta men har stor "sugkraft".

Exakta materialdata redovisas i kap 4.

3.3 Slagregnsbelastning och uttorkningsklimat

Kravet på slagregnsbelastning och uttorkningsklimat var att de i Sverige vanligaste förhållandena skulle efterliknas. Vid uppläggningsprogrammet var slagregnsdata dåligt kända. Enligt Varnbo (1966) varierade det fria slagregnet mellan 30 och 400 kg/m².år och antal slagregnsdygn mellan 50 och 150. Vidare uppgavs att 50-90 % av alla regn hade en totalmängd understigande 2 kg/m². Slagregnsintensitetsdata fanns knappt redovisade överhuvudtaget. Egna mätningar (Sandin, 1974) hade dock visat att "normala" fasadslagregn mot en stor byggnad i Vadstena hade intensiteten 0.1-0.2 kg/m².h medan "kraftiga" regn hade intensiteten 0.6-0.7 kg/m².h.

I laboratorieundersökningarna har slagregnsintensiteterna valts mellan 0.2 och 1.5 kg/m².h. Varaktigheten hos slagregnen har varierats mellan 1 och 24 timmar.

Under slagregnen har inget övertryck applicerats över putsen. Anledningen till detta är att syftet har varit att undersöka själva putsens inverkan och då saknar övertryck betydelse. Övertrycket har betydelse främst vid vattenavvisande impregneringar, sprickor och helt vattenmättade väggar.

Uttorkningsklimatet har valts till i huvudsak 20°C och 65-70% RF. Vidare har vind och solstrålning använts i vissa fall. Vindhastigheten valdes till 2-3 respektive 5-6 m/s medan inverkan av solstrålning efterliknades genom att bestråla putsytorna med IR-lampor, så att yttemperaturen blev 35-40°C. Den valda vindhastigheten är något lägre än de vanligast förekommande medan solstrålningens inverkan torde vara ungefär den som förekommer i praktiken.

Exakta data på slagregn och uttorkningsklimat redovisas i anslutning till redovisningen av respektive försöksresultat.

4 MATERIAL OCH PROVKROPPSTILLVERKNING

4.1 Underlag

Som underlag har gasbetong och tegel använts. Gasbetong, i vilken fuktmätning gjorts med ingjutna elektroder, har tillverkats i specialformar vid Siporexfabriken i Dalby (se delrapport II). Övrig gasbetong är tagen från den löpande produktionen vid samma fabrik. All gasbetong (7 cm isolerblock 500) är levererad vid samma tidpunkt (1975). All tegel är levererad vid samma tidpunkt (1975) från AB Kaniks tegelfabrik och har beteckningen "rött borstat massivtegel".

Porositet, densitet och kapillaritetstal för de olika underlagen redovisas i TAB. I:1.

Porositeten har bestämts genom att porerna fyllts med vatten under vakuum. Porositeten erhålls då genom

$$\text{porositet} = \frac{\text{upptagen vattenmängd från torrt tillstånd}}{\text{volym}} \cdot 100$$

Med denna metod bestäms enbart den öppna porositeten, eftersom slutna porer ej kan fyllas med vatten.

Densiteten har bestämts genom

$$p = \frac{\text{torrvikt}}{\text{volym}}$$

Volymerna, i samband med porositets- och densitetsbestämningarna, har bestämts genom att väga provkropparna i luft respektive nedsänkta i vatten. Skillnaden mellan dessa vikter ger volymen. (Härvid förutsättes att vattnets densitet är 1000 kg/m³)

Kapillaritetstalet har bestämts enligt delrapport V.

4.2 Puts/ytskikt

I TAB. I:2 redovisas samtliga i undersökningen ingående putser/ ytskikt. De organiska tunnputserna levererades helt färdigblandade från respektive leverantör. Grundningsbruk och bruk till ytputsen i puts 11 var färdigblandat torrbruk. Övriga bruk blandades i laboratoriet. Ballasten till

bruk har en korngradering enligt FIG. I:1.

All blandning har skett i en frifallsblandare och vatten har tillsatts till lämplig konsistens. Blandningstiden har varit 10-15 minuter. Innan putsning har alltid underlaget borstats noggrant och förvattnats. Puts/ytskiktappliceringen har skett med putsspruta (Putzmeister tratt-pistol), genom påslagning för hand eller med pensling. Tidsprogrammet för putsning och lagring redovisas i TAB. I:3.

Efter ca 2 månaders lagring i 65% RF och 20⁰C har den slutliga bearbetningen av provkroppar skett. Denna bearbetning har bestått i att mindre provkroppar utsågats ur de putsade blocken respektive tegelstenarna samt att sidorna fuktisolerats med en epoxifuktspärr (Sansol). Den slutliga behandlingen av provkropparna beskrivs utförligare i samband med beskrivningen av de olika försöken.

Putsernas/ytskiktens fuktegenskaper, bestämda enligt ER-nämndens metoder, redovisas i TAB. I:4.

LITTERATUR

ER-nämnden, 1968, Provningsmetoder för ytskiktmaterial för putsat och oputsat murverk, likvärdiga underlag samt betong. ER-nämndens rapport nr 3:68, Stockholm.

Sandin, K, 1974, Fukt-och temperaturundersökning i Vadstena klosterkyrka. (Institutionen för byggnadsteknik, LTH.) Rapport 50. Lund.

Varnbo, B, 1966, Slagregn. (Svenska Riksbyggen.) Handling nr 14. Stockholm.

TAB. I:1. Materialdata för underlag.

Material	Anm	öppen porositet %	densitet kg/m ³	kapillaritetstal kg/m ² · √s
Gasbetong	med ingjutna elektroder	79-80	530-540	0.07
Gasbetong	standardblock	80-81	510-530	0.08
Tegel		25	1980	0.10

TAB. I:2. Redovisning av använda putser/ytskikt.

Puts	Litt	Bindemedel	Bruksbeteckning	Pålagd mängd kg/m ²	Tjocklek mm	Applikeringsmetod	Öppen porositet %	Densitet kg/m ³
Utän puts	1							
KC-puts	2	Kalkcement C	KC-C 100/650	-	10	sprutning	25-28	1850-1950
K-puts	3	Släckt murkalk E	K 100/800	-	10	sprutning	28-36	1600-1850
C-puts	4	Std-cement	C 100/425	-	10	handpåslagning	27-30	1800-1950
M-puts	14	Murcement A	M-A 100/600	-	10	handpåslagning	29-32	1800-1900
Grundning	5	Kalkcement	Serponit Rödgrund (KC 10/90/350)	-	2	sprutning	-	-
KC-puts		Kalkcement	KC-C 100/650	-	10	sprutning	25-28	1850-1950
Primer	6	"Kiselharts"	Ken-Dri	"våt yta"	-	pensling	-	-
Org.tunnputs		Alkyd	Kenitex EH	1.0	-	pensling	-	-
KC-puts	7	Kalkcement C	KC-C 100/650	-	10	sprutning	25-28	1850-1950
Primer		"Kiselharts"	Ken-Dri	"våt yta"	-	pensling	-	-
Org.tunnputs		Alkyd	Kenitex EH	0.9	-	pensling	-	-
Primer	8	"Kiselharts"	Ken-Dri	"våt yta"	-	pensling	-	-
Org.tunnputs		Alkyd	Kenitex EH	1.0	-	pensling	-	-
Skada		Skadan erhöjls genom att med kniv göra en 1 mm bred "repa" över hela provkroppen						
Org.tunnputs	9	Vinylacetat/vinylkaprat	Sandtex Fin	1.1	-	pensling	-	-
Org.tunnputs	10	Vinylacetat/vinylkaprat	Sandtex Fin	1.1	-	pensling	-	-
Skada		Skadan erhöjls genom att med kniv göra en 1 mm bred "repa" över hela provkroppen						
Grundning	11	Kalkcement	Serponit Rödgrund (KC 10/90/350)		2	sprutning	-	-
KC-puts		Kalkcement	KC-C 100/650		10	sprutning	25-28	1850-1950
Org.ytputs		Kalkcement	Serponit rivputs (KC 50/50/650)		7	sprutning	25-28	1900-2000

TAB. I:3. Tidsprogram för putsning och lagring.

PUTS	DAG 1	DAG 2	DAG 3	DAG 4	DAG 5	DAG 6	DAG 7	DAG 8	DAG 9-60
2	V-U-F			R					
3	V-U-F			R					
4	V-U-F			R					
14	V-U-F		R						
5	V-G-F				V-U-F			R	
6	P-Y-R								
7	V-U-F			R			P-Y-R		
8	P-Y-R								
9	Y-R								
10	Y-R								
11	V-G-F				V-U-F	V-Y-F		R	

V = Vattning
 G = Grundning
 U = Utstockning
 Y = Ytputs
 P = Primer-behandling
 F = Lagring i 100% RF, 20°C
 R = Lagring i 65% RF, 20°C

TAB. I:4. Fuktegenskaper hos puts/ytskikt enligt ER-metod.

Puts/ytskikt	Genomsläpplighet för fukt $\cdot 10^{-3}$ m/s (g/m ² ·h·mmHg)		Genomsläpplighet för vatten under tryck μ/m ² ·h		
	Torrmetod	Vätmetod	0-30 min	30-90 min	efter 90 min
2	0,10 (0,36)	2,3 (8,6)	5	1,1	-
3	0,14 (0,53)	0,9 (3,3)	6	1,2	-
4	0,017 (0,06)	0,6 (2,1)	4	1,4	-
5	0,05 (0,17)	1,2 (4,4)	6	1,0	-
6	0,014 (0,05)	0,04(0,15)	0,20	0,04	0,01
7	0,008 (0,03)	0,02(0,07)	0,06	0,01	0,01
8	0,03 (0,12)	0,07(0,26)	1,0	0,5	-
9	0,014 (0,05)	0,35(1,3)	0,20	0,08	0,04
10	0,04 (0,14)	0,35(1,3)	1,8	0,9	-
11	0,08 (0,29)	2,5 (9,2)	8	1,3	-
14	0,07 (0,24)	2,5 (9,1)	5	1,0	-

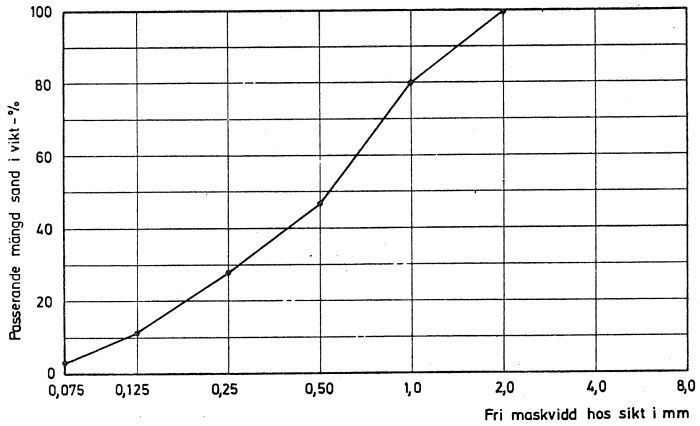


FIG. I:1. Ballastens korngredning.
Gradation of aggregate.

Avdelningen för Byggnadsmateriallära
Tekniska Högskolan i Lund

PUTSENS INVERKAN PÅ FASADENS FUKTBALANS

Delrapport II : FUKTMÄTNINGSMETODER

Lund i mars 1980

Kenneth Sandin

Denna delrapport hänför sig till forskningsanslag 740269-8 från Statens Råd för Byggnadsforskning till avdelningen för Byggnadsmateriallära, Tekniska Högskolan i Lund. Hela projektet slutredovisas i en huvudrapport och åtta delrapporter.

INNEHÅLL

1	INLEDNING.....	II:2
2	VAD SKALL MÄTAS.....	II:4
3	FUKTKVOTSMÄTNING.....	II:8
3.1	Direkta metoder.....	II:8
3.2	Indirekta metoder.....	II:9
4	MÄTNING AV RELATIV LUFTFUKTIGHET.....	II:11
5	RELATIV MÄTNING.....	II:13
5.1	Spiralfuktgivare.....	II:13
5.2	Ingjutna elektroder.....	II:14
5.3	Putsfuktgivare.....	II:14
5.4	Kontakförsök.....	II:15
	LITTERATUR.....	II:16
	FIGURER.....	II:17

1 INLEDNING

Fukt påverkar i mycket hög grad funktionen hos olika material och konstruktioner. Vid bedömningen av hur ett material eller en konstruktion kommer att fungera i praktiken måste fuktens inverkan på olika materialegenskaper och materialkombinationer vara känd. Vidare måste de fukttillstånd som kommer att råda i den aktuella konstruktionen kunna bedömas. Detta ställer i sin tur krav på kunskap om hur olika material påverkar fukttillståndet. Ett exempel på en materialegenskap som påverkar fukttillståndet är ånggenomsläppligheten hos ytskikt. Att kunna fastställa rådande fuktförhållande och vilka materialegenskaper som kan påverka fukttillståndet är ofta nödvändigt även i samband med skadeutredningar.

Det finns alltså ett stort behov av att kunna mäta fukt och fuktgenskaper på något sätt, både under laboratorieförhållande och i fält. För detta finns en mängd olika metoder utvecklade. De olika metoderna mäter i vissa fall samma sak och i andra fall helt olika saker. Vidare är vissa metoder användbara vid höga fukttillstånd medan andra är lämpliga vid låga fukttillstånd. Vissa metoder är användbara endast i ett visst material medan andra kan användas i olika material, även i luft. Andra väsentliga skillnader är om metoden är förstörande eller icke förstörande samt om metoden är användbar vid fältmätningar eller enbart i laboratorium.

För att kunna välja en lämplig metod är det nödvändigt att ha ett väldefinierat syfte med mätningen. Med utgångspunkt från syftet fastställs vad som skall mätas och hur stor noggrannhet som krävs. Valet av mätmetod görs därefter med hänsyn till de olika metodernas användningsområde, tillgängliga resurser och tillåtna ingrepp i aktuellt mätobjekt.

I denna delrapport diskuteras först frågan om vad man skall mäta och olika noggrannhetskrav. Därefter redogörs för vissa mätmetoder som är användbara i samband med fasader. Någon fullständig redogörelse för alla tänkbara metoder görs inte. De metoder som

beskrivs är sådana som är relativt enkla och som har använts antingen i undersökningar inom putsprojektet eller i samband med skadeutredningar. Kärnfysikaliska och spektrometriska metoder behandlas exempelvis inte alls.

2 VAD SKALL MATAS

I samband med fuktmätningar kan man skilja mellan mätning av fukttinnehåll och mätning av fuktpotential. Med fukttinnehåll menas materialets absoluta fukttinnehåll, som kan anges på olika sätt. I allmänhet anges fukttinnehållet i fuktkvot eller fukthalt.

Fuktkvoten definieras genom

$$u = \frac{\text{vikt förångningsbart vatten}}{\text{torrvikt}} \cdot 100 \text{ (viktsprocent)}$$

medan fukthalten definieras genom

$$w = \frac{\text{vikt förångningsbart vatten}}{\text{materialvolym}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

Sambandet mellan fuktkvot och fukthalt ges av $w = \rho \cdot \frac{u}{100}$, där ρ = skrymdensiteten (kg/m^3). I fortsättningen används enbart fuktkvoten som ett mått på fukttinnehåll i olika material.

Med fuktpotential menas ett mått på hur kraftigt vattnet är bundet till materialet. Fuktpotentialen kan uttryckas genom det kapillära undertrycket (N/m^2) i de vattenfyllda porerna. Alternativt kan i det "hygroskopiska" området den mot fukttinnehållet svarande relativa luftfuktigheten användas som ett mått på fuktpotentialen.

Ur mätteknisk och praktisk synvinkel finns även mellanformer mellan fukttinnehåll och fuktpotential. Exempel på ett sådant uttryck är vattenmättnadsgrad, som anger förhållandet mellan aktuellt vatteninnehåll och det vatteninnehåll som materialet får när det behandlas på visst sätt. I samband med frostbeständighet används ofta detta uttryck. Ibland förekommer även begreppet fukttillstånd. Detta skall då ses som en mycket allmän karaktärisering av fukttinnehållet eller fuktpotentialen.

Fuktkvoten eller fukthalten är det vanligaste sättet att ange fukt i material och många materialegenskaper relateras just till fuktkvoten. Fuktkvoten är ett exakt mått på fukttinnehållet i den

undersökta provbiten. Bestäms fuktkvoten på flera provbitar ur samma material kan i vissa fall, exempelvis i betong, bruk och tegel, stor skillnad erhållas beroende på inhomogeniteter. I andra fall, exempelvis trä och gasbetong, blir skillnaden mellan olika prover däremot liten. I ett material med stor spridning är det svårt att direkt jämföra och bedöma uppmätta fuktkvoter. Vidare är en direkt jämförelse mellan fuktkvoter uppmätta i olika material omöjlig. Ett exempel på uppmätta fuktkvoter i en gammal vägg av kalkbetong visas i FIG. II:1, Sandin (1974). Som synes är fuktkvoterna högst varierande, beroende på ojämn materialkvalitet. Fuktkvoterna på olika djup är således inte jämförbara.

Trots att fuktkvoterna enligt ovan är svåra att jämföra med varandra är det ofta motiverat att bestämma dem. Anledningen till detta är främst att fuktkvoter är enkla att bestämma samt att många materialegenskaper relateras till fuktkvoten. Vidare vet man ofta de "normala" fuktkvoterna i praktisk användning för olika material. I vissa fall är det även möjligt (med hjälp av tabeller och diagram) att jämföra fuktkvoter för olika material. Vid fuktkvotsbestämningen måste man dock ha klart för sig att mycket stor spridning kan finnas inom samma materialgrupp, varför alla jämförelser måste göras med stor försiktighet.

Genom att bestämma vissa materialegenskaper kan i vissa fall inverkan av ojämnheter i materialsammansättningen bedömas. Om man i samband med fuktkvotsbestämningen även mäter den fuktkvot materialet får vid kapillärsugning kan den kapillära vattenmättnadsgraden beräknas genom

$$s_{\text{kap}} = \frac{\text{aktuell fuktkvot}}{\text{fuktkvot vid kapillärmättnad}}$$

Härigenom överförs alltså de absoluta fuktkvoterna till ett relationstal som anger hur stor porvolym som är vattenfylld i förhållande till den porvolym som fylls vid kapillärsugning. Den kapillära vattenmättnadsgraden, som är ett uttryck för rådande fukt-tillstånd, möjliggör en väsentligt bättre jämförelse än enbart fuktkvoten. I FIG. II:2 har fuktkvoterna från FIG. II:1 omvandlats till kapillära vattenmättnadsgrader.

I samband med analys av skadefall är fuktkvoterna främst användbara för att bilda sig en ungefärlig uppfattning om fuktförhållandena. I många fall är detta tillräckligt, exempelvis om mycket stora skillnader uppmätts i samma material på olika platser. I andra fall kan en fuktkvotmätning ligga till grund för ytterligare mätningar.

Fuktpotentialen är ofta det mest korrekta sättet att uttrycka fukten. Fuktpotentialerna är oberoende av material och är alltid direkt jämförbara. Vid bedömning av fukttransport visar fuktpotentialen direkt i vilken riktning transporten går. Fuktpotentialen visar även direkt om fuktförhållandena är normala i en verklig konstruktion. Fuktkvoterna är däremot inte direkt användbara vid dessa bedömningar, eftersom fukttransporten mycket väl kan gå i riktning från en låg mot en hög fuktkvot.

Inom det hygroskopiska området är det lätt att mäta fuktpotentialen. Man mäter helt enkelt den relativa luftfuktighet som materialet är i jämvikt med. Vid högre fukttillstånd, vilket ofta är aktuellt i samband med skadeanalyser, är en direkt mätning av den exakta fuktpotentialen praktiskt omöjlig att genomföra. I dessa fall kan man i stället göra relativa mätningar.

Relativa mätningar är användbara då man enbart är intresserad av skillnader i fuktpotential. Ett sätt är att ta ut prover och göra kontaktförsök med standardmaterial, varvid man studerar det fukttillstånd som erhålles i ett annat känt material, som är i jämvikt med det uttagna provet. En sådan mätning kan vara aktuell om fuktpotentialen önskas klarlagd vid en bestämd tidpunkt. Skall däremot fuktpotentialens tidsvariationer studeras bör mätningen göras på exakt samma plats. Härvid är upprepade provtagning omöjlig, eftersom varje provtagning påverkar fuktförhållandena. Ett sätt att studera tidsvariationer är att montera någon typ av fuktgivare i väggen och registrera variationerna kontinuerligt. En sådan mätning säger ingenting om fuktpotentialens absolutnivå, men tillsammans med en fuktkvotsbestämning ger metoden ofta en mycket god bild av konstruktionens fuktförhållande.

I samband med skadeanalyser är en riktig mätmetod väsentligare än en noggrann mätning. En fuktkvotsmätning kan i princip göras hur noggrann som helst och fuktkvoten kan uttryckas med önskat antal decimaler. Detta är dock ofta helt ointressant, bl a beroende på varierande materialsammansättning. En relativ mätning har ofta dålig noggrannhet med avseende på absolutbelopp, men visar även mycket små variationer, vilket kan vara avgörande vid en bedömning av fuktförhållanden.

Vid utvärdering av fuktmätningar har i vissa fall temperaturen stor betydelse, varför även denna måste mätas. Detta är dock en enkel mätning och diskuteras inte i det följande.

3 FUKTKVOTSMÄTNING

Fuktkvoten kan bestämmas med direkta eller indirekta metoder. Vid en direkt metod avlägsnas vattnet på något sätt från provet, varvid denna mängd mäts. Vid indirekta metoder mäts primärt någon annan egenskap hos materialet, varefter man via en kalibreringskurva kan avläsa fuktkvoten i materialet. Vid upprättandet av kalibreringskurvan måste dock en direkt metod användas.

3.1 Direkta metoder

En direkt fuktkvotsmätning kan göras genom att vattnet i ett prov uttorkas. Den uttorkade vattenmängden relateras därefter till det torra materialets vikt enligt

$$u = \frac{\text{uttorkad vattenmängd}}{\text{torrvikt}} \cdot 100 \text{ (vikts-\%)}$$

Uttorkningen kan göras på olika sätt. Avsikten med torkningen är att avlägsna det fysikaliskt bundna vattnet medan däremot kemiskt bundet vatten inte skall påverkas. Detta medför ibland komplikationer eftersom ingen torkmetod klart skiljer mellan fysikaliskt och kemiskt bundet vatten. Vid angivelse av fuktkvoter måste därför torkmetoden anges.

Vid uttorkningen skall provet omges av ett torrt klimat (låg RF). Detta kan nås på två sätt, antingen genom att sänka ånghalten i luften eller genom att höja temperaturen vid bibehållen ånghalt.

Det vanligaste och enklaste sättet i samband med byggnadsmaterial är uttorkning i ugn vid 105°C och ånghalten 5-8 g/m³, vilket medför en relativ luftfuktighet på ca 1%. Det på detta sätt bortdrivna vattnet kallas "förångningsbart vatten" och är inte någon entydig gräns mellan fysikaliskt och kemiskt bundet vatten. Det tillstånd som erhålles efter uttorkningen, "torrvikten", är inte någon absolut torrhet, utan ett referenstillstånd som bestäms av uttorkningsmetoden. En högre temperatur ger ofta en lägre torrvikt. Används torkmedel i stället för hög temperatur kan en annan torrvikt erhållas.

För vissa material kan 105°C inte användas, beroende på att kemiskt vatten avgår vid betydligt lägre temperatur. Vid torkning av gips får exempelvis temperaturen ej överstiga 40°C, eftersom gipsen då börjar att dehydratisera.

Förutom att väga den uttorkade vattenmängden kan fukttinnehållet bestämmas med kemiska metoder. Vid dessa metoder låter man vattnet i ett prov reagera med vissa kemikalier. Fuktmängden kan sedan beräknas med utgångspunkt från kemikalieförbrukning eller mängden reaktionsprodukter.

En vanligt förekommande kemisk metod är kalciumkarbid-metoden. Härvid krossas en viss mängd fuktigt material och placeras tillsammans med en glasampull innehållande kalciumkarbid i en gastät flaska. Flaskan tillslutes och omskakas varvid glasampullen krossas och kalciumkarbiden reagerar med vattnet och bildar acetylen-gas. Denna gas ger upphov till ett övertryck i flaskan, vilket avläses på en manometer. Gastrycket är direkt proportionellt mot mängden vatten i flaskan. Med hjälp av trycket kan således vattenmängden och därmed fuktkvoten beräknas.

En direkt fuktkvotsbestämning kan göras med god noggrannhet på ett visst uttaget prov. I vissa fall kan det dock vara svårt att ur ett material ta representativa prov. I betong och bruk påverkar mängden ballast fuktkvoten i mycket hög grad. Spridningen i fuktkvot på prov uttagna ur samma betong kan uppgå till 40-50%. Ballastfördelningens inverkan illustreras i FIG. II:3. Även porstruktur kan påverka fuktkvoten kraftigt. Om två tegelstenar är i fuktjämvtikt med varandra så kan den ena stenen mycket väl ha en fuktkvot som är dubbelt så hög som den andra.

3.2 Indirekta metoder

Vid indirekta metoder mäts enligt tidigare någon annan egenskap i materialet, varefter fuktkvoten avläses i en kalibreringskurva.

Ett vanligt sätt är att mäta den elektriska ledningsförmågan, som är starkt beroende av fukttinnehållet. Den elektriska ledningsförmågan är även beroende av bl a saltinnehållet i materialet. Detta innebär att olika material får olika kalibreringskurvor samt att

kalibreringskurvan för samma material kan variera allteftersom saltinnehållet varierar. För att kunna översätta de elektriska egenskaperna till fuktkvot krävs i de flesta fall mycket omfattande kalibreringar. Av denna anledning är metoderna främst användbara i samband med relativa mätningar. Dessa metoder behandlas i kap 5.

För snabba fältmätningar finns i handeln olika fuktmätare som grundar sig på att de elektriska egenskaperna hos materialet förändras med fukttinnehållet. För mätning i trä finns ett speciellt instrument som är graderat direkt i fuktkvot. Vid mätningen slås två elektroder in i materialet varefter resistansen mellan dessa mäts. I trä fungerar metoden bra men i bruk och betong är det svårare med inslagna elektroder, bl a beroende på kontaktmotstånd mellan elektroder och material. I bruk och betong måste elektroderna gjutas fast på något sätt. Även om detta görs blir emellertid noggrannheten ofta dålig.

4 MÄTNING AV RELATIV LUFTFUKTIGHET

Vid mätning av den relativa luftfuktigheten (RF), mäts inte fukttillståndet i materialet utan fukttillståndet i den luft som materialet är i jämvikt med. Mätningarna är enkla att göra, både i laboratorium och under fältmässiga förhållanden. För mätningarna finns i handeln en mängd olika instrument. Här redogörs inte för hur de olika instrumenten fungerar, utan i stället diskuteras olika sätt att använda dem. En utförligare beskrivning av de olika instrumentens funktion finns i Nilsson & Sandin (1976).

Det vanligaste sättet att mäta RF är med hjälp av termohygrograf eller psykrometer. Dessa apparater är till sin konstruktion enkla och robusta. Termohygrografer registrerar mekaniskt luftens RF och temperatur direkt på ett papper medan vid användandet av psykrometern två temperaturer (torr och våt) avläses, varefter luftens RF kan beräknas. Metoderna är främst användbara vid klimatmätningar. Skall klimatet registreras på en viss plats är termohygrografen lämpligast. Vid kartläggning av klimatskillnader mellan olika platser används däremot med fördel en psykrometer. För mätning av fukttillstånd i ett material är metoderna inte lämpliga, bland annat beroende på att instrumenten är för stora. Till sådana mätningar används insticksfuktgivare. Dessa fuktgivare består av en liten känselkropp vars elektriska egenskaper förändras med RF. För dessa mätningar krävs, förutom själva fuktgivaren, även elektriska registreringsinstrument.

För att mäta fukttillståndet i en väggyta kan man montera en kupa med en insticksfuktgivare enligt FIG. II:4. Vattenånga kommer då att avdunsta från väggytan, varvid RF ökar i kupan till jämvikt råder mellan väggyta och luften i kupan. Om det föreligger en fukttransport i väggen, mot den sida där kupan är monterad, kommer RF ständigt att öka till jämvikt råder med det ställe i väggen där fuktpotentialen är högst. Detta gäller om temperaturen är konstant och om kupan täcker en tillräckligt stor yta. I praktiken är temperaturen inte konstant varför förhållandena blir mer komplicerade. Metoden är inte färdigutvecklad för praktiskt bruk ännu, men kan ändå ge en viss information om väggens fukttill-

stånd. Om man exempelvis vid mätning på en puts erhåller kurvor enligt FIG. II:5 indikerar detta att i fall 1 är fukttillståndet i putsen mycket högt. I fall 2 har putsen ett lågt fukttillstånd medan däremot underlagets fukttillstånd är högt. I fall 3 är fukttillståndet lågt både i puts och underlag.

För att mäta fukttillståndets variationer i väggen kan insticks-givare monteras i uppborrade hål enligt FIG. II:6. Med denna metod kan variationer i RF studeras under längre tider. Mätningen kan exempelvis göras kontinuerligt under ett slagregn eller intermittent för att studera årstidsvariationer.

Vid mätning i borrhål skall hålet göras så litet som möjligt, för att minimera störande inverkan på fuktförhållandena. Själva mätningen får inte göras omedelbart efter det att hålet borrats. Anledningen till detta är bland annat att den värme som utvecklats vid borrhållningen påverkar fukttillståndet i hålet och dess närmaste omgivning.

Metodens stora fördelar är främst att man kan mäta samma sak i olika material, även i luftspalter, samt att man vet vad man mäter. Vidare är en kontinuerlig mätning enkel att göra. Bland nackdelarna kan nämnas att fuktgivarna är ömtåliga och relativt dyrbara.

Ett alternativ till att mäta RF på platsen är att hugga ut prover från olika djup och placera dessa i diffusionstäta burkar, exempelvis provrör med gummipropp. Luften i provrören kommer då att inställa sig i fuktjämvikt med provbitarna. RF kan därefter enkelt mätas, under laboratorieförhållande, i provrören enligt FIG. II:7. Denna metod har fördelen att alla mätningar görs under laboratorieförhållande samtidigt som bara en enda fuktgivare krävs. Nackdelen är att man får enbart en ögonblicksbild av fukttillståndet i väggen. Någon kontinuerlig registrering är inte möjlig.

5 RELATIV MÄTNING

I många fall är de absoluta värdena på fukttinnehåll eller fukt-potential av mindre intresse, medan däremot variationer i fuktför-hållandena kan vara intressanta att studera. I dessa fall kan man nöja sig med relativa mätningar. Härvid är elektriska mätmetoder mycket användbara. Grundprincipen för de metoder som beskrivs här är att den elektriska konduktiviteten förändras med fukttinnehål-let. Genom att mäta resistansen mellan elektroder i ett fuktigt material kan alltså fuktvariationer studeras. Genom att variera utformningen av elektrodarrangemanget kan mätmetoden anpassas till olika typer av mätningar. De relativa mätmetoderna kan i vissa fall användas till absolutmätningar. Detta kräver dock relativt omfattande kalibreringar.

Vid alla elektriska mätmetoder måste växelspanning användas för att motverka polarisation. Vidare måste alla mätningar göras med samma spänning och frekvens. Anledningen till detta är att i den uppmätta resistansen inkluderas även inverkan av kapacitansen, som är beroende av spänning och frekvens.

5.1 Spiralfuktgivare.

Denna fuktgivare mäter fuktpotentialen i den miljö där den är pla-cerad. Mätområdet är inte, som fallet är för RF-mätare, begränsat till det hygroskopiska området. Fuktgivaren består av en rak och en spiralformad kopparelektrod, skilda från varandra genom ett autoklaverat cementbruk enligt FIG. II:8. Resistansen mellan elektro-derna är beroende av fukttinnehållet i cementbruket. Detta fukt-innehåll beror i sin tur på fuktpotentialen i omgivningen runt givaren. Om fuktgivaren gjuts in i ett material kan alltså de re-lativa fuktvariationerna i detta material studeras. Om materialet är homogent kan även en kalibreringskurva mellan fuktkvot och re-sistans upprättas.

Fuktgivaren är relativt långsam och går inte att använda vid studium av snabba förlopp. En annan nackdel är att i materialet upplösta salter påverkar resistansen.

Noggrannheten hos fuktgivaren, vid absolutmätningar av fuktkvot, bestäms av hur omfattande kalibreringar görs. En noggrann kalibrering kan i betong ge en noggrannhet på $\pm 10\%$ av avläst värde.

Fuktgivarna är användbara både vid mätningar i befintliga konstruktioner och i samband med nybyggnation. Vid mätning i befintliga konstruktioner borrar ett hål i materialet, varefter fuktgivaren gjuts in med ett lämpligt bruk. Vid nybyggnation placeras fuktgivaren direkt i materialet där mätningen skall göras, exempelvis betong eller bruk.

5.2 Ingjutna elektroder

Denna metod mäter fukttinnehållet i det material där elektroderna är monterade. Elektroderna måste monteras i samband med att materialet tillverkas, varför metoden inte är användbar vid mätning i befintliga konstruktioner. Elektrodplaceringen är valfri, varför stora möjligheter finns att göra olika mätningar. Det främsta användningsområdet är vid mätningar av fuktprofiler i exempelvis gasbetong, betong, bruk och jord. I FIG. II:9 visas ett exempel på lämplig elektrodplacering vid mätning av fuktförhållandena i bruksfogarna i ett murverk.

Resistansen mellan elektroderna blir ett direkt mått på fukttinnehållet. Ett varierande fukttinnehåll ger omedelbart ett utslag i resistansen. Metoden är alltså lämplig att använda vid studium av snabba fuktförändringar, exempelvis vid slagregn. En nackdel med metoden är att salter påverkar resistansen. Metoden har använts vid mätningar av fuktvariationer i gasbetong i samband med slagregn. Vid dessa mätningar har kalibreringen drivits så långt att en noggrannhet på ca $\pm 10\%$ av avläst värde erhållits.

Mätmetoden diskuteras utförligt i Sandin (1978).

5.3 Putsfuktgivare

Putsfuktgivaren är avsedd för mätning av variationer i putsens fukttinnehåll. Putsfuktgivaren enligt FIG: II:10 monteras innan putsningsarbetet utförs. Vid putsningen fylls givaren med putsbruket och genom att mäta resistansen mellan elektroderna kan variationer

i fukttinhåll studeras. I tjocka putser kan givaren göras högre så att fler elektroddpar får plats. Detta möjliggör ett studium av fuktprofilen i själva putsen.

Mätmetoden är endast användbar i samband med nyputsning och har samma nackdelar och fördelar som föregående metod med ingjutna elektroder.

5.4 Kontaktförsök

Förutom med de tidigare beskrivna elektriska mätmetoderna kan en relativ mätning även göras genom enkla kontaktförsök. Dessa tillgår så att ett material med väl kända fuktegenskaper, exempelvis gasbetong, placeras i kontakt med det material som skall undersökas.

Metoden är användbar både i laboratorium och i fält. För laboratorieändamål kan metoden användas till att bestämma jämviktsfuktkurvor för olika material. Härvid fylls materialprovet eller gasbetongen med olika mycket vatten. När provet och gasbetongen är i jämvikt med varandra bestäms fuktkvoterna i respektive material. Med känd sorptionsisoterm för gasbetongen kan även sorptionskurvan för materialprovet uppritas. Metoden beskrivs utförligt i delrapport III.

För fältmätningar kan exempelvis en gasbetongbit placeras i ett hål i en vägg. Genom att väga gasbetongbiten vid olika tider kan variationer i fukttillståndet studeras.

LITTERATUR

Nilsson, L O & Sandin, K, 1976, Mätning av fukt. (Avdelningen för byggnadsmateriallära, LTH.) Internrapport. Lund.

Sandin, K, 1974, Fukt-och temperaturmätning i Vadstena Klosterkyrka. (Institutionen för byggnadsteknik, LTH.) Rapport 50. Lund.

Sandin, K, 1978, Metod för fuktprofilmätning i gasbetong. (Avdelningen för byggnadsmateriallära, LTH.) Internrapport. Lund.

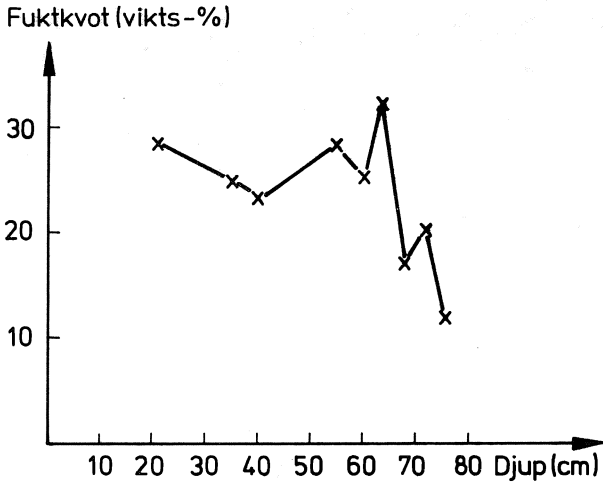


FIG. II:1. Fuktkvoter i en "kalkbetongvägg". (Sandin, 1974).
Moisture content in a "lime-concrete" wall.

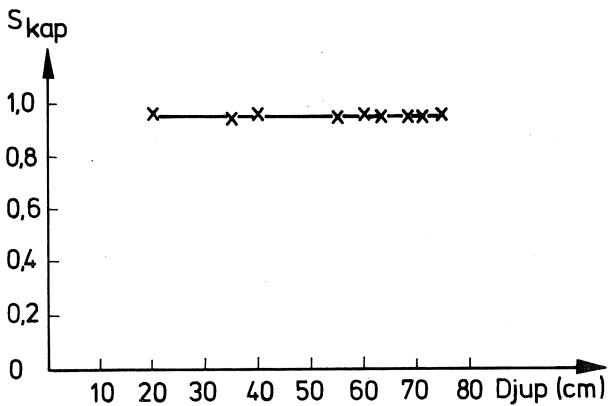


FIG. II:2. Kapillära vattenmättnadsgrader i samma vägg som i FIG. II:1.
 (Sandin, 1974).
Capillary degree of saturation in the same wall as in FIG. II:1.

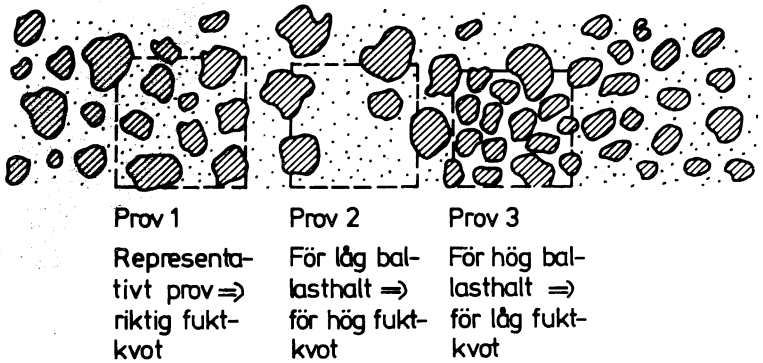


FIG. II:3. Inverkan av ojämn ballastfördelning vid fuktkvotsbestämning.
Influence of the distribution of aggregate at measurement of moisture content.

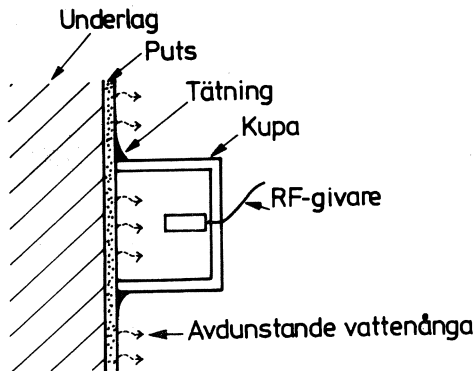


FIG. II:4. Mätning av väggens fukttillstånd med kupa.
Measurement of RH with a cup.

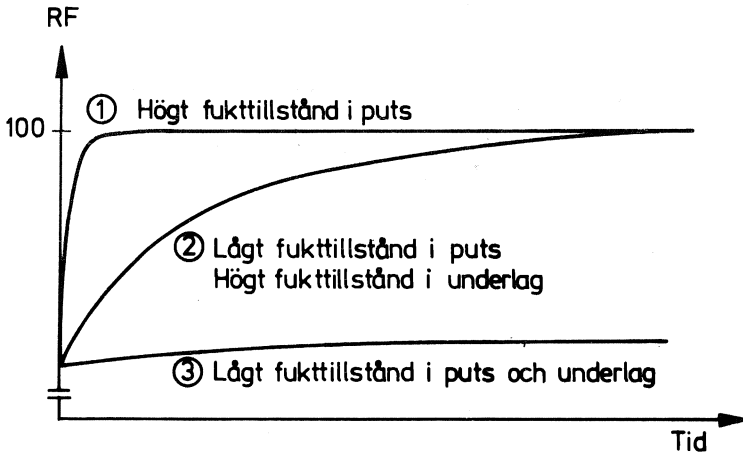


FIG. II:5. Olika principiella förlopp vid mätning av RF i kupa.
Different course at measurement of RH in a cup.

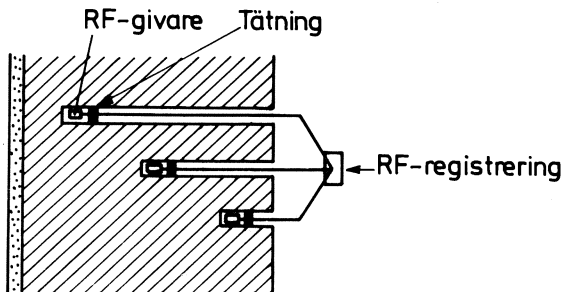


FIG. II:6. RF-mätning i borrhål till olika djup i en vägg.
Measurement of RH in a drilled hole in a wall.

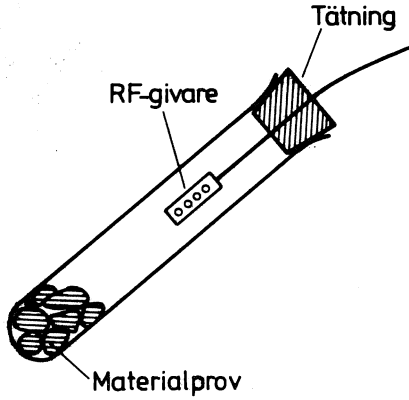


FIG. II:7. Mätning av ett materials RF i ett provrör.

Measurement of RH in a test-tube.

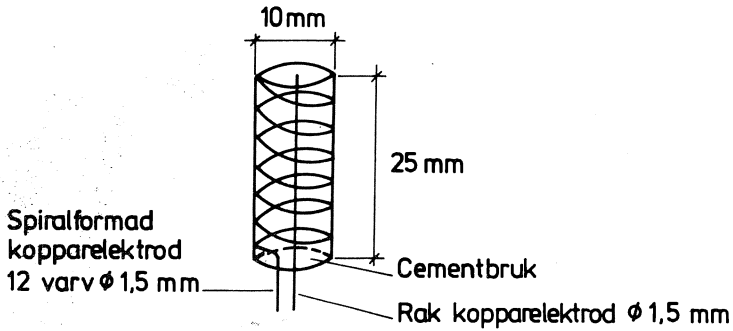


FIG. II:8. Spiralfuktgivare.

Probe for moisture measurement.

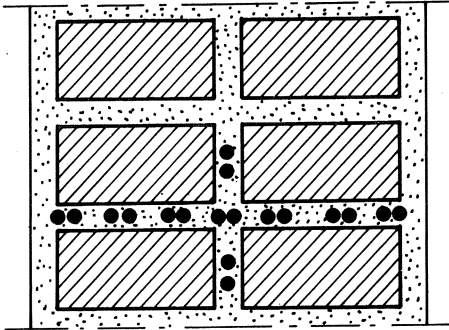


FIG. II:9. Exempel på elektrodplacering vid fuktmätning i murverk.
Example of electrode placing in a brick work.

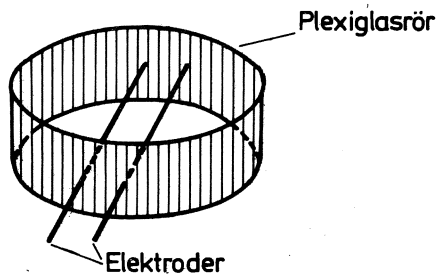


FIG. II:10. Putsfuktgivare.
Probe for moisture measurement in a rendering.

Avdelningen för Byggnadsmateriallära
Tekniska Högskolan i Lund

PUTSENS INVERKAN PÅ FASADENS FUKTBALANS

Delrapport III: FUKTJÄMVIKT

Lund i mars 1980

Kenneth Sandin

Denna delrapport hänför sig till forskningsanslag 740269-8 från Statens Råd för Byggnadsforskning till avdelningen för Byggnadsmateriallära, Tekniska Högskolan i Lund. Hela projektet slutredovisas i en huvudrapport och åtta delrapporter.

INNEHÅLL

1	INLEDNING.....	III:2
2	TEORI.....	III:3
2.1	Fuktfixering.....	III:3
2.2	Jämviktsfukttinnehåll.....	III:5
3	MÄTNING AV FUKTJÄMVIKT.....	III:7
3.1	Hygroskopiska jämviktsfuktkurvor.....	III:7
3.2	Kapillära jämviktsfuktkurvor.....	III:7
3.3	Relativa mätningar.....	III:8
4	EGNA MÄTNINGAR.....	III:9
4.1	Hygroskopiska jämviktsfuktkurvor.....	III:9
4.2	Relativa kapillära jämviktsfuktkurvor.....	III:10
5	DISKUSSION AV RESULTATEN.....	III:13
5.1	Allmänt.....	III:13
5.2	Uppskattning av absoluta jämviktsfuktkurvor.....	III:14
5.3	Kurvform-hysteresis-porstruktur.....	III:15
	LITTERATUR.....	III:20
	TABELLER.....	III:21
	FIGURER.....	III:22

1 INLEDNING

Alla porösa material har i praktisk användning ett visst fukttinnehåll. I material som exempelvis utsätts för omväxlande regn och sol, kommer fukttinnehållet att variera kraftigt. I ett material som däremot placeras i en viss given miljö, kommer efter en tid ett jämviktsläge att inställa sig. Fukttinnehållet härvid, jämviktsfukttinnehållet, bestäms bland annat av materialegenskaperna, fuktpotentialen och på vilket sätt materialet erhållit sitt fukttinnehåll.

Olika sätt att mäta och ange fukttinnehåll och fuktpotential diskuteras i delrapport II.

I denna delrapport behandlas sambandet mellan fukttinnehåll och fuktpotential för enskilda material i fuktjämvikt samt fuktutbyte och fuktjämvikt vid materialkombinationer.

2 TEORI

2.1 Fuktfixering

Fukt i ett material kan vara bundet på ett flertal olika sätt. Ett vanligt och praktiskt sätt att indela den bundna fukten är i förångningsbart och icke förångningsbart vatten. Denna indelning är emellertid inte entydig. Olika resultat kan erhållas beroende på med vilken metod mängderna bestäms. Ur vetenskaplig synpunkt är en indelning efter bindningskraftens storlek bättre. En grov sådan indelning kan göras i följande huvudgrupper

avtagande bindningsenergi ↓	1) Strukturellt vatten	{ kemiskt bundet
	2) Adsorberat vatten	} fysikaliskt bundet (i huvudsak förångningsbart)
	3) Kapillärt vatten	
	4) Fritt vatten	

Det strukturella vattnet är kemiskt bundet vid materialet. Detta vatten kan ingå som särskilda vattenmolekyler i ett material i form av kristallvatten. Vattnet kan även reagera med materialet och bilda speciella joner, exempelvis hydroxid (FIG. III:1a). Detta vatten hänförs i allmänhet till icke förångningsbart vatten. I vissa fall avgår dock det strukturellt bundna vattnet vid en relativt måttlig temperaturhöjning. För gips börjar det kemiskt bundna vattnet att avgå redan vid uppvärmning av "rumsluft" till $+40^{\circ}\text{C}$.

Adsorberat vatten är bundet till den fasta massans yttre och inre ytor, porväggarna (FIG. III:1b). Adsorptionen sker i ett eller flera molekyllager, varvid bindningskrafterna är störst för det innersta skiktet och successivt avtar utåt. Eftersom det adsorberade vattnet enbart binds till ytor, har materialets tillgängliga yta, specifika ytan, en avgörande betydelse för den adsorberade vattenmängden. Hur många molekyllager som binds till ytorna bestäms av den relativa luftfuktigheten i porerna.

Efterhand som flera molekyllager binds till materialet bildas så småningom rena vätskeytor. I fina porer och porförträngningar bildas då krökta vätskeytor (FIG. III:1c). Över dessa krökta menisker blir vattenångans mättnadstryck, beroende på ytspänningskrafter, lägre än

över en plan vattenyta. Ju större krökning menisken har, desto större blir ångtrycksreduktionen. Är ångtrycket i porluften större än mättnadsångtrycket sker kapillärkondensation (FIG. III:1d). (Mättnads-) ångtrycket över en menisk i en cylindrisk kapillär ges av Kelvins formel:

$$p = p_s \cdot e^{-\frac{2 \cdot \sigma \cdot M}{\rho_w \cdot r \cdot R \cdot T} \cdot \cos \theta} \quad (\text{III:1})$$

där	p = vattenångans partialtryck över menisken	N/m^2
	p_s = mättnadstrycket över en plan yta	N/m^2
	σ = vattnets ytspänning	N/m
	M = vattnets molekylvikt	kg/kmol
	ρ_w = vattnets densitet	kg/m^3
	r = kapillärradien	m
	R = allmänna gaskonstanten	$\text{J/kmol} \cdot \text{K}$
	T = temperaturen	K
	θ = randvinkeln	-

Kapillärkondensation sker alltså vid RF lägre än 100%. I TAB. III:1 redovisas vid vilken lägsta RF kapillärkondensation sker i en delvis vattenfylld cylindrisk por med viss radie och randvinkeln $\theta = 0$.

I en icke vattenfylld cylindrisk por måste radien vara mindre för att kapillärkondensation skall ske. Sambandet mellan radie och RF i detta fall fås genom att halvera de i TAB. III:1 angivna radierna. Det praktiskt intressanta området för kapillärkondensation ligger i kapillärradieintervallet 10^{-9} - 10^{-7} m.

Genom kapillärsugning från en fri vattenyta kan ytterligare vatten tillföras materialet (FIG. III:1e). Porradien hos den största por som härvid kan fyllas beror bland annat på sughöjden (se delrapport V). Sambandet mellan porradie och maximal sughöjd ges för en cirkulär cylindrisk por av

$$h \cdot \rho_w \cdot g = \frac{2\sigma \cdot \cos \theta}{r} = p_c \quad (\text{III:2})$$

där	h = stighöjd	m
	ρ_w = vattnets densitet	kg/m^3
	g = tyngdaccelerationen	m/s^2

σ = vattnets ytspänning	N/m
θ = randvinkel	-
r = kapillärradie	m
P_c = porundertryck	N/m ²

Fritt vatten kan förekomma i större håligheter och är mycket svagt bundet (FIG. III:1f). Någon direkt gräns mellan kapillärt och fritt vatten finns inte.

Oberoende av hur fukten binds vid materialet är trycket hos det bundna vattnet lägre än hos fritt vatten. Denna trycksänkning, som orsakas av bindningskrafterna, kallas porundertryck eller suction, P_c . Detta diskuteras utförligare i delrapport V. Porundertrycket är beroende av porradien vid vattenmenisken. För en cylindrisk por ges P_c av ekv (III:2).

Med hjälp av ekv (III:1) - (III:2) kan man nu få ett samband mellan största vattenfyllda por, maximal sughöjd i denna por, porundertryck och RF. Detta redovisas i TAB. III:2. Som ett mått på fuktpotentialen kan exempelvis maximal sughöjd användas. I praktiken används ofta RF upp till 97-98%, däröver används porundertrycket. Observera dock att maximal sughöjd, RF och porundertryck egentligen säger samma sak!

2.2 Jämviktsfukttinhåll

Enligt föregående avsnitt binds olika mycket vatten till ett material, allteftersom fuktpotentialen ändras. Sambandet mellan fukttinhåll och fuktpotential vid jämvikt kallas jämviktsfuktkurva (FIG. III:2). När materialet befinner sig i jämvikt med luft används RF som fuktpotential och kurvan kallas hygroskopisk jämviktsfuktkurva. När materialet befinner sig i jämvikt med ett högre fukttillstånd används porundertrycket som fuktpotential och kurvan kallas kapillär jämviktsfuktkurva.

Jämviktsfuktkvoten beror även av temperaturen och det sätt på vilket fukttinhållet uppnåtts. Temperaturberoendet är ringa och diskuteras inte i fortsättningen. Det sätt på vilket materialet erhållit sin fuktkvot har däremot stor betydelse. Om materialet upptar fukt för att nå jämviktsläget, kallas kurvan absorptionskurva och om materia-

let avger fukt, kallas kurvan desorptionskurva. Absorptionskurvan ligger alltid lägre än desorptionskurvan (FIG. III:3). Fenomenet kallas sorptionshysteresis. Det finns olika teorier för att förklara hysteresiseffekten. En förklaring är att fina porer "blockerar" grövre porer enligt FIG. III:4. Vid absorption fylls poren med radie r_1 vid fuktpotentialen p_1 . För att fylla poren med radien r_2 måste fuktpotentialen p_2 nås. Om däremot hela porsystemet från början är fyllt med vatten, måste fuktpotentialen sänkas till p_1 innan något vatten avgår, eftersom fuktpotentialen bestäms av porradien där menisken finns. (Se delrapport V). Av ovanstående följer att två olika material vid samma fuktpotential, kan ha helt olika fukttinnehåll. Om olika fuktpotential råder i ett material sker alltid en utjämning till samma fuktpotential, jämviktsläget. Även om fuktpotentialen är densamma i hela materialet så kan hysteresiseffekterna medföra att fukttinnehållet varierar avsevärt. Vidare kan, om två olika material placeras i kontakt med varandra, fukttransporten gå från materialet med det lägre fukttinnehållet till materialet med det högre fukttinnehållet. Avgörande för händelseförloppet är fuktpotentialen, vilken i sin tur beror på storleken hos de porer där meniskerna finns. Ett finporöst material, som inte är helt vattenfyllt, kan absorbera vatten från ett grovporöst, beroende på att fuktpotentialen i det finporösa materialet är lägre än i det grovporösa.

3 MÄTNING AV FUKTJÄMVIKT

3.1 Hygroskopiska jämviktsfuktkurvor

Genom att bestämma fukttinnehållet i ett material, som lagrats till jämvikt i olika RF, kan jämviktsfuktkurvan bestämmas. Erforderlig tid till jämvikt bestäms bl a av provkroppsstorlek, porstorleksfördelning i materialet och RF. En generell tid går inte att fastställa utan kontroll får göras vid varje mätning genom successiva vägningar.

Om provet från början är vattenmättat erhålles desorptionskurvan. Ett från början torrt prov ger absorptionskurvan. Även jämviktsfukttinnehåll mellan dessa två ytterlighetsfall är möjliga. Om exempelvis ett material, som nått ett visst jämviktsläge genom desorption, utsätts för ökande RF, så kommer en successiv övergång till absorptionskurvan att ske (FIG. III:5). Hygroskopiska jämviktsfuktkurvor för vanliga byggnadsmaterial redovisas bl a av Ahlgren (1972) och Tveit (1966).

3.2 Kapillära jämviktsfuktkurvor

Vid höga RF, 95-98%, uppstår experimentella svårigheter att bestämma jämviktsfuktkurvor med ovan angivna metod. Över denna RF-nivå bestäms därför fukttinnehållet i relation till porundertrycket direkt. Principen för mätningen är att utsätta vattnet i provkroppen för ett visst givet undertryck och bestämma fukttinnehållet. De praktiska metoderna varierar med storleken på porundertrycket.

Vid små porundertryck, högt fukttinnehåll, kan mätningen ske i en suctionapparat (FIG. III:6). Provkroppen sätts i förbindelse med vatten, som genom evakuering av luft får ett visst undertryck. Det maximala undertryck som kan nås med denna metod är ca 10^5 N/m^2 , vilket motsvarar vakuum. Större "undertryck" kan åstadkommas genom att utsätta utrymmet runt provkroppen för ett övertryck. Dessa metoder samt ytterligare varianter beskrivs i detalj av Fagerlund (1973).

I FIG. III:7-8 redovisas exempel på kapillära jämviktsfuktkurvor (Bomberg, 1974).

3.3 Relativa mätningar (kontaktförsök)

Metoderna enligt ovan för bestämning av de kapillära jämviktsfukt-kurvorna är relativt komplicerade och kräver avancerad mätutrustning. En förenklad mätning kan göras genom att det material som skall undersökas, placeras i kontakt med ett standardmaterial med känd jämviktsfuktkurva. När dessa material är i fuktjämvikt med varandra bestäms fukttinnehållet. Med hjälp av den kända jämviktsfuktkurvan fås då även porundertrycket. Absorptionskurvan erhålles genom att standardmaterial från början är blött medan provmaterialet är torrt. Avläsning av porundertrycket görs då på standardmaterialets desorptionskurva. Desorptionskurvan erhålles på motsatt sätt. (FIG. III:9).

Vid materialkombinationer, exempelvis puts-underlag, kan det vara tillräckligt att veta sambandet mellan fukttinnehållen i de olika materialen vid jämvikt. Dessa mätningar görs enkelt genom kontaktförsök med aktuella material. Något standardmaterial behövs alltså inte i detta fall. Resultatet kan redovisas enligt FIG. III:10. Även vid dessa relativa mätningar erhålles olika kurvor beroende på hur fukten tillförs respektive avlägsnas. Detta diskuteras i detalj i följande avsnitt.

4 EGENA MÄTNINGAR

Hygroskopiska och relativa kapillära jämviktsfuktkurvor har bestämts för alla i undersökningen ingående material. Syftet med dessa mätningar var inte att bestämma några generella materialdata utan främst att få en uppfattning om det principiella utseendet. Mätningarna har därför gjorts på få prover, utan större krav på kontroll av spridning, klimat etc. Alla använda material definieras i delrapport I.

4.1 Hygroskopiska jämviktsfuktkurvor

De hygroskopiska jämviktsfuktkvoterna har bestämts vid 40, 60, 85 och 96% RF. Variationerna kring angivet medelvärde låg inom ca $\pm 3\%$ RF. Temperaturen var $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$. Proverna, som hade torrvikten ca 10 g, fick ligga i respektive klimat tills viktsändringen under två veckor var mindre än 0.01 g. Erforderlig tid för detta varierade mellan 1 och 3 månader. Fuktkvoten bestämdes genom uttorkning vid 105°C under 3 dygn.

Resultaten redovisas i FIG. III:11-16. Mätningarna på ett visst bruk vid de olika RF-nivåerna är i vissa fall gjorda på samma provkroppar, i andra fall har olika provkroppar använts. Vid försöksstarten var putserna ca 4 månader gamla. De använda brukena har tagits från putsade tegel- och gasbetongprovkroppar enligt delrapport I.

Vissa av kurvorna grundar sig på ett fåtal mätpunkter, vilket medför att absolutvärdena är något osäkra. Ordningsföljd och det principiella utseendet torde dock vara korrekt. Absolutvärdena kan även påverkas av provkroppsålder, olika blandningsförhållande etc. Detta har inte alls studerats.

Putser applicerade på gasbetong och tegel uppvisar ingen signifikant skillnad. Vid uppritandet av jämviktskurvorna för de olika putserna har därför ingen skillnad gjorts mellan prov tagna från olika underlag eller putsuppbbyggnad. Vid angivandet av de olika mätpunkterna har dock detta markerats.

Värdet vid 96% RF påverkas mycket kraftigt av varierande RF, beroende på att kurvan lutar kraftigt vid denna nivå. För att erhålla ett tillförlitligt värde på jämviktsfuktkvoten här, måste noggrannheten i RF vara bättre än ovan angivna. $\pm 1\%$ RF är ett rimligt krav, vilket dock kräver specialutrustning.

4.2 Relativa kapillära jämviktsfuktkurvor

Vid mätningarna har "lufttorra" provkroppar, bestående av puts-underlag, via kapillärsugning tillförts en viss mängd vatten. När den uppsugna fukt mängden utjämnats, bestämdes fuktkvoten i olika snitt.

Olika kurvor fås dels beroende på från vilken sida fukten tillförts och dels beroende på vilka snitt som jämförs. Fyra olika renodlade kurvor kan definieras enligt:

ABS-ABS (I-II): absorption i material I och absorption i material II

ABS-DES (I-II): absorption i material I och desorption i material II

DES-ABS (I-II): desorption i material I och absorption i material II

DES-DES (I-II): desorption i material I och desorption i material II

Av definitionen följer att ABS-ABS (I-II) = ABS-ABS (II-I),
ABS-DES (I-II) = DES-ABS (II-I) etc.

ABS-DES (I-II) bestäms genom att material II från början vattenmätas medan material I är torrt. Efterhand kommer I att uppta vatten från II. När utjämnningen är avslutad bestäms fuktkvoterna i respektive material. För att definitionen skall vara entydig får inga fuktgradienter finnas inom de olika materialen. Om det finns fuktgradienter måste fuktkvoterna bestämmas i sådana snitt där enbart absorption (i material I) och desorption (i material II) förekommit.

DES-ABS (I-II) erhålles genom att material I från början vattenmätas medan material II är torrt.

ABS-ABS (I-II) och DES-DES (I-II) erhålles genom att båda materialen från början är torra respektive vattenmättade, varefter de uppfuktas eller uttorkas.

Det principiella förloppet i fallet med en puts på ett underlag illustreras i FIG. III:17. I FIG. III:17a får material II (underlaget) suga kapillärt så att en del av material II är kapillärmättat, medan den andra delen och material I är torrt. Vid jämvikt kommer snitt A att ha genomgått uttorkning medan snitt B genomgått uppfuktning. Ur strikt vetenskaplig synvinkel är det inte helt säkert att

hela snitt B uppfuktats hela tiden. Den vänstra delen kan först ha uppfuktats, varefter den torkat. Vidare kan en fuktgradient finnas inom snitten. Inverkan av dessa faktorer kan bli stora om fuktkvoten bestäms i ett snitt som ligger nära fuktfronten vid kapillärsugningens avbrytande. Fuktkvoter i sådana snitt skall inte beaktas vid utvärderingen. I vissa fall kan det vara svårt att avgöra det exakta förhållandet i vissa punkter. En bedömning får då göras från fall till fall. (Jfr resultatredovisningen nedan).

Ur FIG. III:17a fås ABS-DES (I-II) till $u_2' - u_1'$ medan ABS-ABS (I-II) blir $u_2' - u_3'$. Ur figuren kan även samhörande värden på absorptions- och desorptionskurvan för materialet II avläsas till $u_3' - u_1'$.

I FIG. III:17b sker kapillärsugningen via material I. Sugningen får pågå minst så länge att fronten passerat gränsen mellan de två materialen. Ur figuren fås DES-ABS (I-II) till $u_2'' - u_1''$ medan DES-DES (I-II) blir $u_2'' - u_3''$.

Prover för mätningarna utsågades ur färdigputsade Siporexblock och tegelstenar med tjockleken 70 respektive 120 mm. Putsytan var ca 50 x 50 mm. Vid kapillärsugningen var proverna ca 4 månader gamla. Efter kapillärsugningen placerades proverna i dubbla plastpåsar för utjämning. Den erforderliga tiden till "praktisk" jämvikt har genom stickprov bestämts till ca 3 månader. Efter denna tid uppsågades proverna med en stensåg i 5-10 mm tjocka bitar, på vilka fuktkvoten bestämdes genom uttorkning vid 105°C under 3 dygn. Vid uppsågningen utvecklas värme i sågsnittet, vilket kan ge viss uttorkning. Inverkan av detta ökar med minskande snittjocklek. Denna uttorkning är dock av ringa omfattning, inom den normala spridningen vid en fuktkvotsbestämning, och har inte beaktats.

Resultaten av mätningarna redovisas i FIG. III:18-22. Även punkter som enligt ovan inte är väldefinierade har markerats i figurerna. Det högsta fukttinnehållet har erhållits genom kapillärsugning via putsen under lång tid, följt av utjämning. Även denna punkt är svårdefinierad, eftersom viss omfördelning kan ha skett vid utjämningen.

Kurvornas exakta utseende vid ändpunkterna är svårt att fastställa. Vid uppritandet av kurvorna har i vissa fall grova uppskattningar gjorts. Detta har dock mindre betydelse, eftersom det är den principiella skillnaden mellan olika putser och underlag som är det väsentliga. Inverkan av provkroppsålder, olika sammansättning och lagring av de olika brukstyperna har inte studerats.

5 DISKUSSION AV RESULTATEN

5.1 Allmänt

För att underlätta en direkt jämförelse mellan olika putser och underlag redovisas i FIG. III:23-24 en sammanställning av resultaten. I samband med de relativa kapillära jämviktsfuktkurvorna redovisas här enbart ytterlighetskurvorna.

FIG. III:24 visar tydligt de principiella skillnaderna mellan olika putser och underlag. Med utgångspunkt från dessa skillnader kan vissa generella slutsatser dras. Tegel och gasbetong, som har helt olika porstruktur, uppvisar helt olika resultat. För att tegel skall kunna absorbera vatten från putsen måste fukttinnehållet i denna vara mycket högt, praktiskt taget kapillärmättad. Gasbetong kan däremot absorbera vatten från putsen vid låga fukttinnehåll i putsen. Praktiskt innebär detta att små slagregn som träffar en putsad tegelfasad inte kommer att sugas in i underlaget. Med "små slagregn" avses ett regn som är mindre än den mängd, som krävs för att kapillärmätta putsen, vilket motsvarar en slagregnmängd på 1-2 kg/m². Om samma regnmängd däremot träffar en putsad gasbetongvägg kan praktiskt taget hela vattentmängden sugas in i underlaget.

Omvänt gäller att om underlaget är blött, så kan putsen inte absorbera vatten från gasbetong vid fukttinnehåll understigande kapillärmättad. I fallet med tegel kan däremot putsen absorbera vatten om teglets fuktkvot är högre än 3-4 vikts-%. Detta innebär att uttorkning av en gasbetongvägg alltid sker i ångfas. En tegelvägg kan däremot torka genom att putsen suger vatten från underlaget.

FIG. III:24 visar enbart vattnets strävan att omfördelas. Vid en bedömning av det verkliga förloppet måste hänsyn även tas till andra faktorer, exempelvis tidsförlopp, klimat och övergång mellan olika kurvor. Detta diskuteras utförligt i delrapport VI och VII.

De olika putserna skiljer sig från varandra enbart genom att fuktnivåerna i putserna blir olika. Cementputs har exempelvis en högre fuktkvot än kalkputs vid låga fukttillstånd. Vid högre fukttillstånd gäller motsatsen. Med fukttillstånd avses här relativ luftfuktighet respektive fukttinnehåll i underlaget.

Kurvornas utseende och strävan till fuktomlagring är helt beroende av porstrukturen. Ett finporöst material får ett högt fukttinnehåll vid låga fuktillstånd och kan även suga vatten från ett grovporöst. FIG. III:23-24 kan alltså även användas till att bedöma porstrukturen i de olika materialen. Omvänt kan man vid känd porstruktur bedöma vattnets strävan till omfördelning. Detta samt de olika kurvformerna diskuteras ytterligare i avsnitt 5.3.

Sammanfattningsvis kan man konstatera att en finporös puts på ett grovporöst underlag är gynnsamt med hänsyn till fuktbalansen i samband med slagregn samt att jämviktsfuktkurvorna medger en grov bedömning av möjliga fuktmekaniska förlopp.

5.2 Uppskattning av absoluta jämviktsfuktkurvor

Enligt avsnitt 3.3 kan de absoluta jämviktsfuktkurvorna för putserna beräknas, om kurvan är känd för underlaget. Den exakta jämviktsfuktkurvan är inte känd för något av de undersökta materialen. En grov uppskattning av putsernas jämviktsfuktkurvor kan dock göras genom att utgå från gasbetongens jämviktsfuktkurva enligt FIG. III:7. Denna kurva är mätt på prover, som antingen varit helt torra eller helt vattenmättade från början. Vid de egna mätningarna har materialen från början varit torra eller kapillärmättade. Absorptionskurvan kan alltså utnyttjas direkt. Gasbetongens desorptionskurva går däremot inte att använda direkt, eftersom startfukttinnehållet inte varit detsamma. För att få en användbar desorptionskurva för gasbetongen måste en "scanningkurva" konstrueras. Den enda givna punkten på denna är kapillärmättnadspunkten, som ligger på absorptionskurvan, eftersom detta fukttinnehåll nåtts genom absorption. Från denna punkt skall alltså en "återgående" kurva dras som någonstans träffar desorptionskurvan. Vid beräkningarna har denna punkt antagits ligga vid fuktkvoten 18 vikts-%. Den sålunda modifierade jämviktsfuktkurvan för gasbetong redovisas i FIG. III:25. I figuren har även några punkter från de egna mätningarna i det hygroskopiska området markerats. Överensstämmelse mellan dessa punkter och den allmänna kurvan är tillfredsställande.

De beräknade jämviktsfuktkurvorna för olika putser redovisas i FIG. III:26. Med hjälp av dessa kurvor kan härefter jämviktsfuktkurvan för tegel bestämmas på samma sätt. Resultatet framgår av FIG. III:27. Oberoende av vilken puts som används som referens erhålles i princip samma resultat. Även vid en jämförelse med de enskilda mätvärdena i FIG. III:8 är överensstämmelsen god. I FIG. III:8 har dock inte några markanta diskontinuiteter markerats. Förekomst av en kritisk fuktkvot vid ca 4% indikerar dock att det skall finnas diskontinuiteter i jämviktsfuktkurvan.

Med hänsyn till att kurvorna i FIG. III:26-27 är beräknade med utgångspunkt från jämviktsfuktkurvan för gasbetongkvaliteter som inte använts vid de egna mätningarna är absolutbeloppen osäkra. Storleksordningar och skillnader mellan olika putser och underlag torde dock vara riktiga.

5.3 Kurvform-hysteresis-porstruktur

Den stora skillnaden i kurvform mellan puts på tegel respektive gasbetong samt mellan ABS-DES och DES-ABS i fallet med puts på tegel beror på en kraftigt varierande porstruktur hos de olika materialen. Att matematiskt beskriva verkliga porsystem är omöjligt. Vid fuktmeکانiska resonemang approximeras ofta det verkliga porsystemet med enkla elementarporer. Vid redovisning av porstorleksfördelningar används i allmänhet en cirkulärcylindrisk kapillär med konstant radie som elementarpor. Detta innebär att de angivna porradierna inte är några verkliga poregenskaper, utan enbart ett fuktmekaniskt sätt att beskriva porsystemet. Den uppmätta porstorleksfördelningen är starkt beroende av provningsmetoden. Vid mätning av porstorleksfördelningar används ofta en kvicksilverporosimeter. Genom att med successivt ökande tryck pressa in kvicksilver i materialet, kommer allt finare porer att fyllas. Med ett känt samband mellan tryck och porradie enligt ekv (III:2) samt mellan tryck och inpressad kvicksilvermängd erhålles ett samband mellan porvolym och porradie. Det måste dock betonas att det erhållna sambandet enbart är en fiktiv porstorleksfördelning. En por enligt FIG. III:4 kommer exempelvis att betraktas som en por med radien r_p med samma totalvolym som hela poren. Enbart med en uppmätt porstorleksfördelning kan alltså inga exakta beräkningar göras av det fuktmeکانiska händelseförloppet. Porstorleksfördelningen kan dock

ligga till grund för en grov bedömning av olika möjliga fuktmekaniska förlopp. Med ytterligare kunskaper om porsystemen, erhållna genom andra mätningar, kan den fuktmekaniska bedömningen göras säkrare. För att kunna beskriva hysteresiseffekter kan exempelvis elementarporer med varierande radier användas. I vissa fall, exempelvis i samband med kritiskt fukttinnehåll med avseende på kapillärtransport, måste mer komplicerade pormodeller väljas. Porstrukturens inverkan på fukttransporten behandlas utförligare i delrapport V. Här kommenteras enbart det kvalitativa sambandet mellan jämviktsfuktkurvorna och porstrukturen, samtidigt som några enkla möjliga pormodeller redovisas. För att renodla resonemangen schematiseras de erhållna jämviktsfuktkurvorna enligt FIG. III:28.

Om en från början torr provkropp bestående av puts och gasbetong tillföres en liten mängd vatten via putsen, så kommer gasbetongen att absorbera en viss del enligt kurvdelen OG/OA. Denna omfördelning sker främst i ångfas genom kapillärkondensation i gasbetongens minsta porer. Om ytterligare vatten tillföres, efter det att provkroppen nått ett jämviktsläge vid ett fukttinnehåll strax under punkten G/A, kommer allt detta att absorberas av gasbetongen. Detta fortsätter så länge fukttinnehållet i gasbetongen är lägre än B. Gasbetongen måste alltså ha en stor mängd porer i detta intervall, som saknas i putsen. Om ytterligare vatten tillföres sedan punkten G/B nåtts, kommer fukttinnehållet att öka i både puts och gasbetong, GH/BC. I detta intervall förekommer sålunda porer av samma storlek i puts och gasbetong. Ökas fuktillskottet ytterligare sugs inget vatten in i underlaget, HI/C. Putsen har alltså ett överskott på porer i detta intervall.

Ovanstående förlopp går att förklara med den enkla cirkulär-cylindriska elementarporen med konstant porradie. I FIG. III:29 redovisas en möjlig porstorleksfördelning i puts respektive gasbetong. I figuren angivna radier hänför sig till den största por, som är vattenfylld vid respektive punkter i FIG. III:28.

Hysteresiseffekterna är i fallet med gasbetong som underlag relativt små. Om vattentillförseln i stället sker via gasbetongen förändras alltså relationerna endast obetydligt. Detta innebär att samma principresonemang kan föras i detta fall samt att samma porstorleksfördelning som enligt FIG. III:29 är möjlig.

I fallet med puts på tegel blir förhållandena helt annorlunda. Om putsen, på den från början torra provkroppen, tillföres en liten mängd vatten kommer praktiskt taget allt detta vatten att stanna i putsen. Någon omfördelning in i teglet sker inte, beroende på att de tomma porerna i teglet är större än de vattenfyllda i putsen. Teglet saknar alltså fina porer där kapillärkondensation kan ske. För att teglet skall kunna absorbera vatten från putsen måste fukttinnehållet i denna först ökas till L-nivån.

Om fukttinnehållet i putsen ökas till en nivå överstigande L-nivån, så kommer teglet att genom kapillärsugning absorbera vatten från putsen, så att L-nivån nås igen. Detta pågår tills fukttinnehållet i teglet nått E-nivån. Detta är möjligt om teglet har en mycket stor mängd porer med samma porradie som den största vattenfyllda poren i putsen vid fukttinnehållet L. Alla de porer som fylls i teglet vid L-nivå behöver inte vara lika stora. Det kan mycket väl finnas en mängd mindre porer, som inte kan fyllas förrän de grövre fyllts. Anledningen till detta är att vattnet måste passera en grov por innan det når en finare. (Se vidare nedan). Om ytterligare vatten tillföres, efter det att jämvikt råder vid L/E, kommer fukttinnehållet att öka både i puts och tegel, LM/EF. Här finns alltså porer av samma storleksordning. Ovanstående förlopp går att förklara med cirkulär-cylindriska kapillärer med konstant radie och porstorleksfördelning enligt absorptionskurvan i FIG. III:30.

Hysteresiseffekterna är i detta fall mycket markanta. Om en liten mängd vatten tillföres den torra provkroppen via teglet, så kommer putsen att absorbera hela denna vattenmängd, så länge fukttinnehållet i putsen är lägre än G. Denna omfördelning sker i ångfas genom kapillärkondensation i putsens finaste porer. Teglets brist på dessa porstorlekar medför att inget vatten kan hållas kvar. Tillföres teglet ytterligare en liten mängd vatten, efter det att putsen nått G-nivån, så kommer hela denna mängd att stanna i teglet. Det kommer inte heller att ske någon väsentlig utjämning inom teglet utan vattnet kommer att finnas där det tillfördes. Detta beror på att teglet inte kan transportera vatten kapillärt förrän ett sammanhängande kapillär-system fyllts med vatten. Den mängd vatten som krävs för detta, bestäms av att fukttinnehållet måste vara så högt att även den största poren i det sammanhängande kapillärsystemet vattenfylls. Detta fukttinnehåll motsvarar teglets kritiska fuktkvot med avseende på kapillär-

transport, u_{kr} . (Detta behandlas ytterligare i delrapport V). I FIG. III:28 motsvaras det kritiska fukttinnehållet av punkten D. Förekomsten av detta kritiska fukttinnehåll innebär bl a att det inom samma provkropp kan finnas tomma porer, som har en porradie som är mindre än den som motsvaras av det kapillära undertrycket i vattenfyllda porer. (Jfr FIG. III:27) När fukttinnehållet i teglet ökas till en nivå över D, kommer detta vattentillskott att absorberas av putsen så att teglets fukttinnehåll sänks till D-nivån. Detta är möjligt om putsens icke vattenfyllda porer är mindre än eller lika med storleken hos vattenfyllda porer i teglet. Att putsen slutar absorbera vatten då teglets fukttinnehåll sänkts till D-nivån beror på att kapillärkontakten i teglet då upphör. Detta pågår tills alla porer i putsen, som är mindre än eller lika med de vattenfyllda porerna i teglet, är fyllda, GK/D. Härefter medför ytterligare fukttillskott att teglets fukttinnehåll ökar medan däremot inget vatten absorberas av putsen, K/DF. Detta kan tolkas så att det sammanhängande vattenfyllda porsystemet utökas genom att större porer, som tidigare var omslutna av det vattenfyllda porsystemet, vattenfylls. Detta medför ingen förändring av porundertrycket, varför inget vatten kan absorberas av putsen.

Ovanstående förlopp, med fukttillförsel via teglet, går inte att förklara med cirkulärcylindriska porer med samma porstorleksfördelning som i fallet med vattentillförsel via putsen. Väljs den cirkulärcylindriska poren med konstant radie som elementarpör får vi alltså två olika porstorleksfördelningar, beroende på om teglet är utsatt för absorption eller desorption, enligt FIG. III:30.

För att kunna beskriva fuktmekanismen i teglet måste en mer komplicerad pormodell användas. I FIG. III:31 illustreras en modell som stämmer med ovan angivna fuktförlopp.

Vid uttorkning av vatten kommer först poren A att tömmas vid ett relativt högt fukttillstånd. C kan däremot inte tömmas förrän B tömts, vilket kräver ett lågt fukttillstånd. D fungerar enbart som sammanbindningskanaler.

Vid kapillärsugning kan enbart de understa B och D-porerna fyllas vid ett lågt fukttillstånd. För att fylla det övriga porsystemet måste först A eller C-porerna fyllas, vilket sker vid höga fukttillstånd.

Bestäms porstorleksfördelningen i ett sådant material, med hjälp av en kvicksilverporosimeter, kommer en kurva att erhållas som stämmer med desorptionskurvan i FIG. III:30. När kvicksilver pressas in i porsystemet kommer nämligen den genomgående poren A att fyllas vid ett lågt tryck. Poren C fylls dock inte vid detta tryck, trots att den har samma storlek som A. För att fylla C måste först B fyllas, vilket kräver ett högre tryck.

Några direkta mätningar av porstorleksfördelningar har inte gjorts på använda putser och underlag. I litteraturen finns dock vissa mätningar redovisade på liknande material. Exempel på sådana mätningar redovisas i FIG. III:32. I denna figur har även de principiella kurvorna enligt FIG. III:29-30 markerats. Trots de grova generaliseringarna som gjorts, så är överensstämmelsen i kurvform mycket god.

LITTERATUR

Adamson, B, Ahlgren, L, Bergström, S G & Nevander, L E, 1970, Byggnadstekniska fuktproblem. (Statens råd för byggnadsforskning.) Programskrift 12, Stockholm

Ahlgren, L, 1972, Fuktfixering i porösa byggnadsmaterial. (Institutionen för byggnadsteknik. Tekniska högskolan i Lund.) Rapport 36. Lund

Bomberg, M, 1974, Moisture flow through porous building materials. (Institutionen för byggnadsteknik. Tekniska högskolan i Lund.) Report 52. Lund

Fagerlund, G, 1973, Methods of characterization of pore structure. (Institutionen för byggnadsteknik. Tekniska högskolan i Lund.) Report 41. Lund

Tveit, A, 1966, Measurements of Moisture Sorption and Moisture Permeability of Porous Materials. (Norges Byggforskningsinstitut.) Rapport 45. Oslo

Wexler, A, 1965, Humidity and Moisture (Reinhold Publishing Corporation.) Vol. 3. New York

Vos, B H & Tammes, E, 1968, Flow of water in the liquid phase. (Institute TNO for Building Materials and Building Structures.) Report BI-68-38. Delft

TAB. III:1. Samband mellan kapillärradie (r) och relativ fuktighet (RF) vid kapillärkondensation i en delvis fylld cylindrisk por.

r ($\cdot 10^{-9}\text{m}$)	RF (%)
1000	99,9
100	99
10	90
2,1	60
1,2	40

TAB. III:2. Samband mellan största vattenfyllda por (r), maximal sughöjd (h), porundertryck (P_c) och relativ fuktighet (RF).

r ($\cdot 10^{-6}\text{m}$)	h (m)	P_c (N/m^2)	RF (%)
∞	0	0	100
1480	10^{-2}	9,8	100
148	10^{-1}	$9,8 \cdot 10^2$	100
14,8	1	$9,8 \cdot 10^3$	99,99
1,48	10	$9,8 \cdot 10^4$	99,92
0,148	10^2	$9,8 \cdot 10^5$	99,27
0,0148	10^3	$9,8 \cdot 10^6$	93,00
0,00148	10^4	$9,8 \cdot 10^7$	48,43

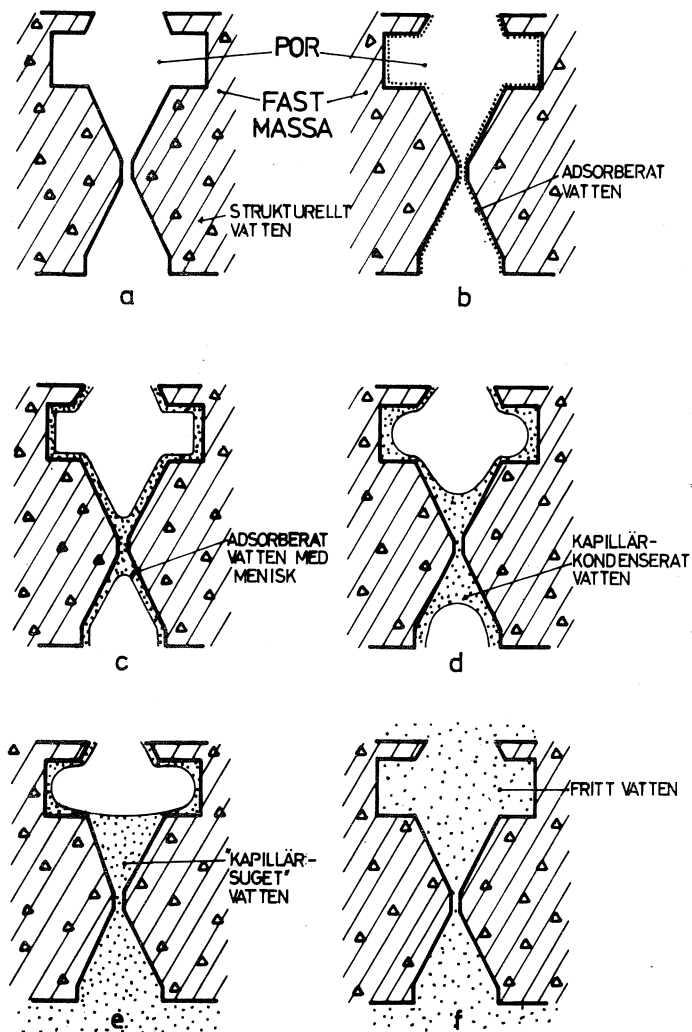


FIG. III:1. Olika fuktfixeringssätt.
Moisture fixation.

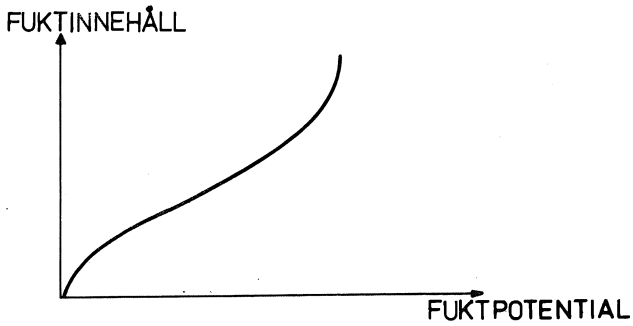


FIG. III:2. Principiell jämviktsfuktkurva.
Moisture equilibrium curve.

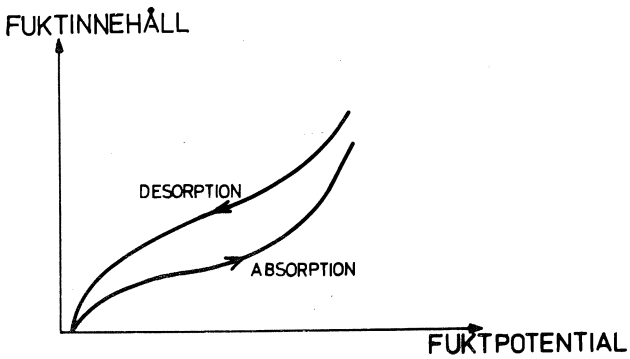


FIG. III:3. Principiell absorptions- och desorptionskurva.
Moisture equilibrium curve at absorption and desorption.

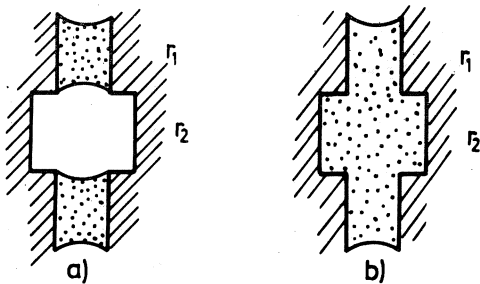


FIG. III:4. Illustration av fukttinnehåll vid fuktpotentialen p_1 med från början torrt (a) respektive fyllt (b) porsystem.
Moisture content at moisture potential p_1 at absorption (a) and at desorption (b).

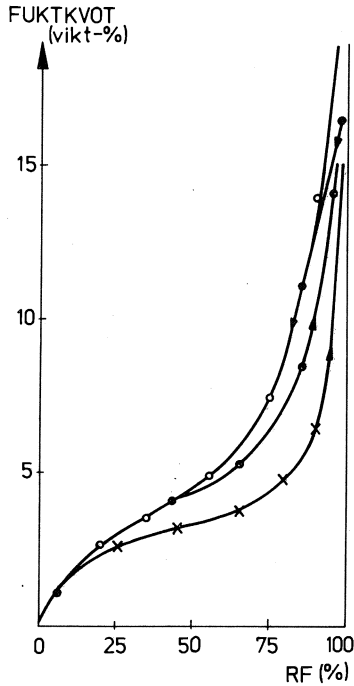


FIG. III:5. Övergångskurvor mellan absorption och desorption för gasbetong $\rho = 510 \text{ kg/m}^3$. (Ahlgren, 1972)

Scanning curves between absorption and desorption, aerated concrete $\rho = 510 \text{ kg/m}^3$.

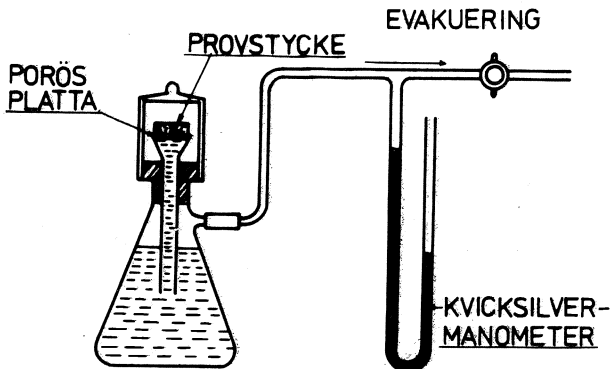


FIG. III:6. Apparat för bestämning av porundertryck.

Apparatus for measurement of suction.

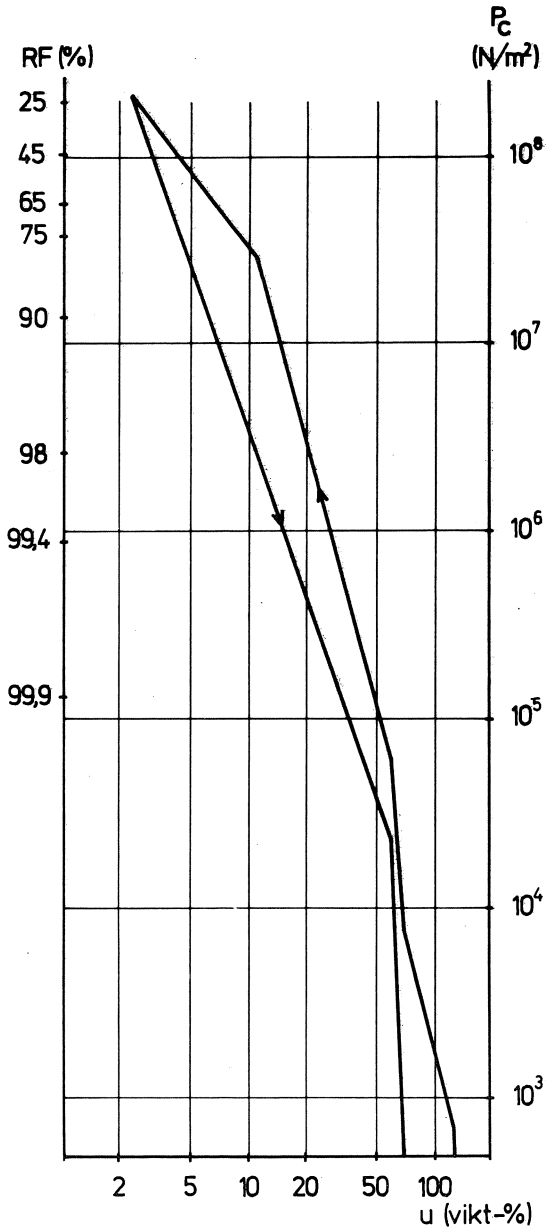


FIG. III:7. Jämviktsfuktkurva för gasbetong med densiteten 500 kg/m³.
(Bomberg, 1974)

Moisture equilibrium curve, aerated concrete with density 500 kg/m³.

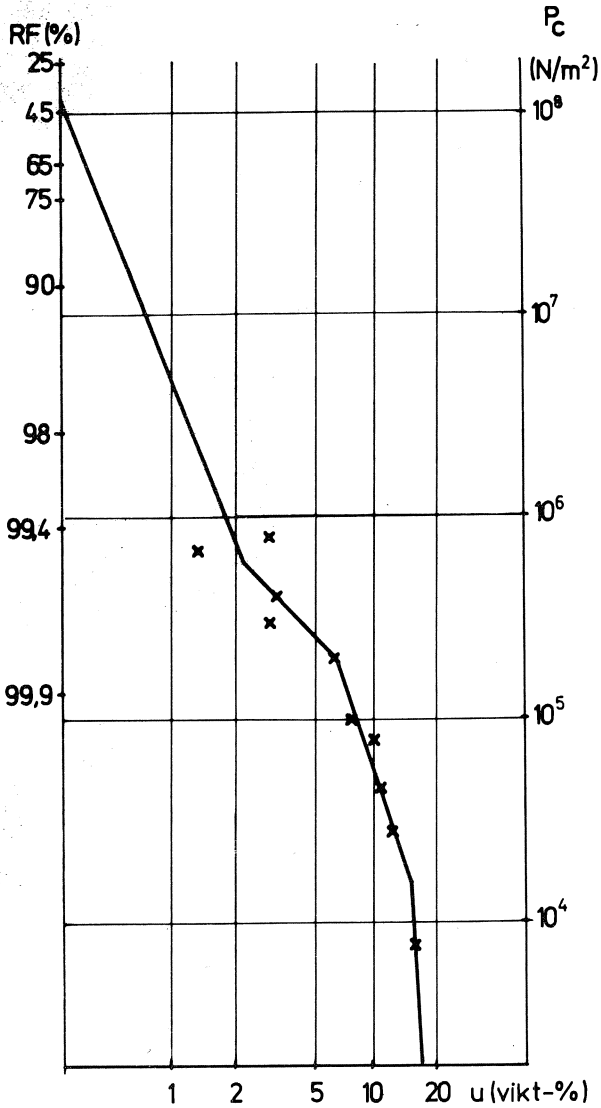


FIG. III:8. Jämviktsfuktkurva för tegel med densiteten 1800 kg/m^3 .
(Bomberg, 1974)

Moisture equilibrium curve, clay brick with density 1800 kg/m^3 .

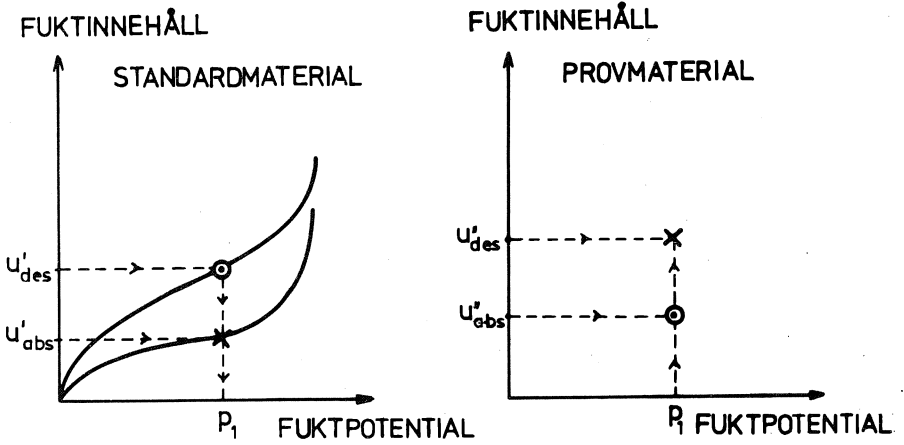


FIG. III:9. Bestämning av jämviktsfuktkurva vid kontaktförsök.

Measurement of equilibrium moisture content at contact test.

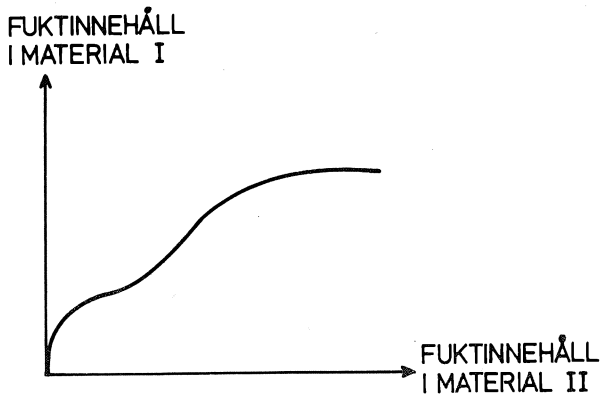


FIG. III:10. Princip samband mellan fukttinnehållet i två material vid jämvikt.

Relation between moisture content in two different materials at moisture equilibrium.

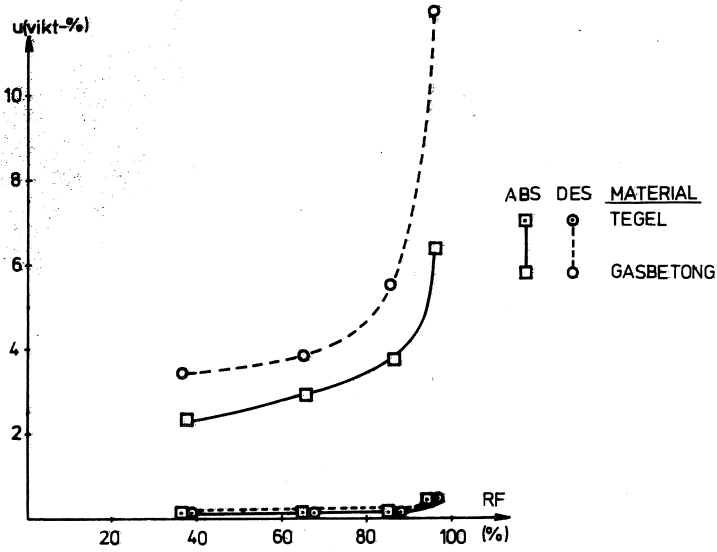


FIG. III:11. Hygroskopisk jämviktsfuktkurva för gasbetong och tegel.

Hygroscopic moisture equilibrium curve, aerated concrete and clay brick.

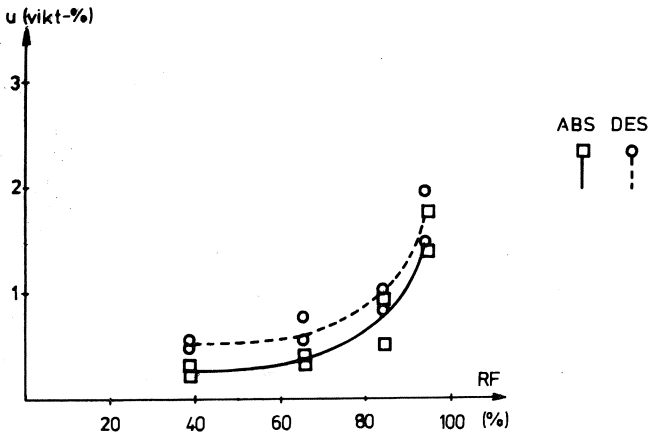


FIG. III:12. Hygroskopisk jämviktsfuktkurva för rivputs.

Hygroscopic moisture equilibrium curve, LC-finishing coat.

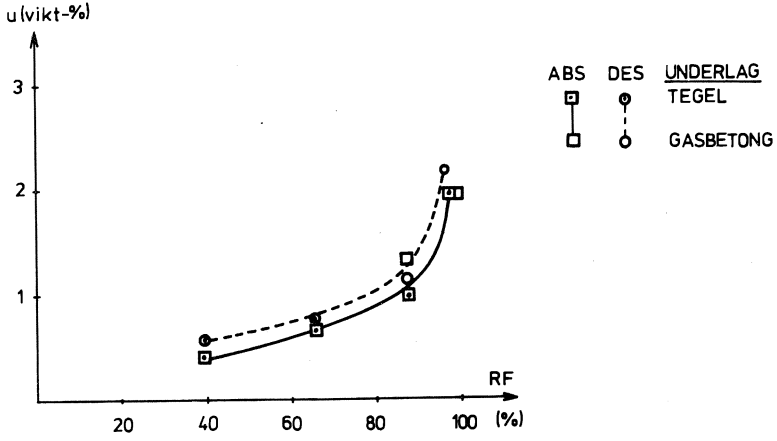


FIG. III:13. Hygroskopisk jämviktsfuktkurva för M-A 100/600.
Hygroscopic moisture equilibrium curve, M-A 100/600.

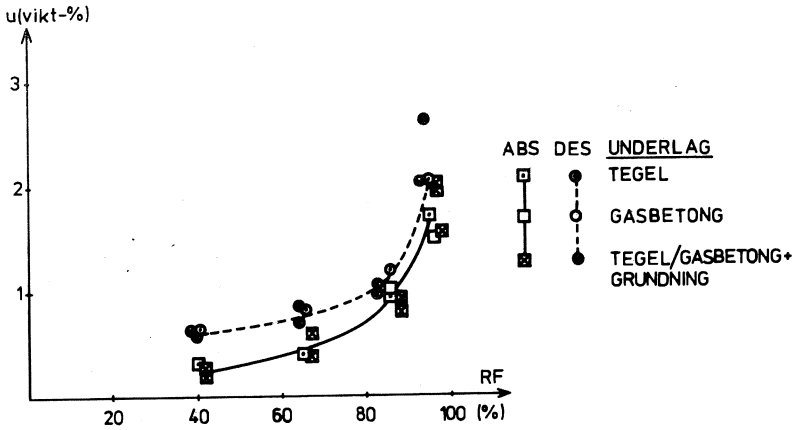


FIG. III:14. Hygroskopisk jämviktsfuktkurva för KC-C 100/650.
Hygroscopic moisture equilibrium curve, LC 50/50/650.

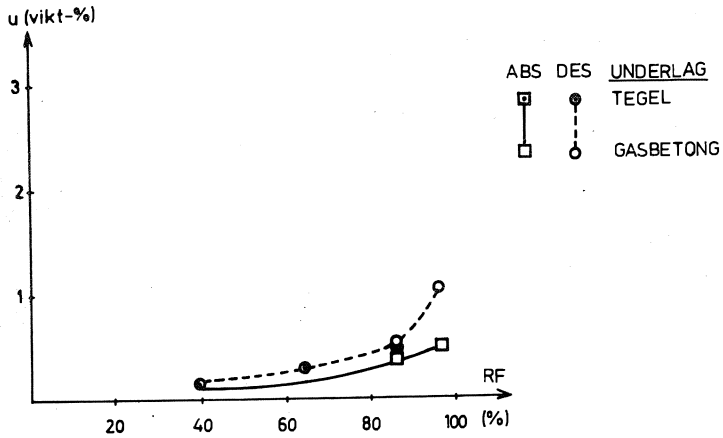


FIG. III:15. Hygroskopisk jämviktsfuktkurva för K 100/800.
Hygroscopic moisture equilibrium curve, L 100/800.

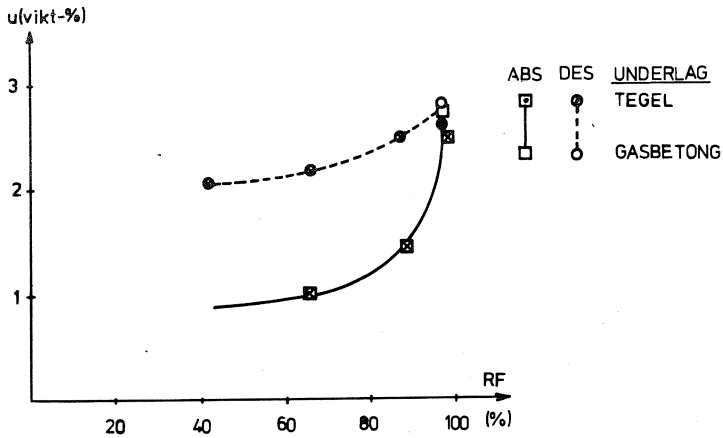


FIG. III:16. Hygroskopisk jämviktsfuktkurva för C 100/425.
Hygroscopic moisture equilibrium curve, C 100/425.

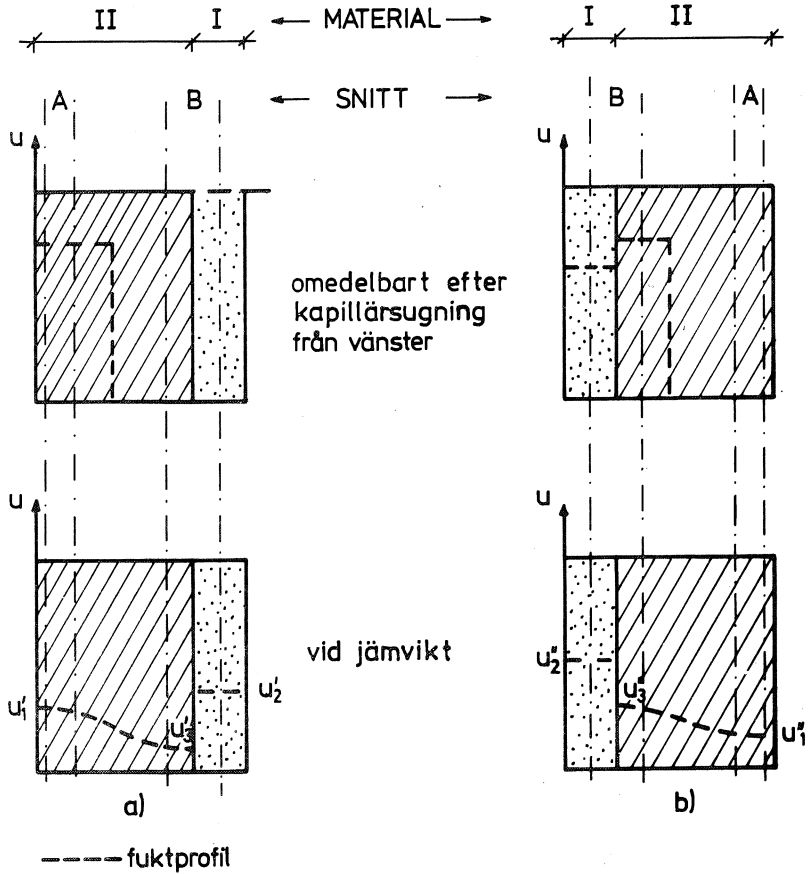
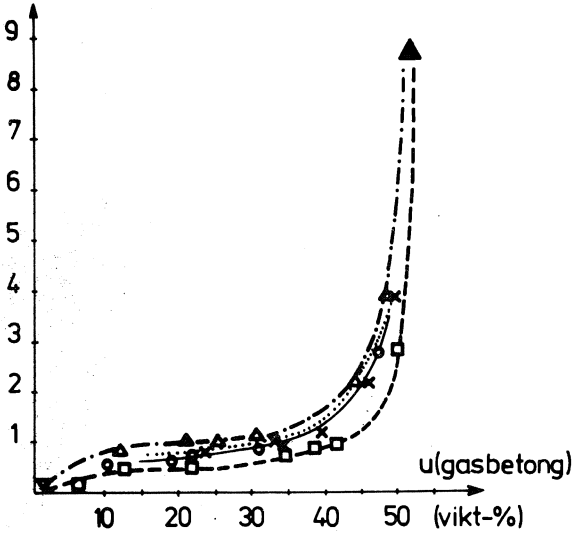
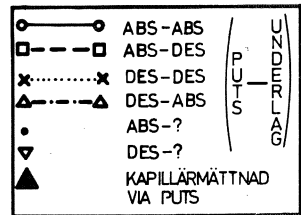


FIG. III:17. Princip för bestämning av relativa kapillära jämviktsfuktkvoter.
Measurement of relative capillary moisture equilibrium curve.

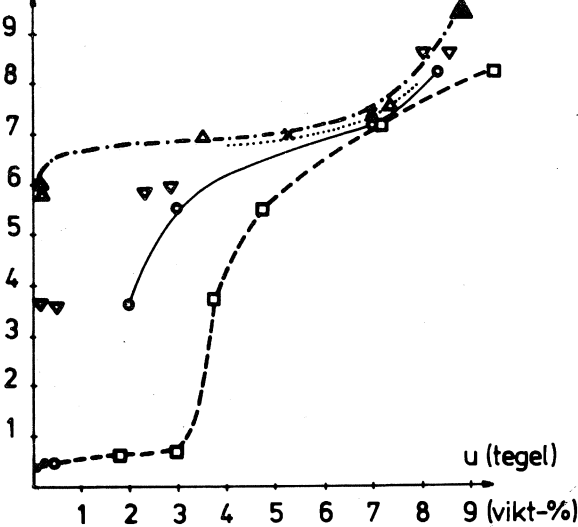
u (puts)
(vikt-%)



K 100/800 PÅ
GASBETONG



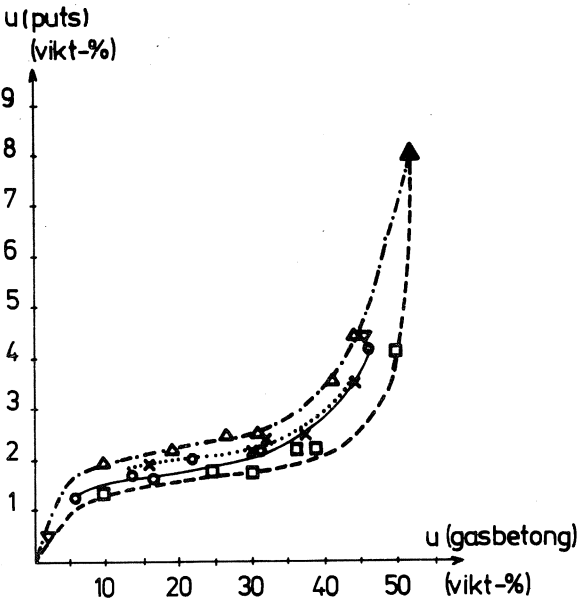
u (puts)
(vikt-%)



K 100/800 PÅ
TEGEL

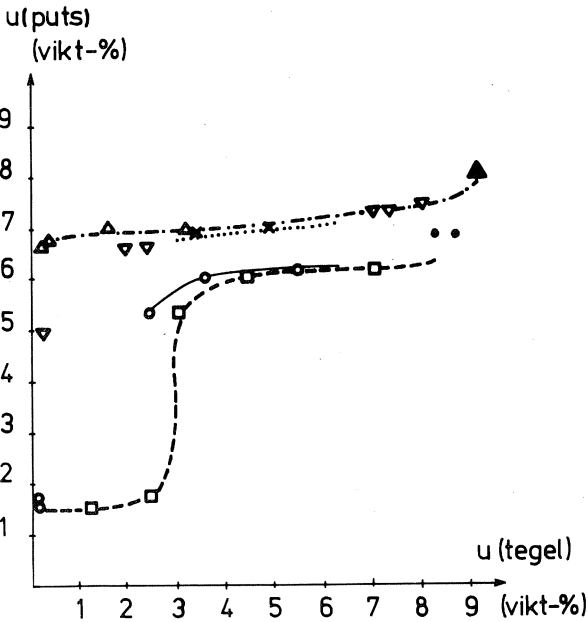
FIG. III:18. Relativa kapillära jämviktsfuktkurvor för K 100/800 på gasbetong respektive tegel.

Relative capillary moisture equilibrium curve, L 100/800 on aerated concrete (upper) and on clay brick (bottom).



KC-C 100/650 PÅ
GASBETONG

○	—	○	ABS-ABS	(U P S — O M R E G A G)
□	- - -	□	ABS-DES	
x	⋯	x	DES-DES	
△	- - -	△	DES-ABS	
•			ABS-?	
▽			DES-?	
▲			KAPILLÄRMÄTTNAD VIA PUTS	



KC-C 100/650 PÅ
TEGEL

FIG. III:19. Relativa kapillära jämviktsfuktkurvor för KC-C 100/650 på gasbetong respektive tegel.

Relative capillary moisture equilibrium curve, LC 50/50/650 on aerated concrete (upper) and on clay brick (bottom).

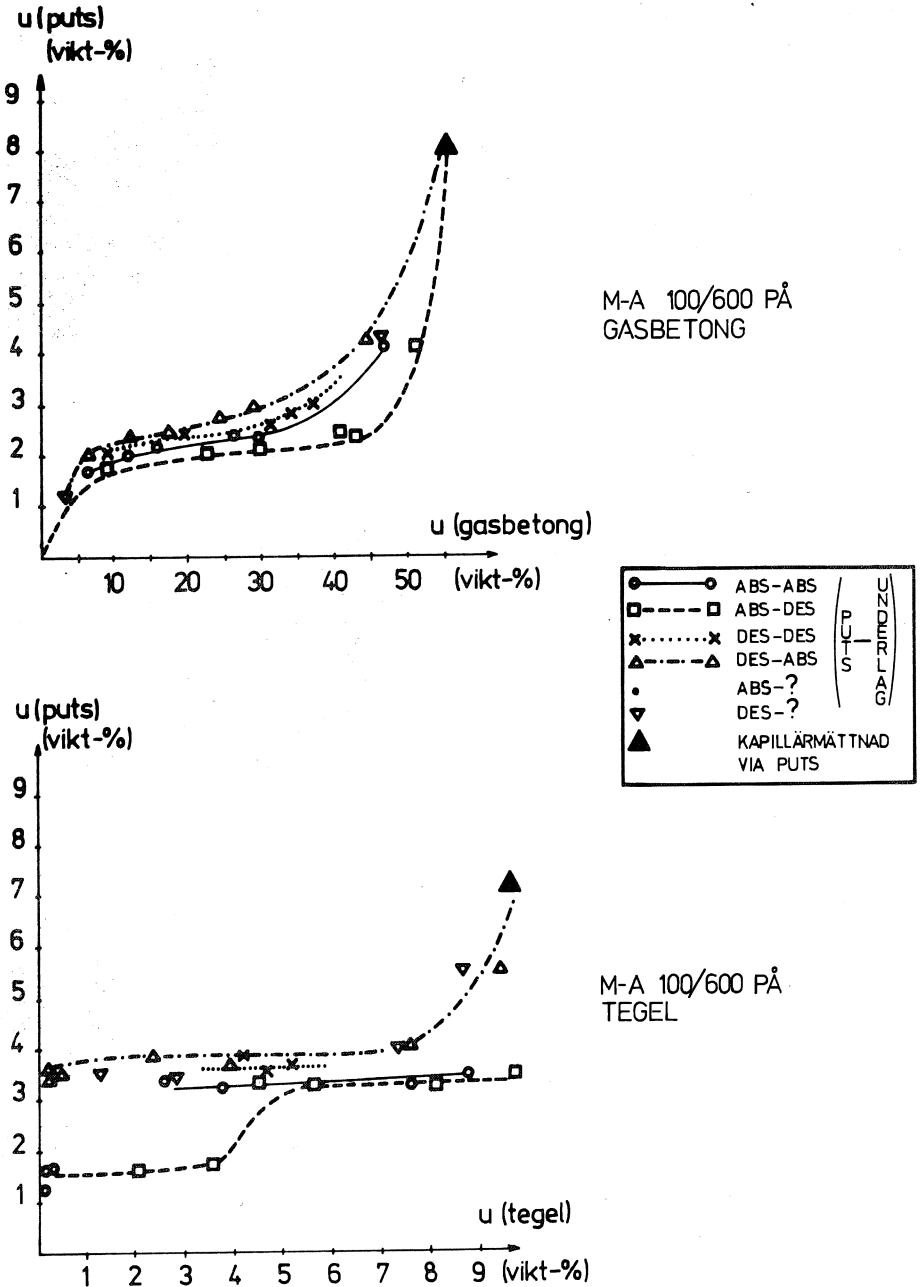


FIG. III:20. Relativa kapillära jämviktsfuktkurvor för M-A 100/600 på gasbetong respektive tegel.

Relative capillary moisture equilibrium curve, M-A 100/600 on aerated concrete (upper) and on clay brick (bottom).

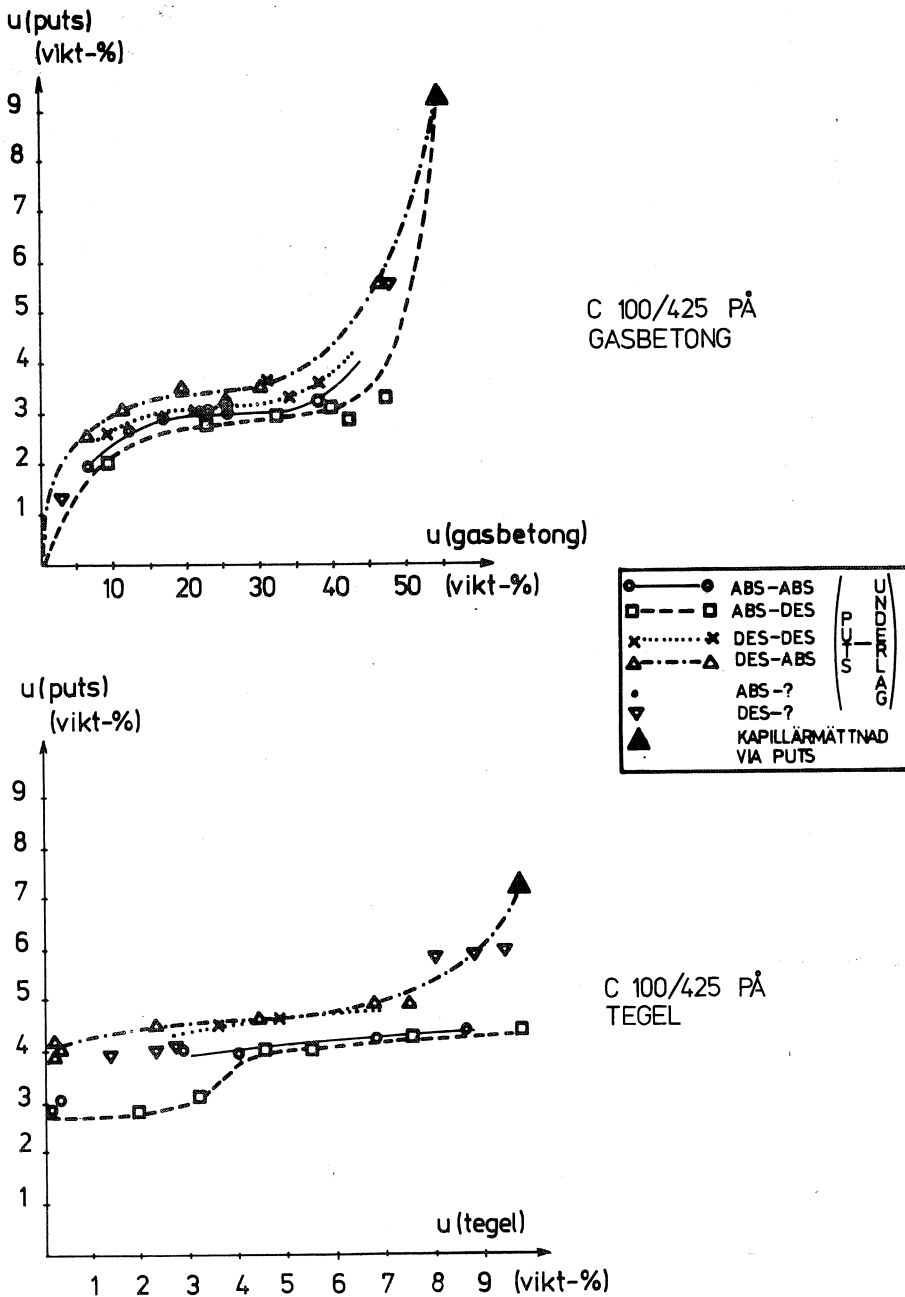
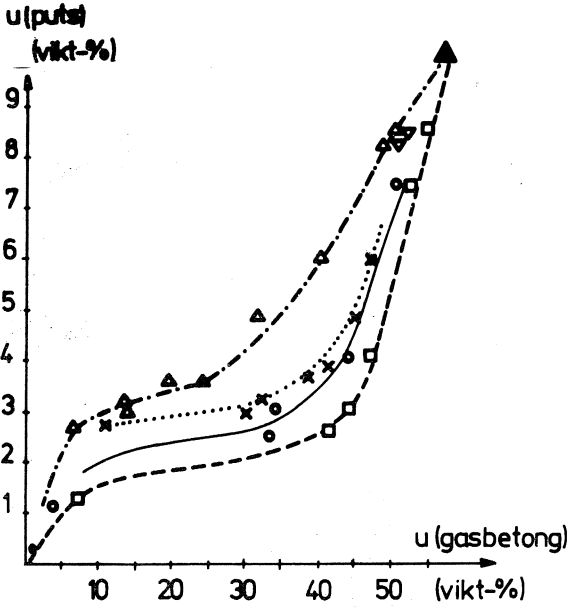
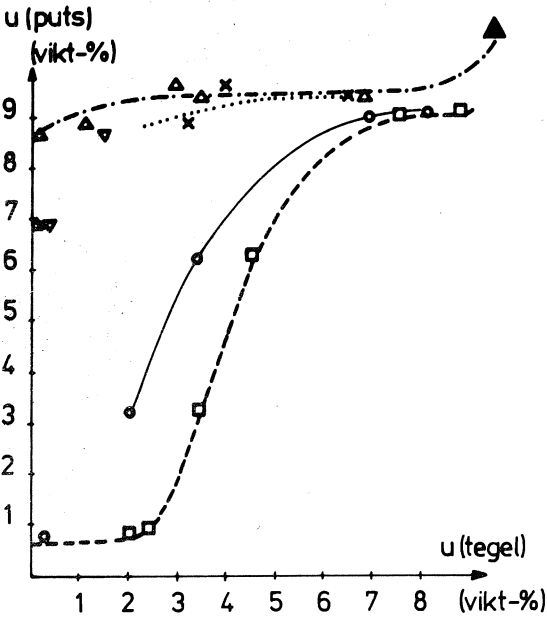


FIG. III:21. Relativa kapillära jämviktsfuktkurvor för C 100/425 på gasbetong respektive tegel.

Relative capillary moisture equilibrium curve, C 100/425 on aerated concrete (upper) and on clay brick (bottom).



RIVPUTS I 3-SKIKTSPUTS
PÅ GASBETONG



RIVPUTS I 3-SKIKTSPUTS
PÅ TEGEL

○	—	○	ABS-ABS	STUVERLAG
□	- - -	□	ABS-DES	
x	⋯	x	DES-DES	
△	- - -	△	DES-ABS	
•			ABS-?	
▽			DES-?	
▲			KAPILLÄRMÄTNAD VIA PUTS	

FIG. III:22. Relativa kapillära jämviktsfuktkurvor för rivputs på gasbetong respektive tegel.

Relative capillary moisture equilibrium curve, LC-finishing coat on aerated concrete (upper) and on clay brick (bottom).

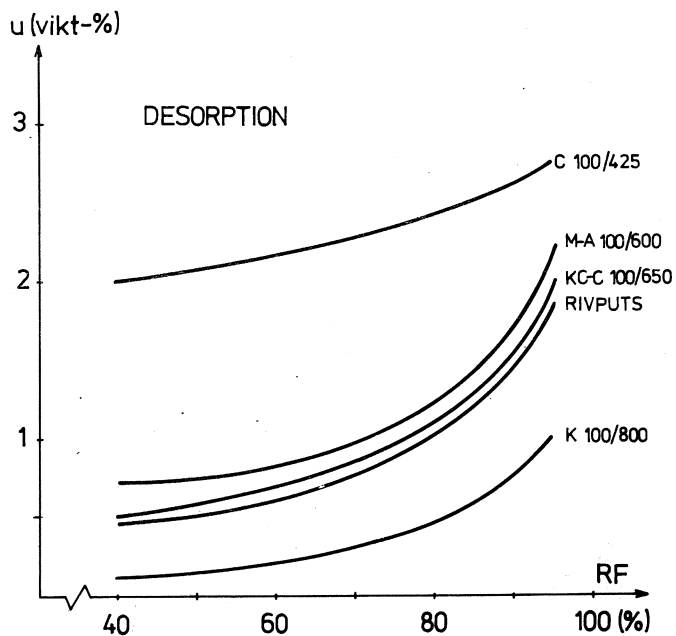
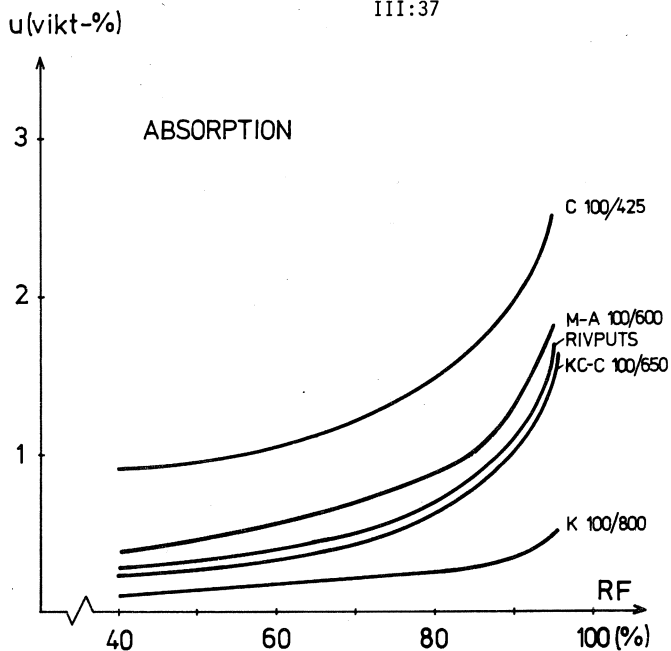
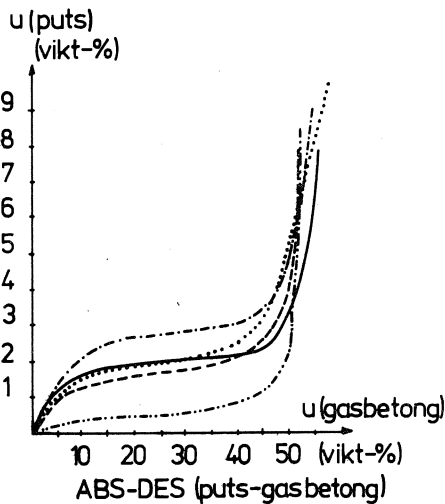
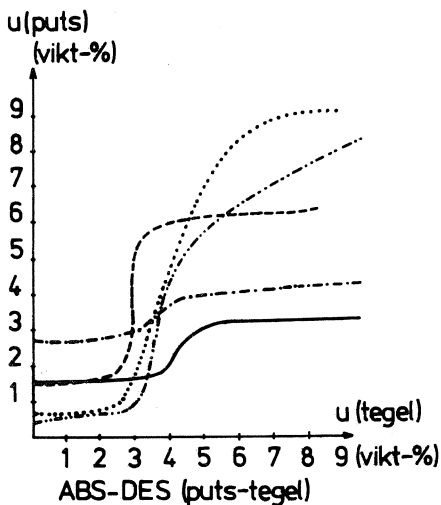
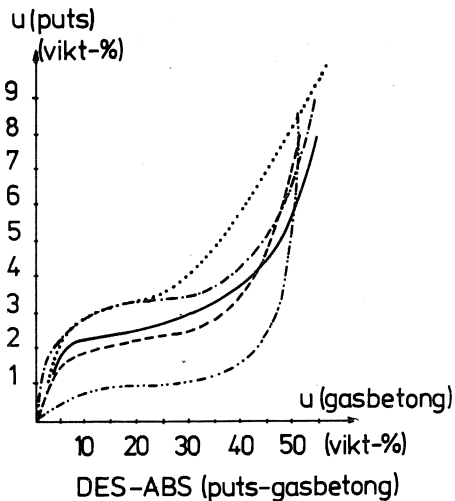
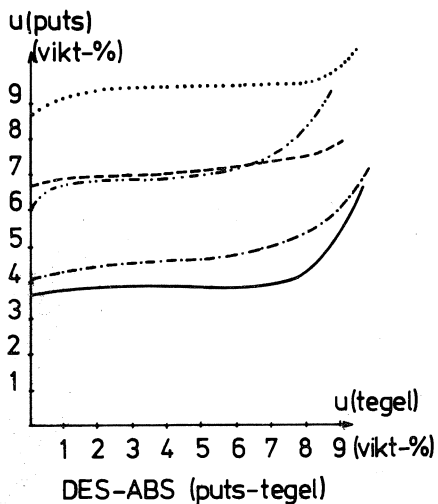


FIG. III:23. Olika putsers hygroskopiska jämviktsfuktkurvor.

Hygroscopic moisture equilibrium curves of different renderings.



- M-A 100/600
- - - C 100/425
- · - K 100/800
- - - - KC-C 100/650
- · · · · RIVPUTS I 3-SKIKTSPUTS

FIG. III:24. Relativa kapillära jämviktsfuktkurvor för olika putser och underlag.

Relative capillary moisture equilibrium curves of different renderings.

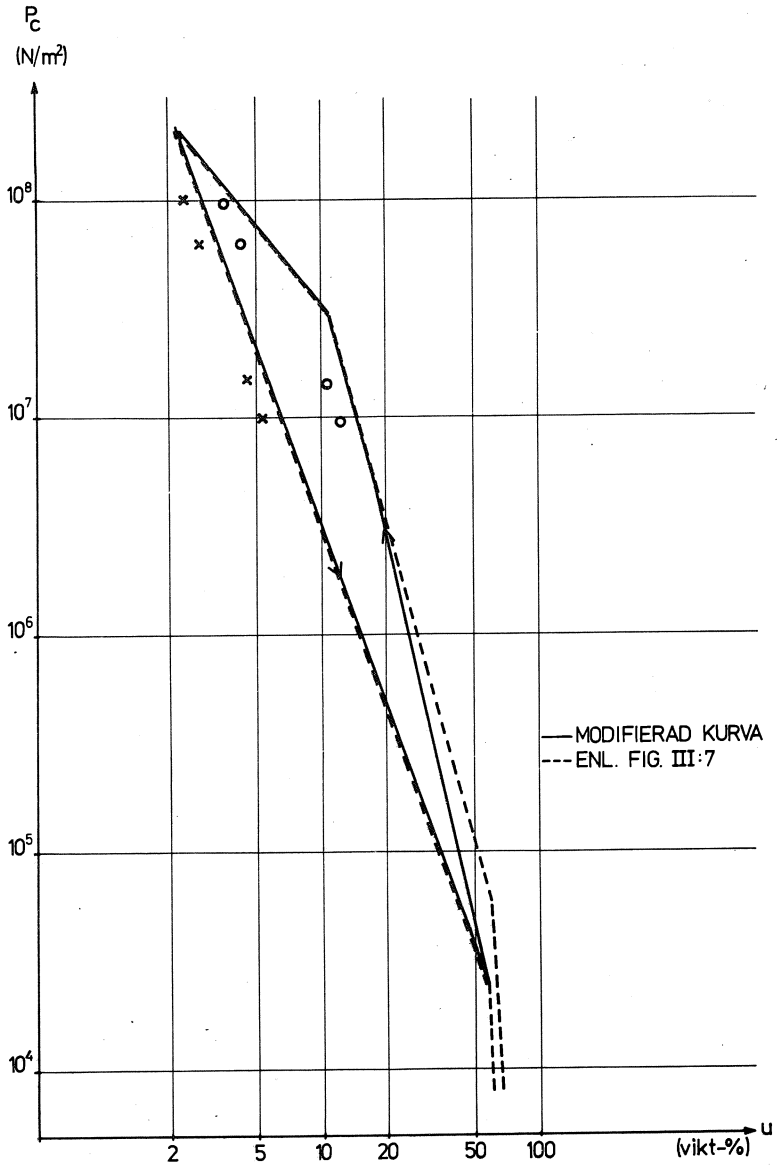


FIG. III:25. Modifierad jämviktsfuktkurva för gasbetong med $\rho = 500 \text{ kg/m}^3$.
 Modified moisture equilibrium curve, aerated concrete with
 density 500 kg/m^3 .

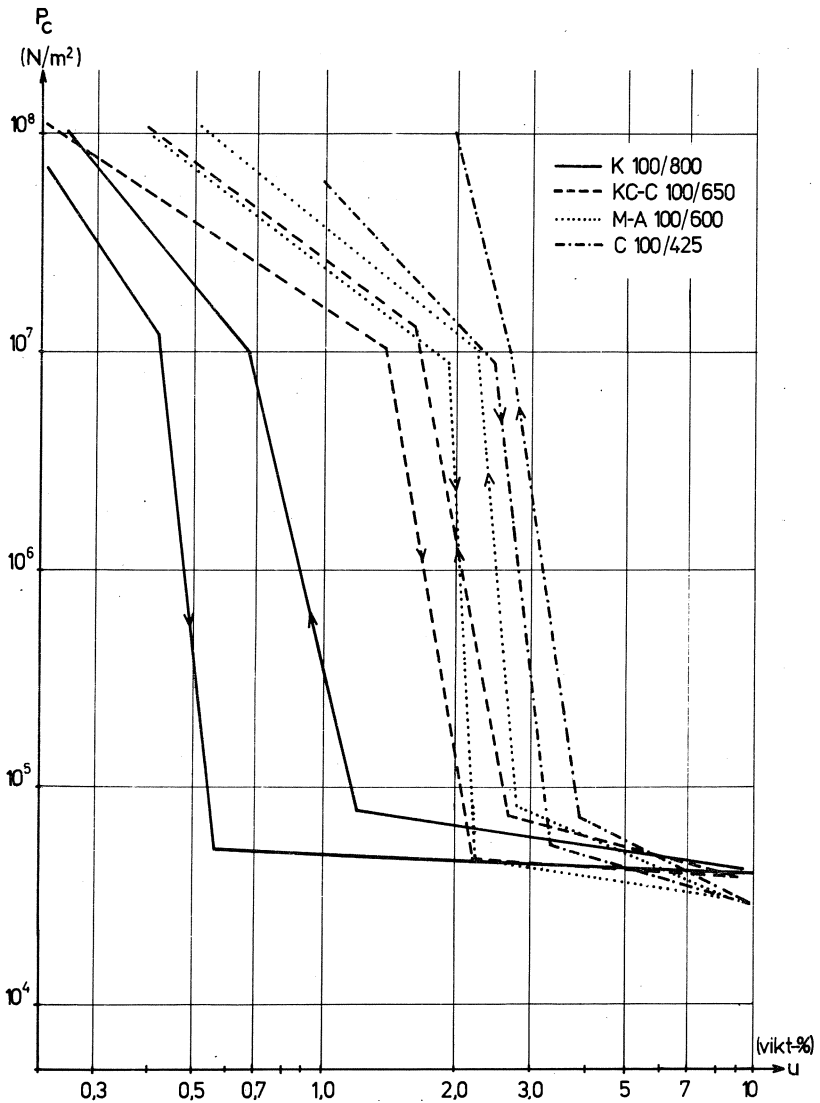


FIG. III:26. Beräknade jämviktsfuktkurvor för olika putser.

Calculated moisture equilibrium curves of different renderings.

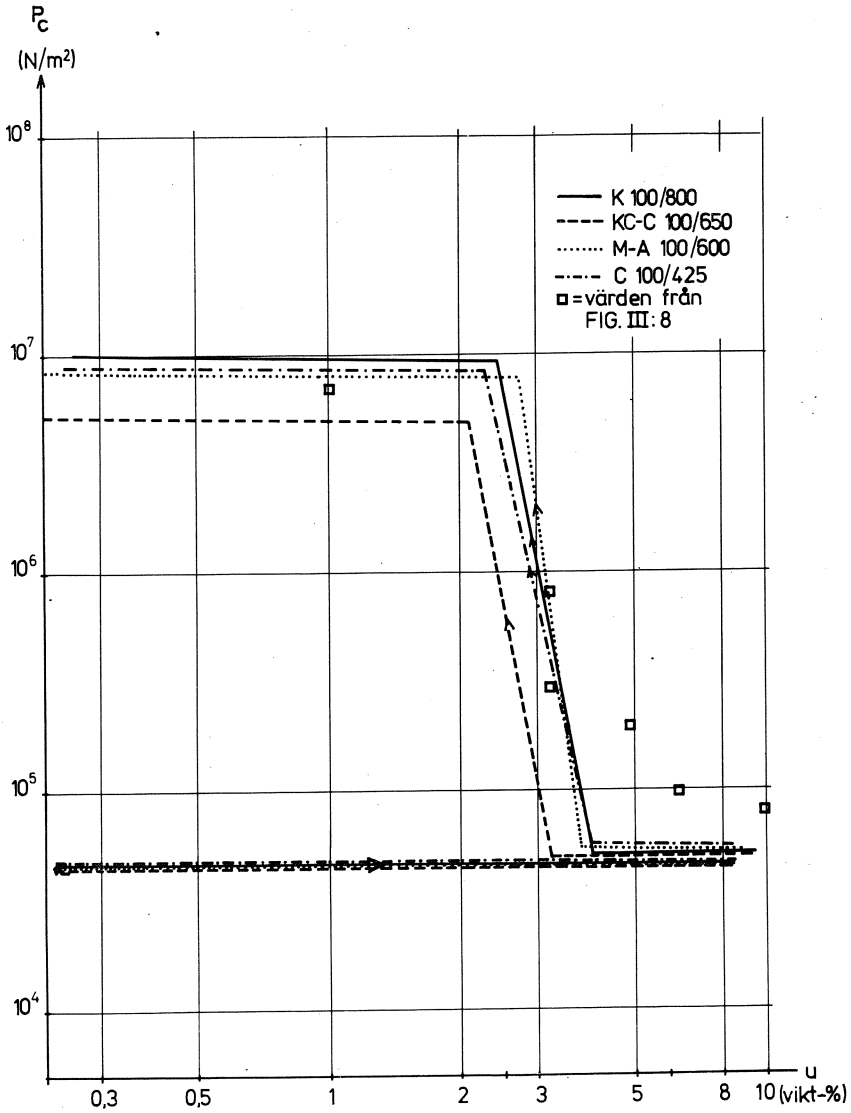


FIG. III:27. Beräknad jämviktsfuktkurva för tegel.

Calculated moisture equilibrium curve of clay brick.

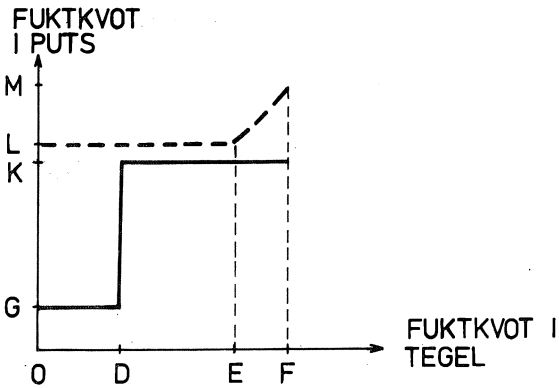
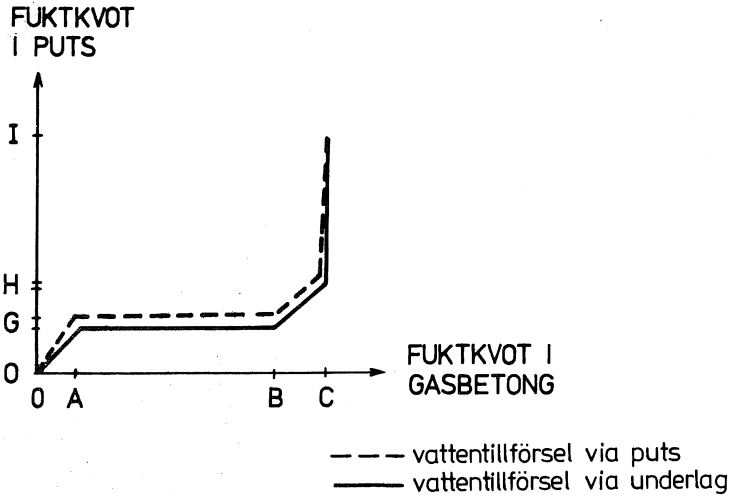


FIG. III:28. Schematiserade relativa kapillära jämviktsfuktkurvor.
Schematic relative capillary moisture equilibrium curves.

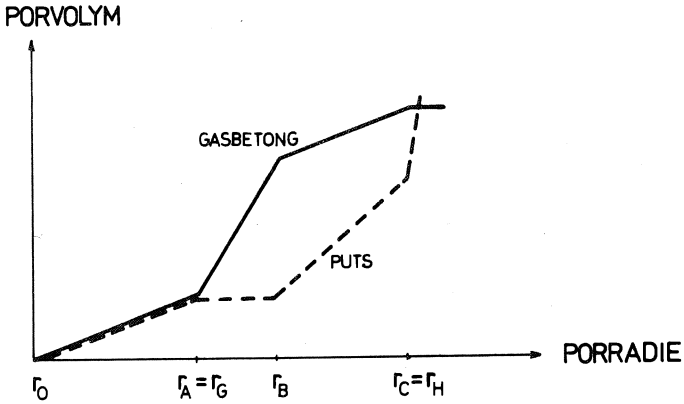


FIG. III:29. Möjliga porstorleksfördelningar i puts respektive gasbetong.
Possible pore-size distributions in rendering and aerated concrete.

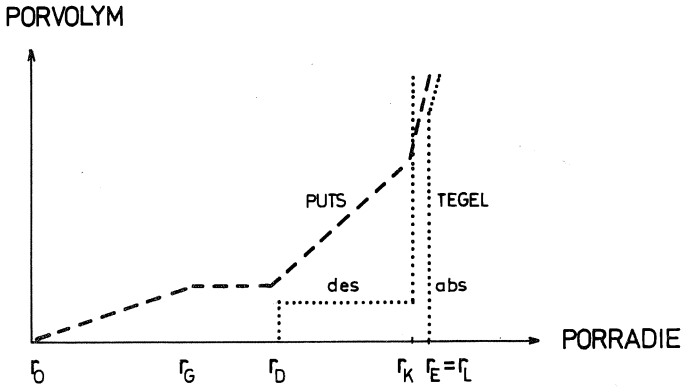


FIG. III:30. Möjliga porstorleksfördelningar i puts respektive tegel.
Possible pore-size distributions in rendering and clay brick.

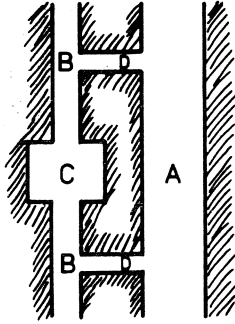


FIG. III:31. Pormodell för tegel.
Pore model of clay brick.

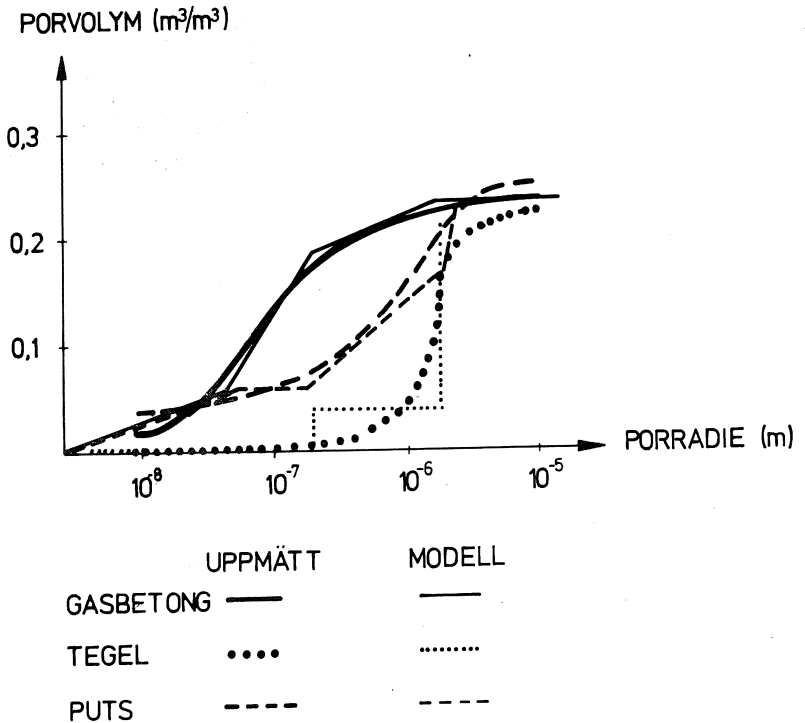


FIG. III:32. Porstorleksfördelningar enligt principmodell och enligt mätningar på liknande material.
Pore-size distributions according to the model and according to measurements on similar materials.

Avdelningen för Byggnadsmateriallära
Tekniska Högskolan i Lund

PUTSENS INVERKAN PÅ FASADENS FUKTBALANS

Delrapport IV: FUKTTRANSPORT I ÅNGFAS

Lund i mars 1980

Kenneth Sandin

Denna delrapport hänför sig till forskningsanslag 740269-8 från Statens Råd för Byggnadsforskning till avdelningen för Byggnadsmateriallära, Tekniska Högskolan i Lund. Hela projektet slutredovisas i en huvudrapport och åtta delrapporter.

INNEHÅLL

1	INLEDNING	IV:2
2	TEORI	IV:4
2.1	Olika transportmekanismer	IV:4
2.2	Totaltransport vid en ånghaltsskillnad	IV:6
2.3	Praktisk beräkning av fukttransport vid en ånghaltsskillnad	IV:8
2.4	Kondens	IV:12
2.5	Uttorkning	IV:14
3	MÄTNING AV ANGGENOMSLÄPPLIGHET	IV:16
3.1	Olika metoder, allmänt	IV:16
3.2	"Standardmetoder" för puts	IV:19
3.3	Alternativa metoder	IV:22
4	EGNA MÄTNINGAR	IV:23
4.1	Skålmetod	IV:23
4.2	Uttorkningsförsök	IV:26
5	DISKUSSION AV RESULTATEN	IV:27
5.1	Allmänt	IV:27
5.2	Fuktnivå - ånggenomsläpplighet	IV:27
5.3	Lämplig mätmetod för puts/ytskikt	IV:29
	LITTERATUR	IV:32
	TABELLER	IV:34
	FIGURER	IV:40

1 INLEDNING

Inom byggnadstekniken kallas ofta slentrianmässigt all fukttransport i ångfas för "diffusion". Detta har många gånger bidragit till felaktiga slutsatser i samband med bedömningar av inträffade skador. En följd härav blir lätt att "erfarenheten" blir snedvriden. Vid fukttransport i ångfas måste man nämligen skilja på diffusion och konvektion.

Ångtransport på grund av konvektion sker under inverkan av en totaltrycksskillnad. Skillnaden i totaltryck ger upphov till en luftström, vilken i sin tur för med sig vattenånga. Luftens ånghalt påverkar inte på något sätt den transporterade luftmängden. Avgörande för den transporterade luftmängden är enbart totaltrycksskillnaden och genomsläpligheten för luft. Den transporterade vattenångmängden påverkas naturligtvis även av ånghalten i den genomströmmande luften.

I normala murverksväggar är luftgenomsläpligheten genom själva materialen liten. Några problem med fukttransport på grund av konvektion genom själva materialen föreligger sålunda inte i allmänhet. Genom springor eller liknande kan däremot fukttransporten på grund av konvektion bli avsevärd. Detta förutsätter då även att det finns en totaltrycksskillnad. Denna totaltrycksskillnad kan exempelvis uppstå vid blåst eller på grund av ventilationssystemet. För putsade murverk är fukttransport på grund av konvektion inget problem. Problem i samband med konvektion diskuteras bl a av Nevander (1968) och behandlas inte i denna delrapport.

Ångtransport genom diffusion sker under inverkan av en skillnad i ånghalt. Själva transportmekanismen kan vara olika, men vid praktiska beräkningar brukar man ändå betrakta hela transporten som en ångtransport på grund av en ånghaltsskillnad. Denna ånghaltsskillnad uppstår i praktiken exempelvis mellan in- och utsida hos en yttervägg på grund av att fukt tillförs inomhusluften genom olika aktiviteter. I normala bostadshus har inomhusluften en ånghalt som är 2-4 g/m³ större än utomhusluftens. Detta medför en fukttransport ut genom väggen och under ogynnsamma förhållanden kan skadlig kondens uppstå i väggen.

Fukttransport genom diffusion, med tillhörande problem inom byggnadstekniken, är ett ämne som studerats mycket och där kunskaperna är stora. Floran av speciallitteratur är mycket rikhaltig. Denna delrapport är inte avsedd som ett ytterligare bidrag till denna litteratur utan skall närmast ses som en kortfattad sammanfattning av dagens kunskaper om diffusionsförloppet med hänvisningar till speciallitteraturen.

Det främsta syftet med denna delrapport är att granska de i Sverige använda metoderna för bestämning av putsers och ytskikts fuktgenomsläpplighet samt att studera i vilken utsträckning erhållna värden är användbara vid praktiska beräkningar. I viss mån studeras även alternativa metoder.

2 TEORI

2.1 Olika transportmekanismer

Allmänt

Med diffusion avses allmänt "ett kemiskt ämnes förflyttning från ett ställe med hög koncentration till ett ställe med låg koncentration". Denna diffusionsprocess strävar efter att utjämna alla koncentrationskillnader och beror på molekylernas ständiga rörelse. Diffusionshastigheten beror på koncentrationskillnaden och på inblandade ämnen. Utjämningen sker snabbast mellan två gaser. I vätskor sker utjämningen betydligt långsammare medan den i fasta ämnen ofta är omätbar.

Allmänt kan diffusionsprocessen uttryckas med Fick's lag

$$g = -D \cdot \frac{dc}{dx} \quad (\text{IV:1})$$

där

g	= flödestäthet	$\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$
D	= diffusionskoefficient	m^2/s
c	= koncentration	kg/m^3
x	= längdkoordinat	m

För vattenånga i luft varierar diffusionskoefficienten empiriskt enligt

$$D = (22,2 + 0,14 \cdot \vartheta) \cdot 10^{-6} \quad (\text{IV:2})$$

där ϑ = temperatur $^{\circ}\text{C}$

Som jämförelse kan nämnas att enligt teoretiska beräkningar är diffusionskoefficienten för vattenånga i luft ca 10^4 gånger större än för vatten i vatten och ca 10^7 gånger större än för vatten i polymerer (Klopfer, 1974).

Vattenångdiffusion i porösa material

För vattenångdiffusion i luft gäller enligt förgående avsnitt ekvation (IV:1). I ett poröst material kan samma diffusionsprocess ske i de luftfyllda porerna. Flödet kommer naturligtvis att bli väsentligt mindre i ett poröst material än i luft, eftersom bara porerna är tillgängliga för fukttransporten. Angtransporten i ett poröst material kan

alltså beskrivas med i princip samma ekvation som ångdiffusion i luft. Det enda som ändras är diffusionskoefficienten. Storleken på denna bestäms av porstrukturen i materialet. Flödet i ett poröst material ges då av

$$g = -\delta \cdot \frac{dv}{dx} \quad (\text{IV:3})$$

där δ = diffusionskoefficient för vattenånga m^2/s
 v = ånghalt kg/m^3

Diffusionskoefficienten kallas även permeabiliteten för vattenånga. I vissa fall (främst i Tyskland) anges i stället för diffusionskoefficienten en diffusionsmotståndsfaktor, μ . Denna diffusionsmotståndsfaktor anger förhållandet mellan diffusionskoefficienten i luft och i aktuellt material enligt

$$\mu = \frac{D}{\delta} \quad (\text{IV:4})$$

Renodlad diffusion förutsätter att alla porer är luftfyllda. Detta förutsätter i sin tur ett lågt fukttinnehåll. Vid högre fukttinnehåll kommer en del porer helt eller delvis att vattenfyllas. Fuktttransporten kommer då att ske både genom diffusion och kapillärsugning. (se avsnitt 2.2)

Lösningsdiffusion i polymera material

I polymera material med låg pigmentvolymkoncentration finns i vissa fall inga porer där diffusion enligt föregående avsnitt kan ske. För att en fuktttransport skall kunna ske i ett sådant material måste vattenångmolekylerna vandra genom själva polymeren. Denna process, "lösningsdiffusion" eller "aktiverad diffusion", sker genom att vattenångmolekylerna efterhand tränger in mellan polymerens molekyler. I samband härmed sker även en svällning av polymeren.

En förutsättning för att lösningsdiffusionen skall kunna ske är att vattenången har en viss löslighet i polymeren. Denna löslighet definieras som antalet vattenångmolekyler som polymeren kan absorbera vid en given fuktpotential. En ökad löslighet ger i allmänhet en ökad fuktttransport. Den transporterade fuktmängden påverkas även av polymerens motstånd mot att förflytta en vattenångmolekyl i polymeren.

Polymerens "totala fuktgenomsläpplighet" (ångpermeabiliteten) bestäms sålunda både av vattenångans löslighet och "rörlighet" i polymeren. Bägge dessa faktorer är starkt beroende av bl a polymertyp och polymerkedjornas styvhet.

En högre fuktpotential medför i allmänhet att lösligheten ökar, vilket i sin tur medför att ångpermeabiliteten ökar.

Övriga transportmekanismer

Fukttransport i ångfas kan även förekomma genom andra mekanismer. Förutom den i inledningen nämnda fuktkonvektionen förekommer ångtransport genom effusion (i mycket små porer) och termodiffusion (vid en temperaturgradient). I samband med fasader saknar dessa dock betydelse och diskuteras inte i fortsättningen.

I vissa fall betraktas även fukttransport i vätskefas beräkningsmässigt som transport i ångfas. (Jfr 2.2)

Förutom den i delrapport V behandlade rena kapillärtransporten kan vätsketransport bl a ske genom att vatten som absorberats på porväggarna, förflyttas under inverkan av olika tryck på olika ställen. Alternativt relateras denna transport ibland till tjockleken hos det absorberade vattenskiktet. Transporten går alltid mot den mindre skikt-tjockleken. Enligt vissa litteraturuppgifter kan denna transport i vissa fall bli avsevärd, flera gånger större än den rena diffusionen.

Anledningen till att ovanstående mekanismer betraktas som ångtransport är att ånghalten används som potential vid beräkningar. Vidare är det den totala fukttransporten som mäts vid laboratorieprovningar av olika materials ånggenomsläpplighetsegenskaper.

Olika transportmekanismer för vatten i ång- och vätskefas behandlas utförligt bl a av Klopfer (1974).

2.2 Totaltransport vid en ånghaltsskillnad

Av praktiska skäl vill man uttrycka den totala fukttransporten under inverkan av en ånghaltsskillnad med en enda ekvation. Vid praktiska beräkningar saknar ju transportsättet ofta betydelse.

Det intressanta är enbart den transporterade mängden. Denna kan då tecknas

$$g = \frac{\delta_v}{d} \cdot (v_1 - v_2) \quad (\text{IV:5})$$

där g = fuktflödestäthet $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$
 δ_v = ånggenomsläpplighetskoefficient m^2/s
 d = tjocklek m
 $v_1 - v_2$ = ånghaltsskillnad kg/m^3

Ånggenomsläpplighetskoefficienten inkluderar då samtliga transportmekanismer och blir en materialegenskap som varierar med fuktinnehållet. Ett högre fuktinnehåll ger ofta en större ånggenomsläpplighetskoefficient. I porösa material kan exempelvis vissa porer helt eller delvis vattenfyllas vid höga fukttillstånd, vilket medför att vattnet lokalt kan transporteras i vattenfas. I polymera material kan vid höga fukttillstånd stora mängder vatten absorberas i polymeren, vilket medför en kraftig svällning. Båda dessa mekanismer medför att ånggenomsläpplighetskoefficienten ökar. En bättre benämning vore egentligen fuktgenomsläpplighetskoefficient. Att den trots detta kallas för ånggenomsläpplighetskoefficient beror på att ånghalten används som "formell" drivkraft.

För att kunna använda ekvation (IV:5) måste δ_v vara känd vid olika fukttillstånd. Fukttillståndets inverkan på δ_v varierar för olika material. I FIG. IV:1 redovisas δ_v som funktion av RF för några olika material enligt Tveit (1966).

För tunna materialskikt, exempelvis färger, tunnputser och folier, är det mer praktiskt att ange ånggenomsläppligheten för hela skiktet (per-meansen). Denna ges då av

$$P_v = \frac{\delta_v}{d} \quad (\text{IV:6})$$

där P_v = ånggenomsläpplighet m/s

Även P_v kommer naturligtvis att bli starkt beroende av fuktnivån.

I stället för att ange ånggenomsläppligheten hos ett materialskikt kan man använda ett ånggenomgångsmotstånd, som då definieras genom

$$Z_v = \frac{1}{P_v} = \frac{d}{\delta_v} \quad (\text{IV:7})$$

där Z_v = ånggenomgångsmotstånd s/m

På samma sätt som i fallet med renodlad diffusion används även vid en totaltransport diffusionsmotståndsfaktorn μ för att ange materialens egenskaper. (jfr ekvation (IV:4))

Ånggenomsläpplighetskoefficienten är temperaturberoende. Inverkan av temperaturen varierar med transportsättet och därmed indirekt med fuktnivån. Vid renodlad diffusion i luft och porösa material ökar koefficienten med temperaturen (jfr ekv (IV:2)). Om däremot fukttransporten i vattenfas dominerar så minskar koefficienten med ökande temperatur. Att koefficienten minskar med temperaturen i detta fall kan vid en första anblick verka konstigt, eftersom vanlig kapillärtransport i ett kapillärrör ökar med temperaturen. Anledningen till den minskande ånggenomsläpplighetskoefficienten är att den beräkningsmässiga ånghaltsskillnaden ökar mer med temperaturen än kapillärsugningshastigheten.

Vid praktiska beräkningar bortser man oftast från temperaturens inverkan på ånggenomsläpplighetskoefficienten. Enligt Tveit (1966) är inverkan obetydlig vid praktiskt förekommande klimat.

I vissa fall, exempelvis vid mycket låga temperaturer då vattnet i porerna kan frysa till is, måste dock hänsyn tas till temperaturinverkan.

2.3 Praktisk beräkning av fukttransport vid en ånghaltsskillnad.

Allmänt

En exakt beräkning av fukttransporten på grund av en ånghaltsskillnad blir mycket komplicerad och kräver tillgång till dator. Anledningen till detta är främst att när fuktillståndet ändras i materialet, så måste även fuktkvoten ändras enligt jämviktsfuktkurvan. Detta kräver ett tillskott eller bortgång av vatten, vilket i vissa fall kan ta lång tid. De metoder som redovisas i fortsättningen förutsätter att denna fuktkvotsförändring har skett i materialet, d.v.s. ett stationärt förhållande råder. Denna fuktkvotsskillnad medför också att ånggenomsläpplighetskoefficienten inte är konstant genom hela materialet.

För praktiska beräkningar med de förenklade metoderna förutsätts dock att ånggenomsläpplighetskoefficienten är konstant. Värdet på denna får väljas med hänsyn till aktuellt fuktinnehåll.

Detaljerade datorberäkningar, där hänsyn tagits till ovanstående faktorer, redovisas av Sandberg (1973). Den metod som redovisas här överensstämmer helt med metoden i Kommentarer till Svensk Byggnorm 1975:3.

Ett homogent material

Fukttransporten på grund av en ånghaltsgradient ges enligt tidigare av

$$g = -\delta_v \cdot \frac{dv}{dx} \quad (\text{IV:3})$$

Vid stationärt tillstånd sker ingen förändring av materialets fuktinnehåll. Samma fukt mängd måste passera varje snitt i väggen, g är alltså konstant oberoende av x . Detta medför, om δ_v antas konstant, att även $\frac{dv}{dx}$ är konstant, vilket innebär att ånghalten måste variera rätlinjigt inom materialet. Om ånghalten är v_A respektive v_B vid ytorna av ett material med tjockleken d_1 och med ånggenomsläpplighetskoefficienten δ_{v1} (FIG. IV:2), ges flödet av

$$g = \delta_{v1} \cdot \frac{v_A - v_B}{d_1} = \frac{v_A - v_B}{Z_{v1}} \quad (\text{IV:8})$$

där Z_{v1} = hela materialets ånggenomgångsmotstånd s/m

Om ovanstående material är en skiljevägg mellan två rum med olika ånghalt så kommer ånghalten vid ytorna (v_A respektive v_B) inte att vara samma som ånghalterna i de två rummen. I gränsen mellan materialet och luften uppträder nämligen ett ångövergångsmotstånd. I rummen finns det luftrörelser som medför att ånghalten blir "lika" överallt. Intill väggarna kommer det däremot att finnas "stillastående" luft beroende på friktionskrafter. Genom denna stillastående luft måste då vattenångmolekylerna transporteras genom diffusion enligt ekvation (IV:1). Detta går betydligt långsammare än genom den "konvektiva" omrörningen i själva luften. Tjockleken på det "stillastående" luftskiktet blir beroende av luftens rörelse. En stor luftrörelse medför ett tunt "stillastående" luftskikt. I stället för att ange tjockleken på luftskikten användes för praktiska beräkningar ett totalt ångövergångs-

motstånd eller en ångövergångskoefficient, β , som blir beroende av lufthastigheten. Sambandet mellan β och lufthastigheten varierar kraftigt enligt olika litteraturuppgifter. Anledningen till detta är troligen olika sätt att mäta och definiera ingående variabler. I FIG. IV:3 redovisas sambandet mellan β och lufthastigheten enligt van der Held (1941).

Ångövergångsmotståndet fås genom (jfr ekvation (IV:7))

$$Z_V = \frac{1}{\beta} \quad (\text{IV:9})$$

Anghaltsfördelningen i en vägg som avgränsar två rum med olika ånghalt kommer alltså att bli enligt FIG. IV:4. Fukttransporten skall fortfarande vara densamma genom alla skikt, även genom övergångsskiktet. Detta medför att

$$g = \frac{v_A - v_A'}{Z_{vA}} = \frac{v_A' - v_B'}{Z_{v1}} = \frac{v_B' - v_B}{Z_{vB}} \quad (\text{IV:10})$$

vilket slutligen ger

$$g = \frac{v_A - v_B}{\Sigma Z_V} \quad (\text{IV:11})$$

$$\text{där } \Sigma Z_V = Z_{vA} + Z_{v1} + Z_{vB} = \frac{1}{\beta_A} + \frac{d_1}{\delta_{v1}} + \frac{1}{\beta_B} \quad (\text{IV:12})$$

Vid beräkningar i verkliga väggar kan oftast övergångsmotstånden försummas. Vid bestämning av materialdata i laboratorium (se avsnitt 3.1) måste däremot övergångsmotstånden beaktas. Även i vissa andra fall måste övergångsmotstånden beaktas, exempelvis när ingående material är blöta.

Sammanfattning vägg

I en vägg bestående av flera skikt enligt FIG. IV:5 sker beräkningen på i princip samma sätt som i föregående fall. Villkoret att flödet skall vara samma genom alla snitt ger

$$g = \frac{v_A - v_B}{\Sigma Z_V} \quad (\text{IV:11})$$

$$\text{där} \quad \Sigma Z_V = Z_{VA} + Z_{V1} + Z_{V2} + \dots + Z_{Vn} + Z_{VB} \quad (\text{IV:13})$$

Inom de olika materialsnitten kommer ånghaltsfördelningen att vara rätlinjig och ånghaltsskillnaden över snitt i ges av

$$\Delta v_i = \frac{Z_{Vi}}{\Sigma Z_V} (v_A - v_B) \quad (\text{IV:14})$$

Den totala ånghaltsskillnaden kan alltså proportioneras ut på varje skikt i förhållande till respektive snitts ånggenomgångsmotstånd.

Kommentarer

Ovanstående förfaringsätt förutsätter bl.a. stationära förhållanden och att den verkliga ånghalten är mindre än mätnadsånghalten. Avvikelser från detta diskuteras i avsnitt 2.4. Vidare förutsätts att materialen är homogena. Det får alltså inte finnas några "felaktigheter" eller liknande. Materialen får ej heller vara skiktade parallellt med flödesriktningen.

I material som är skiktade parallellt med flödesriktningen, eller innehåller genomgående hål, kan flödet beräknas var för sig i de olika materialen varefter mängderna summeras. Vid denna beräkning förutsätts att flödena i de olika materialen är oberoende av varandra, d.v.s. ingen fukttransport sker i sidled. Metoden innebär naturligtvis en kraftig förenkling men torde vara användbar vid överslagsberäkningar.

Ovan beskrivna metoder behandlas utförligt av bl.a. Klopfer (1974), Sandberg (1973), Jenisch (1971) och Seiffert (1967).

2.4 Kondens

Vid en given temperatur kan luft inte innehålla mer än en viss mängd vattenånga, mätnadsånghalten. Denna mätnadsånghalt är beroende av temperaturen enligt FIG. IV:6. För att definiera luftens fuktstillstånd används oftast den relativa fuktigheten, RF, som anger den verkliga ånghalten i förhållande till mätnadsånghalten. När luftens ånghalt beräkningsmässigt är större än mätnadsånghalten ($RF=100\%$) kommer ångan delvis att kondensera till vatten, så att den relativa fuktigheten blir 100 %.

Denna kondens kan ske i luft, på ytor eller inuti material. Kondens i luft kan exempelvis ske om temperaturen plötsligt sjunker. Dimma under natten är ett exempel på sådan kondens.

Kondens på ytor kan ske om yttemperaturen är lägre än lufttemperaturen. För att kunna bedöma risken för ytkondens måste ytans temperatur och luftens ånghalt beräknas. Om ytans temperatur är lägre än den temperatur vid vilken mätnadsånghalten är lika med aktuell ånghalt (daggpunkten), sker kondens på ytan. Ytkondens påverkas inte alls av väggens ånggenomsläpplighet utan enbart av väggens värmeisoleringssegenskaper. Vid beräkning av väggens yttemperatur kan man inte ta något medelvärde för hela väggen utan varje del av väggen måste studeras för sig.

Ytkondensation förekommer främst vid köldbryggor och där lufthastigheten på insidan av en yttervägg är låg. En liten lufthastighet medför nämligen att värmeövergångsmotståndet ökar, vilket i sin tur medför en lägre yttemperatur. En liten lufthastighet förekommer exempelvis bakom tavlor och i hörn.

Inne i en konstruktion sker kondens om den beräknade ånghalten (enligt avsnitt 2.3) på något ställe blir högre än mätnadsånghalten på samma ställe. För att kunna bedöma risken för kondens måste man därför även beräkna temperaturfördelningen i konstruktionen, eftersom mätnadsånghalten är temperaturberoende. Risken för kondens kommer alltså att vara beroende både av konstruktionens ånggenomsläpplighet och värmeisoleringssegenskaper. Härvid är det inte väggens totala

värden som är intressanta utan placeringen av de olika materialen i väggen.

Om den enligt avsnitt 2.3 beräknade ånghaltskurvan någonstans ligger över mätnadskurvan kommer alltså kondens att äga rum. Detta innebär även att den beräknade ånghaltskurvan inte är riktig eftersom ånghalten inte kan vara större än mätnadsånghalten! Den verkliga ånghalten kan emellertid lätt uppskattas grafiskt enligt FIG. IV:7. I detta fall ligger alltså den beräknade ånghalten över mätnadsånghalten. Förutom att den verkliga ånghaltskurvan måste ligga under mätnadskurvan får den inte ha några "hopp". Den enda kurva som uppfyller detta krav är kurvan 1-2-3-4 där 1-2 och 3-4 är tangenter till mätnadskurvan och 2-3 är mätnadskurvan själv. I skiktet 2-3 kommer kondens att äga rum. Kondensmängden kan beräknas som skillnaden mellan transporten till och från kondenszonen enligt

$$g_{\text{kond}} = \delta_v \frac{v_1 - v_2}{d_{12}} - \delta_v \frac{v_3 - v_4}{d_{34}} \quad (\text{IV:15})$$

där

g_{kond}	= kondensintensitet	$\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$
δ_v	= ånggenomsläpplighetskoefficient	m^2/s
v	= ånghalt	kg/m^3
d	= tjocklek	m

Om kondens äger rum vid ett gränsskikt i en skiktad konstruktion måste en ny beräkning göras för hela konstruktionen. Vid denna beräkning antas då att den verkliga ånghalten är lika med mätnadsånghalten vid gränsen mellan de olika materialen. Denna punkt är alltså given vid den fortsatta beräkningen.

Beräkningen av kondensrisk inuti en konstruktion med ovanstående metod bygger på en mängd förenklade antaganden. Resultaten måste alltså bedömas med stor försiktighet. Som exempel på osäkra faktorer eller förenklade antaganden kan nämnas:

- a) Kondens medför att värme frigörs, vilket påverkar temperaturfördelningen. Detta beaktas inte.

- b) Kondens medför att värmekonduktivitet och ånggenomsläpplighetskoefficient ändras. Båda dessa koefficienter antas i beräkningarna vara konstanta.
- c) Kapillärsugning vid högre fuktinnehåll medför att förloppen ändras kraftigt.
- d) Omgivande klimat varierar i allmänhet kraftigt. Vid beräkningen antas detta konstant.
- e) Beräkningarna förutsätter stationära förhållanden, vilket sällan förekommer i ytterväggar.

Vid en fullständig beräkning av fuktförloppet måste hänsyn tas till dessa faktorer. Många byggnadsmaterial har exempelvis en stor fuktkapacitet, vilket medför att en förändring av omgivande klimat inte fortplantar sig in i materialen omedelbart. Den beräknade ånghaltskurvan kommer alltså inte att vara "sann" förrän efter en viss tid. Denna "insvängningstid" kan i vissa fall bli mycket lång. I en gasbetongvägg, som har stor fuktkapacitet, kan insvängningstiden bli flera månader. I en tegelvägg, med liten fuktkapacitet, blir däremot insvängningstiden relativt kort.

Om den förenklade beräkningen visar att kondens inträffar så måste man studera konsekvenserna av detta. Om kondensmängden hinner torka ut under sommaren och inte medför någon annan skada kan kondensen accepteras. Om detta inte är fallet måste särskilda åtgärder vidtas, exempelvis en fuktspärr eller ventilerad luftspalt.

Beräkningsmetoderna i samband med kondens behandlas utförligt av Nevander & Samuelson (1976).

2.5 Uttorkning

Olika uttorkningsmekanismer diskuteras utförligt i delrapport VI. Här skall enbart nämnas att fukttransport i ångfas spelar en mycket stor roll vid uttorkningen.

Uttorkningsberäkningar görs i princip på samma sätt som i avsnitt 2.3. Ånghaltsgradienten ges i detta fall av ånghalten i "den våta zonen" och i luften. Ånghalten i den våta zonen blir i allmänhet lika med mättnadsånghalten, vilket medför att temperaturen också måste beräknas. Vid temperaturberäkningen måste hänsyn tas till bl.a. solinstrålning mot fasaden.

3 MÄTNING AV ÅNGGENOMSLÄPPLIGHET

3.1 Olika metoder, allmänt

Enligt tidigare avsnitt anges ett materials förmåga att släppa igenom fukt, under inverkan av en ånghaltsskillnad, med en ånggenomsläpplighetskoefficient. Denna koefficient används vid praktiska beräkningar och inkluderar alla former av fukttransport. Det väsentliga är att det är en ånghaltsskillnad som förorsakar transporten. I olika litteratur används ofta olika benämningar och definitioner på motsvarande transportkoefficient. Som exempel kan nämnas permeabilitet, permeans, diffusionstal och diffusivitet. I bland tilläggs även förtydligandet att det handlar om vattenånga eller fukt. I vissa fall används ånghalt som drivkraft, i andra fall används partialtryck. I de flesta fall kan en omräkning enkelt ske mellan de olika uttryckssätten, som i princip säger samma sak.

Ånggenomsläppligheten mäts genom att man åstadkommer en ånghaltsskillnad över provet samt mäter den transporterade fuktmängden. Det vanligaste sättet att genomföra mätningen är med den så kallade "skålmetoden". Härvid placeras provmaterialet som lock på en skål (FIG. IV:8), vilken placeras i ett rum med konstant temperatur och relativ luftfuktighet. Den relativa luftfuktigheten i skålen regleras med hjälp av olika salter. I allmänhet används mättade saltlösningar som vid en viss temperatur ger en viss relativ luftfuktighet. Temperaturen i skålen blir densamma som utanför. Ånghalterna i rums-luften och omedelbart över saltlösningen ges av motsvarande relativa luftfuktigheter till

$$v = v_s \cdot \frac{\varphi}{100} \quad (\text{IV:16})$$

där φ = relativa luftfuktigheten %
 v_s = mättnadsånghalt kg/m^3

Genom att väga skålen vid olika tider fås fuktflödes tätheten. I början av försöket blir denna inte konstant beroende på att provkroppen inte är i jämvikt med rådande klimat. Vid utvärderingen skall man bortse från denna insvängningsperiod och använda värdena när

viktsändringshastigheten blivit konstant. Genom att utnyttja ekvation (IV:11) erhålles ånggenomsläpplighetskoefficienten till (beteckningar enligt FIG. IV:8)

$$\delta_v = \frac{d_1}{\frac{(v_o - v_\ell)}{g} - \frac{d_o}{D} - \frac{1}{\beta}} \quad (\text{IV:17})$$

Enligt vissa litteraturuppgifter skall även ångövergångskoefficienterna inne i skålen medtagas vid beräkningen. Detta är dock tveksamt eftersom luften är stillastående i hela skålen och enligt tidigare är ju ångövergångskoefficienterna ett sätt att uttrycka diffusion i luft vid begränsningsytor. Att räkna med både ångövergångskoefficienter vid ytorna och diffusion i luften (i skålen) innebär alltså att man räknar med samma sak två gånger. Eventuellt kan ett visst övergångsmotstånd förekomma i samband med omvandling från vatten-till ångfas. Mätningar av Künzel (1973) tyder dock på att det enda motstånd som skall medtagas i beräkningen är det som finns i luftmellanrummet.

Ånggenomsläpplighetskoefficienten är starkt beroende av fukttinnehållet i provkroppen, vilket i sin tur bl.a. är beroende av den relativa luftfuktigheten. Vid angivandet av ånggenomsläpplighetskoefficienten måste därför även ett mått på fukttillståndet vid provningen anges. Vanligen anges de relativa fuktigheterna i rumsluften och över den mättade saltlösningen i skålen. Vid grafisk illustration av fukttillståndets inverkan bildas ofta medelvärden av dessa relativa luftfuktigheter, varefter ånggenomsläpplighetskoefficienten sägs gälla för detta värde.

I vissa fall kan ovanstående sätt att ange fukttillståndet ge stora "fel". Om exempelvis ett mycket genomsläppligt material provas och luftmellanrummet är stort mellan prov och saltlösning och det är stor skillnad mellan de båda RF-nivåerna kommer angivet fukttillstånd att bli helt felaktigt. En mätning som i ett sådant fall anges ske mellan exempelvis 0 och 100 % RF, respektive vid 50 % RF i medeltal, kan mycket väl i verkligheten vara en mätning mellan 10 och 20 % RF eller mellan 80 och 90 % RF.

Det mest korrekta sättet att ange fukttillståndet är att ange de relativa luftfuktigheterna vid materialprovets båda ytor. Är skillnaden liten mellan dessa RF-nivåer samtidigt som ånggenomsläppligheten endast varierar obetydligt mellan RF-nivåerna, kan medelvärdet användas som ett mått på fukttillståndet. Hur stor skillnad som kan tillåtas för att ange värden skall vara acceptabla beror främst på materialets jämviktsfukt-kurva. Ur praktisk synpunkt är det olämpligt att ha för liten skillnad mellan RF-nivåerna. En lämplig kompromiss torde vara en skillnad på 10 - 30 % RF. Vid höga RF-nivåer måste dock skillnaden vara mindre, storleksordning 10 % RF. Den relativa luftfuktigheten vid provets begränsningsytor fås genom att först beräkna ånghaltsfördelningen enligt avsnitt 2.3 och därefter RF med ekvation (IV:16).

Ånggenomsläpplighetskoefficienten som funktion av medelvärdet av RF i rumsluften och över saltlösningen, för en mängd olika material, redovisas bl.a. av Tveit (1966). Den totala skillnaden mellan RF-nivåerna var i hans försök 12 - 20 % RF. I FIG.IV:1 redovisas några exempel.

För att få ett exakt samband mellan ånggenomsläpplighetskoefficienten och RF måste både provning och utvärdering göras på ett speciellt sätt. Metoden diskuteras bl.a. av Nilsson (1976). Vid ett antal mätningar med samma RF på ena sidan och varierande RF på andra sidan av ett prov bestäms fuktflödet som funktion av ånghalten på den sida där ånghalten varierar. Ånggenomsläpplighetskoefficienten erhålles därefter genom

$$\delta_{v_i} = d \cdot \frac{\partial g}{\partial v_i} \quad (\text{IV:18})$$

där	δ_{v_i} = ånggenomsläpplighetskoefficient vid RF _i	m ² /s
	RF _i = relativ fuktighet vid ånghalten v _i	%
	v _i = ånghalt på den sida där RF varierar	kg/m ³
	d = provkroppstjocklek	m
	g = fuktflödestäthet	kg/m ² .s

3.2 "Standardmetoder" för puts

Standardmätningar av ånggenomsläppligheten för puts och ytskikt görs på i princip samma sätt som i avsnitt 3.1. Provkroppstillverkning och utvärderingsmetod kan dock variera kraftigt. Vidare är vid standardmätningarna klimatet i både rummet och i skålen bestämt på förhand. De i Sverige vanligen förekommande metoderna är ER-nämndens torr- och våtmetod samt Siporexmetoden.

ER-nämndens metoder

I Hus-AMA anges vissa krav på fuktgenomsläpplighet hos putser och ytskikt. Denna fuktgenomsläpplighet skall bestämmas enligt ER-nämndens metoder, CP-BM-3/67-2. Man skiljer här på två olika fall, som skall efterlikna den praktiska verklighetens ytterlighetsfall med torr respektive fuktig vägg. I bägge fallen appliceras putsen/ytskiktet på en 10 mm tjock gasbetongskiva som placeras som lock på skålen enligt FIG. IV:8. Putsen/ytskiktet är alltid utåt.

Vid torrmetoden (metod A) används ett torkmedel i skålen i stället för en saltlösning. Skålen placeras i ett rum med konstant klimat 20-23⁰C och 50-65 % RF. Viktökningen av hela skålen bestäms genom vägning efter lämpliga tidsintervall. Vid utvärderingen antas att torkmedlet ger ånghalten noll. Ingen hänsyn tas vid utvärderingen till övergångsmotstånd eller diffusionsmotstånd i luften mellan torkmedel och provkropp. Vidare anges ånggenomsläppligheten för hela provkroppen, d.v.s. puts/ytskikt och 10 mm gasbetong. Vid våtmetoden (metod B) används samma skål och provkropp som vid torrmetoden. I stället för ett torkmedel hälls vatten i skålen och via en svamp har provet kapillärkontakt med vattnet. Skålen placeras i ett rum med konstant klimat inom gränserna 20-30⁰C och 40-55 % RF. Viktminskningen av skålen bestäms herefter genom vägning efter lämpliga tidsintervall. Utvärderingen, som sker när viktsändringshastigheten är "konstant", görs på samma sätt som vid torrmetoden. Den relativa luftfuktigheten i skålen antas vara 100 %.

ER-nämndens metoder är tveksamma av flera orsaker, både med avseende på valda klimatbetingelser och utvärderingsmetod. De resultat som anges

är ur teoretisk synvinkel inte att betrakta som putsens/ytskiktets ånggenomsläpplighet. Resultaten är inte heller användbara för några praktiska beräkningar eller uppskattningar av putsens inverkan på fasadens fuktbalans.

En teoretisk anmärkning mot torrmetoden är att ingen hänsyn tas till övergångsmotstånd respektive diffusionsmotstånd i luften mellan torkmedel och provkropp. Vidare anges genomsläppligheten för hela provkroppen, inklusive underlaget. Båda dessa faktorer medför att den beräknade ånggenomsläppligheten blir för liten. För vissa putser/ytskikt kan den verkliga ånggenomsläppligheten bli flera gånger större än den som anges enligt ER-metoden. Den verkliga ånggenomsläppligheten kan dock lätt beräknas om hänsyn tas till ovanstående. En praktisk invändning mot torrmetoden är att de valda relativa luftfuktigheterna är för låga. Under praktiska förhållanden är luftfuktigheterna 60-100 % RF. Detta medför att under praktiska förhållanden så blir ånggenomsläppligheten större än enligt torrmetoden, även om utvärderingen av ånggenomsläppligheten görs på ett teoretiskt riktigt sätt.

Vätmetoden är både fysikaliskt felaktig och praktiskt oanvändbar i samband med fuktbalansberäkningar. Den fysikaliska felaktigheten beror på att det i många fall inte är någon fukttransport i ångfas utan utslutande kapillärsugning från svampen och upp till överytan. För vissa "öppna" putser kommer avdunstningshastigheten att bli densamma som från en fri vattenyta. Avgörande för denna avdunstningshastighet blir då, i stället för putsens egenskaper, vindhastigheten utanför skålen. Att betrakta detta förlopp som "diffusion" genom putsen är helt felaktigt.

För putser/ytskikt som inte kan transportera fukt i vattenfas är vätmetoden dock användbar och den angivna ånggenomsläppligheten torde motsvara händelseförloppet vid höga fukttillstånd. Detta förutsätter dock att putsen/ytskiktet inte har några skador i form av håligheter eller sprickor.

För putser/ytskikt med egenskaper mellan ovanstående ytterlighetsfall,

d.v.s. de flesta putsar, kan "vilket värde som helst" erhållas vid våtmetoden. Avgörande för vilket värde som erhålles är kapillärsugningsmotstånd, kapillär sugförmåga och ånggenomsläpplighet hos puts och underlag samt klimat utanför skålen. Eftersom olika faktorer har olika betydelse för olika putsar kan inte heller några jämförande mätningar göras!

Siporexmetoden

Siporex-metoden genomförs på i princip samma sätt som ER-nämndens metoder. Den väsentliga skillnaden är att i skålen finns vatten som inte har kontakt med provkroppen. För att vattnet inte skall stänka upp på provkroppen är skålen fylld med sand upp till vattenytan. I detta fall sker alltså ingen kapillärsugning utan fukttransporten drivs av en ånghaltsskillnad. Vid utvärderingen antas 100 % RF råda i skålen medan luftfuktigheten utanför hålls vid 43 % RF. Metoden beskrivs i detalj i "Intern metod för diffusionsprov", Siporex Centrallaboratorium. Utvärderingen görs på två olika sätt. Dels anges en fuktgenomsläpplighet på samma sätt som vid ER-nämndens metoder. Dels anges ett relationstal som uttrycker fuktgenomsläppligheten hos underlag och puts/ytskikt i förhållande till genomsläppligheten hos enbart underlaget.

Ur principiell och praktisk synpunkt är metoden riktig. Utvärderingen lider dock av samma brister som ER-nämndens metoder. En omräkning till korrekta värden är dock lätt att göra.

En praktisk anmärkning mot metoden är att RF-nivån utanför skålen är för låg, 60-70 % vore bättre. En annan tänkbar invändning är att det höga fuktillståndet i skålen kan medföra tillfällig kondens på provets undersida. Risken härför är störst vid "täta" ytskikt. I sådana fall saknar dock inverkan av eventuell kondens, med tillhörande kapillärsugning, praktisk betydelse.

Sammanfattningsvis kan man säga att Siporexmetoden, med några smärre modifieringar, väl beskriver det verkliga händelseförloppet och ger riktiga värden på ånggenomsläppligheten hos puts/ytskikt.

3.3 Alternativa metoder

För att bestämma ånggenomsläppligheten för putsar kan ett förenklat förfaringssätt användas, som trots sin enkelhet ger ett värde på ånggenomsläppligheten som är användbart vid praktiska beräkningar. Metoden går ut på att applicera putsen/ytskiktet på ett underlag, som tillförs vatten varefter uttorkning får ske genom putsen/ytskiktet. Genom vägning av hela provkroppen bestäms uttorkningshastigheten. Om fuktinnehållet i underlaget anpassas så att det är större än jämviktsfuktkvoten vid 97-98 % RF och mindre än den fuktkvot som ger kapillärtransport i putsen, kan man vid utvärderingen sätta den relativa fuktigheten till 100 % under putsen.

Denna metod är ur teoretisk synvinkel inte helt korrekt. Ur praktisk synvinkel är metoden däremot mycket bra. Metoden är nämligen enkel och efterliknar verkligheten i detalj. Ånggenomsläppligheten kommer att variera med underlagets fuktinnehåll och eventuellt kan man ange ånggenomsläppligheten som funktion av underlagets fuktinnehåll. Metoden diskuteras ytterligare i delrapport VI.

Ånggenomsläpplighetskoefficienten kan även bestämmas genom omräkning av flödeskoefficienter bestämda enligt avsnitt 3.1 i delrapport V. Detta förutsätter då att jämviktsfuktkurvan är känd. Omräkningen görs enligt

$$\delta_{vi} = K_i \cdot \frac{\delta u_i}{\delta v_i} \quad (\text{IV:19})$$

där

δ_{vi}	= ånggenomsläpplighetskoefficient vid RF _i	m ² /s
K_i	= flödeskoefficient relaterad till fuktkvot vid u _i	kg/m·s
u_i	= fuktkvot vid RF _i	-
v_i	= ånghalt vid RF _i	kg/m ³

4 EGENA MÄTNINGAR

4.1 Skålmätod

Mätningar har gjorts på prover bestående av puts/ytskikt applicerade på 10 mm gasbetong samt på enbart gasbetong. Exakta materialdata redovisas i delrapport I.

Klimatet vid provningarna har varierats mellan ytterlighetsfallen enligt ER-nämndens metoder. De exakta provningsbetingelserna och klimatet i skål respektive rumsluft redovisas i TAB. IV:1. Det praktiska utförandet vid provningarna var detsamma som enligt avsnitt 3.2. Lufthastigheten utanför skålen var 0,1-0,2 m/s och temperaturen $20 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Avståndet mellan provkropp och "saltlösning" var i medeltal 7 mm (utom provning 4 där provet hade kapillärkontakt med vattnet).

Den använda skålen var vid de första försöken identisk med ER-nämndens skål. Av praktiska skäl byttes efterhand denna aluminiumskål mot en glas-skål med samma dimension.

Utvärderingen är gjord med ekvationerna enligt tidigare avsnitt. För enbart gasbetong ges ånggenomsläpplighetskoefficienten direkt av ekvation (IV:17). Med insatta värden ($D = 25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $d_0 = 0.007 \text{ m}$ och $\beta = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$) och beteckningar enligt FIG. IV:8 erhålles

$$\delta_v = \frac{d_1}{\frac{v_0 - v_\ell}{g} - 0.5 \cdot 10^3} \quad (\text{IV:20})$$

Anghalterna vid över- och undersidan, $v_{\text{ö}}$ respektive v_{u} , beräknas med utgångspunkt från ekvation (IV:14). Tillsammans med ekvation (IV:17) ger detta

$$v_{\text{ö}} = v_\ell + \frac{g}{\beta} = v_\ell + g \cdot 0,25 \cdot 10^3 \quad (\text{IV:21 a})$$

$$v_{\text{u}} = v_0 - \frac{g \cdot d_0}{D} = v_0 - g \cdot 0,28 \cdot 10^3 \quad (\text{IV:21 b})$$

Den relativa fuktigheten vid respektive ytor beräknas slutligen med ekvation (IV:16).

Resultatet av mätningarna på enbart gasbetong redovisas i TAB. IV:2. Någon redovisning av sambandet mellan ånggenomsläpplighetskoefficient och relativ luftfuktighet är inte möjlig med utgångspunkt från TAB. IV:2. I de följande beräkningarna är detta dock nödvändigt och i FIG. IV:9 redovisas ett samband mellan δ_v och RF för gasbetong. Beräkningarna är gjorda på resultat från egna mätningar med ekvation (IV:18) och på resultat från van der Kooi (1971) med ekvation (IV:19).

Beräkningen med ekvation (IV:18) har gjorts på provkropparna vid provning 3 enligt TAB. IV:2. Dessa provningar är gjorda med olika provkroppstjocklekar och för att kunna använda resultaten har en omräkning av fuktflödet gjorts till en provkroppstjocklek av 10 mm. För provet med tjockleken 30 mm blir det omräknade flödet tre gånger större än enligt tabellen, om RF vid provkroppsytor hålls oförändrade enligt TAB. IV:2. RF_{δ} har vidare antagits konstant i samtliga fall. De små variationer som förekommer i RF_{δ} saknar betydelse.

Beräkningen med ekvation (IV:19) har gjorts med hjälp av resultat av van der Kooi (1971). Både fuktflödeskoefficienten och jämviktsfukt-kurvan är i detta fall bestämda på en annan gasbetongkvalitet. Storleksordningen på dessa torde dock vara samma som för den kvalitet som använts i de egna försöken. Vidare är de exakta siffrorna inte av någon större praktisk betydelse. Det väsentliga är den markanta ökningen vid höga RF-nivåer. I FIG. IV:9 har även ett värde markerats från de egna mätningarna vid ett lågt fuktillstånd. Den mycket kraftiga ökningen vid de högre RF-nivåerna, som beror på att fukttransport i vattenfas dominerar, framgår inte vid det traditionella sättet att utvärdera diffusionsförsök. (Jfr FIG. IV:1)

Utvärderingen av försöken med puts/ytskikt har gjorts dels med metoden enligt ER-nämnden (d.v.s. utan hänsyn till tidigare diskuterade faktorer) och dels med hänsyn tagen till ånggenomgångsmotstånd i underlag och luft. Ånggenomsläppligheten enligt ER-metoden (för hela provkroppen) ges av

$$P_v = \frac{g}{v_0 - v_d} \quad (IV:22)$$

Med beteckningar enligt FIG:IV 10 ges ånggenomsläppligheten för själva putsen/ytskiktet (med hänsyn tagen till ovanstående motstånd) av

$$P_v = \frac{1}{\frac{v_0 - v_\ell}{g} - \frac{1}{\beta} - \frac{d_2}{\delta_{v2}} - \frac{d_0}{D}} \quad (\text{IV:23})$$

Underlagets ånggenomsläpplighetskoefficient skall här väljas med hänsyn till den RF-nivå som råder i gasbetongen enligt FIG. IV:9.

δ_{v2} kommer alltså att variera mellan olika försök och provkroppar.

Övriga ingående faktorer blir desamma som tidigare.

Anghalterna vid över- och underytan beräknas på samma sätt som tidigare.

I gränsen mellan underlag och puts/ytskikt ges anghalten av

$$v_{12} = v_0 - g \left(\frac{d_0}{D} + \frac{d_2}{\delta_{v2}} \right) \quad (\text{IV:24})$$

RF-nivån i materialgränsen är alltså beroende av underlagets ånggenomsläpplighet, vilket medför att det "exakta" värdet på δ_{v2} måste bestämmas genom en passningsberäkning. Praktiskt görs detta enklast genom att med hjälp av ekvation (IV:24) och FIG. IV:9 samt med v_u enligt ekvation (IV:21 b) beräkna underlagets ånggenomgångsmotstånd som funktion av fukttransporten för de olika RF_0 som använts vid mätningarna. Resultatet av denna passningsberäkning redovisas i FIG. IV:11. Med underlagets ånggenomgångsmotstånd (d_2/δ_{v2}) enligt denna figur och med övriga konstanter insatta i ekvation (IV:23) erhålles slutligen

$$P_v = \frac{1}{\frac{v_0 - v_\ell}{g} - \frac{d_2}{\delta_{v2}} - 0,5 \cdot 10^3} \quad (\text{IV:25})$$

och

$$v_{12} = v_0 - g \left(\frac{d_2}{\delta_{v2}} + 0,28 \cdot 10^3 \right) \quad (\text{IV:26})$$

Resultaten från mätningarna redovisas i TAB.IV:3-6

4.2 Uttorkningsförsök

Det praktiska genomförandet av försöket beskrivs i detalj i delrapport VI.

Uttorkningen av de kapillärmättade provkropparna skedde i klimatrum med 65 % RF, 20⁰ C och lufthastigheten 0.1-0.2 m/s.

Vid utvärderingen antas att den relativa fuktigheten i gränsen mellan puts/ytskikt och underlag är 100 %. Vidare bortses från den temperatursänkning som uppstår på grund av avdunstningen. Med hjälp av tidigare ekvationer ges då putsens ånggenomsläpplighet av

$$P_v = \frac{1}{\frac{v_{12} - v_{\ell}}{g} - \frac{1}{\beta}} = \frac{1}{\frac{v_{12} - v_{\ell}}{g} - 0.25 \cdot 10^3} \quad (\text{IV:27})$$

Vid ett högt fukttinnehåll i underlaget kan i vissa fall putsen suga vatten kapillärt från underlaget. Den enligt ovan beräknade "ånggenomsläppligheten" kan alltså variera mycket kraftigt med underlagets fukttillstånd. För att få en uppfattning om detta görs beräkningarna vid ett flertal tidpunkter, med olika fukttinnehåll i underlaget.

Resultatet redovisas i TAB. IV:7-8. Beträffande fukttinnehållet i underlaget vid de olika tidpunkterna hänvisas till detaljbeskrivningen i delrapport VI. I samtliga fall är dock fukttinnehållet "stort".

5 DISKUSSION AV RESULTATEN

5.1 Allmänt

Syftet med undersökningarna var främst att studera olika metoder att mäta ånggenomsläppligheten hos putser och ytskikt samt att analysera i vilken utsträckning resultaten var användbara vid praktiska beräkningar. Undersökningarna har sålunda inte syftat till att bestämma några exakta materialdata utan enbart till att studera metoderna för denna bestämning. De studerade materialen är enbart ett urval av de som förekommer i praktiken. För alla materialtyper kan variationer i sammansättning och ålder påverka absolutbeloppen i mycket hög grad. Dessa faktorer har inte studerats alls.

Mätningarna visar entydigt att provnings- och utvärderingsmetoden har en mycket stor inverkan på resultatet. Olika metoder kan medföra helt olika rangordning för olika putser med avseende på ånggenomsläppligheten. Den avgörande faktorn är vid vilket fukttillstånd provningen görs. Något exakt samband mellan ånggenomsläpplighet och fukttillstånd går inte att ge med utgångspunkt från utförda mätningar. Fukttillståndets stora betydelse framgår dock klart av TAB. IV:9 som är en sammanställning av resultaten. Tabellen visar även att ER-metoderna inte på något sätt överensstämmer med det verkliga förloppet vid uttorkning av en fuktig vägg. Ånggenomsläppligheten bestämd genom skålmotoden vid höga fukttillstånd (Siporexmetoden) visar däremot en god överensstämmelse med det verkliga uttorkningsförloppet. Även vid vanliga "diffusionsberäkningar" torde resultaten från "diffusionsmätningar" vid höga fukttillstånd vara användbara.

5.2 Fuktnivå - ånggenomsläpplighet

Ånggenomsläpplighetens beroende av fukttillståndet framgår tydligt av TAB.IV:9. Beroendet är olika för olika putser och ytskikt. Mekanismen som medför ökande ånggenomsläpplighet vid ökande RF är olika för de organiska och de oorganiska putserna. I de oorganiska tjockputserna beror den ökande ånggenomsläppligheten på att de finare porerna helt eller delvis fylls vid höga RF. Detta medför att fukten

lokalt transporteras i vattenfas genom kapillärsugning, vilket går snabbare än i ångfas genom diffusion. Denna transport i vätskefas kan ske både parallellt och i serie med ångtransporten. I FIG. IV:12 illustreras detta schematiskt. I den fina poren sker vid höga fukt-tillstånd all transport i vätskefas. I den grova poren med en åtsnörning sker däremot både vätske- och ångtransport samtidigt. Denna mekanism medför att ånggenomsläpplighetens beroende av fukt-tillståndet bestäms av porstrukturen hos materialet. I ett material med grova porer bör ånggenomsläppligheten inte vara beroende av RF-nivån. I ett finporöst material blir däremot inverkan av RF-nivån mycket stor. Utförda mätningar illustrerar detta mycket tydligt. Den grovporösa kalkputsen visar exempelvis ingen ökning av ånggenomsläppligheten vid ökande RF-nivå. Hos den finporösa cementputsen ökar däremot ånggenomsläppligheten mycket kraftigt med RF-nivån. För gasbetong, som också är finporös, sker en mycket dramatisk ökning vid 95-97 % RF. Ökningen är i storleksordningen 10-100 gånger! Vid provning av material med kraftigt fuktberoende hos ånggenomsläpplighetskoefficienten kan i vissa fall ånggenomsläpplighetskoefficienten variera kraftigt genom provet. Detta innebär i sin tur att de grundläggande antagandena för ångtransporten inte gäller. Ånghaltsfördelningen blir nämligen inte rätlinjig vid jämvikt. En noggrann beräkning går att göra om materialet delas upp i olika skikt med olika ånggenomsläpplighetskoefficienter. En sådan analys faller dock utanför ramen för denna behandling. Principen utnyttjas dock i ekvation (IV:18). Ånghaltsfördelningen vid konstant respektive varierande ånggenomsläpplighetskoefficient visas i FIG. IV:13.

Mekanismen i de organiska tunnputserna är helt annorlunda. Ökningen här beror på att mer vatten kan "lösas" i polymeren vid höga RF-nivåer. Avgörande för hur stor ökningen blir är därför främst polymer-typen. De två provade typerna (puts 6 och 9) uppvisar stor skillnad med avseende på ökningen av ånggenomsläppligheten vid höga RF-nivåer. För ytskikt 6 är exempelvis ökningen 2-3 gånger medan för ytskikt 9 ökningen är c:a 10 gånger!

Vid provning enligt ER-nämndens våtmetod erhålles i vissa fall värden som helt avviker från ånggenomsläppligheten bestämd genom "diffusionsförsök" eller uttorkningsförsök. Detta beror helt enkelt på att vissa putser kan suga vatten kapillärt från svampen. Under praktiska förhållanden är detta emellertid ovanligt, varför metoden kan anses som olämplig. Rangordningen mellan olika putser kan bli helt felaktig. Avgörande för händelseförloppet blir sugförhållanden och motstånd i puts och underlag. För putser som förmår suga vatten kapillärt till ytan bestäms avdunstningshastigheten enbart av ångövergångsmotståndet vid ytan. Detta är fallet för putserna 2,11,14. Putsen 3 får med denna metod en låg genomsläpplighet trots att den i verkligheten är helt jämförbar med de förra. Anledningen till detta är att sugförmågan hos putsen är liten. Puts 3 på gasbetong förmår alltså inte suga vatten genom gasbetongen och upp till ytan. Gör samma provning med putsen vänd nedåt och gasbetongen uppåt blir förhållandet annorlunda. Nu kan gasbetongen (med sin stora sugförmåga) suga vatten genom putsen och upp till ytan där avdunstningen kan ske. Nu erhålles också samma värde som för de tidigare nämnda putserna. (Se TAB. IV:6). ER-nämndens våtmetod bör alltså inte användas vid bedömning av putsens inverkan på fuktbalansen i en viss vägg.

Vid provning av ånggenomsläppligheten kan stor skillnad erhållas vid samma provning beroende på provkroppens fukttinnehåll vid provningsstarten. Är provkroppen från början blöt kan ett väsentligt större värde erhållas på ånggenomsläppligheten än om provkroppen är torr från början. Anledningen till detta är hysteresiseffekterna i jämvikt-fuktkurvan enligt delrapport III. Det högre startfukttinnehållet medför nämligen att även fukttinnehållet vid jämvikt blir högre, vilket medför en större ånggenomsläpplighet. Inverkan av hysteresis har inte studerats vid de egna mätningarna. De egna mätningarna har gjorts med från början "rumstorra" provkroppar.

5.3 Lämplig mätmetod för puts/ytskikt

Vid val av lämplig metod för mätning av ånggenomsläppligheten hos putser och ytskikt måste hänsyn tas till de RF-nivåer som förekommer

i praktiken. I samtliga fall då ånggenomsläppligheten har betydelse för fuktbalansen råder ett relativt högt fukttillstånd i underlaget, exempelvis efter slagregn, vid byggfukt eller i samband med diffusionsberäkningar. I dessa fall är den relativa luftfuktigheten i underlaget 90-100 %. Att räkna med ett så pass högt fukttillstånd som ER-nämndens våtmetod (fritt vatten) är dock orealistiskt. I luften utanför putsen torde en RF-nivå på 60-90 % vara rimlig.

Med hänsyn till ovanstående RF-nivåer är ER-metoderna klart olämpliga. Den lämpligaste metoden torde vara den där mätningen görs mellan 100 och 65 % RF. I detta fall kan en viss kondensation ske på undersidan av provkroppen. Detta är ingen direkt nackdel, eftersom detta mycket väl kan ske i praktiken. Görs mätningen vid 93-65 % blir RF-nivån vid putsundersidan i lägsta laget. Vid denna nivå bortfaller den positiva inverkan av mycket höga RF-nivåer för vissa putser. Med hänsyn till att eventuella negativa verkningar av för täta putser inträffar först vid mycket höga RF-nivåer i underlaget, bör mätningen göras vid dessa höga nivåer.

En allmän nackdel med skålmetoden med underlag av gasbetong är att underlagets inverkan på putsens ånggenomsläpplighet inte beaktas. Olika sugning hos underlagen kan exempelvis medföra att själva putsskiktet får olika egenskaper. En jämförelse mellan TAB. IV:7 och IV:8 antyder att så kan vara fallet. Dessa problem kan elimineras genom att bestämma ånggenomsläppligheten vid uttorkningsförsök. Vid sådana mätningar inkluderas även eventuell inverkan av kapillärsugning. Genom att göra mätningen vid olika fukttillstånd i underlaget kan en fullständig bild av ånggenomsläpplighetens fuktberoende erhållas.

Används värden på ånggenomsläppligheten bestämd vid fel fuktnivå, exempelvis vid en beräkning av erforderlig uttorkningstid, erhålles i vissa fall ett någorlunda riktigt resultat medan i andra fall den beräknade tiden kan bli 10-20 gånger för lång eller 1/10-1/20 av den verkliga. Det är alltså av allra största betydelse att mätningen görs vid en riktig fuktnivå. Olika fuktnivåer rangordnar olika putser på helt olika sätt. Någon generell omräkning från en fuktnivå till en

annan går inte att göra. För vissa putser överensstämmer exempelvis ER-nämndens torrmetod med verkligheten (kalkputs). För andra putser ligger däremot ER-nämndens våtmetod närmare sanningen (organiska tunnputsar).

LITTERATUR

Adamson, B, Ahlgren, L, Bergström, SG & Nevander, L E, 1970, Byggnadstekniska fuktproblem. (Statens råd för byggnadsforskning.) Programskrift 12, Stockholm.

Caemmerer, W, 1968, Berechnung der Wasserdampfdurchlässigkeit und Bemessung des Feuchtigkeitsschutzes von Bauteilen. Berichte aus der Bauforschung, Heft 51. Verlag Wilhelm Ernst & Sohn. Berlin.

ER-nämnden, 1968, Provningsmetoder för ytskiktmaterial för putsat och oputsat murverk, likvärdiga underlag samt betong. ER-nämndens rapport nr 3:68. Stockholm.

Van der Held, 1941, Diffusionserscheinungen in Verbindung mit der Trocknung von Werkstoffen. Gesundheits-Ingenieur, 64. Jahrgang, Heft 15.

Jenisch, R, 1971, Berechnung der Feuchtigkeitskondensation in Aussenbauteilen und die Austrocknung abhängig von Aussenklima. Gesundheits-Ingenieur, 92. Jahrgang, Heft 9.

Johansson, F, 1969, Färgskikt och fukt. (Statens institut för byggnadsforskning.) Rapport 47/69. Stockholm.

Klopfer, H, 1974, Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen. Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin.

van der Kooij, J, 1971, Moisture transport in cellular concrete roofs. Uitgeverij Waltman. Delft.

Künzel, H, 1973, Einfluss der Versuchsbedingungen auf die Ergebnisse von Diffusionsmessungen. Berichte aus der Bauvorschung, Heft 80. Verlag Wilhelm Ernst & Sohn. Berlin.

Künzel, H & Bernhardt, P, 1973, Wasserdampf-Durchlässigkeit von Baustoffen bei verschiedenen Feuchtigkeitszuständen. Berichte aus der Bauvorschung, Heft 80. Verlag Wilhelm Ernst & Sohn. Berlin.

Lund-Hansen, P, 1967, Fukttransport i byggmaterialer. Polyteknisk Forlag. Köpenhamn.

Nevander, L E , 1968, Fuktproblem i byggnader med befuktad luft. Lättbetong 3/68.

Nevander, L E & Samuelson, I, 1976, Elementär byggnadsfysik. (Institutionen för byggnadsteknik, LTH) Kompendium i husbyggnadsteknik. Lund.

Nilsson, L O, 1976, Fuktproblem vid betonggolv. (Avd. för byggnadsmateriallära, LTH) Rapport TVBM-3002. Lund.

Perera, D Y, 1971, Water transport in paint films. Verfinstituut TNO . Delft.

Sandberg, P I, 1973, Byggnadsdelars fuktbalans i naturligt klimat. (Institutionen för byggnadsteknik, LTH) Rapport 43. Lund.

Seiffert, K, 1967, Wasserdampfdiffusion im Bauwesen. Bauverlag GmbH, Wiesbaden.

Siporex Centrallaboratorium, Intern metod för diffusionsprov.

Statens planverk, 1975, Kommentarer till svensk byggnorm 1975:3. Stockholm.

Tveit, A, 1966, Measurements of Moisture Sorption and Moisture Permeability of Porous Materials. (Norges Byggforskningsinstitutt.) Rapport 45. Oslo.

Varnbo, B, 1972, Utvecklingstendenser på fasadputsningsområdet. Lättbetong 1/72.

TAB. IV:1. Provningsbetingelser vid mätning av ånggenomsläpplighet med skålmetoden.

Provning	Skålinnehåll	RF(skål) (%)	RF(rum) (%)	Kommentar
1	Blågel	0	40 ± 2	ER-nämndens torrmetod
2	Mättad KNO ₃ -lösning	93	65 ± 2	
3	Vatten	100	65 ± 2	Siporexmetoden
4	Vatten och svamp	-	40 ± 2	ER-nämndens våtmetod

TAB. IV:2. Resultat från mätning av ånggenomsläpplighetskoefficient för gasbetong.

Prov enl. TAB.IV:1	V_0 ($\cdot 10^{-3}$ kg/m ³)	V_1 ($\cdot 10^{-3}$ kg/m ³)	g ($\cdot 10^{-6}$ kg/m ² ·s)	d_1 ($\cdot 10^{-3}$ m)	δ_v ($\cdot 10^{-6}$ m ² /s)	V_{δ} ($\cdot 10^{-3}$ kg/m ³)	V_u ($\cdot 10^{-3}$ kg/m ³)	RF _δ (%)	RF _u (%)	RF _{med} (%)
1	0	6,91	-1,65	10	2,71	6,50	0,46	37,7	2,7	20
	0	6,91	-1,69	10	2,78	6,49	0,47	37,6	2,7	20
	0	6,91	-1,65	10	2,71	6,50	0,46	37,7	2,7	20
2	16,07	11,23	2,36	10	6,45	11,82	15,41	68,5	89,3	79
	16,07	11,23	2,14	10	5,68	11,77	15,47	68,2	89,6	79
	16,07	11,23	2,03	10	5,31	11,74	15,50	68,1	89,8	79
3	17,28	11,23	3,00	10	6,62	11,98	16,44	69,4	95,1	82
	17,28	11,23	2,68	10	5,71	11,90	16,53	69,0	95,7	82
	17,28	11,23	3,00	10	6,62	11,98	16,44	69,4	95,1	82
3	17,28	11,23	2,28	20	9,33	11,80	16,64	68,4	96,3	82
	17,28	11,23	2,44	20	10,15	11,84	16,60	68,6	96,1	82
	17,28	11,23	2,39	20	9,89	11,83	16,61	68,6	96,1	82
3	17,28	11,23	1,83	30	10,73	11,69	16,77	67,8	97,0	82
	17,28	11,23	2,17	30	13,16	11,77	16,67	68,2	96,5	82
	17,28	11,23	1,83	30	10,73	11,69	16,77	67,8	97,0	82

TAB. IV:3. Resultat från mätning av ånggenomsläppligheten hos puts/ytskiikt med $RF_0 = 0$, $RF_1 = 40\%$, $v = 20^\circ\text{C}$ (ER-nämndens torrmetod), putsbeteckningar enligt delrapport I.

Puts	g	$\frac{d_2}{\delta \sqrt{2}}$	$P_V(\text{ER})$	$P_V(\text{korrekt})$	v_0	v_{12}	RF_0	RF_{12}	RF^{med}	$p_v^{\text{med}}(\text{korrekt})$
	$(\cdot 10^{-6} \text{kg/m}^2 \cdot \text{s})$	$(\cdot 10^3 \text{s/m})$	$(\cdot 10^{-3} \text{m/s})$	$(\cdot 10^{-3} \text{m/s})$	$(\cdot 10^{-3} \text{kg/m}^3)$	$(\cdot 10^{-3} \text{kg/m}^3)$	(%)	(%)	(%)	$(\cdot 10^{-3} \text{m/s})$
2	-0,51	4,3	0,074	0,114	6,78	2,34	39,2	13,5	26	0,10
	-0,42	4,3	0,061	0,086	6,81	1,92	39,4	11,1	25	
	-0,46	4,3	0,067	0,098	6,80	2,11	39,4	12,2	26	
3	-0,63	4,2	0,091	0,160	6,75	2,82	39,1	16,3	28	0,15
	-0,62	4,2	0,090	0,155	6,76	2,78	39,1	16,1	28	
	-0,58	4,2	0,084	0,139	6,77	2,60	39,2	15,0	27	
4	-0,09	4,4	0,013	0,014	6,89	0,42	39,9	2,4	21	0,017
	-0,12	4,4	0,017	0,019	6,88	0,56	39,8	3,2	21	
5	-0,30	4,3	0,043	0,055	6,84	1,37	39,6	7,9	24	0,05
	-0,30	4,3	0,043	0,055	6,84	1,37	39,6	7,9	24	
	-0,20	4,3	0,029	0,034	6,86	0,92	39,7	5,3	23	
6	-0,09	4,4	0,013	0,014	6,89	0,42	39,9	2,4	21	0,014
	-0,09	4,4	0,013	0,014	6,89	0,42	39,9	2,4	21	
	-0,09	4,4	0,013	0,014	6,89	0,42	39,9	2,4	21	
7	-0,06	4,4	0,009	0,009	6,90	0,28	39,9	1,6	21	0,007
	-0,04	4,4	0,006	0,006	6,90	0,19	39,9	1,1	21	
	-0,04	4,4	0,006	0,006	6,90	0,19	39,9	1,1	21	
8	-0,20	4,3	0,029	0,034	6,86	0,92	39,7	5,3	23	0,03
	-0,20	4,3	0,029	0,034	6,86	0,92	39,7	5,3	23	
	-0,20	4,3	0,029	0,034	6,86	0,92	39,7	5,3	23	
9	-0,10	4,4	0,014	0,016	6,89	0,47	39,9	2,7	21	0,014
	-0,08	4,4	0,012	0,012	6,89	0,37	39,9	2,1	21	
10	-0,26	4,3	0,038	0,046	6,85	1,19	39,6	6,9	23	0,04
	-0,20	4,3	0,029	0,034	6,86	0,92	39,7	5,3	23	
11	-0,39	4,3	0,056	0,077	6,81	1,79	39,4	10,4	25	0,08
	-0,38	4,3	0,055	0,075	6,82	1,74	39,5	10,1	25	
	-0,43	4,3	0,062	0,089	6,80	1,97	39,4	11,4	25	
14	-0,28	4,3	0,041	0,050	6,84	1,28	39,6	7,4	24	0,07
	-0,40	4,3	0,058	0,080	6,81	1,83	39,4	10,6	25	

TAB. IV:4. Resultat från mätning av ånggenomsläppligheten hos puts/ytskikt med
 $RF_0 = 93 \%$, $RF_1 = 65 \%$, $\vartheta = 20^\circ\text{C}$.
 Putsbeteckningar enligt delrapport I.

Puts	g ($\cdot 10^{-6} \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)	$\frac{d_2}{\delta}$ ($\cdot 10^3 \text{s/m}$)	$P_V(\text{ER})$ ($\cdot 10^{-3} \text{m/s}$)	$P_V(\text{korrekt})$ ($\cdot 10^{-3} \text{m/s}$)	v_0 ($\cdot 10^{-3} \text{kg/m}^3$)	v_{12} ($\cdot 10^{-3} \text{kg/m}^3$)	RF_0 (%)	RF_{12} (%)	RF^{med} (%)	$P_V^{\text{med}}(\text{korrekt})$ ($\cdot 10^{-3} \text{m/s}$)
2	0,55	1,4	0,114	0,145	11,37	15,15	65,8	87,7	77	
	0,49	1,4	0,101	0,125	11,35	15,25	65,7	88,2	77	0,13
	0,49	1,4	0,101	0,125	11,35	15,25	65,7	88,2	77	
3	0,43	1,3	0,089	0,106	11,34	15,39	65,6	89,1	77	
	0,37	1,3	0,076	0,089	11,32	15,49	65,5	89,6	78	0,10
	0,40	1,3	0,083	0,097	11,33	15,44	65,6	89,3	77	
4	0,15	1,1	0,031	0,033	11,27	15,86	65,2	91,8	79	
	0,15	1,1	0,031	0,033	11,27	15,86	65,2	91,8	79	0,03
	0,15	1,1	0,031	0,033	11,27	15,86	65,2	91,8	79	
6	0,09	1,1	0,019	0,019	11,25	15,95	65,1	92,3	79	
	0,09	1,1	0,019	0,019	11,25	15,95	65,1	92,3	79	0,02
	0,09	1,1	0,019	0,019	11,25	15,95	65,1	92,3	79	
7	0,04	1,0	0,008	0,008	11,24	16,02	65,0	92,7	79	
	0,05	1,0	0,010	0,010	11,24	16,01	65,1	92,6	79	0,009
	0,04	1,0	0,008	0,008	11,24	16,02	65,0	92,6	79	
8	0,23	1,2	0,048	0,052	11,29	15,73	65,3	91,0	78	
	0,23	1,2	0,048	0,052	11,29	15,73	65,3	91,0	78	0,05
	0,23	1,2	0,048	0,052	11,29	15,73	65,3	91,0	78	
9	0,28	1,3	0,058	0,065	11,30	15,63	65,4	90,4	78	0,07
	0,31	1,3	0,064	0,072	11,31	15,58	65,4	90,2	78	
10	0,29	1,3	0,060	0,067	11,30	15,61	65,4	90,3	78	0,06
	0,27	1,3	0,056	0,062	11,30	15,64	65,4	90,5	78	
11	0,17	1,2	0,035	0,037	11,27	15,82	65,2	91,5	78	
	0,24	1,2	0,050	0,054	11,29	15,72	65,3	90,9	78	0,05
	0,26	1,2	0,054	0,059	11,30	15,69	65,4	90,8	78	
14	0,65	1,5	0,134	0,184	11,39	14,91	65,9	86,3	76	
	0,56	1,4	0,116	0,148	11,37	15,13	65,8	87,6	77	0,17
	0,65	1,5	0,134	0,184	11,39	14,91	65,9	86,3	76	

TAB. IV.5. Resultat från mätning av ånggenomsläppligheten hos puts/ytskikt med
 $RF_0 = 100 \%$, $RF_1 = 65 \%$, $\psi = 20^\circ\text{C}$.
 Putsbeteckningar enligt delrapport I.

Puts	g	$\frac{d_2}{\delta\sqrt{2}}$ ($\cdot 10^{-3}\text{s/m}$)	$P_V(\text{ER})$ ($\cdot 10^{-3}\text{m/s}$)	$P_V(\text{korrekt})$ ($\cdot 10^{-3}\text{m/s}$)	V_{δ} ($\cdot 10^{-3}\text{kg/m}^3$)	V_{12} ($\cdot 10^{-3}\text{kg/m}^3$)	RF_{δ}	RF_{12}	RF^{med} (%)	$P_V^{\text{med}}(\text{korrekt})$ ($\cdot 10^{-3}\text{m/s}$)
2	1,18	0,1	0,195	0,221	11,53	16,83	66,7	97,4	82	0,18
	0,74	0,1	0,122	0,132	11,42	17,00	66,1	98,4	82	
3	1,01	0,1	0,167	0,186	11,48	16,90	66,4	97,8	82	0,15
	0,59	0,1	0,098	0,104	11,38	17,06	65,8	98,7	82	
4	0,45	0,1	0,074	0,078	11,34	17,11	65,6	99,0	82	0,07
	0,35	0,1	0,058	0,060	11,32	17,15	65,5	99,2	82	
5	0,63	0,1	0,104	0,111	11,39	17,04	65,9	98,6	82	0,12
	0,69	0,1	0,114	0,122	11,40	17,02	66,0	98,5	82	
6	0,14	0,1	0,023	0,023	11,27	17,23	65,2	99,7	82	0,02
	0,15	0,1	0,025	0,025	11,27	17,22	65,2	99,7	82	
7	0,09	0,1	0,015	0,015	11,25	17,25	65,1	99,8	82	0,015
	0,09	0,1	0,015	0,015	11,25	17,25	65,1	99,8	82	
9	0,81	0,1	0,134	0,146	11,43	16,97	66,2	98,2	82	0,13
	0,69	0,1	0,114	0,122	11,40	17,02	66,0	98,5	82	
11	0,40	0,1	0,066	0,069	11,33	17,13	65,6	99,1	82	0,09
	0,58	0,1	0,096	0,102	11,38	17,06	65,8	98,7	82	
14	0,73	0,1	0,121	0,130	11,41	17,00	66,0	98,4	82	0,13
	0,73	0,1	0,121	0,130	11,41	17,00	66,0	98,4	82	

TAB. IV.7. Beräkning av ånggenomsläppligheten hos puts/ytskikt vid uttorknings-
 försök. $RF_{12} = 100 \%$, $RF_1 = 65 \%$, $\psi = 20^\circ\text{C}$. Underlag av gasbetong.
 Putsbeteckningar enligt delrapport I.

Puts	Efter 15 dygns uttorkning		Efter 50 dygns uttorkning	
	g ($\cdot 10^{-6}\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)	P_V ($\cdot 10^{-3}\text{m/s}$)	g ($\cdot 10^{-6}\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)	P_V ($\cdot 10^{-3}\text{m/s}$)
2	2,17	0,39	1,30	0,23
3	1,56	0,28	1,33	0,23
4	0,61	0,10	0,56	0,09
5	1,07	0,19	0,78	0,13
6	0,29	0,05	0,29	0,05
7	0,33	0,06	0,33	0,06
8	0,64	0,11	0,55	0,09
9	0,81	0,14	0,69	0,12
10	0,94	0,16	0,81	0,14
11	0,51	0,09	0,36	0,06
14	1,74	0,31	1,24	0,22

TAB. IV:6. Resultat från mätning enligt ER-nämndens våtmetod. Putsbeteckningar enligt delrapport I.

Puts	g ($\cdot 10^{-6} \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)	$P_v(\text{ER})$ ($\cdot 10^{-3} \text{m/s}$)	$P_v^{\text{medel}}(\text{ER})$ ($\cdot 10^{-3} \text{m/s}$)
2	24	2,3	2,3
	24	2,3	
	24	2,3	
3	2,9	0,28	0,39
	5,4	0,52	
	3,9	0,37	
4	5,8	0,56	0,56
	5,8	0,56	
	5,8	0,56	
5	15	1,5	1,2
	11	1,0	
	11	1,1	
6	0,48	0,05	0,04
	0,33	0,03	
	0,43	0,04	
7	0,17	0,02	0,02
	0,16	0,02	
	0,20	0,02	
8	0,79	0,08	0,07
	0,66	0,06	
	0,71	0,07	
9	3,0	0,29	0,35
	4,2	0,41	
	3,7	0,36	
10	4,2	0,41	0,35
	3,4	0,32	
	3,4	0,32	
11	25	2,4	2,5
	27	2,6	
14	25	2,4	2,5
	25	2,4	
	27	2,6	
3 ^x	30	2,9	-

x Provkroppen monterad med putsen nedåt.

TAB. IV:3. Resultat från mätning av ånggenomsläppligheten hos puts/ytskikt med $RF_0 = 0$, $RF_1 = 40\%$, $\psi = 20^\circ\text{C}$ (ER-nämndens torrmetod), putsbeteckningar enligt delrapport I.

Puts	g ($\cdot 10^{-6}\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)	$\frac{d_2}{\delta \sqrt{2}}$ ($\cdot 10^3\text{s/m}$)	$P_v(\text{ER})$ ($\cdot 10^{-3}\text{m/s}$)	$P_v(\text{korrekt})$ ($\cdot 10^{-3}\text{m/s}$)	v_6 ($\cdot 10^{-3}\text{kg/m}^3$)	v_{12} ($\cdot 10^{-3}\text{kg/m}^3$)	RF_6 (%)	RF_{12} (%)	RF^{med} (%)	p_v^{med} (korrekt) ($\cdot 10^{-3}\text{m/s}$)
2	-0,51	4,3	0,074	0,114	6,78	2,34	39,2	13,5	26	0,10
	-0,42	4,3	0,061	0,086	6,81	1,92	39,4	11,1	25	
	-0,46	4,3	0,067	0,098	6,80	2,11	39,4	12,2	26	
3	-0,63	4,2	0,091	0,160	6,75	2,82	39,1	16,3	28	0,15
	-0,62	4,2	0,090	0,155	6,76	2,78	39,1	16,1	28	
	-0,58	4,2	0,084	0,139	6,77	2,60	39,2	15,0	27	
4	-0,09	4,4	0,013	0,014	6,89	0,42	39,9	2,4	21	0,017
	-0,12	4,4	0,017	0,019	6,88	0,56	39,8	3,2	21	
5	-0,30	4,3	0,043	0,055	6,84	1,37	39,6	7,9	24	0,05
	-0,30	4,3	0,043	0,055	6,84	1,37	39,6	7,9	24	
	-0,20	4,3	0,029	0,034	6,86	0,92	39,7	5,3	23	
6	-0,09	4,4	0,013	0,014	6,89	0,42	39,9	2,4	21	0,014
	-0,09	4,4	0,013	0,014	6,89	0,42	39,9	2,4	21	
	-0,09	4,4	0,013	0,014	6,89	0,42	39,9	2,4	21	
7	-0,06	4,4	0,009	0,009	6,90	0,28	39,9	1,6	21	0,007
	-0,04	4,4	0,006	0,006	6,90	0,19	39,9	1,1	21	
	-0,04	4,4	0,006	0,006	6,90	0,19	39,9	1,1	21	
8	-0,20	4,3	0,029	0,034	6,86	0,92	39,7	5,3	23	0,03
	-0,20	4,3	0,029	0,034	6,86	0,92	39,7	5,3	23	
	-0,20	4,3	0,029	0,034	6,86	0,92	39,7	5,3	23	
9	-0,10	4,4	0,014	0,016	6,89	0,47	39,9	2,7	21	0,014
	-0,08	4,4	0,012	0,012	6,89	0,37	39,9	2,1	21	
10	-0,26	4,3	0,038	0,046	6,85	1,19	39,6	6,9	23	0,04
	-0,20	4,3	0,029	0,034	6,86	0,92	39,7	5,3	23	
11	-0,39	4,3	0,056	0,077	6,81	1,79	39,4	10,4	25	0,08
	-0,38	4,3	0,055	0,075	6,82	1,74	39,5	10,1	25	
	-0,43	4,3	0,062	0,089	6,80	1,97	39,4	11,4	25	
14	-0,28	4,3	0,041	0,050	6,84	1,28	39,6	7,4	24	0,07
	-0,40	4,3	0,058	0,080	6,81	1,83	39,4	10,6	25	

TAB. IV:4. Resultat från mätning av ånggenomsläppligheten hos puts/ytskikt med
 $RF_0 = 93 \%$, $RF_1 = 65 \%$, $v_s = 20^\circ\text{C}$.
 Putsbeteckningar enligt delrapport I.

Puts	g ($\cdot 10^{-6} \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)	$\frac{d_2}{\delta \sqrt{v_2}}$ ($\cdot 10^{-3} \text{s/m}$)	$P_V(\text{ER})$ ($\cdot 10^{-3} \text{m/s}$)	$P_V(\text{korrekt})$ ($\cdot 10^{-3} \text{m/s}$)	v_0 ($\cdot 10^{-3} \text{kg/m}^3$)	v_{12} ($\cdot 10^{-3} \text{kg/m}^3$)	RF_0 (%)	RF_{12} (%)	RF^{med} (%)	$P_V^{\text{med}}(\text{korrekt})$ ($\cdot 10^{-3} \text{m/s}$)
2	0,55	1,4	0,114	0,145	11,37	15,15	65,8	87,7	77	
	0,49	1,4	0,101	0,125	11,35	15,25	65,7	88,2	77	0,13
	0,49	1,4	0,101	0,125	11,35	15,25	65,7	88,2	77	
3	0,43	1,3	0,089	0,106	11,34	15,39	65,6	89,1	77	
	0,37	1,3	0,076	0,089	11,32	15,49	65,5	89,6	78	0,10
	0,40	1,3	0,083	0,097	11,33	15,44	65,6	89,3	77	
4	0,15	1,1	0,031	0,033	11,27	15,86	65,2	91,8	79	
	0,15	1,1	0,031	0,033	11,27	15,86	65,2	91,8	79	0,03
	0,15	1,1	0,031	0,033	11,27	15,86	65,2	91,8	79	
6	0,09	1,1	0,019	0,019	11,25	15,95	65,1	92,3	79	
	0,09	1,1	0,019	0,019	11,25	15,95	65,1	92,3	79	0,02
	0,09	1,1	0,019	0,019	11,25	15,95	65,1	92,3	79	
7	0,04	1,0	0,008	0,008	11,24	16,02	65,0	92,7	79	
	0,05	1,0	0,010	0,010	11,24	16,01	65,1	92,6	79	0,009
	0,04	1,0	0,008	0,008	11,24	16,02	65,0	92,6	79	
8	0,23	1,2	0,048	0,052	11,29	15,73	65,3	91,0	78	
	0,23	1,2	0,048	0,052	11,29	15,73	65,3	91,0	78	0,05
	0,23	1,2	0,048	0,052	11,29	15,73	65,3	91,0	78	
9	0,28	1,3	0,058	0,065	11,30	15,63	65,4	90,4	78	
	0,31	1,3	0,064	0,072	11,31	15,58	65,4	90,2	78	0,07
10	0,29	1,3	0,060	0,067	11,30	15,61	65,4	90,3	78	
	0,27	1,3	0,056	0,062	11,30	15,64	65,4	90,5	78	0,06
11	0,17	1,2	0,035	0,037	11,27	15,82	65,2	91,5	78	
	0,24	1,2	0,050	0,054	11,29	15,72	65,3	90,9	78	0,05
	0,26	1,2	0,054	0,059	11,30	15,69	65,4	90,8	78	
14	0,65	1,5	0,134	0,184	11,39	14,91	65,9	86,3	76	
	0,56	1,4	0,116	0,148	11,37	15,13	65,8	87,6	77	0,17
	0,65	1,5	0,134	0,184	11,39	14,91	65,9	86,3	76	

TAB. IV:5. Resultat från mätning av ånggenomsläppligheten hos puts/ytskikt med $RF_0 = 100 \%$, $RF_1 = 65 \%$, $v = 20^\circ\text{C}$.
Putsbeteckningar enligt delrapport I.

Puts	g ($\cdot 10^{-6} \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)	$\frac{d_p}{\delta \sqrt{2}}$ ($\cdot 10^{-3} \text{s/m}$)	$P_v(\text{ER})$ ($\cdot 10^{-3} \text{m/s}$)	$P_v(\text{korrekt})$ ($\cdot 10^{-3} \text{m/s}$)	V_0 ($\cdot 10^{-3} \text{kg/m}^3$)	v_{12} ($\cdot 10^{-3} \text{kg/m}^3$)	RF_0 (%)	RF_{12} (%)	RF_{med} (%)	$p_v^{\text{med}}(\text{korrekt})$ ($\cdot 10^{-3} \text{m/s}$)
2	1,18	0,1	0,195	0,221	11,53	16,83	66,7	97,4	82	0,18
	0,74	0,1	0,122	0,132	11,42	17,00	66,1	98,4	82	
3	1,01	0,1	0,167	0,186	11,48	16,90	66,4	97,8	82	0,15
	0,59	0,1	0,098	0,104	11,38	17,06	65,8	98,7	82	
4	0,45	0,1	0,074	0,078	11,34	17,11	65,6	99,0	82	0,07
	0,35	0,1	0,058	0,060	11,32	17,15	65,5	99,2	82	
5	0,63	0,1	0,104	0,111	11,39	17,04	65,9	98,6	82	0,12
	0,69	0,1	0,114	0,122	11,40	17,02	66,0	98,5	82	
6	0,14	0,1	0,023	0,023	11,27	17,23	65,2	99,7	82	0,02
	0,15	0,1	0,025	0,025	11,27	17,22	65,2	99,7	82	
7	0,09	0,1	0,015	0,015	11,25	17,25	65,1	99,8	82	0,015
	0,09	0,1	0,015	0,015	11,25	17,25	65,1	99,8	82	
9	0,81	0,1	0,134	0,146	11,43	16,97	66,2	98,2	82	0,13
	0,69	0,1	0,114	0,122	11,40	17,02	66,0	98,5	82	
11	0,40	0,1	0,066	0,069	11,33	17,13	65,6	99,1	82	0,09
	0,58	0,1	0,096	0,102	11,38	17,06	65,8	98,7	82	
14	0,73	0,1	0,121	0,130	11,41	17,00	66,0	98,4	82	0,13
	0,73	0,1	0,121	0,130	11,41	17,00	66,0	98,4	82	

TAB. IV:7. Beräkning av ånggenomsläppligheten hos puts/ytskikt vid uttorkningsförsök. $RF_{12} = 100 \%$, $RF_1 = 65 \%$, $v = 20^\circ\text{C}$. Underlag av gasbetong.
Putsbeteckningar enligt delrapport I.

Puts	Efter 15 dygns uttorkning		Efter 50 dygns uttorkning	
	g ($\cdot 10^{-6} \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)	P_v ($\cdot 10^{-3} \text{m/s}$)	g ($\cdot 10^{-6} \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)	P_v ($\cdot 10^{-3} \text{m/s}$)
2	2,17	0,39	1,30	0,23
3	1,56	0,28	1,33	0,23
4	0,61	0,10	0,56	0,09
5	1,07	0,19	0,78	0,13
6	0,29	0,05	0,29	0,05
7	0,33	0,06	0,33	0,06
8	0,64	0,11	0,55	0,09
9	0,81	0,14	0,69	0,12
10	0,94	0,16	0,81	0,14
11	0,51	0,09	0,36	0,06
14	1,74	0,31	1,24	0,22

TAB. IV:6. Resultat från mätning enligt ER-nämndens våtmetod. Putsbeteckningar enligt delrapport I.

Puts	g ($\cdot 10^{-6}$ kg/m ² ·s)	P _v (ER) ($\cdot 10^{-3}$ m/s)	p _v medel ¹ (ER) ($\cdot 10^{-3}$ m/s)
2	24	2,3	2,3
	24	2,3	
	24	2,3	
3	2,9	0,28	0,39
	5,4	0,52	
	3,9	0,37	
4	5,8	0,56	0,56
	5,8	0,56	
	5,8	0,56	
5	15	1,5	1,2
	11	1,0	
	11	1,1	
6	0,48	0,05	0,04
	0,33	0,03	
	0,43	0,04	
7	0,17	0,02	0,02
	0,16	0,02	
	0,20	0,02	
8	0,79	0,08	0,07
	0,66	0,06	
	0,71	0,07	
9	3,0	0,29	0,35
	4,2	0,41	
	3,7	0,36	
10	4,2	0,41	0,35
	3,4	0,32	
	3,4	0,32	
11	25	2,4	2,5
	27	2,6	
14	25	2,4	2,5
	25	2,4	
	27	2,6	
3 ^x	30	2,9	-

x Provkroppen monterad med putsen nedåt.

TAB. IV:8. Beräkning av ånggenomsläppligheten hos puts/ytskikt vid uttorkningsförsök. $RF_{12} = 100\%$, $RF_1 = 65\%$, $\varphi = 20^\circ\text{C}$. Underlag av tegel. Putsbeteckningar enligt delrapport 1.

Puts	Efter 15 dygns uttorkning		Efter 50 dygns uttorkning	
	g ($\cdot 10^{-6}\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$)	P_v ($\cdot 10^{-3}\text{m/s}$)	g ($\cdot 10^{-6}\text{kg}^2\cdot\text{s}$)	P_v ($\cdot 10^{-3}\text{m/s}$)
2	0,91	0,16	0,82	0,14
	0,72	0,12	0,67	0,11
3	0,88	0,15	0,82	0,14
	0,85	0,15	0,62	0,11
4	0,39	0,07	0,33	0,06
	0,32	0,05	0,32	0,06
5	0,81	0,14	0,65	0,11
	0,79	0,13	0,64	0,11
6	0,40	0,07	0,40	0,07
	0,40	0,07	0,40	0,07
8	0,40	0,07	0,40	0,07
	0,40	0,07	0,40	0,07
9	1,81	0,32	1,06	0,18
	2,03	0,37	1,06	0,18
10	2,68	0,50	1,19	0,21
	3,00	0,57	1,19	0,21
11	1,50	0,26	0,95	0,16
	1,47	0,26	0,75	0,13
14	2,02	0,36	1,04	0,18
	2,02	0,36	1,04	0,18

TAB. IV:9. Sammanställning av ånggenomsläppligheten ($\cdot 10^{-3}\text{m/s}$) vid olika mätningar.

Puts	0-40 % RF (torrmetod)	93-65 % RF	100-65 % RF (Siporexmetod)	Kapillär- transport (vätmetod)	Uttorknings- försök(50 dygn)
2	0,10	0,13	0,18	2,3	0,13 - 0,23
3	0,15	0,10	0,15	0,39	0,12 - 0,23
4	0,017	0,03	0,07	0,56	0,06 - 0,09
5	0,05	-	0,12	1,2	0,11 - 0,13
6	0,014	0,02	0,02	0,04	0,05 - 0,07
7	0,007	0,009	0,015	0,02	(0,06)
8	0,03	0,05	-	0,07	0,07 - 0,09
9	0,014	0,07	0,13	0,35	0,12 - 0,18
10	0,04	0,06	-	0,35	0,14 - 0,21
11	0,08	0,05	0,09	2,5	0,06 - 0,15
14	0,07	0,17	0,13	2,5	0,18 - 0,22

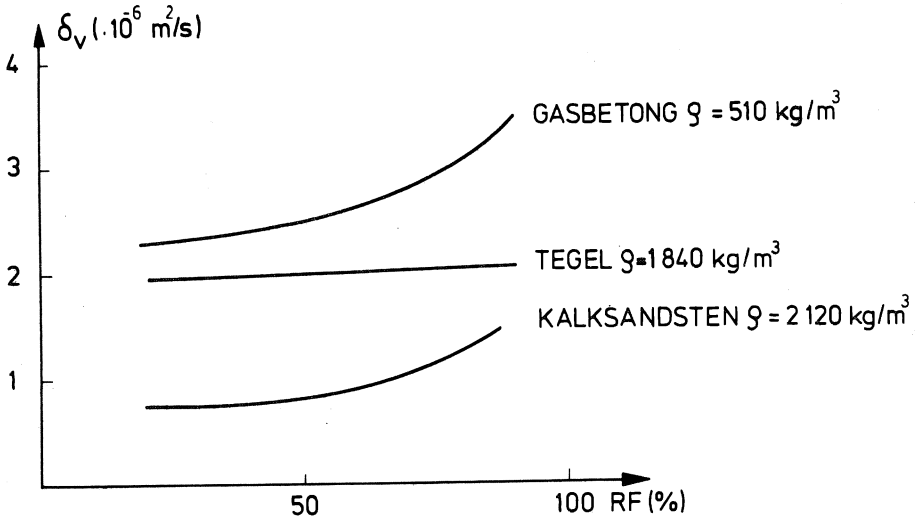


FIG. IV:1. Fuktgenomsläpplighetskoefficientens beroende av fuktillståndet. (Tveit 1966)

Relationship between coefficient of vapour conductivity and moisture condition.

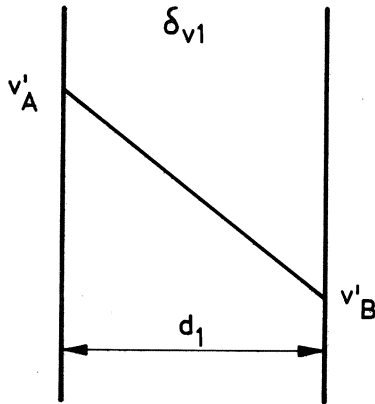


FIG. IV:2. Anghaltsfördelning i homogent skikt vid stationärt tillstånd.

Distribution of vapour concentration in a homogeneous wall at a stationary condition.

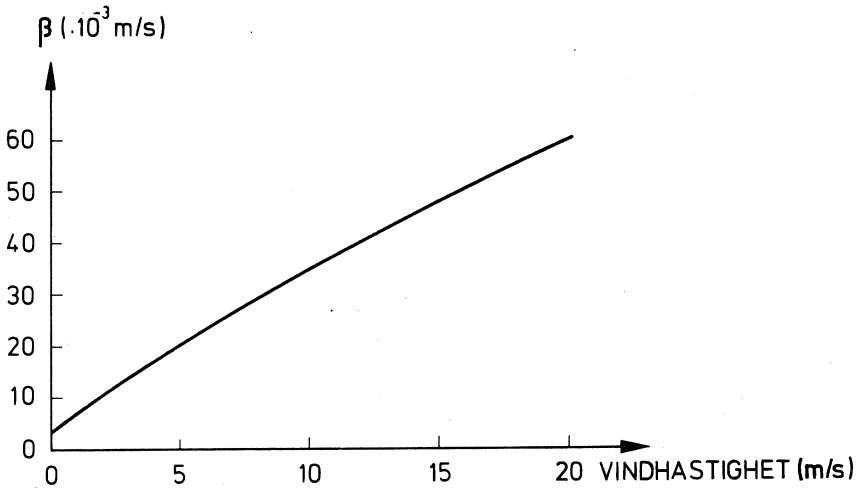


FIG. IV:3. Sambandet mellan β och vindhastigheten enligt van der Held (1941).

Relationship between surface coefficient of mass transfer and wind velocity.

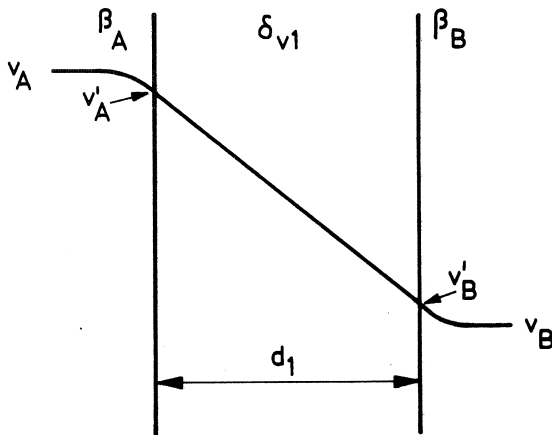


FIG. IV:4. Anghaltsfördelning i och omkring ett homogent skikt vid stationärt tillstånd.

Distribution of vapour concentration in and around a homogeneous wall at a stationary condition.

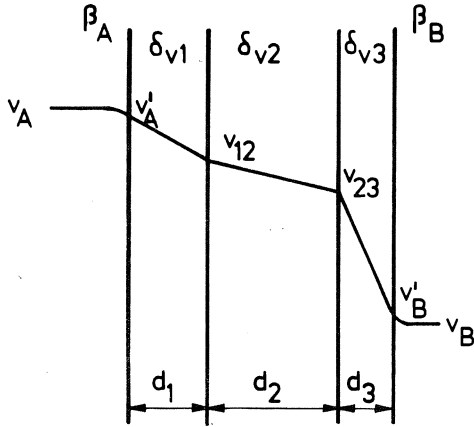


FIG. IV:5. Anghaltsfördelning i en sammansatt vägg vid stationärt tillstånd.

Distribution of vapour concentration in and around a several-layered wall at a stationary condition.

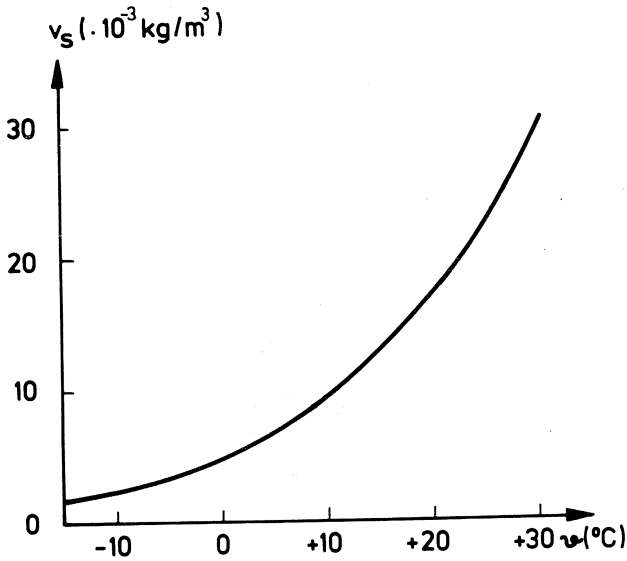


FIG. IV:6. Mättnadsänghalten som funktion av temperaturen.

Relationship between maximum vapour concentration and temperature.

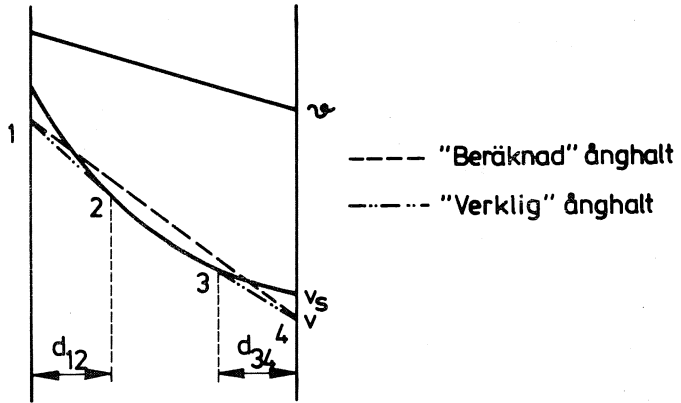


FIG. IV:7. Ånghaltsfördelning vid kondens i homogen vägg.

Distribution of vapour concentration when condensation takes place in a homogeneous wall.

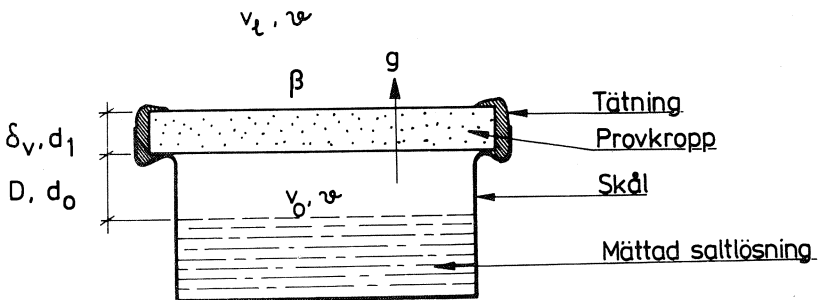


FIG. IV:8. Mätning av ånggenomsläpplighet med skålmetoden.

Measurement of vapour permeability according to the cup-method.

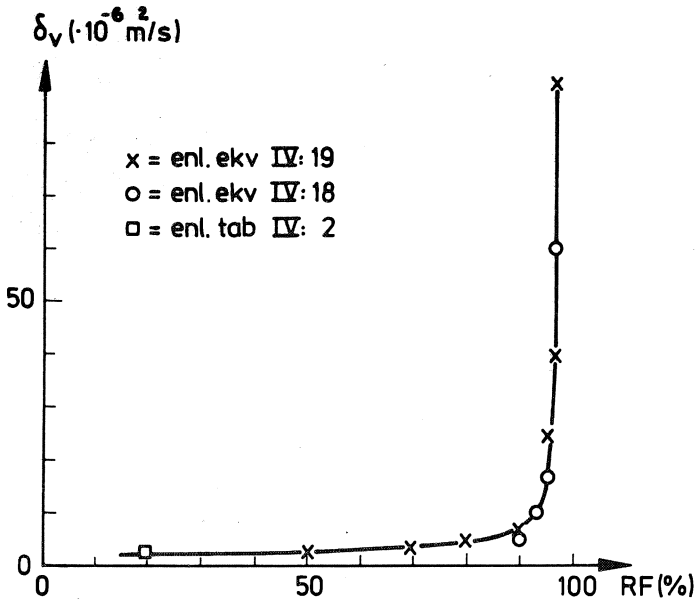


FIG. IV:9. Beräknat samband mellan ånggenomsläpplighetskoefficient i gasbetong och relativ luftfuktighet.

Calculated relationship between coefficient of vapour conductivity and relative humidity in aerated concrete with density 500 kg/m^3 .

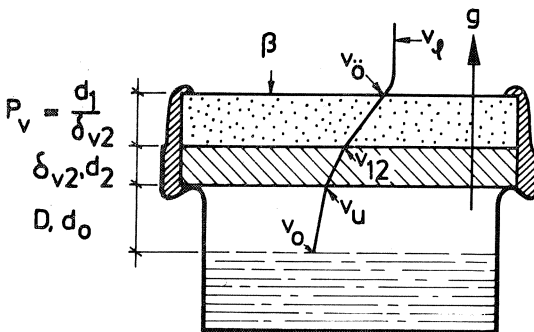


FIG. IV:10. Beteckningar vid mätning av ånggenomsläpplighetskoefficient hos puts på ett underlag.

Symbols at measurement of vapour permeability of a rendering on an underlayer.

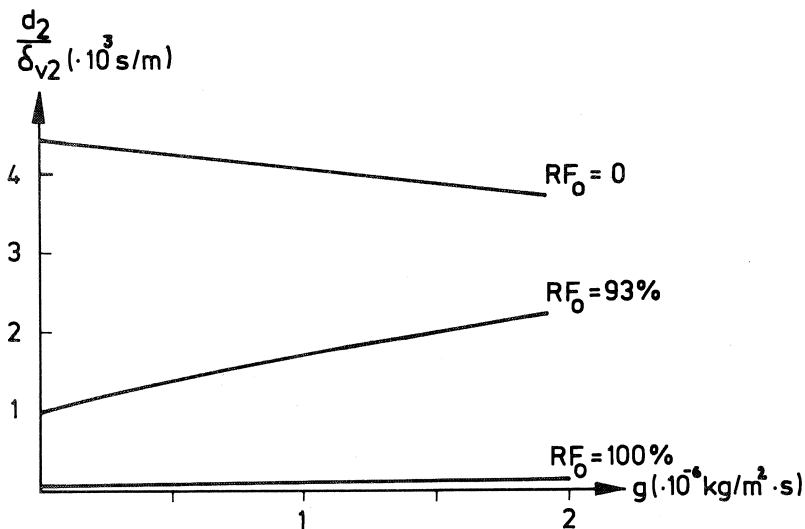


FIG. IV:11. Underlagets ånggenomgångsmotstånd som funktion av fuktflödet vid olika RF_0 .

Relationship between diffusion resistance of the underlayer and moisture flow at different RH.

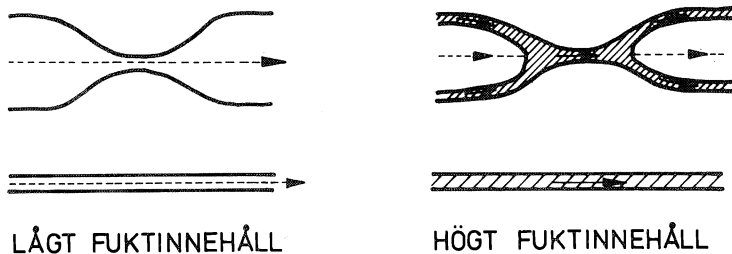


FIG. IV:12. Exempel på fukttransportmekanismer vid olika fuktinnehåll i olika porer.

Examples of moisture flow at different moisture contents in the pores.

- > Fukttransport i ångfas
- > Fukttransport i vätskefas

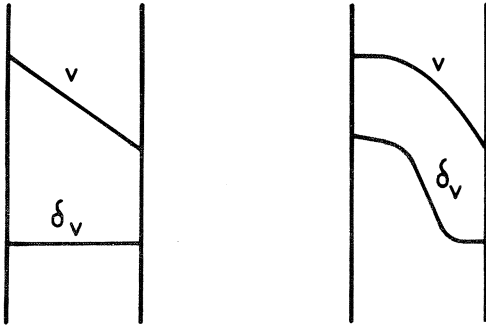


FIG. IV:13. Anhaltsfördelning vid konstant respektive varierande ånggenomsläpplighetskoefficient.

Distribution of vapour concentration at constant (left) and at varying (right) coefficient of vapour conductivity.

Avdelningen för Byggnadsmateriallära
Tekniska Högskolan i Lund

PUTSENS INVERKAN PÅ FASADENS FUKTBALANS
Delrapport V: FUKTTRANSPORT I VÄTSKEFAS

Lund i mars 1980
Kenneth Sandin

Denna delrapport hänför sig till forskningsanslag 740269-8 från Statens Råd för Byggnadsforskning till avdelningen för Byggnadsmateriallära, Tekniska Högskolan i Lund. Hela projektet slutredovisas i en huvudrapport och åtta delrapporter.

INNEHÅLL

1	INLEDNING	V:2
2	TEORI	V:3
2.1	Allmänt, definitioner.....	V:3
2.2	Enkla elementarporer	V:5
2.3	Sammansatta elementarporer	V:12
2.4	Enskilda material	V:16
2.5	Sammansatta material	V:21
2.6	Spricka i tätt ytskikt	V:22
3	MÄTNING AV KAPILLÄRSUGNINGSEGENSKAPERNA	V:26
3.1	Allmänna flödeskoefficienter.....	V:26
3.2	ER-nämndens metoder	V:27
3.3	Kapillaritetstal	V:27
3.4	Kapillärsugningsmotstånd	V:30
4	EGNA MÄTNINGAR	V:32
4.1	Kapillaritetstal	V:32
4.2	Kapillärsugningsmotstånd	V:33
4.3	Inverkan av sprickor i tätt ytskikt	V:35
5	DISKUSSION AV RESULTATEN	V:36
5.1	Allmänt	V:36
5.2	Kapillaritetstal	V:37
5.3	Sammansatta material	V:39
5.4	Sprickor i tätt ytskikt	V:40
	LITTERATUR	V:41
	TABELLER	V:42
	FIGURER	V:46

1. INLEDNING

Fukttransport i vätskefas kan ske om vatten utsätts för tryckgradienter. Dessa tryckgradienter kan bero på yttre eller inre faktorer. Exempel på yttre tryck är vind i samband med slagregn på en fasad och vattentryck mot en grundkonstruktion under grundvattenytan. Fukttransport beroende på dessa yttre krafter behandlas inte i denna delrapport. Här behandlas enbart fukttransport i vätskefas på grund av att vattnet i ett material kan ha inre tryckskillnader. Detta fenomen kallas i allmänhet för kapillärsugning och är ofta helt avgörande för en ytterväggs fuktbalans.

Begreppet kapillärtransport kan tolkas på ett flertal olika sätt. Strikt vetenskapligt är kapillärtransport en vattentransport i vätskefas under inverkan av en tryckgradient. I praktiska material är det ofta svårt att skilja kapillärtransport från ångtransport. Är hela porsystemet vattenfyllt så är det en entydig kapillärtransport. Är å andra sidan hela porsystemet luftfyllt är det en entydig ångtransport. Gränsdragningsproblem uppstår då porsystemet är delvis vattenfyllt. Fukttransporten sker då genom både kapillärtransport och ångtransport.

Vid praktiska beräkningar och vid bedömningar av transportmekanismen i verkliga material drar man ofta gränsen mellan kapillär- och ångtransport där transportmekanismen "i huvudsak" ändras från den ena till den andra. Vid diskussion om kapillärsugning i verkliga material används i hela denna rapport, om inte annat anges, denna "praktiska" definition.

Den praktiska gränsen för kapillärtransport sammanfaller definitionsmässigt med begreppet kritiskt fuktinnehåll. Över detta fuktinnehåll finns det nämligen en sammanhängande vattenfas i porsystemet.

I denna delrapport behandlas först den fysikaliska bakgrunden till kapillärsugning i enkla elementarporer. Därefter appliceras dessa samband på verkliga material. Det allmänna fallet med fukttransport i vätskefas i ett material har sysselsatt ett flertal forskare under lång tid och behandlas här mycket kortfattat. Här läggs i stället huvudvikten vid materialkombinationen puts-underlag med specialfallet "kapillärsugning från fri vattenyta". De egna mätningar som redovisas, behandlar enbart detta specialfall.

2 TEORI

2.1 Allmänt, definitioner

Vattentransport i porösa byggnadsmaterial sker under inverkan av kapillärkrafter, som bl a är beroende av egenskaperna hos vattnet och materialet samt fukttinnehållet. Kapillärkrafterna kan betraktas som en drivkraft till vattentransporten. I samband med att vattnet transporteras inuti ett material uppstår friktionskrafter, som är motriktade kapillärkrafterna och sålunda ger upphov till ett motstånd mot vattentransporten. I vissa fall kan även tyngdkrafterna inverka. Motståndet mot vattentransporten påverkas av samma faktorer som kapillärkrafterna, men på ett annorlunda sätt. Transporthastigheten bestäms av sambandet mellan kapillärkrafterna och motståndet. En stor sugkraft behöver alltså inte medföra en stor sughastighet!

I följande avsnitt behandlas först ovanstående i idealiserade kapillärporer, varefter erhållna samband utnyttjas för porösa material. Ett poröst material kan naturligtvis inte representeras med hjälp av enkla kapillärporer. Ett studium av ideala porer kan emellertid öka förståelsen för hur olika faktorer påverkar förhållandena samt ge en viss hjälp vid uppställandet av transportekvationer etc.

Olika begrepp och definitioner beskrivs i allmänhet i respektive avsnitt där de används. Vissa inom fuktmekniken grundläggande fenomen och begrepp förklaras dock nedan.

Ytspänning, σ

En vätskas yta kan jämföras med en spänd hinna, som vill göra den yta som omsluter en given vätskevolym så liten som möjligt. Ytspänningen, som alltid verkar parallellt med vätskeytan, kan definieras genom att betrakta krafterna i ett snitt genom en vätskeyta. En sådan betraktelse medför att ytspänningen definieras som kraft per längdenhet av vätskeytan, med enheten N/m. Alternativt kan ytspänningen definieras genom en energibetraktelse varvid enheten blir Nm/m^2 .

Den fysikaliska förklaringen till ytspänningsfenomenet är molekylära krafter i vätskan. I en vätska påverkar molekylerna varandra med attraktionskrafter, som avtar hastigt med avståndet mellan molekylerna. En given molekyl påverkas enbart av övriga molekyler som finns inom ett visst avstånd, verkningsfären. Vätskemolekyler vars verkningsfär helt befinner sig i vätskan, (molekyl A i FIG.V:1), påverkas av samma attraktionskrafter åt alla håll. Någon ensidig kraftverkan uppstår således inte. En vätskemolekyl som ligger i ytan, har däremot både luft och vätska inom sin verkningsfär (molekyl B i FIG.V:1). Luften har en betydligt mindre molekyltäthet än vätskan, med följd att vätskan attraherar mer än luften. Molekyler som befinner sig i ytan påverkas alltså av en resulterande kraft in mot vätskan. För att förflytta en molekyl från det inre av vätskan till ytan åtgår det alltså en viss energimängd. Denna energimängd per ytenhet är numeriskt lika med ytspänningen.

Ytspänningen är beroende av temperaturen på så vis att en högre temperatur medför lägre ytspänning. För vatten med temperaturen 18°C är ytspänningen $\sigma = 73 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$.

Randvinkel, θ

Attraktionskrafterna inom en vätskemolekyls verkningsfär medför att speciella förhållanden uppstår där en vätskeyta är i kontakt med en fast vägg. Molekylen C i FIG.V:1 attraheras av vätskan, luften och väggen. Beroende på riktningen av den sammanlagda attraktionen kommer vätskeytan att bilda en viss vinkel mot väggen. Denna vinkel kallas randvinkeln, θ , och definieras enligt FIG. V:2. Är den resulterande kraften riktad in mot vätskan blir $\theta > 90^{\circ}$. Är resultanten riktad in i väggen blir $\theta < 90^{\circ}$. Vätskor som medför att $\theta < 90^{\circ}$ sägs vara vätande. En fullständigt vätande vätska har randvinkeln $\theta = 0^{\circ}$. Vatten på en absolut ren glasyta är ett exempel med $\theta = 0^{\circ}$. När en yta görs vattenavvisande, hydrofob, ändras randvinkeln. En fullständigt vattenavvisande yta har randvinkeln 180° . Randvinkeln för en viss vätska i kontakt med ett visst material bestäms av egenskaperna hos vätska och material. En viss vätska kan ge olika randvinkel vid kontakt med olika material.

Randvinkelns betydelse för utseendet hos en vattendroppe som ligger på ett underlag illustreras i FIG. V:3.

Kapillaritet

Med kapillaritet avses den egenskap, som medför att en vätska i ett kapillärrör eller poröst material, under inverkan av ytspänningen, kan sugas upp och hållas kvar ovanför en fri vattenyta.

Elementarpor

Elementarporen är en väldefinierad idealiserad por med given geometrisk utformning. Vanligen består den enkla elementarporen av ett rör med konstant radie.

Menisk

Med menisk avses den krökta vätskeyta, som vanligen bildas i en por under inverkan av ytspänningen.

Dynamisk viskositet, η

Ett mått på en vätskas inre friktion. Viskositeten varierar kraftigt med temperaturen. För vatten varierar η med temperaturen enligt FIG. V:4.

2.2 Enkla elementarporer

Sugförmåga, porvattenundertryck, maximal stighöjd

Om ett kapillärrör (elementarpor) placeras i kontakt med fritt vatten kommer vattnet att sugas in i röret. Den drivande kraften utgörs av vattnets ytspänning längs periferin. Enligt FIG. V:5 fås den totala kapillärkraften till

$$F = 2\pi \cdot r \cdot \sigma \cdot \cos \theta \quad (V:1)$$

där F =	uppåtverkande kraft	N
r =	kapillärradie	m
σ =	ytspänning	N/m
θ =	randvinkel	-

Denna kraft, som alltså "drar" i vattnet, ger upphov till en dragspänning i vattnet vid menisken. Denna dragspänning kan tolkas som ett undertryck i vattnet. Storleken på detta undertryck fås, genom att dividera kraften med tvärsnittsytan vid menisken, till

$$P_c = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{r} \quad (V:2)$$

där P_c = undertrycket i relation till trycket vid den fria vattenytan, N/m^2

Andra benämningar på detta undertryck är suction och porvattenundertryck.

Ekvation (V:2) är ett specialfall av Laplace's lag, som säger att det uppstår en tryckskillnad över en krökt fasgräns mellan två medier enligt

$$\Delta P = \sigma \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (V:3)$$

där ΔP = tryckskillnaden N/m^2

R_1 och R_2 = huvudkrökningsradier m

Trycket är alltid högre på den sida där krökningscentrum finns. För ett cylindriskt vätskefyllt kapillärrör blir $R_1 = R_2 = r/\cos \theta$. För en vätska i en lång spalt med avståndet d mellan väggarna blir $R_1 = d/2 \cos \theta$ och $R_2 = \infty$. Detta ger att tryckskillnaden över menisken blir

$$\Delta P = \frac{2\sigma \cdot \cos \theta}{d} \quad (V:4)$$

Tryckskillnaden räknas i förhållande till lufttrycket, vilket är detsamma som trycket i den fria vattenytan. Vätskans undertryck varierar rätlinjigt mellan menisken och den fria vattenytan enligt FIG. V:6. I en horisontell kapillär medför denna tryckskillnad att vattnet sugs längre och längre in i kapillären.

I en vertikal kapillär begränsas uppsugningen av att gravitationen medför en motriktad kraft. När porvattenundertrycket är numeriskt lika med det hydrostatiska trycket för en vattenpelare med aktuell höjd upphör stigningen. Det hydrostatiska trycket kan i detta fall betraktas som en nedåtriktad spänning på menisken och ökar linjärt med stighöjden. Omvänt gäller att om kapillären från början är fylld så sjunker vattnet tills det hydrostatiska trycket balanserar porvattenundertrycket. För en cirkulär cylindrisk kapillär ges sålunda den maximala stighöjden av

$$h = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{r \cdot \rho_w \cdot g} \quad (V:5)$$

där h = maximal stighöjd m
 ρ_w = vattnets densitet kg/m³
 g = jordaccelerationen m/s²

Undertrycket hos menisken eller den maximala stighöjden i ett vertikalt kapillärrör som står i vatten kan betraktas som en egenskap hos kapillärröret. I fortsättningen kallas denna egenskap för kapillär sugförmåga. Denna kapillära sugförmåga behöver inte vara densamma som det aktuella porvattenundertrycket. Den kapillära sugförmågan bestäms nämligen av radien hos de enskilda porerna medan porvattenundertrycket bestäms av krökningsradierna hos meniskerna. Dessa krökningsradier är i sin tur beroende av porradierna där meniskerna finns och av tyngdkraften. Detta exemplifieras i FIG. V:7.

FIG. V:7 a visar ett horisontellt jämntjockt kapillärrör som i ena änden har kontakt med fritt vatten. Den kapillära sugförmågan är lika i alla delar av röret eftersom radien är konstant. Vid menisken är undertrycket lika med den kapillära sugförmågan och vid det fria vattnet är undertrycket noll. Vattnet kommer p g a tryckgradienten att ständigt förflytta sig åt höger. Upphör vattentillförseln till röret kommer det att bildas en menisk även vid denna sida enligt FIG. V:7 b. Undertrycket blir då konstant genom hela röret och vattenflödet upphör.

FIG. V:7 c och d visar ett kapillärrör som är jämntjockt i bägge ändarna men med en utvidgning respektive åtsnörning på mitten. Den kapillära sugförmågan är här inte konstant i mittpartiet, beroende på att radien inte är konstant. Vid jämvikt är dock vattnets undertryck konstant, eftersom meniskerna alltid har samma krökningsradie vid jämvikt. Om vatten tillförs en från början tom kapillär med utseende enligt ovanstående och vattentillförseln avbryts när menisken befinner sig i mittpartiet så kommer, under inverkan av de olika porvattenundertrycken vid meniskerna, en omfördelning att ske tills bägge meniskerna har samma krökningsradie. Detta behöver nödvändigtvis inte betyda att porradierna är desamma vid meniskerna. Jfr FIG. V:7e.

FIG. V:7 e visar ett koniskt kapillärrör. Den kapillära sugförmågan varierar längs röret och är störst där porradien är minst. Befinner sig bägge meniskerna

inne i röret så kommer meniskerna att ha ett porvattenundertryck som svarar mot den kapillära sugförmågan. Porvattenundertrycket blir alltså större vid den mindre radien och vattnet kommer att transporteras mot den smalare delen. Porvattenundertrycket i den vänstra menisken kommer att svara mot den kapillära sugförmågan ända tills menisken når kanten. När detta inträffar är alltså fortfarande porvattenundertrycket större i vänstra menisken. Eftersom porvattenundertrycket här är större så fortsätter transporten åt vänster. Följden av detta blir att krökningsradien i den vänstra menisken kommer att öka tills samma porvattenundertryck råder i hela vattenmängden. Vid jämvikt kommer alltså den vänstra menisken att ha ett lägre porvattenundertryck än som svarar mot den kapillära sugförmågan.

FIG. V:7 f visar ett jämntjockt, vertikalt, från början tomt kapillärrör med ena änden i vatten. Den kapillära sugförmågan är konstant genom hela röret. Porvattenundertrycket varierar rätlinjigt från ett värde vid menisken, som ges av den kapillära sugförmågan, till noll vid den fria vattenytan. Uppstigningen i kapillärröret kommer att fortgå så länge som porvattenundertrycket är större än det hydrostatiska trycket. Jämvikt inträder då likhet råder.

FIG. V:7 g visar samma kapillärrör som ovan men från början fyllt med vatten. I detta fall är det hydrostatiska trycket större än porvattenundertrycket. Vattenmenisken kommer alltså att sjunka till jämvikt råder mellan det hydrostatiska trycket och porvattenundertrycket.

FIG. V:7 h visar ett från början tomt kapillärrör med varierande radie som placerats vertikalt i kontakt med fritt vatten. Den kapillära sugförmågan varierar längs röret. Porvattenundertrycket varierar rätlinjigt från ett visst värde vid menisken, som bestäms av kapillärsugningsförmågan där, till noll vid den fria vattenytan. Så länge som porvattenundertrycket är större än det hydrostatiska trycket stiger vattnet uppåt. När likhet inträder mellan dessa tryck kommer jämvikt att råda. Vatten kan alltså inte stiga högre, även om sugförmågan lokalt är större än det hydrostatiska trycket på en högre nivå, eftersom vattenmenisken på sin väg dit måste passera ett område med lägre sugförmåga än det hydrostatiska trycket på motsvarande nivå.

FIG. V:7 i visar samma kapillärrör som h) men i detta fall är röret från början fyllt med vatten. Det hydrostatiska trycket är här från början större

än porvattenundertrycket, med följd att vattnet sjunker. Denna sänkning kommer att pågå till en nivå där porvattenundertrycket och det hydrostatiska trycket är lika. Detta kan inträffa vid en högre nivå än vid sugning från en fri vattenyta enligt h). Under denna nivå finns det då partier där den kapillära sugförmågan är mindre än det hydrostatiska trycket. Detta fenomen, olika höjd vid jämvikt beroende på om vattnet stiger eller sjunker, kallas hysteresis.

Sammanfattningsvis så gäller att det är krökningsradierna hos meniskerna som bestämmer porvattenundertrycket. Dessa krökningsradier är i allmänhet beroende av porradierna där meniskerna finns. Övriga porradier saknar betydelse. Är vattenundertrycket inte lika i hela vattenmassan sker en omfördelning så att porvattenundertrycket blir konstant. I vertikala kapillärer måste hänsyn tas till gravitationens inverkan.

Porvattenundertrycket är även beroende av temperaturen, eftersom vattnets ytspänning är temperaturberoende. En högre temperatur medför en lägre ytspänning, vilket i sin tur medför ett mindre porvattenundertryck. Detta innebär, att om det finns en temperaturgradient över kapillären enligt FIG. V:7 a så kommer vattnet att transporteras mot den kalla delen.

Av ekvationerna (V:2) och (V:3) framgår att den kapillära sugförmågan ökar med minskande porradie. I FIG. V:8 redovisas sambandet mellan porvattenundertryck respektive maximal stighöjd och porradie för en cirkulärcylindrisk kapillärpor innehållande vatten med temperaturen 18 °C.

Flödesmotstånd, flödeskapacitet

När en vätska strömmar genom ett rör så varierar strömningshastigheten i radialled beroende på friktionskrafter. Vid rörväggarna är hastigheten noll medan vätskan har sin största hastighet i mitten. Friktionskrafternas storlek bestäms av Newtons viskositetsekvation

$$\tau = - \eta \cdot \frac{dv_r}{dr} \quad (V:6)$$

där	τ = friktionskraft/ytenhet	N/m^2
	η = dynamisk viskositet	Ns/m^2
	v_r = hastigheten vid radien r	m/s
	r = radie	m

Vid laminär strömning i ett rör ges hastighetsprofilen enligt hydrauliklagarna av

$$v_r = 2v \left(1 - \left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right) \quad (V:7)$$

där v = vattnets medelhastighet m/s

r_0 = rörets radie m

Medelhastigheten definieras härvid som den hastighet varmed hela vätskemängden skall transporteras för att ge samma vattenflöde som aktuell hastighetsprofil, vilket ger

$$v \cdot \pi r_0^2 = \int_0^{r_0} v_r \cdot 2\pi r \cdot dr \quad (V:8)$$

Derivering av ekv (V:7) med avseende på radien ger

$$\frac{dv_r}{dr} = -\frac{4v \cdot r}{r_0^2} \quad (V:9)$$

Vid rörväggen erhålles sålunda genom insättning i ekv (V:6)

$$\tau = \eta \cdot \frac{4v}{r_0} \quad (V:10)$$

Det totala motståndet mot vattenflödet i en cirkulärcylindrisk kapillärpor med längden z och radien r blir då

$$F' = 2\pi r \cdot z \cdot \eta \cdot \frac{4v}{r} \quad (V:11)$$

Genom att sätta detta totala motstånd lika med kapillärkraften enligt ekv (V:1) erhålles ett samband mellan insugningshastighet, kapillärradie och inträngningsdjup enligt

$$v = \frac{r \cdot \sigma \cdot \cos\theta}{4 \cdot \eta \cdot z} \quad (V:12)$$

där z = inträngningsdjup m

Ekvation (V:12) visar att sughastigheten avtar med ökande inträngningsdjup

och minskande radie.

Genom insättning av $v = \frac{dz}{dt}$ i ekv. (V:12) och integrering erhålles sambandet mellan tiden och inträngningsdjupet till

$$t = \frac{2\eta}{r \cdot \sigma \cdot \cos\theta} \cdot z^2 \quad (\text{V:13})$$

där $t = \text{tid}$ s

Den härvid insugna vätskemängden per ytenhet ges av

$$G_0 = z \cdot \rho = \sqrt{\frac{\rho^2 \cdot r \cdot \sigma \cdot \cos\theta}{2\eta}} \cdot t \quad (\text{V:14})$$

där

$$G_0 = \text{insugen vätskemängd} \quad \text{kg/m}^2$$

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

Vid vertikal uppsugning tillkommer inverkan av tyngdkraften i ovan angivna ekvationer. Ekv.(V:12-13) omformas då till

$$v = \frac{r \cdot \sigma \cdot \cos\theta}{4\eta} \left[\frac{1}{z} - \frac{1}{h} \right] \quad (\text{V:15})$$

$$t = \frac{8\eta}{r^2 \cdot \rho \cdot g} \left[h \cdot \ln\left(\frac{h}{h-z}\right) - z \right] \quad (\text{V:16})$$

Sambandet mellan kapillärradie, tid och inträngningsdjup vid kapillärsugning av vatten med temperaturen 18°C illustreras i FIG. V:9.

För den enkla cirkulär cylindriska kapillärporen med konstant radie kan man sammanfattningsvis konstatera att både sugkraft och flödesmotstånd ökar med avtagande kapillärradie. Flödesmotståndet ökar emellertid mer än sugkraften, med följd att sughastigheten avtar med minskande porradie. Den maximala stighöjden ökar däremot, på grund av större sugkraft, med minskande porradie.

Ovanstående samband gäller för kapillärsugning under inverkan av kapillärrörets egna kapillärkrafter. Ekvation (V:12) kan emellertid omformas till ett allmänt fall med en viss given tryckgradient längs röret. Med hjälp av ekv. (V:2) erhålles tryckgradienten vid kapillärsugningen till

$$\frac{dP}{dz} = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos\theta}{r \cdot z} \quad (\text{V:17})$$

Genom insättning av detta samband i ekv. (V:12) erhålles

$$v = - \frac{r^2}{8\eta} \cdot \frac{dP}{dz} \quad (V:18)$$

vilket är känt som Poiseuilles ekvation.

Den transporterade vätskemängden per tids- och ytenhet kan skrivas

$$g_o = - \frac{r^2 \cdot \rho}{8 \cdot \eta} \cdot \frac{dP}{dz} = - \frac{1}{M_o} \cdot \frac{dP}{dz} \quad (V:19)$$

där

$$g_o = \text{massflödestäthet} \quad \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

$$M_o = \text{flödesmotstånd} \quad \text{Ns/kg} \cdot \text{m}$$

Som framgår av ekv. (V:19) så ökar flödesmotståndet mycket kraftigt med minskande porradie (vid konstant total porarea). En halvering av porradien medför en 4-dubbling av motståndet.

Ovan angivna ekvationer för massflödestäthet respektive uppsugen vattenmängd vid kapillärsugning ger mängden per ytenhet porer. Vid beräkningar för specifika porer eller porsystem skall dessa värden multipliceras med den totala porarean.

2.3 Sammansatta elementarporer

I föregående avsnitt behandlades vattenflöde enbart för enkla elementarporer. I ett porsystem, som är sammansatt av olika elementarporer, kan förhållandena variera mycket kraftigt beroende på hur porerna kombineras. I fortsättningen skall några principiellt olika kombinationer av elementarporer diskuteras med avseende på kapillärsugning och vattenflöde på grund av en yttre tryckgradient. Ingen hänsyn tas till gravitationen.

Pormodeller

De olika pormodeller som studeras framgår av FIG. V:10-12. Vid alla jämförelser är den totala porvolymen konstant. För pormodellerna A och B är även porarean vinkelrät mot flödesriktningen konstant.

Modell A_1 (FIG.V:10) består av n st cirkulär cylindriska rör med radien r_1 . Denna modell jämförs med ett rör (A_2) med radien $r_2=r_1 \cdot \sqrt{n}$. Porarea och porvolym är sålunda samma.

Modell B_1 (FIG.V:11) består av n st rör med radien r_1 och ett rör med radien $r_2=r_1 \cdot \sqrt{n}$ som parallellkopplas. B_2 och B_3 består av samma porer, men seriekopplade. B_2 har de minsta porerna närmast den fria vattenytan. B_3 har den grova poren närmast den fria vattenytan. Porarea och porvolym är samma för B_1 , B_2 och B_3 .

Modell C_1 (FIG.V:12) består av ett rör med språngvis varierande radie. På sträckan λ_3 är radien r_3 och på sträckan λ_4 är radien $r_4=r_3 \cdot \sqrt{n}$.

Flera fina porer - en grov por

Vid kapillärsugning i pormodell A ges den uppsugna vattenmängden i respektive porsystem av ekv. (V:14). Förhållandet mellan de uppsugna vattenmängderna i de båda systemen ges av

$$\frac{G(A_1)}{G(A_2)} = \frac{\sqrt{r_1}}{\sqrt{r_2}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (V:20)$$

Vid en given yttre tryckgradient över porsystemen fås förhållandet mellan flödena (med hjälp av ekv(V:19)) till

$$\frac{g(A_1)}{g(A_2)} = \frac{r_1^2}{r_2^2} = \frac{1}{n} \quad (V:21)$$

Sambanden illustreras grafiskt i FIG. V:13.

Grova och fina porer med serie-respektive parallellkoppling

Vid kapillärsugning i porsystemet B_1 sker sugningen samtidigt i de båda porstorlekarna oberoende av varandra. Den totalt uppsugna vattenmängden blir lika med summan av uppsugningen i de olika porerna. Ekvation (V:14) kan således användas direkt för respektive porstorlek. I FIG. V:14 redovisas det principiella sambandet mellan uppsugen vattenmängd och tid för olika värden på n . Kurvan för $n=1$ motsvarar uppsugningen i två porer med radien r_2 medan kurvan för $n=\infty$ motsvarar fallet att enbart poren med radien r_2 suger. Brytpunkten i kurvan

motsvarar den tid då den grova poren är helt fylld. Efter denna tid sker all uppsugning i de finare porerna, vilket medför ett långsammare förlopp.

Vid kapillärsugning i B_2 finns vattenmeniskerna antingen i den grova eller i de fina porerna. Vid övergången ändras plötsligt porvattenundertrycket. Uppsugningen innan övergången beräknas med ekvation (V:14) på vanligt sätt. För att erhålla uppsugningen härefter beräknas det totala flödet i de olika por-delarna var för sig med hjälp av ekvation (V:19) varefter dessa flöden sätts lika. Detta ger, med beteckningar enligt FIG.V:15.

$$g_0 = \frac{P_1 - P_2}{M_0' \cdot \ell_1 + M_0'' \cdot (z - \ell_1)} \quad (V:22)$$

där

$$g_0 = \text{vattenflödestäthet} \quad \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

$$P_1 - P_2 = \text{total tryckskillnad} = \frac{2\sigma \cdot \cos\theta}{\sqrt{n} \cdot r_1} \quad \text{N/m}^2$$

$$M_0' = \text{flödesmotstånd i nedre halvan} = \frac{8\eta}{r_1^2 \cdot \rho} \quad \text{Ns/kg} \cdot \text{m}$$

$$M_0'' = \text{flödesmotstånd i övre halvan} = \frac{8\eta}{n \cdot r_1^2 \cdot \rho} \quad \text{Ns/kg} \cdot \text{m}$$

Genom integrering av ekvation (V:22) erhålles den uppsugna vattenmängden. För B_3 erhålles i princip samma uttryck. Den uppsugna vattenmängden som funktion av tiden för olika n -värden redovisas i FIG.V:16-17. Brytpunkten motsvarar den uppsugna vattenmängden då vattenfronten når övergångszonen mellan de två porstorlekarna.

Beräkning av vattenflödet genom porsystemen görs på i princip samma sätt som vid kapillärsugningen med utnyttjande av ekv. (V:19). Vattenflödet som funktion av n för en given tryckskillnad redovisas i FIG. V:18.

En por med varierande radie

I hittills diskuterade modeller har den totala tvärsnittsytan varit konstant hos porsystemet. Den i FIG.V:12 redovisade modellen, C_1 , har en varierande tvärsnittsytan. I denna por kommer, till skillnad från tidigare modeller, vattnets hastighet inte att vara konstant i hela poren vid en viss tid.

Vid beräkning av kapillär uppsugning i en sådan por görs beräkningen stegvis på samma sätt som för B_2 och B_1 med beaktande av att tvärsnittsytan samtidigt varierar. Flödet i C_1 påverkas, förutom av n , även av förhållandet mellan λ_3 och λ_4 . I FIG. V:19 redovisas den kapillära uppsugningen som funktion av tiden med olika värden på n för specialfallet $\lambda_3 = \lambda_4$ och då sugningen börjar i den grova poren. Som ett mått på den absoluta porstorleken används här den radie (r_5), som en por med konstant radie skulle ha för att få samma totala porvolym som C_1 .

Flödet genom poren på grund av en yttre tryckgradient redovisas i FIG.V:20 som funktion av n .

Kommentarer

Gjorda beräkningar för de sammansatta pormodellerna visar den stora betydelsen av hur vissa givna porer är sammankopplade. Kopplas elementarporerna parallellt sker kapillärsugning och flöde i en viss por oberoende av övriga porer. Mängderna kan alltså beräknas för varje por för sig, varefter en summering göres. Vid seriekoppling blir förhållandena mer komplicerade. Generellt kan sägas att kapillärsugningen avtar mycket kraftigt om porradien plötsligt ökar. Ett porsystem bestående av fina porer närmast den fria vattenytan och grövre porer högre upp ger alltså en mycket långsam uppsugning. Beräkningarna har även visat att flödet i en por med varierande radie blir betydligt mindre än i en por med konstant radie vid konstant total porvolym.

2.4 Enskilda material

I verkliga material kan porsystemen inte beskrivas med de tidigare diskuterade modellerna. Porsystemen har här en mycket komplicerad struktur med varierande form och storlek. De principiella sambanden som diskuterats i föregående avsnitt, bör dock gälla även för verkliga material. Med hjälp av utseendet på ekvationerna i 2.2-2.3 kan man konstruera liknande ekvationer för verkliga material. Den väsentliga skillnaden blir att porradien ersätts med någon annan variabel, som måste mätas genom laboratorieförsök.

Kapillärtransport, allmänt

All kapillärtransport drivs av en tryckskillnad i vattnet. Mot denna transport verkar ett motstånd bli beroende på friktionskrafter. Generellt kan alltså kapillärtransporten beskrivas med (Jfr ekvation(V:19))

$$g = \frac{\Delta P}{M \cdot z} = - \frac{1}{M} \cdot \frac{dP}{dz} \quad (V:23)$$

där

ΔP = tryckskillnad i vattnet	N/m^2
M = specifikt motstånd	$Ns/kg \cdot m$
z = längd över vilken ΔP verkar	m
g = vattenflödestäthet	$kg/m^2 \cdot s$
$\frac{dP}{dz}$ = tryckgradient	$N/m^2 \cdot m$

Ekvation (V:23) är ett specialfall av den allmänna ekvationen för potentialströmning

$$g = - K \cdot \text{grad } \psi \quad (V:24)$$

där

g = flöde
K = flödeskoefficient
ψ = potential

I ekvation (V:23) används porvattenundertrycket som potential. Inom fukt-mekniken används även andra mått på potentialen, exempelvis fuktkvot, ånghalt och temperatur. Olika potentialval medför att transportkoefficienten blir olika.

Flödeskoefficienten K är i princip det inverterade värdet av det specifika motståndet. I de tidigare diskuterade modellerna var detta konstant. I verkliga material är däremot motståndet respektive flödeskoefficienten starkt beroende av fukttinnehållet i materialet. Ett lågt fukttinnehåll medför i allmänhet en liten flödeskoefficient. En av anledningarna till detta är att vid låga fukttillstånd är bara en del av porsystemet vattenfyllt. Detta innebär alltså att endast en del av alla porerna utnyttjas för flödet. Vid ökande fukttinnehåll ökas andelen porer som utnyttjas. En annan anledning till att flödeskoefficienten minskar med fukttinnehållet är att vid låga fukttinnehåll är det de finaste porerna som är fyllda. Enligt tidigare avsnitt har dessa porer det största motståndet mot vattenflöde. Den sammanlagda inverkan av dessa faktorer kan medföra att flödeskoefficienterna vid höga fukttinnehåll kan bli avsevärt mycket större än vid låga fukttinnehåll, 1000 gånger större är inte ovanligt.

Dessa allmänna flödesekvationer med tillhörande koefficienter diskuteras ingående av bl a Bomberg (1974) och Sandberg (1973).

Kapillärsugning från fri vattenyta

Vid kapillärsugning från en fri vattenyta förflyttar sig en vattenfront in i materialet. I idealfallet är materialet torrt framför fronten och "vattenmättat" bakom. Även i detta fall kan flödet beskrivas med ekv. (V:23). ΔP ges då av porvattenundertrycket vid vattenfronten medan z är sughöjden. Den totalt uppsugna vattenmängden ges av

$$G = z \cdot p \cdot \rho_w \quad (V:25)$$

där

$$G = \text{uppsugen vattenmängd} \quad \text{kg/m}^2$$

$$z = \text{sughöjd} \quad \text{m}$$

$$p = \text{vattenfylld porandel} \quad -$$

$$\rho_w = \text{vattnets densitet} \quad \text{kg/m}^3$$

Vattenflödet kan alltså tecknas (med hjälp av ekv(V:23) och (V:25))

$$g = \frac{dG}{dt} = \frac{\Delta P \cdot p \cdot \rho_w}{M \cdot G} \quad (V:26)$$

Integrering ger

$$G = \sqrt{\frac{\Delta P \cdot p \cdot \rho_w \cdot 2}{M} \cdot t} \quad (V:27)$$

Vid kapillärsugning från en fri vattenyta beskrivs förloppet traditionellt genom

$$G = B \cdot \sqrt{t} \quad (V:28)$$

där

$$B = \text{kapillaritetstal} \quad \text{kg/m}^2 \cdot \sqrt{\text{s}}$$

Det traditionella kapillaritetstalet kan alltså skrivas

$$B = \sqrt{\frac{\Delta P \cdot p \cdot \rho_w \cdot 2}{M}} \quad (V:29)$$

Kapillaritetstalet, som alltid antas konstant, är enligt ekv.(V:29) en materialkonstant som sammanväver fuktegenskaperna. Sambandet mellan uppsugen vattenmängd och tid illustreras grafiskt av kurvan med $M_1/M_2 = 1$ i FIG. V:22.

Traditionellt brukar tiden anges med en "kvadratrotskala", vilket medför en rät linje.

I verkligheten sker inte kapillärsugningen som i idealfallet med ett konstant fukttinnehåll bakom fronten. Detta medför att både p och M ändras i ekv(V:29). Kapillaritetstalet är alltså ingen konstant och variationerna kan i vissa fall bli avsevärda. Detta diskuteras ytterligare i avsnitt 3.3.

Kapillärsugning vid konstant vattentillförsel

Om vattentillgången i samband med kapillärsugningen är begränsad, exempelvis vid slagregn, gäller inte ovan angivna samband direkt. Med det mycket för- enkla antagandet att en vattenfront förflyttar sig inåt även i detta fall, kan den absorberade mängden bestämmas som funktion av tiden. Fukttinnehållet bakom fronten antas vara detsamma som vid kapillärsugning från en fri vatten-

yta. I början kommer materialets sugkapacitet att vara större än vattentillförseln, varför allt vatten absorberas. När sugkapaciteten är densamma som vattentillförseln bildas en vattenfilm och herefter kan uppsugningen betraktas som kapillärsugning från en fri vattenyta.

Innan vattenfilm bildas på ytan ges den absorberade vattenmängden av

$$G = a \cdot t \quad (V:30)$$

där

$$a = \text{vattentillförselintensitet} \quad \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

$$t = \text{tid} \quad \text{s}$$

$$G = \text{absorberad vattenmängd} \quad \text{kg/m}^2$$

Vid kapillärsugning från en fri vattenyta gäller

$$G = B \cdot \sqrt{t} \quad (V:28)$$

Uppsugningshastigheten i detta fall ges av

$$g = \frac{B}{2 \cdot \sqrt{t}} \quad (V:31)$$

Genom insättning av ekv. (V:28) i (V:31) erhålles

$$g = \frac{B^2}{2G} \quad (V:32)$$

Vattenfilm bildas när $g=a$, vilket genom insättning av ekv.(V:30) i (V:32) ger

$$t_{\text{film}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{B}{a} \right)^2 \quad (V:33)$$

Antagandet om en vattenfront med konstant fukttinhåll är mycket förenklat. Vid begränsad vattentillförsel kommer de finare porerna att suga åt sig vatten från de grövre, vilket medför att vattenfronten får ett lägre fukttinhåll och när längre in i materialet än vad som antages. Först när sugkapaciteten i de fina porerna nått en låg nivå kan de grova porerna fyllas. Detta sker emellertid långsamt, på grund av liten sugkraft i de grova porerna och stort motstånd i de fina porerna som måste passeras, varför en vattenfilm kan bildas innan de grövre porerna är fyllda. Starkt schematiskt kan man

tänka sig det totala förloppet bestående av dels en uppsugning i ett genomgående fint porsystem och dels uppfyllning av vissa grova porer. Vid sugning från en fri vattenyta börjar uppfyllningen av de grova porerna omedelbart och denna uppfyllning inkluderas i kapillaritetstalet. Vid begränsad vattentillförsel börjar däremot inte denna uppfyllning förrän efter en viss tid och eftersom denna uppfyllning sker långsamt bildas en vattenfilm innan porerna är fyllda. (Jfr även diskussionen beträffande varierande kapillaritetstal i avsnitt 3.3 och 5.2).

Med hänsyn till ovanstående bör den verkliga tiden till en vattenfilm bildas vara mindre än den som beräknas enligt ekv. (V:33). Skillnaden bör även öka med minskande vattentillförsel.

En experimentell studie av tiden för vattenfilmbildning på tegel vid olika slagregnsintensitet redovisas i Kjellander & Linder (1970). Genom att i ekvation (V:33) sätta in ett reducerat kapillaritetstal (jfr ovan) kan god överensstämmelse erhållas med deras försöksresultat. Den erforderliga reduktionen blir c:a 10-40 %, beroende på tegelsort. Inverkan av olika slagregnsintensitet är liten, storleksordning 10%.

Kritiskt fukttinnehåll

För att transport i vattenfas skall kunna ske måste ett sammanhängande vatten nätverk finnas i materialet. När nätverket bryts upphör kapillärtransporten. Detta innebär att materialet måste ha ett visst fukttinnehåll för att kapillärtransport skall vara möjlig. Detta fukttinnehåll kallas det kritiska fukttinnehållet med avseende på kapillärtransport. Under det kritiska fukttinnehållet sker fuktttransport i huvudsak i ångfas, varvid transporthastigheten minskar kraftigt.

Det kritiska fukttinnehållet varierar kraftigt med materialtyp, beroende på olika porsystem. För tegel respektive gasbetong är den kritiska fuktkvoten 3-4 respektive 30-40 vikt-%.

Förekomsten av denna kritiska fuktkvot innebär exempelvis för tegel att om en tegelsten får suga vatten kapillärt en kort tid följt av "utjämning" så kan vattnet aldrig fördela sig jämnt inom tegelstenen. Kapillärkrafterna medför en omfördelning så länge fuktkvoten är större än 3-4 vikts-%. Härefter upphör kapillärtransporten även om fuktkvoten är noll i en del av stenen. En viss omfördelning fortsätter dock härefter i ångfas.

2.5 Sammansatta material

Vid kapillärsugning i materialkombinationer kan tidigare angivna uttryck inte användas direkt. I den allmänna ekvationen (V:23) kommer exempelvis det specifika motståndet att vara olika i de olika materialen. Det generella uttrycket för kapillärtransport i materialkombinationer kan skrivas

$$g = \frac{\Delta P}{\sum_{i=1}^n d_i \cdot M_i} \quad (V:34)$$

där

g = vattenflödestäthet	$\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$
d_i = tjocklek hos material i	m
M_i = specifikt motstånd hos material i	$\text{Ns/kg} \cdot \text{m}$
ΔP = tryckskillnad i vattnet	N/m^2

Ekvation (V:34) kan även utnyttjas då det specifika motståndet varierar inom samma material, exempelvis beroende på olika fukttinnehåll.

Vid kapillärsugning från en fri vattenyta i en materialkombination enligt FIG. V:21 beskrivs förhållandena under den första tiden (innan vattenfronten når höjden d_1) av ekvationerna (V:26-28). Efter denna tid ges flödet av

$$g = \frac{\Delta P_2}{M_1 \cdot d_1 + M_2 \cdot (z - d_1)} \quad (V:35)$$

där

ΔP_2 = porvattenundertryck vid vattenfronten när denna befinner sig i material 2.	N/m^2
---	----------------

Den totalt uppsugna vattenmängden kan tecknas

$$G = G_1 + (z - d_1) \cdot p_2 \cdot \rho_w \quad (V:36)$$

där

G_1 = uppsugen vattenmängd i material 1	kg/m^2
---	-----------------

Insättning av ekv(V:36) i (V:35) samt integrering med avseende på tiden ger

$$G = G_1 - \frac{M_1}{M_2} \cdot d_1 \cdot p_2 \cdot \rho_w + \sqrt{\left(\frac{M_1}{M_2} \cdot d_1 \cdot p_2 \cdot \rho_w\right)^2 + \frac{1}{M_2} \cdot 2 \cdot p_2 \cdot \Delta P_2 \cdot \rho_w (t - t_1)} \quad (V:37)$$

där

t_1 = tiden då vattenfronten når material 2 s
i övrigt enligt FIG.V:21 och föregående ekvationer.

Den i material 1 uppsugna vattenmängden ges av

$$G_1 = d_1 \cdot p_1 \cdot \rho_w \quad (V:38)$$

Tiden då vattenfronten når material 2 fås med hjälp av ekv (V:27) och (V:29) till

$$t_1 = \frac{G_1^2 \cdot M_1}{\Delta P_1 \cdot p_1 \cdot \rho_w \cdot 2} = \frac{G_1^2}{B_1^2} \quad (V:39)$$

Insättning ger slututtrycket

$$G = d_1 \cdot p_1 \cdot \rho_w - \frac{M_1}{M_2} \cdot d_1 \cdot p_2 \cdot \rho_w + \sqrt{\left(\frac{M_1}{M_2} \cdot d_1 \cdot p_2 \cdot \rho_w\right)^2 + B_2^2 \left(t - \frac{(d_1 \cdot p_1 \cdot \rho_w)^2}{B_1^2}\right)} \quad (V:40)$$

Med antagandet att de i ekvation (V:40) ingående "materialkonstanterna" verkligen är konstanta kan alltså den uppsugna vattenmängden bestämmas som funktion av tiden. Enligt tidigare resonemang är emellertid "materialkonstanterna" inte konstanta utan varierar med fukttinnehållet och är dessutom beroende av varandra. För att göra kvalitativa bedömningar är dock ekvationen användbar. I FIG. V:22 redovisas exempelvis hur kvoten M_1/M_2 påverkar den uppsugna vattenmängden när $p_1 = p_2 = p_0$ och $B_1 = B_2 = B_0$. (Jfr FIG. V:16-17). Om $p_1 \neq p_2$ fås olika skala på den vertikala axeln före och efter det att vattenfronten nått materialgränsen. Om $B_1 \neq B_2$ ändrastidsskalan vid motsvarande tidpunkt.

2.6 Spricka i tätt ytskikt

För fallet med en spricka i ett i övrigt tätt ytskikt på ett homogent underlag kan enkla uttryck härledas för den kapillära uppsugningen från en fri vattenyta. Även här förutsättes att det bildas en vattenfront som tränger in i underlaget och att fukttinnehållet är konstant bakom denna front. Man kan

särskilja två extremfall, som ger helt olika resultat. Dels kan sprickan finnas enbart i själva ytskiktet och dels kan sprickan gå in även i underlaget.

Spricka enbart i ytskiktet

I detta fall förutsätts att vattenfronten är en mantelyta till en halvcylinder som växer inåt i materialet. Vid härledningen av uttrycken nedan antas en halvcylinder med radien r_0 (FIG. V:23) alltid vara vattenfylld.

Det totala flödet per längdenhet (utsträckning vinkelrätt mot papperets plan i FIG. V:23) genom mantelytan till halvcylindern ges av (jfr ekv. V:23)

$$g'(r) = \frac{dP}{dr} \cdot \frac{1}{M} \cdot \pi \cdot r \quad (V:41)$$

Vid en given tid är detta flöde konstant oberoende av r . Integrering av ekv.(V:41) ger

$$P = P_1 \frac{\ln \frac{r}{r_0}}{\ln \frac{r_f}{r_0}} \quad (V:42)$$

Derivering av ekv.(V:42) med avseende på r samt insättning i ekv.(V:41) ger

$$g'(r_f) = \frac{dG'}{dt} = \frac{P_1 \cdot \pi}{\ln\left(\frac{r_f}{r_0}\right) \cdot M} \quad (V:43)$$

där G' = totalt absorberad vattenmängd per längdenhet kg/m

Insättning av

$$dG'_f = \pi \cdot r_f \cdot p \cdot \rho_w \cdot dr_f \quad (V:44)$$

samt integrering ger

$$\left(\frac{r_f}{r_0}\right)^2 \cdot \ln\left(\frac{r_f}{r_0}\right) - \left(\frac{r_f}{r_0}\right)^2 + 1 = \frac{4P_1}{M \cdot p \cdot \rho_w \cdot r_0^2} \cdot t \quad (V:45)$$

Genom insättning av B enligt ekv. (V:29) erhålles slutligen

$$\left(\frac{r_f}{r_0}\right)^2 \cdot \ln\left(\frac{r_f}{r_0}\right) - \left(\frac{r_f}{r_0}\right)^2 + 1 = \frac{2B^2}{p^2 \cdot \rho_w^2 \cdot r_0^2} \cdot t \quad (V:46)$$

Den uppsugna vattenmängden per längdenhet erhålles genom

$$G_f' = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot (r_f^2 - r_0^2) \cdot p \cdot \rho_w \quad (V:47)$$

I FIG. V:24 illustreras r_f/r_0 som funktion av tiden och i FIG. V:25 illustreras hur sprickbredden påverkar den uppsugna vattenmängden. Som synes så blir den uppsugna vattenmängden nästan direkt proportionell mot tiden bortsett från den första tiden

Spricka i ytskikt och underlag

Detta fall kan behandlas som en kombination av kapillärsugning i en spalt (spricka) och vanlig kapillärsugning från spalten och in i materialet enligt FIG. V:26.

Ett uttryck för kapillärsugningen i spalten kan härledas på liknande sätt som ekvation (V:12). Detta ger (med beteckningar enligt FIG. V:26)

$$v = \frac{r_0 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{3 \cdot \eta \cdot z} \quad (V:48)$$

Från spalten och in i materialet ges uppsugningsintensiteten av (jfr ekv.(V:31))

$$g = \frac{B}{2 \cdot \sqrt{t}} \cdot 2 \quad (V:49)$$

En förutsättning för att ekv.(V:49) skall gälla är att uppsugningen i spalten är "tillräckligt snabb", så att spalten alltid är fylld.

I verkligheten blir vattenfronten inte rätlinjig, beroende på att den del som ligger närmast ytan får längre sugtid samt att vattnet i spalten här har ett mindre porvattenundertryck. En noggrann beräkning blir relativt omfattande och görs inte här.

En grov bedömning kan göras genom att beräkna spaltens transportkapacitet vid olika insugningsdjup samt jämföra denna mängd med den mängd som kan sugas in i materialet enligt ekv.(V:49). Är erforderlig tid för att nå likhet mellan dessa mängder "kort" kan man beräkna hela förloppet med hjälp av ekv.(V:49). Felet härvid blir försumbart. Är den erforderliga tiden däremot "lång" kan en

noggrannare beräkning bli nödvändig. Om förloppet kan approximeras med ekv.(V:49) så ges den totalt uppsugna mängden per meter spricka av

$$G' = 2 \cdot B \cdot z \cdot \sqrt{t} \quad (V:50)$$

För verkliga material måste den teoretiskt beräknade transportkapaciteten i sprickan reduceras, beroende på avvikelser från det idealiserade fallet. En verklig spricka är exempelvis inte plan, vilket medför en längre transportväg. I vissa material blir även "den effektiva sugarean" mindre, beroende på luftblåsor som inte deltar vid vattentransporten. För tegel torde det senare ha liten betydelse medan för gasbetong en reduktion med 90-95% kan bli nödvändig. Vidare kan det finnas materialrester i sprickan, vilket ökar motståndet mot vattentransporten. En rimlig uppskattning torde vara en total reduktion till 2-50% av den teoretiskt beräknade transportkapaciteten. Felmarginalerna är således mycket stora. En exakt beräkning är med dagens kunskaper omöjlig. För praktiska bedömningar kan man dock med hjälp av ovanstående anta att ekv.(V:50) gäller om r_0 är större än 0,02-0,1 mm och sprickdjupet är mindre än 50 mm. Det lägre värdet på r_0 gäller för tegel och det större för gasbetong.

Jämförelse mellan spricka enbart i ytskikt och genomgående spricka

För att belysa den principiella skillnaden mellan de två spricktyperna redovisas i FIG.V:27 den uppsugna vattenmängden som funktion av tiden för några olika sprickbredder. Beräkningarna är gjorda för ett material med kapillaritetstalet $0,07 \text{ kg/m}^2 \cdot \sqrt{\text{s}}$ och tjockleken 30 mm. I fallet med genomgående spricka antas att sprickan vattenfylls omedelbart. Den vid kapillärsugningen vattenfyllda porvolymen är satt till $0.25 \text{ m}^3/\text{m}^3$, ($p_1 = 0.25$).

Som synes av FIG.V:27 så blir den uppsugna vattenmängden mycket större med den genomgående sprickan. En genomgående spricka, exempelvis med $r_0 = 0,1 \text{ mm}$, har efter 1 timma sugit upp tre gånger så mycket vatten som en ytspricka med $r_0 = 2 \text{ mm}$!

Vid en spricka som bara går delvis in i underlaget kan en bedömning göras genom att kombinera de ovan behandlade ytterlighetsfallen.

3 MÄTNING AV KAPILLÄRSUGNINGSEGENSKAPERNA

Metoderna för att bestämma kapillärsugningsegenskaperna varierar mycket kraftigt beroende på syftet med mätningen. Olika metoder används i olika länder etc. Vissa av metoderna är mycket tveksamma med hänsyn till syftet med mätningen. Nedan beskrivs och diskuteras några vedertagna metoder. I avsnitt 3.4 diskuteras även alternativa metoder (delvis icke testade) i samband med puts på ett homogent underlag.

3.1 Allmänna flödeskoefficienter

Flödeskoefficienter, som relateras till en potential enligt ekvation (V:24), bestäms i princip genom att mäta flödet mellan två punkter med kända potentialer. De praktiska metoderna varierar och är i vissa fall mycket komplicerade. Mätningarna kan göras både vid stationära och dynamiska förlopp.

Vid stationära förlopp tillföres ena ytan av en provkropp vatten med en viss intensitet (FIG.V:28). Genom motstående yta får provkroppen samtidigt torka medan sidoytorna är täta. När jämvikt råder i hela provkroppen är flödet konstant i varje punkt och flödeskoefficienten kan bestämmas enligt

$$K_i = \frac{g \cdot \Delta x}{\Delta \Psi_i} \quad (V:51)$$

där

K_i = flödeskoefficient vid medelpotentialen Ψ_i

g = fuktflödestäthet

$\Delta \Psi_i$ = potentialskillnad mellan aktuella punkter

Δx = avstånd mellan aktuella punkter

Genom att göra beräkningar på olika ställen i provkroppen fås ett samband mellan flödeskoefficienten och potentialen.

Vid dynamiska förlopp görs beräkningen på i princip samma sätt. Här varierar dock även flödet mellan olika punkter. Metoderna beskrivs och diskuteras utförligt av van der Kooi (1971). Ett exempel på resultat från van der Koois mätningar i gasbetong redovisas i FIG.V:29. I detta fall har fukthalten (uttryckt i volymandelar) använts som potential. Som synes så är koefficienten starkt

beroende av fukttinnehållet. Vid höga fukttinnehåll är koefficienten $c:a$ 1000 gånger större än vid låga fukttinnehåll!

3.2 ER - nämndens metoder

Hus-AMA anger vissa krav på vatteninträgningshastighet och fuktgenomsläpplighet i samband med putser och ytskikt. Vatteninträgningshastigheten skall härvid bestämmas enligt ER-nämndens "trattmetod", CP-BM-2/67-2. Metoden innebär att putsen appliceras på en 10 mm tjock gasbetongskiva, varefter vattenupptagningen bestäms som funktion av tiden då putsen är i kontakt med vatten, som har ett övertryck på $c:a 10^3 \text{ N/m}^2$. Vattenupptagningshastigheten anges i tidsintervallen 0-30 min, 30-90 min samt över 90 min.

Metoden är av flera skäl felaktig. Den främsta invändningen mot metoden är att underlaget har en tjocklek på endast 10 mm. Vid en tunn och genomsläpplig ytbehandling blir hela provkroppen mättad efter några minuter. För tjockputser blir motsvarande tid någon timme. Att med dessa provningar ange vattenupptagning under längre tider är helt felaktigt.

En annan invändning mot metoden är att underlaget påverkar vattenupptagningen mycket kraftigt. Vid provningen används enbart gasbetong som underlag. Andra underlag, exempelvis tegel, ger helt andra resultat.

Resultaten från trattmetoden är alltså inte användbara för några beräkningar. Även jämförelser mellan olika putser är tveksamma, eftersom metoden inte motsvarar några realistiska förhållanden.

Metoderna att bestämma fuktgenomsläppligheten hos en puts finns angiven i CP-BM-3/67-2 och diskuteras i delrapport IV.

3.3 Kapillaritetstal

Kapillaritetstalet för enskilda material bestäms traditionellt genom enkla kapillärugsningsförsök enligt FIG. V:30. En provkropp förseglas diffusionstätt på alla ytor utom sugytan och placeras med sugytan i vatten. Den uppsugna vattenmängden upprättas därefter som funktion av kvadratroten ur tiden, varvid kurvan anpassas till två räta linjer enligt FIG. V:31. Den första delen av kurvan motsvarar uppsugningen innan vattenfronten nått överytan. När vattenfronten når

överytan, vid tiden t_{bryt} , avtar uppsugningen kraftigt. Att vattenupptagningen överhuvudtaget fortsätter beror på att de finare porerna, vilka fylls långsamt, fortsätter att suga. Provkroppens medelfuktkvot när fronten når överytan kallas ofta för kapillär mättnadsfuktkvot, u_{kap} . Det traditionella kapillaritetstalet fås som lutningen på första kurvdelen i FIG. V:31. (Jfr ekv.(V:28))

I TAB.V:1 redovisas några exempel på kapillaritetstal och kapillär mättnadsfuktkvot bestämda av Schwarz (1972). Som synes så är variationerna avsevärda inom samma materialtyp.

Enligt avsnitt 2.4 är kapillaritetstalet egentligen ingen konstant. Vid bestämningen av kapillaritetstalet enligt ovan antas dock att så är fallet och kurvan anpassas till en rät linje. Detta innebär att man får ett medelvärde för hela sugtiden. För de flesta tillämpningar är detta acceptabelt. I vissa fall kan detta förfaringssätt dock medföra avsevärda fel, exempelvis vid kortvarig vattenbelastning.

Anledningen till att kapillaritetstalet inte kan betraktas som en konstant är att fukttätheten i provkroppen inte är konstant vid provningen. Vid kapilläruppsugningsförsöket kommer de undre delarna efterhand att få ett högre fuktinnehåll.

Anledningen till detta är dels insugning i de finare porerna och dels uppsugning i grövre porer. De grova porerna kan överhuvudtaget inte fyllas på högre höjder beroende på att den maximala sughöjden har nåtts här. De finare porerna kommer på sikt att fyllas även högre upp i provkroppen, men med en viss tidsförskjutning. Uppfyllningen av de grova porerna närmast vattenytan medför att uppsugningen i början sker snabbare. Efterhand som de grova porerna fylls minskar uppsugningshastigheten. Denna mekanism kan alltså ge ett samband mellan uppsuggen vattenmängd och tid enligt kurva a i FIG.V:32.

Den större uppsugningen i de lägre delarna medför även att det specifika motståndet minskar, vilket i sin tur medför en ökande uppsugningshastighet exempelvis enligt kurvan b i FIG.V:32.

Dessa båda mekanismer påverkar varandra och slutresultatet är omöjligt att teoretiskt förutsäga. Olika material ger helt olika resultat.

En god bild av hur kapillaritetstalet varierar med sugtiden (sughöjden) fås

genom att göra beräkningen med hjälp av derivatan vid olika tidpunkter. Vid praktiska beräkningar väljs sedan kapillaritetstalet med hänsyn till randvillkoren i aktuellt fall.

Vid kortvarig intensiv vattenbelastning är kapillaritetstalet bestämt vid korta tider lämpligt. Vid långvarig intensiv vattenbelastning kan ett medelvärde, som bestämts på traditionellt sätt, vara användbart. Vid begränsad vattentillförsel hinner de grövre porerna inte att fyllas omedelbart. Detta innebär att ett kapillaritetstal bestämt efter lång tid bör väljas. Skillnaden mellan kapillaritetstal bestämda vid olika tider kan vara mycket stor.

Även för materialkombinationer, exempelvis en puts på ett underlag, anges i vissa fall ett kapillaritetstal. Så länge vattenfronten finns i putsen så är fallet identiskt med det ovan behandlade. När vattenfronten passerat materialgränsen används uttrycket "reducerat kapillaritetstal" för underlaget (Künzel & Schwarz, 1968).

För en viss given materialkombination kan det reducerade kapillaritetstalet användas för beräkningar av absorberade vattenmängder. Skillnaden mellan det vanliga och det reducerade kapillaritetstalet är även ett mått på hur putsen påverkar vattenuptagningen. Det måste dock betonas att detta gäller enbart för den provade kombinationen. Det är emellertid helt felaktigt att utnyttja denna reduktion av kapillaritetstalet för ett visst underlag som en generell egenskap hos putsen. Reduktionens storlek är nämligen i mycket hög grad beroende av underlagets egenskaper. En puts som på ett visst underlag medför en obetydlig reduktion av vattenuptagningen kan på ett annat underlag medföra en mycket stor reduktion!

Som en generell egenskap hos putsen kan endast någon form av motstånd användas. (Detta diskuteras i avsnitt 3.4). Som drivkraft för vattentransporten utnyttjas då det vanliga kapillaritetstalet för underlaget. I detta fall fylls inte underlagets grova porer omedelbart, vilket medför att ett lågt värde på kapillaritetstalet bör väljas i början av sugningen. Ju större reduktion putsen medför, desto lägre värde bör väljas. Samma sak gäller vid begränsad vattentillförsel i samband med enskilda material.

3.4 Kapillärsugningsmotstånd

Med kapillärsugningsmotstånd avses allmänt ett materials motstånd mot fukttransport i vattenfas. Detta motstånd kan definieras på olika sätt. Här diskuteras enbart det specifika motståndet definierat enligt ekv.(V:23) med tillhörande modifieringar. Detta specifika motstånd är användbart både vid kapillärtransport i enskilda och sammansatta material. Det specifika motståndet är vidare inte sammankopplat med någon annan materialegenskap. Ett annat vanligt mått på ett materials motstånd mot kapillärsugning är det specifika motståndstalet. Detta är emellertid kopplat till bl a kapillaritetstalet för materialet i fråga och är därför inte användbart vid kapillärsugning i materialkombinationer.

Permeabilitetsmätning

Traditionella mätningar av vattenpermeabiliteten görs genom att bestämma hur mycket vatten som strömmar genom en provkropp vid en viss given tryckskillnad. Vatten finns härvid på båda sidorna av provet. Detta innebär att "hela" porsystemet är vattenfyllt, vilket i sin tur medför att motståndet blir litet. I samband med kapillärsugning är emellertid inte hela porsystemet fyllt. Motståndet i detta fall blir alltså betydligt större.

Att göra en direkt mätning av det specifika motståndet vid lägre porfyllnadsgrader är förenat med stora praktiska (oöverkomliga?) svårigheter. En viss vägledning kan dock fås av de specifika motstånd som bestäms med ovan nämnda metod. Man måste dock ha klart för sig att i samband med kapillärsugning så är motståndet väsentligt större, flera tiopotenser. Någon generell faktor går inte att ange. Olika material torde ge helt olika skillnader.

I TAB V:2 redovisas några exempel på specifika motstånd vid "fullständig" vattenmättnad enligt Ruettgens et al (1935).

Kapillärsugning med standardmaterial

Genom att låta ett väldefinierat standardmaterial suga vatten genom ett provmaterial enligt FIG.V:33 kan det specifika motståndet bestämmas med hjälp av ekv.(V:40). Detta förutsätter att det specifika motståndet, kapillaritetstalet samt vattenfylld porvolym hos standardmaterialet är kända. För ett material med ensartade porer, exempelvis sintrade filter, torde detta vara möjligt.

Genom att samtidigt utsätta vattnet för ett undertryck kan olika porfyllnads-

grader erhållas i provmaterialet.

En praktisk svårighet med metoden är kontakten mellan de två materialen. Absolut planslipade ytor är en nödvändighet vid fasta material. Vissa material, exempelvis putsar, kan alternativt appliceras direkt på standardmaterialet. Ett sådant förfarande kan dock medföra andra problem i övergångszonen mellan materialen. Insugning av bindemedel i standardmaterialet och mikrosprickor är exempel på tänkbara problem.

Några egna mätningar har inte gjorts med metoden. (Jfr dock nedan)

Kapillärsugning hos puts-underlag (relativ mätning)

Principen är densamma som i fallet med standardmaterialet. Skillnaden ligger främst däri att underlagets egenskaper inte är helt väldefinierade. Detta medför att några absoluta siffervärden inte kan erhållas på det specifika motståndet. Relativa motståndstal kan dock beräknas, vilka är användbara vid kvalitativa bedömningar. Vid utvärderingen av ett sugförsök måste kapillaritetsstal och vattenfylld porvolym hos underlaget bedömas med utgångspunkt från andra försök. Härvid måste dock stor försiktighet iakttas bl a beroende på att uppskattade egenskaper utnyttjas i både täljare och nämnare i ekv.(V:40) samt att i vissa fall mycket små differenser används.

Vid utvärderingen bör någon form av "felmarginallanalys" göras genom att testa hur små variationer i underlagets egenskaper påverkar resultatet. Vidare bör beräkningen göras vid ett flertal olika tidpunkter (uppsugna vattenmängder). Uppvisar motstånden härvid mycket stor spridning så beror detta troligen på att underlagets egenskaper bedömts felaktigt.

Det relativa specifika motståndet definieras här som putsens specifika motstånd dividerat med underlagets. För putsen som helhet kan man även definiera ett totalt motstånd, kapillärsugningsmotståndet, genom att multiplicera det specifika motståndet med putsens tjocklek. För tunna ytskikt är det främst detta kapillärsugningsmotstånd som är intressant.

En viss uppfattning om absolutbeloppen hos det specifika motståndet (eller kapillärsugningsmotståndet) kan fås genom att uppskatta underlagets specifika motstånd. Detta kan exempelvis göras med hjälp av ekv.(V:29). Detta kräver i sin tur en uppskattning av porvattenundertrycket vid vattenfronten, vilket kan göras med en kapillär jämviktsfuktkurva enligt delrapport III. Ovanstående metod, som grundar sig på ett flertal olika försök, har tillämpats vid egna mätningar och beskrivs ytterligare i avsnitt 4.2.

4 EGENA MÄTNINGAR

Här redovisas enbart mätningar av kapillärsugningsegenskaperna vid sugning från en fri vattenyta. Mätningar har gjorts med enskilda material, med materialkombinationer och med spricka i tätt ytskikt. Metodiken har varit densamma vid alla försök. Provkropparnas sidytor (parallellt med sugriktningen) har förseglats diffusionstätt med en epoxifuktspärr. När provkroppen var "rumstorr" placerades den med sugytan nedsänkt 1-2 mm i vatten. För att hindra avdunstning genom överytan förseglades i allmänhet denna ytan med plastfolie (FIG.V:30 och V:33). Vid vissa tids mellanrum togs provkroppen upp ur badet, avtorkades med en fuktig hushållssvamp, vägdes samt placerades i vattenbadet igen. Varje sådan vägningsprocedur tog c:a 20 sek. Detta medför ett visst fel i den absoluta sugtiden. Görs många vägningar vid korta tider kan ett stort fel uppstå. För att undvika någon större inverkan av detta slags fel gjordes få vägningar vid korta tider. (Med korta tider avses c:a 5 min.). Vägningarna gjordes vid tiderna 0,2,5,10,30,60,120 och 480 min. För prover med putser gjordes vägningar även efter längre tider. Vid utvärderingen har ovan angivna fel inte beaktats.

Vägningsproceduren kan även medföra att hela kapillärsugningsprocessen störs, bl a beroende på inestängda luftbubblor. Detta har inte studerats närmare.

4.1 Kapillaritetstal

Enligt avsnitt 3.3 är kapillaritetstalet inte alltid konstant utan varierar beroende på hur försöksresultaten utvärderas. För att i detalj studera detta har kapillaritetstalet (definierat på olika sätt) bestämts för de två underlag som använts i de övriga försöken samt för Ytong med nominell densitet 450 kg/m^3 . För putser, som normalt används i relativt tunna skikt, har inte samma detaljstudier gjorts.

Beräkningen av kapillaritetstalet har gjorts dels med utgångspunkt från den totalt uppsugna vattenmängden vid en viss tid och dels med hjälp av viktsökningen mellan två tidpunkter. I stället för tid kan uppsugen vattenmängd eller stighöjd användas som referens. Kapillaritetstalet betecknas med $B(t_x - t_y)$ där t_x och t_y anger mellan vilka tider beräkningen gjorts. Beräkningen

görs med hjälp av formeln

$$B(t_x - t_y) = \frac{G(t_x - t_y)}{\sqrt{t_y} - \sqrt{t_x}} \quad (V:52)$$

där

$G(t_x - t_y)$ = uppsugen vattenmängd mellan tiderna t_x och t_y kg/m^2

Resultaten för en tegel- och två lättbetongkvaliteter redovisas i Fig. V:34-35. Om $t_x = 0$ relateras $B(0 - t_y)$ till $G(t_y)$. I övriga fall relateras $B(t_x - t_y)$ till det aritmetiska medelvärdet av $G(t_x)$ och $G(t_y)$. Bestämningen av kapillaritetstalet har gjorts med $G(t_x - t_y)$ ungefär lika med 1 kg/m^2 . I FIG. V:35 angivna värden avser medelvärde av 2-3 provkroppar. Spridningen från medelvärdet ligger inom storleksordningen $\pm 0.005 \text{ kg/m}^2 \cdot \sqrt{s}$ oberoende av absolutbeloppet.

För putser har kapillaritetstalet bestämts på provkroppar tillverkade enligt delrapport I. Putserna med underlag av tegel var vid provningen c:a 5 månader gamla. Putserna med gasbetong som underlag var c:a 1 år gamla och hade innan kapillärsugningen använts i ett annat försök där de under c:a 1/2 år utsatts för slagregn 1-3 gånger per vecka.

Kapillaritetstalet för putserna har bestämts i tidsintervallen 0-2 respektive 2-10 min för alla putser utom kalkputsen, där det senare tidsintervallet valdes till 2-5 min. Anledningen till detta är att efter 10 min hade vattenfronten i detta fall nått in i underlaget. Angivna värden är medelvärde av två provkroppar. Den maximala avvikelser från medelvärdet för enskilda provkroppar är mindre än $0,005 \text{ kg/m}^2 \cdot \sqrt{s}$. De beräknade kapillaritetstalen redovisas i TAB. V:3. Beräkningarna är gjorda med utgångspunkt från sugförsöken enligt 4.2.

4.2 Kapillärsugningsmotstånd

Provningarna har gjorts med putser och underlag enligt delrapport I. Provkropparna med underlag av tegel var vid provningen c:a 5 månader gamla. Proverna med gasbetong som underlag var c:a 1 år vid provningarna och hade innan kapillärsugningen använts i ett annat försök där de utsatts för slagregn 1-3 gånger per vecka. Putserna applicerade på gasbetong och tegel är sålunda inte direkt jämförbara med varandra.

Proverna med tegelunderlaget var inte skyddade mot uttorkning uppåt under kapillärsugningen. Vid korta sugtider (8-10 timmar) har detta ingen praktisk

betydelse. Vid långa sugtider och täta puster kan däremot detta medföra ett stort fel.

Alla provningar gjordes på två provkroppar. Resultaten av sugförsöken redovisas i FIG. V:36-37.

En direkt jämförelse av kurvorna ger en viss uppfattning om putsernas inbördes motstånd. (Jfr FIG. V:22). Att beräkna ett exakt värde på motstånden är med gjorda mätningar inte möjligt. En viss uppfattning om storleksordningen hos de olika putsernas "relativa" motstånd kan dock erhållas genom att utnyttja ekv. (V:40). Dessa relativa motstånd relateras då till underlagets motstånd. För tjockputser kan man direkt jämföra de specifika motstånden i puts och underlag, M_p/M_u . För tunnputser är det lämpligare att utgå från putsens totala motstånd $M_p \cdot d$. Detta är naturligtvis möjligt även för tjockputser.

Dessa relativa motstånd kommer att bli olika, beroende på vilket underlag man jämför med. Relationstalen blir inte entydiga även om man jämför med samma underlag, beroende på att underlagets egenskaper inte är konstanta under hela sugförsöket. (Detta diskuteras ytterligare i avsnitt 5.) I TAB. V:4-5 redovisas de enligt ovan beräknade relativa motstånden. För att få en uppfattning om hur förhållandena påverkas av de varierande materialegenskaperna under sugförsöket har beräkningarna gjorts vid olika uppsugen vattenmängd. Vid beräkningarna har underlagets egenskaper valts enligt TAB.V:6.

Genom att uppskatta ΔP i ekv.(V:35) kan ett direkt siffervärde erhållas på motstånden. ΔP kan exempelvis tas från de kapillära jämviktsfuktkurvorna i delrapport III. Även denna uppskattning är osäker varför slutresultatet blir relativt osäkert. I vissa fall kan även ΔP variera i underlaget. En viss uppfattning om storleksordningen är dock möjlig att få genom att utgå från konstanta förhållanden. I TAB. V:7 redovisas de olika putsernas motstånd då ΔP valts till $4 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$ för tegel och till 10^5 N/m^2 för gasbetong. Dessa värden motsvarar porvattenundertrycket ungefär vid kapillärmättnad. För gasbetong är porvattenundertrycket känsligt för små variationer i fukttinnehåll. Vid en mycket öppen puts, eller utan puts, blir fukttinnehållet högre vilket medför ett lägre porvattenundertryck. Vid sugning genom en tät puts blir fukttinnehållet lägre vilket medför ett större porvattenundertryck. I beräkningarna har gasbetongens porvattenundertryck valts mellan dessa ytterlighetsfall. Porvattenundertrycket i tegel är relativt okänsligt för små skillnader i fukttinnehåll.

4.3 Inverkan av sprickor i tätt ytskikt

Sugförsök har gjorts både med genomgående spricka och med spricka enbart i ytskiktet. Som underlag har enbart gasbetong använts (Siporex $\rho = 530 \text{ kg/m}^3$). Provkropparna med genomgående spricka tillverkades genom att en gasbetongbit c:a 200x70x30 mm fuktisolerades med epoxifuktspärr, varefter provkroppen "knäcktes" på mitten i en provningsmaskin enligt FIG.V:38. Under "knäckningen" sammanhölls provkroppen med kraftiga gummiband. Efter knäckningen fixerades sprickan genom att plåtar limmades på sidoytorna. För att provkroppen skulle spricka vid så liten deformation som möjligt, så lagrades proverna i -20°C innan "knäckningen".

Den på detta sätt erhållna sprickan varierade mellan 0 och 0,25 mm i bredd. I vissa fall var inte sprickan helt genomgående, utan slutade 10-20 mm in i provet.

De icke genomgående sprickorna erhöles genom att på gasbetongbitarna limma Al-folie med en olika bred springa. Syftet var att framställa springor med bredden 0-4 mm. Vid en kontroll efter sugförsöket visade det sig att folien inte hade fastnat invid springan. De verkliga bredderna var därför c:a 3-5 mm.

I FIG. V:39 redovisas den uppsugna vattenmängden som funktion av tiden för två provkroppar med helt respektive delvis genomgående spricka. Sprickbredd och sprickdjup anges i figuren. Även vattenfrontens läge efter 1 timme redovisas schematiskt.

I FIG. V:40 redovisas den uppsugna vattenmängden som funktion av tiden för två provkroppar med ytsprickor.

5 DISKUSSION AV RESULTATEN

5.1 Allmänt

Syftet med de egna mätningarna var inte att bestämma några exakta materialdata utan främst att studera de grundläggande fuktmekaniska sambanden vid höga fukttillstånd. Huvudvikten har lagts vid fuktmekanikens beroende av putsens och underlagets egenskaper samt ett relevant sätt att mäta och ange dessa egenskaper. Härvid har även en viss uppfattning om storleksordningen av olika materialdata erhållits. Exakta materialdata påverkas i mycket hög grad av bl a brukssammansättning, härdningsbetingelser och tillsatsmedel. Ett vattenavvisande tillsatsmedel förändrar exempelvis förhållandena totalt.

De olika delundersökningarna diskuteras och kommenteras var för sig i följande avsnitt.

Resultaten, både de teoretiska och laborativa, visar klart att porstrukturen har en avgörande betydelse för händelseförloppet. Ett grovporöst material, t ex tegel, har litet motstånd mot vattenflödet och suger vatten snabbt trots att sugkraften är liten. För den studerade gasbetongkvaliteten gäller motsatsen. Appliceras en puts på dessa material ändras förhållandena mycket drastiskt. Teglet, med sin lilla sugkraft, kan nu uppvisa en väsentligt mindre vattenupptagningshastighet än gasbetongen. Anledningen till detta är sambandet mellan sugegenskaperna i underlaget och motstånden i puts och underlag. Detta har stor principiell betydelse och illustreras i FIG. V:41. Samma puts på olika underlag medför sålunda helt olika resultat

Förutom vid putsade väggar har ovanstående betydelse exempelvis vid kapillär uppsugning från marken. Bruket mellan stenarna kommer i detta fall att ha en avgörande betydelse för händelseförloppet. Ett stort motstånd hos bruket, exempelvis C-bruk, ger mycket låg uppsugningshastighet. Ett bruk med litet motstånd, exempelvis K-bruk, medför däremot en hög uppsugningshastighet. Den höjd som vattnet kommer att stiga till bestäms av sambandet mellan uppsugning och avdunstning.

I denna delrapport har främst förhållandena vid vattensugning från en fri vattenyta eller vid begränsad vattentillförsel behandlats. Resultaten är dock användbara även för översiktliga bedömningar av andra förlopp. Ett exempel på detta är uttorkning efter ett slagregn. Enligt delrapport III fanns det inga

förutsättningar för en putsad gasbetongvägg att torka ut genom avdunstning från ytan. För en putsad tegelvägg fanns det dock en teoretisk möjlighet. För att närmare studera detta fall kan i princip tidigare angivna ekvationer användas för att beräkna transporthastigheten genom putsen. Den väsentligaste skillnaden är att vattnet "hålls kvar" i underlaget av porvattenundertrycket där. Drivkraften blir alltså i detta fall skillnaden mellan porvattenundertrycket vid ytan och i underlaget. Med denna drivkraft fås transporthastigheten genom putsen, vilken sedan skall jämföras med avdunstningshastigheten från ytan. I praktiken kommer oftast avdunstningshastigheten att vara större än den kapillära transporthastigheten, med följd att avdunstningszonen förflyttar sig in i putsen. Anledningen till detta är att skillnaden mellan porvattenundertrycket i puts och tegel, när det finns en sammanhängande vattenfas, är liten. Drivkraften blir i detta fall av storleksordningen $1/1000-1/100000$ av drivkraften vid ren kapillärsugning från en fri vattenyta. Uttorkningsförloppet diskuteras i detalj i delrapport VI.

5.2 Kapillaritetstal

Den stora betydelsen av utvärderingsmetoden vid bestämning av kapillaritetstalet framgår tydligt av FIG.V:35. För gasbetong avtar kapillaritetstalet med tiden medan för tegel en viss ökning sker med ökande sugtid. Vid utvärdering med hjälp av uppsugningshastigheten vid olika sugtid nås ett konstant värde relativt snabbt. Den stora skillnaden mellan utvärderingsmetoderna är mest markanta för de båda gasbetongkvaliteterna. En utvärdering på traditionellt sätt medför att kapillaritetstalet för YTONG blir ungefär dubbelt så stort som för SIPOREX. En utvärdering med hjälp av sughastigheten (derivatan) ger däremot samma slutvärde efter ett par timmars sugning.

Anledningen till det varierande kapillaritetstalet är att fuktkvoten inte är konstant bakom vattenfronten. Detta medför att både det specifika motståndet och den vattenfyllda porvolymen ändras med tiden (sughöjden). Enligt ekv.(V:29) är kapillaritetstalet $B^2 \frac{\Delta p p}{M}$. Små variationer i vattenfylld porvolym har liten direkt betydelse. En ändring med 20% ger exempelvis bara en ändring i B med 10%. Indirekt kan däremot små variationer i p få stor betydelse. En liten minskning av p kan nämligen medföra att vissa grova porer (med litet motstånd) töms, varefter vattnet måste transporteras genom de finare vattenfyllda porerna. Detta kan totalt medföra att motståndet flerfaldigas vid relativt små variationer i vattenfylld porvolym. Även porvattenundertrycket kan ändras. Vid ökande sughöjd nås efterhand den maximala sughöjden

för vissa porstorlekar. De finare porerna kan dock med sin större sugkraft fortsätta att suga. Härvid minskar dock p samtidigt som M ökar. Att kvantifiera dessa olika faktorer är omöjligt. En kvalitativ förklaring av de olika kurvformerna i FIG. V:35 går dock att ge enligt nedan. Med utgångspunkt från denna förklaring kan även lämpliga kapillaritetstal väljas vid olika randvillkor.

Det ökande kapillaritetstalet för tegel kan bero på att den vattenfyllda porvolymen i provkroppens nedre del ökar långsamt med tiden. Detta medför att motståndet här minskar, vilket i sin tur ger ett ökande kapillaritetstal. Ändringen i vattenfylld porvolym är dock så liten att den direkta inverkan härav är försumbar. En annan orsak kan vara att teglet inte har samma egenskaper vid ytan som längre in. Olika bränningsgrad kan exempelvis ge vissa variationer i materialegenskaperna.

Gasbetongens avtagande kapillaritetstal beror främst på att den lägst belägna delen av provkroppen mycket snabbt får ett fukttnehåll som är väsentligt högre än fukttnehållet på högre höjder. Anledningen till detta är att mycket grova porer fylls i de lägst belägna delarna. Dessa porer är så grova att den kapillära sughöjden snabbt nås (0-1 cm). Det specifika motståndet kommer alltså att bli mycket mindre i början. Schematiskt kan man betrakta förloppet som en kapillärsugning i två skilda porssystem, där den maximala stighöjden snabbt nås i det ena systemet. Vid sugning på större höjder kan enbart det finare systemet suga. Sugningen sker dock genom det grövre i de nedre delarna. Samtidigt med denna mekanism minskar även motståndet på samma sätt som vid tegel. Detta sker dock mycket långsammare.

Med beaktande av ovanstående mekanismer kan ett lämpligt kapillaritetstal väljas i olika fall. Vid begränsad vattentillförsel, exempelvis ett litet slagregn eller vid sugning genom en tät puts, skall ett litet kapillaritetstal väljas. Det specifika motståndet kommer i detta fall att bli stort, eftersom vattnet som sugts upp inte kommer att fylla de grova porerna utan sugs vidare till de finare. Vid en mycket intensiv vattenbelastning kommer däremot i stort sett alla porer att fyllas, varför ett större kapillaritetstal bör väljas.

Vid mycket täta putser eller mycket låg slagregnsintensitet kan en ytterligare reduktion av kapillaritetstalet vara tänkbar. I detta fall är det emellertid möjligt att även porvattenundertrycket ökar, varför kapillaritetstalet ökar igen. Troligen ökar dock motståndet mer än porvattenundertrycket. Porvattenundertrycket är ju enligt tidigare omvänt proportionellt mot porradien medan

däremot motståndet är omvänt proportionellt mot porradien i kvadrat. (Jfr även "kapillärsugning vid konstant vattentillförsel" i avsnitt 2.4).

5.3 Sammansatta material

För materialkombinationer kan man enligt tidigare avsnitt inte generellt uttrycka fuktegenskaperna med kapillaritetstal. För en given kombination av puts- underlag är det möjligt att ange ett "reducerat" kapillaritetstal för just denna kombination. Samma puts på ett annat underlag ger dock inte samma reduktion av vattenupptagningen. (FIG. V:36-37 och FIG.V:41).

Som ett generellt mått på putsens reduktion av vattenupptagning kan det specifika eller det totala motståndet hos putsen användas. Några exakta mätningar av dessa motstånd har inte gjorts. Enkla överslagsuppskattningar av motstånden har dock gjorts med hjälp av resultaten från kapillärsugningsförsök med tegel och gasbetong som underlag. Eftersom dessa material inte har helt väldefinierade egenskaper blir de uppskattade värdena inte exakta. Små variationer hos underlagen kan medföra relativt stor inverkan på slutresultatet. Trots detta så är överensstämmelsen mellan motstånden bestämda med tegel respektive gasbetong som underlag god i de flesta fallen. Även överensstämmelsen mellan de teoretiska kurvorna (FIG.V:22) och de uppmätta (FIG.V:36-37) är god. Med hänsyn till osäkerheten i underlagets motstånd bör putsernas specifika motstånd bestämmas vid små värden på den uppsugna vattenmängden. Inverkan av ett visst fel i underlaget ökar nämligen med ökande inträngningsdjup.

De i vissa fall stora avvikelserna kan ha olika orsaker. En möjlig orsak är att egenskaperna hos putsen blir olika med gasbetong och tegel som underlag. Gasbetongen suger exempelvis snabbt åt sig brukets blandningsvatten, varvid hårdningen, främst hos de cementbundna M- och C-bruken, störs. För tegel är detta inte lika markant. Skillnaden i motstånd är också störst för dessa bruk.

En annan möjlig orsak är att de täta putserna medför att de grova porerna i underlaget inte fylls med vatten. Detta medför i sin tur att underlagets egenskaper, främst det specifika motståndet, ändras. Även andra förklaringar till avvikelserna kan finnas, exempelvis olika ålder och lagring av proverna. Kalkputsen på gasbetong kan exempelvis ha karbonatiserat betydligt mer än den på tegel, vilket bör medföra ett större motstånd.

Med hänsyn till syftet med undersökningen saknar ovanstående praktisk betydelse.

Undersökningarna har klart visat att någon form av motstånd hos putsen är en mycket lämplig egenskap att använda som mått på putsens "vattenskyddande" egenskaper. De i TAB.V:7 angivna motstånden skall inte uppfattas som några definitiva materialdata utan visar enbart storleksordningen. För flerskiktsputsen är det något oegentligt att använda det specifika motståndet. För sådana putser bör man istället använda det totala motståndet.

För att kunna ange exakta siffror på motstånden måste ytterligare mätningar göras. Dessa mätningar bör då göras på ett väldefinierat standardunderlag med putser av olika sammansättning och ålder.

För att illustrera betydelsen av sambandet mellan egenskaperna hos puts och underlag redovisas i FIG.V:42 några exempel på beräknad uppsugen vattenmängd i underlaget vid olika egenskaper hos puts och underlag. Två putser och två underlag kombineras på olika sätt. Egenskaperna hos underlagen har valts enligt TAB.V:6, d v s gasbetong och tegel. Med hjälp av dessa egenskaper och porvatten- undertryck enligt delrapport III kan de specifika motstånden, med hjälp av ekv. (V:29), uppskattas till $10 \cdot 10^9$ och 10^9 Ns/kg·m för gasbetong respektive tegel.

Putsernas totala motstånd har valts till 0.01 och 0.2 Ns/kg, vilket motsvarar i undersökningarna använda kalk- respektive kalkcementputser (enligt tegelför-söken). (Jfr även FIG.V:36 prov 2 och 3).

5.4 Sprickor i tätt ytskikt

De fåtal mätningar som gjorts på vattenuppsugning genom en spricka i ett tätt ytskikt visar mycket god överensstämmelse med de teoretiska beräkningarna enligt avsnitt 2.6. I FIG.V:43 redovisas mätta och beräknade uppsugna vatten-mängder som funktion av tiden för en genomgående och en ytspricka enligt av-snitt 4.3. Vid beräkningen har kapillaritetstalet satts till $0.06 \text{ kg/m}^2 \cdot \sqrt{s}$. Detta är något större än det värde som använts i samband med beräkningen av putsernas specifika motstånd. Detta motiveras av att sughöjden är liten, vilket enligt av-snitt 5.2 medför ett högre kapillaritetstal för gasbetong. Den vattenfyllda por-volymer har satts till $0.25 \text{ m}^3/\text{m}^3$, ($p_1 = 0.25$).

Som synes är överensstämmelsen nästan fullständig. I avsnitt 2.6 angivna ekva-tioner torde sålunda vara relativt tillförlitliga för beräkningar av sprickor-nas inverkan på fuktbalansen.

LITTERATUR

Ahlgren, L, Bergström, SG, Fagerlund, G & Nilsson, L-O, 1976, Fukt i betong. (CBI, kursverksamheten) Stockholm.

Bomberg, M, 1974, Moisture flow through porous building materials. (Division of building technology, Lund institute of technology) Report 52. Lund.

ER-nämnden, 1968, Provningsmetoder för ytskiktmaterial för putsat och oputsat murverk, likvärdiga underlag samt betong. ER-nämndens rapport nr 3:68. Stockholm.

Jansson, I, 1965, Testing the rate of water absorption. (RILEM/CIB symposium "Moisture problems in buildings") Helsinki.

Kjellander, B & Linder, L, 1970, Experimentell bestämning av tiden för vattenfilmbildning på två tegelsorter vid olika slagregnsintensitet. (Institutionen för byggnadsteknik, LTH) X2:70. Lund.

Van der Kooij, J, 1971, Moisture transport in cellular concrete roofs. Uitgeverij Waltman. Delft..

Künzel, H & Schwarz, B, 1968, Die Feuchtigkeitsaufnahme von Baustoffen bei Berechnung. Berichte aus der Bauforschung, Heft 51. Verlag Wilhelm Ernst & Sohn. Berlin.

Ruettgers, A, Vidal, EN & Wing, SP, 1935, An investigation of the permeability of mass concrete with particular reference to Boulder dam. Journal of the American Concrete Institute. Proc V 31, pp 382-416.

Sandberg, PI, 1973, Byggnadsdelars fuktbalans i naturligt klimat. (Institutionen för byggnadsteknik. Tekniska högskolan i Lund) Report 43. Lund.

Schwarz, B, 1972, Die kapillare Wasseraufnahme von Baustoffen. Gesundheits-Ingenieur, 93. Jahrgang, Heft 7.

Schwarz, B & Künzel, H, 1974, Der kritische Feuchtigkeitsgehalt von Baustoffen. Gesundheits-Ingenieur, 95. Jahrgang, Heft 9.

Vos, BH & Tammes, E, 1968, Flow of water in the liquid phase. (Institute TNO for building materials and building structures). Report BI-68-38. Delft.

TAB. V:1. Kapillaritetstal och kapillär mätnadsfuktkvot. (Schwarz 1972)

Material	Densitet (kg/m ³)	Kapillaritetstal (kg/m ² · √s)	Kapillär mätnads- fuktkvot (vikts-%)
Tege1	1750	0.42	11
"	2175	0.05	4
Kalksandsten	1635	0.12	17
"	1920	0.05	10
Betong	2290	0.03	6
Gasbetong	530	0.07	55
K-bruk 1:3		0.12	
KC-bruk 2:1:8		0.03-0.06	
C-bruk		0.03-0.05	

TAB. V:2. Specifika motstånd beräknade från permeabilitetskoefficienten enligt Ruetters et al (1935).

Material	Specifikt motstånd (·10 ⁹ Ns/kg·m)
Granit	3000 -20 000
Betong och bruk vct= 0.5-0.6	100 -30 000
vct= 0.7-0.8	20 - 1 000
vct=1.0-1.2	0.5 - 30
Sandsten	0.1 - 5
Fasadtegel	0.03 - 0.3
Sand	0.00003

TAB. V:3. Kapillaritetstal för putsar

Puts ↓	Underlag ⇒	B(0-2min) (kg/m ² ·√s)		B(2-10min) (kg/m ² ·√s)	
		Tege1	Gasbetong	Tege1	Gasbetong
K 100/800		0.13	0.13	0.10 ^x	0.10 ^x
KC-C 100/650		0.06	0.06	0.06	0.06
M-A 100/600		0.03	0.03	0.015	0.03
C 100/425		0.025	0.01	0.015	0.015
Rivputs		0.16	0.06	0.12	0.05

x avser B(2-5min).

Kommentar: Proverna med tege1 respektive gasbetong har behandlats olika innan kapillärsugningen.

TAB. V:4. Relativa motstånd puts/gasbetong vid olika uppsugen vattenmängd.

Puts	Uppsugen vattenmängd i gasbetongen (kg/m ²)			
	1	3	5	8
2	1.8	1.6	2.7	2.7
3	0.9	1.3	1.4	1.1
4	13	20	36	91
5	1.8	1.7	2.8	3.2
11	3.3	4.0	3.7	3.2
14	2.4	2.4	2.6	3.2

TAB. V:5. Relativa motstånd puts/tegel vid olika uppsugen vattenmängd.

Puts	Uppsugen vattenmängd i teglet (kg/m^2)			
	1	3	5	8
2	14	14	16	17
3	1.7	1.5	1.4	1.0
4	2500	5000	-	-
5	35	45	55	58
11	29	34	36	42
14	320	350	400	420

TAB. V:6. Underlagets egenskaper vid beräkning av relativa motstånd

	Gasbetong	Tegel
Kapillaritetstal ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{s}}$)	0.05	0.10
Vattenfylld porvolym (m^3/m^3)	0.20	0.15

TAB. V:7. Specifika och totala motstånd för putser på olika underlag

Puts	Specifikt motstånd ($\cdot 10^9$ Ns/kg·m)		Totalt motstånd ($\cdot 10^9$ Ns/kg)	
	Underlag:			
	Gasbetong	Tegel	Gasbetong	Tegel
2	15-25	15-20	0.15-0.25	0.15-0.20
3	4-13	1	0.04-0.13	0.01
4	200-1500	3000-7000	2-15	30-70
5	15-45	40-70	0.15-0.5	0.5 - 0.8
11	35	35-50	0.8	0.8 - 1.1
14	25-35	400-500	0.25-0.35	4 - 5
6	-	-	6	15
9	-	-	4	5 -10

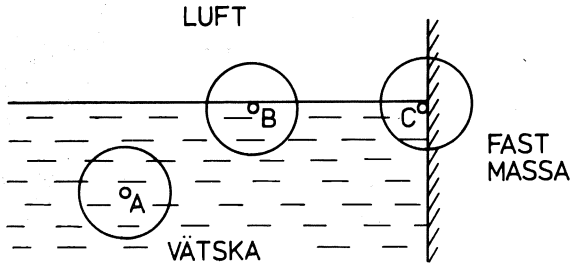


FIG. V:1. Molekylär verkningsfär hos molekyler med olika placering.
Sphere of action of molecules with different placing.

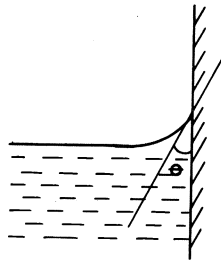


FIG. V:2. Definition av randvinkel.
Definition of contact angle.

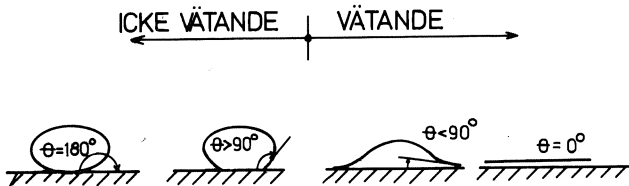


FIG. V:3. Vattendroppe på underlag med olika randvinkel.
A drop of water on underlayers with different contact angles.

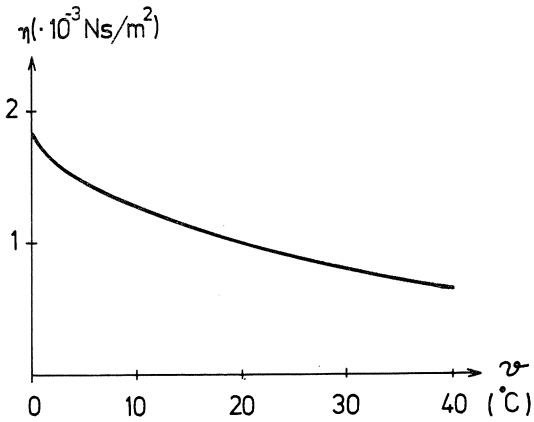


FIG. V:4. Viskositeten hos vatten som funktion av temperaturen.
Viscosity of water as a function of temperature.

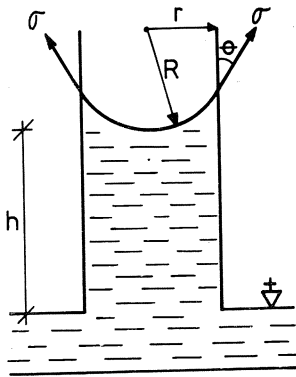


FIG. V:5. Kapillärsugning i cirkulärcylindrisk kapillär.
Capillary action in a circular cylindrical tube.

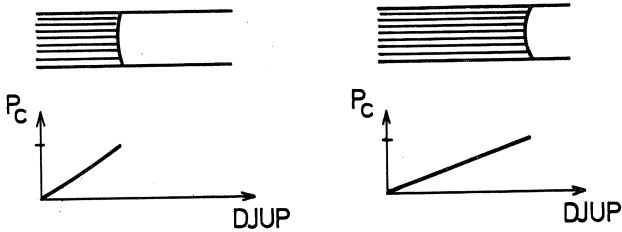


FIG. V:6. Porvattenundertryck i delvis vattenfylld kapillär.
Suction in a partly filled capillary tube.

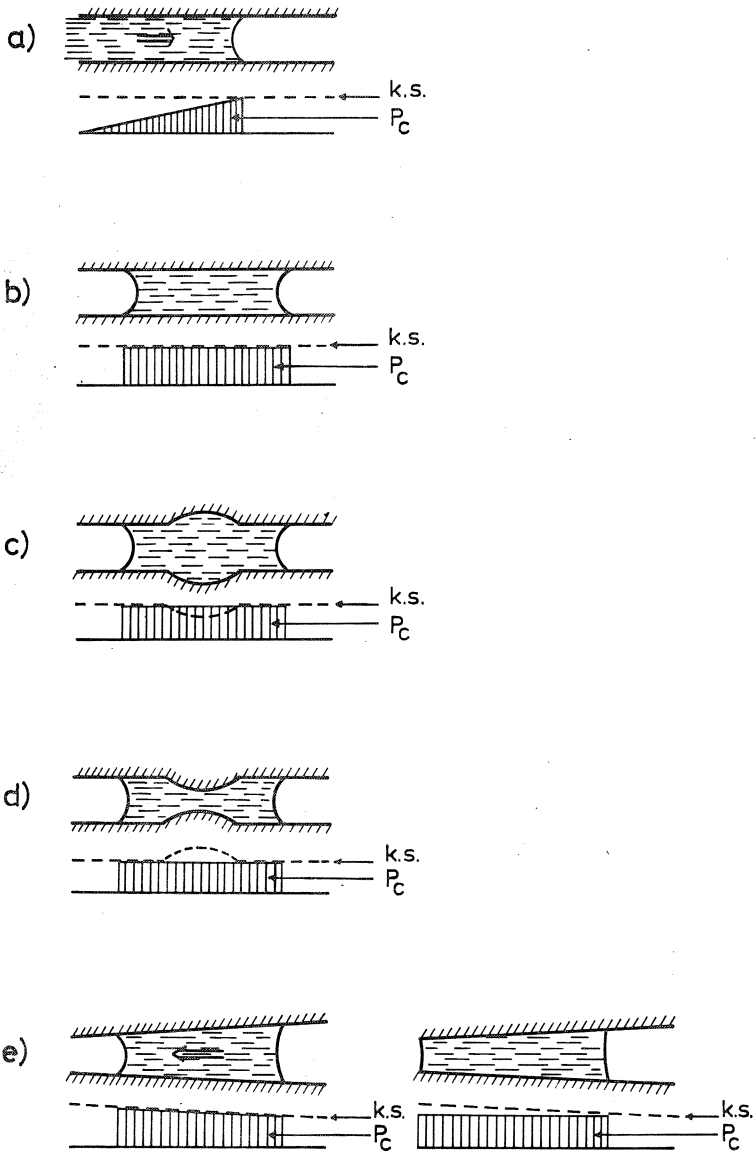


FIG. V:7a-e. Kapillär sugförmåga (k.s.) och porvattenundertryck (P_c) i olika kapillärporer.

Capillary power of suction (k.s.) and sub-pressure of the pore-water (P_c) in different capillary tubes.

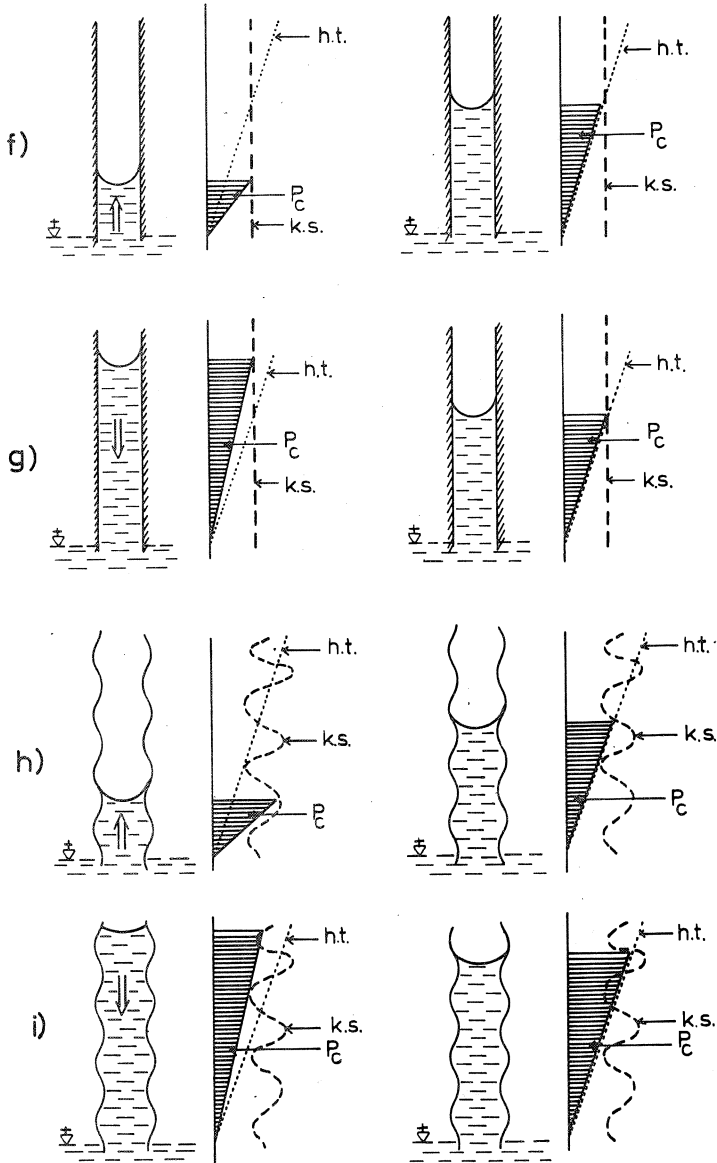


FIG. V:7f-i. Kapillär sugförmåga (k.s.), "hydrostatiskt tryck" (h.t.) och porvattenundertryck (P_C) i olika kapillärporer.

Capillary power of suction (k.s.), "hydrostatic pressure" (h.t.) and sub-pressure of the pore-water (P_C) in different capillary tubes.

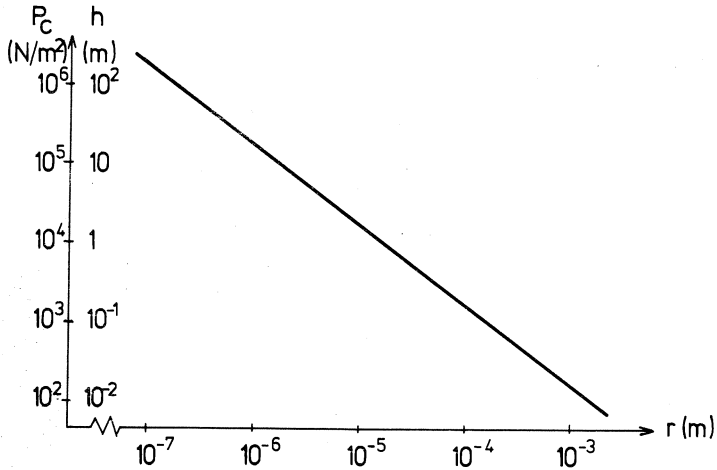


FIG. V:8. Porvattenundertryck (P_c) respektive maximal stighöjd (h) som funktion av porradien (r) i en cirkulär cylindrisk kapillärpor innehållande vatten.

Suction (P_c) and maximum height of capillary rise (h) as function of pore-radius (r) in a circular cylindrical capillary tube containing water.

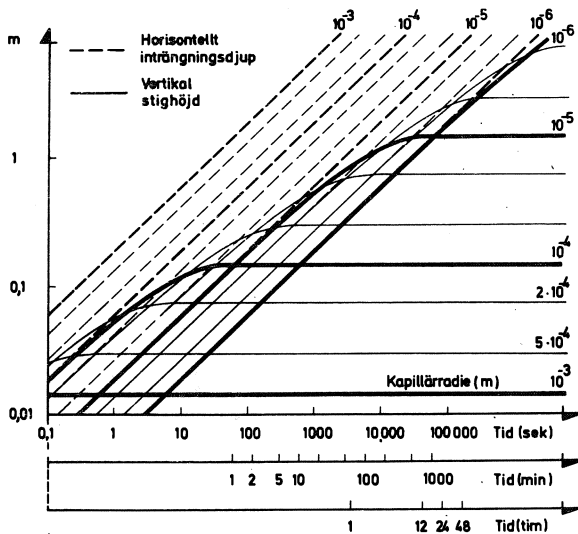


FIG. V:9. Samband mellan kapillärradie, tid och inträngningsdjup vid kapillär-sugning.

Relationship between capillary-radius, time and depth of penetration at capillary water intake.

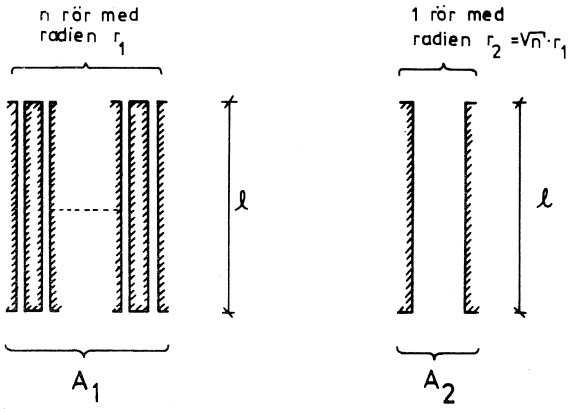


FIG. V:10. Pormodell A_1 och A_2 .
Pore models A_1 and A_2 .

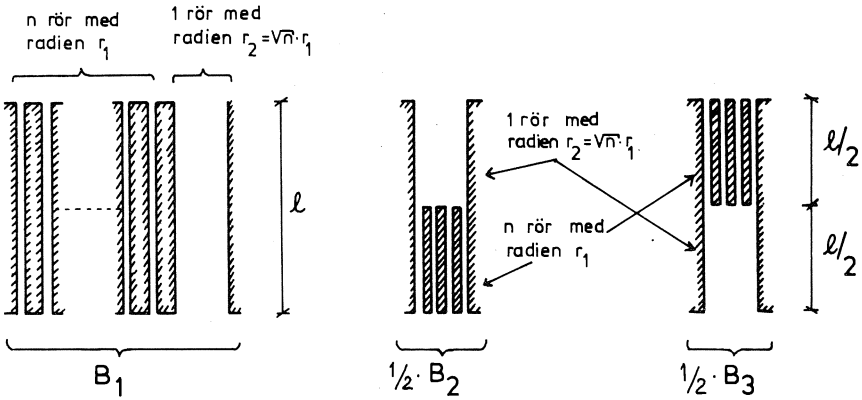


FIG. V:11. Pormodell B_1 , B_2 och B_3 .
Pore models B_1 , B_2 and B_3 .

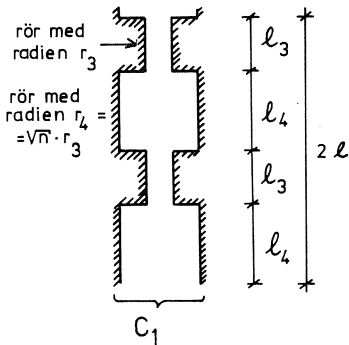


FIG. V:12. Pormodell C_1 .
Pore model C_1 .

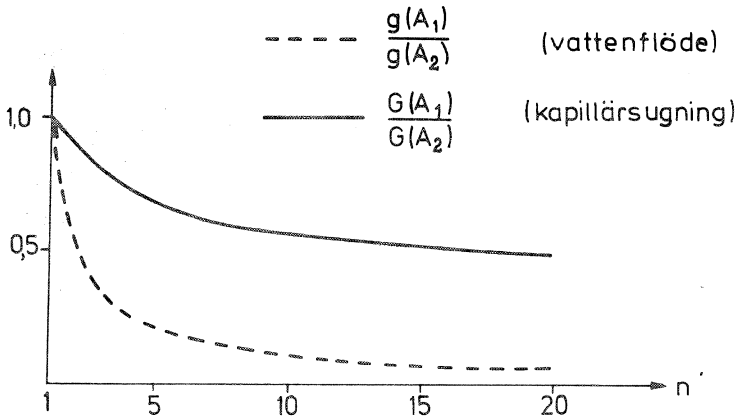


FIG. V:13. Jämförelse mellan pormodell A_1 och A_2 vid kapillärsugning och vid vattenflöde under inverkan av yttre tryck.

Comparison between pore models A_1 and A_2 with regard to capillary water intake and at water flow by an external pressure.

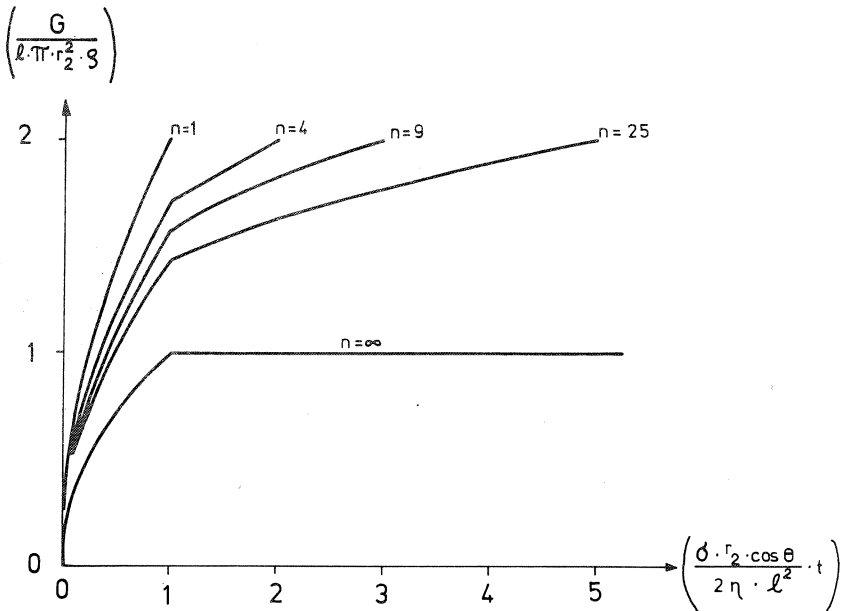


FIG. V:14. Uppsugen vattenmängd som funktion av tiden för pormodell B_1 .

Absorbed amount of water as function of time, pore model B_1 .

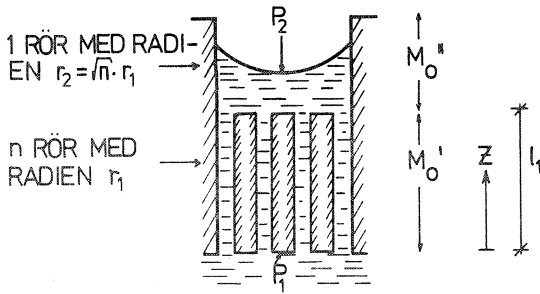


FIG. V:15. Flödesmotstånd i sammansatt por.
Resistance against water flow in combined pores.

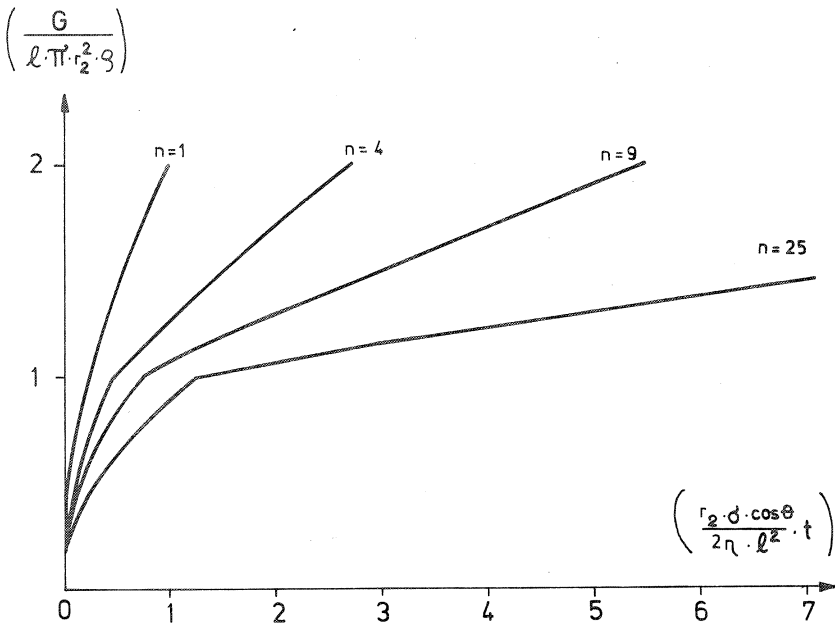


FIG. V:16. Uppsugen vattenmängd som funktion av tiden för pormodell B_2 .
Absorbed amount of water as function of time, pore model B_2 .

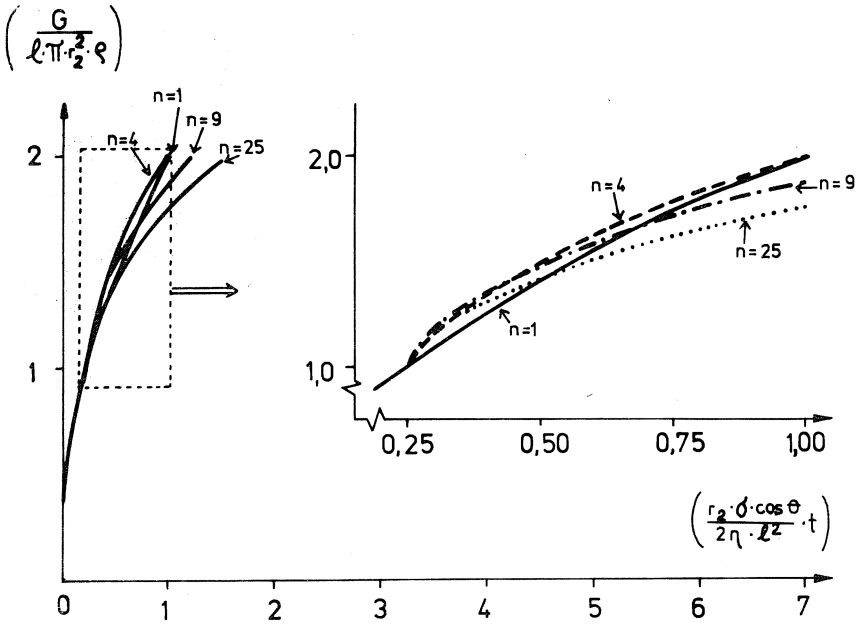


FIG. V:17. Uppsugen vattenmängd som funktion av tiden för pormodell B_3 .
Absorbed amount of water as function of time, pore model B_3 .

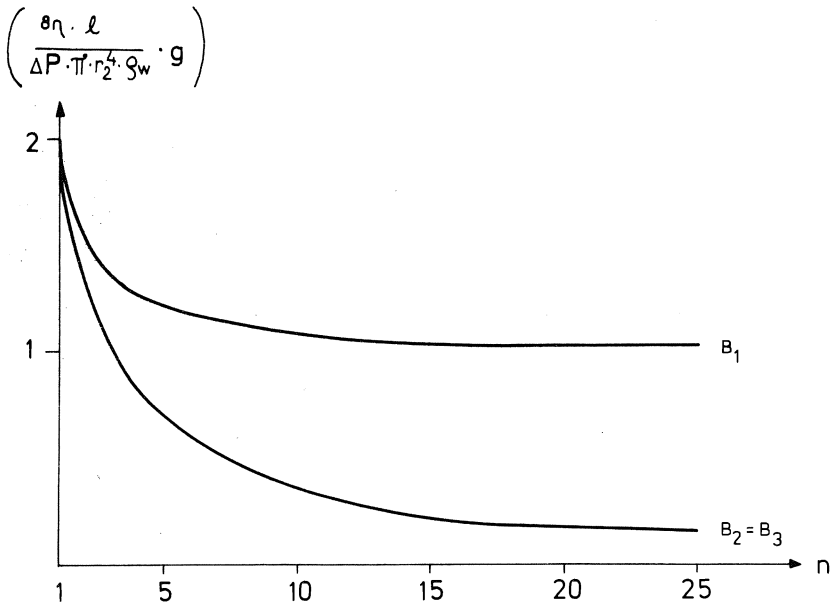


FIG. V:18. Vattenflöde under inverkan av yttre tryck som funktion av n för pormodellerna B_1 , B_2 och B_3 .
Flow of water as function of n , pore models B_1 , B_2 and B_3 .

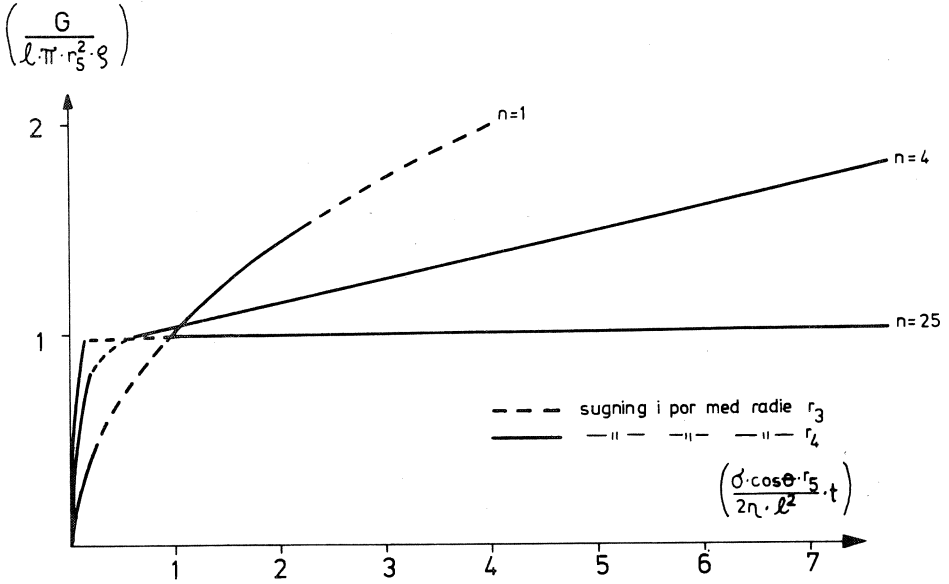


FIG. V:19. Uppsugen vattenmängd som funktion av tiden för pormodell C_1 .
 Absorbed amount of water as function of time, pore model C_1 .

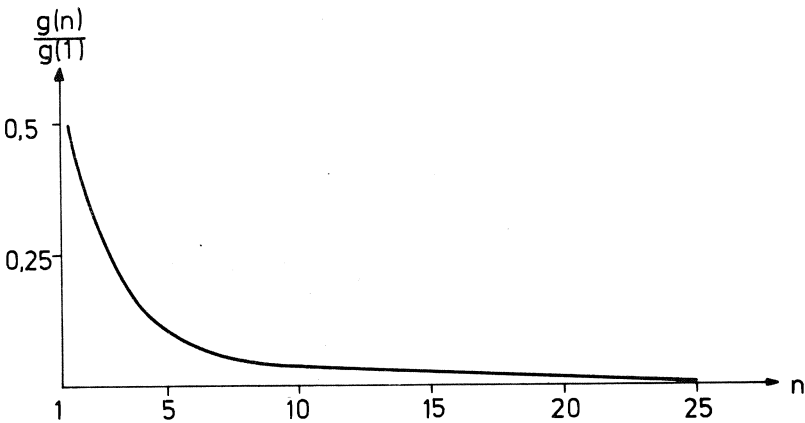


FIG. V:20. Relativt vattenflöde under inverkan av yttre tryckgradient som funktion av n .
 Relative flow of water by an external pressure as function of n .

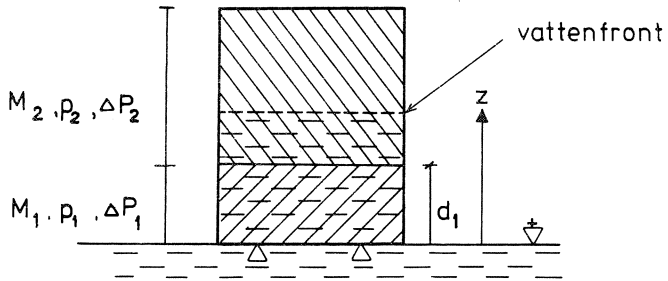


FIG. V:21. Kapillärsugning i materialkombination.
Capillary water intake in combinations of materials.

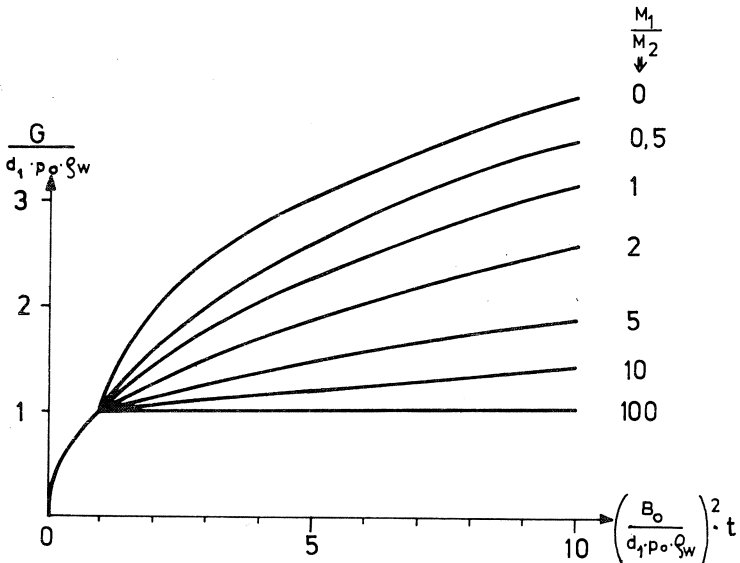


FIG. V:22. Uppsugen vattenmängd som funktion av tiden vid varierande $\frac{M_1}{M_2}$.
Absorbed amount of water as function of time at varying $\frac{M_1}{M_2}$.

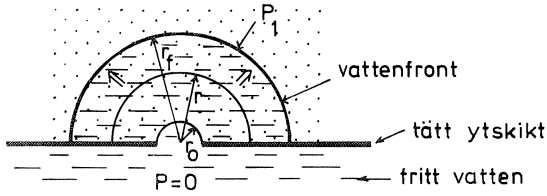


FIG. V:23. Beteckningar vid kapillärsugning genom spricka i tätt ytskikt.

Symbols at capillary water absorption through a crack in a tight surface coating.

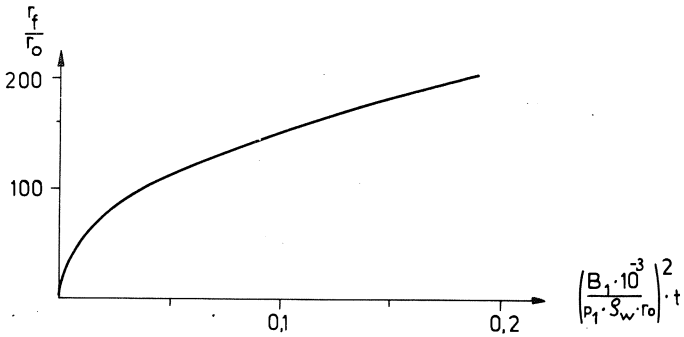


FIG. V:24. Vattenfrontens läge som funktion av tiden.

Position of the water front as function of time.

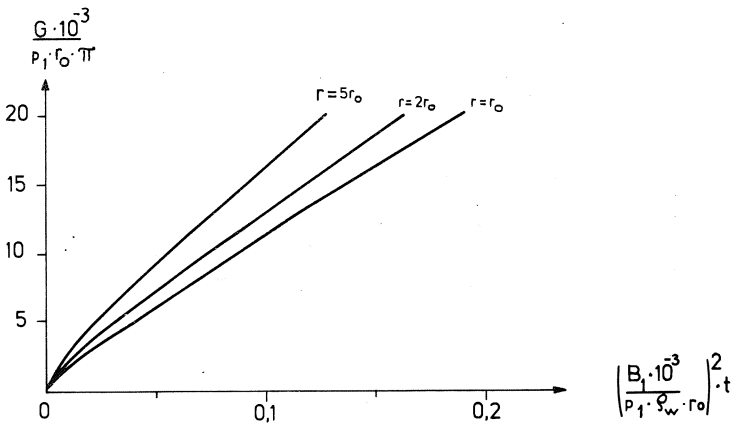


FIG. V:25. Uppsugen vattenmängd som funktion av tiden vid varierende sprickbredd.

Absorbed amount of water as function of time at varying width of a crack.

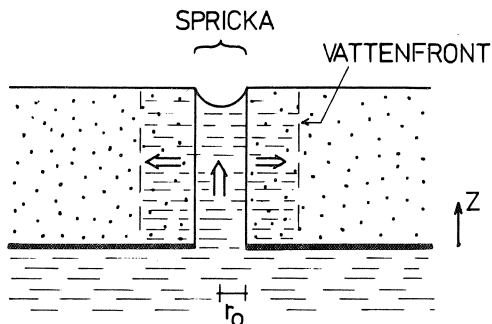


FIG. V:26. Beteckningar vid kapillärsugning i genomgående spricka.

Symbols at capillary water intake in a crack through the whole material.

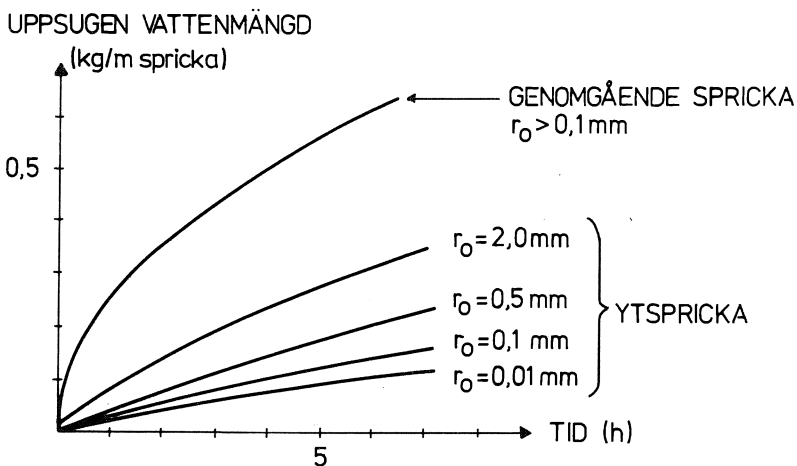


FIG. V:27. Uppsugen vattenmängd i olika sprickor som funktion av tiden. $B=0.07 \text{ kg/m}^2 \cdot \sqrt{\text{s}}$, $p_1=0.25$.

Absorbed amount of water as function of time in different cracks. $B=0.07 \text{ kg/m}^2 \cdot \sqrt{\text{s}}$, $p_1=0.25$.

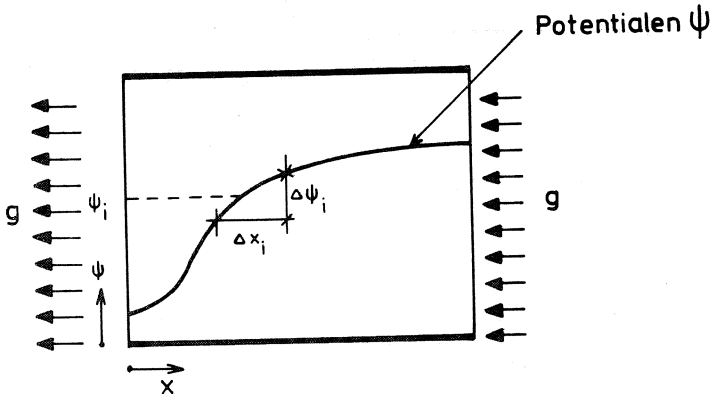


FIG. V:28. Bestämning av flödeskoefficienten vid stationärt förlopp.
Determination of coefficient of flow at stationary condition.

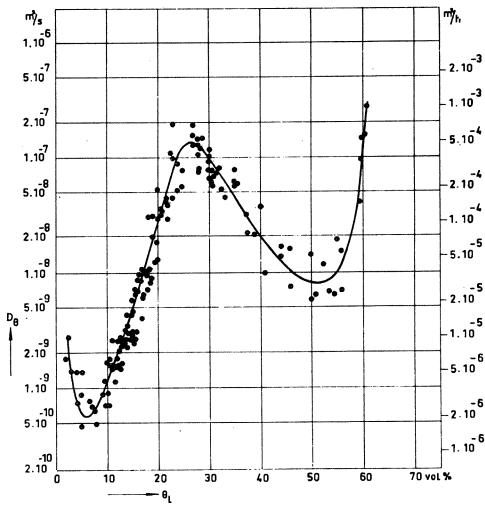


FIG. V:29. Flödeskoefficient som funktion av fukthalten i gasbetong. (van der Kooi, 1971).
Coefficient of moisture flow as function of moisture content in aerated concrete.

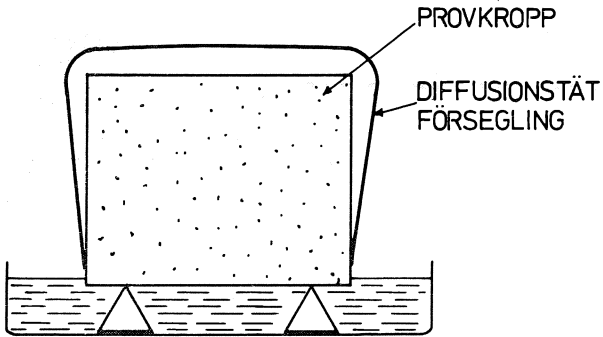


FIG. V:30. Kapillärsugningsförsök med enskilt material.
Capillary water intake test of a single material.

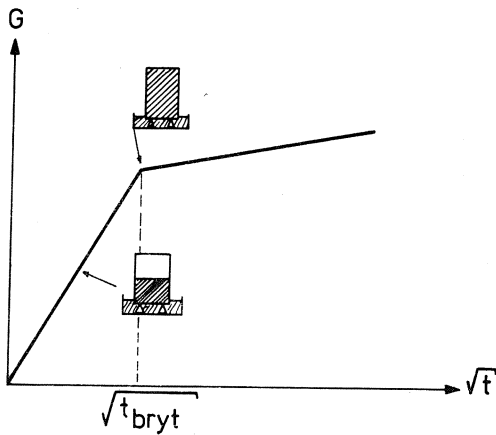


FIG. V:31. Vattenupptagning som funktion av tiden vid kapillärsugningsförsök.
Water absorption as function of time at a capillary water intake test.

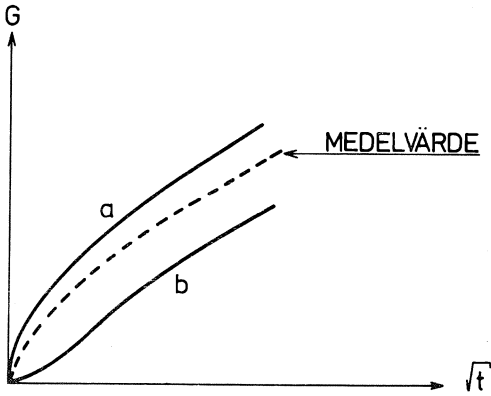


FIG. V:32. Möjliga samband mellan uppsugen vattenmängd och tid vid kapillärsugningsförsök.

Different relationships between absorbed amount of water and time at a capillary water intake test.

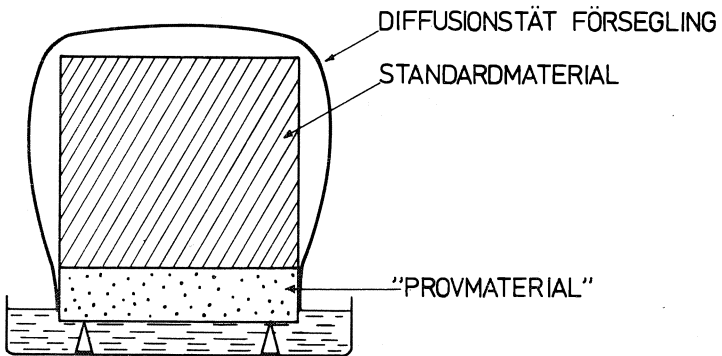


FIG. V:33. Kapillärsugningsförsök med materialkombinationer.

Capillary water intake test of combinations of materials.

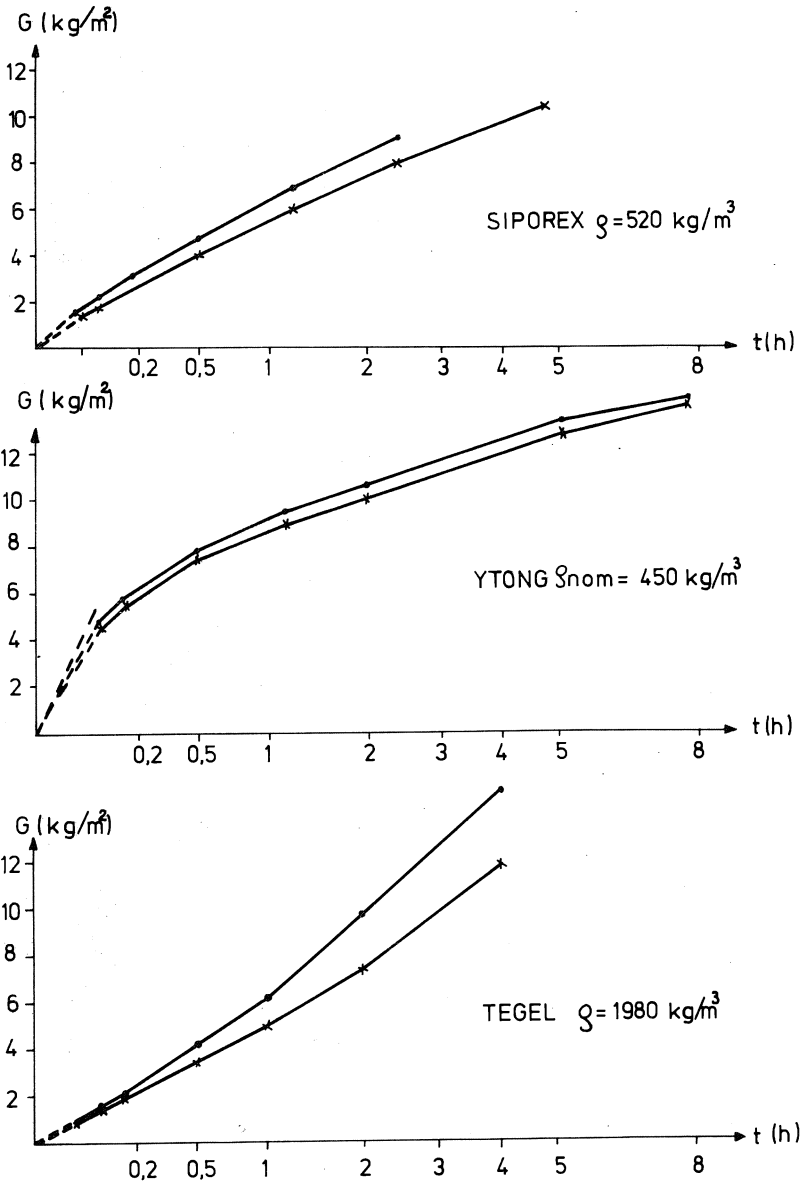


FIG. V:34. Resultat från kapillärsugningsförsök.
Results from capillary water intake test.

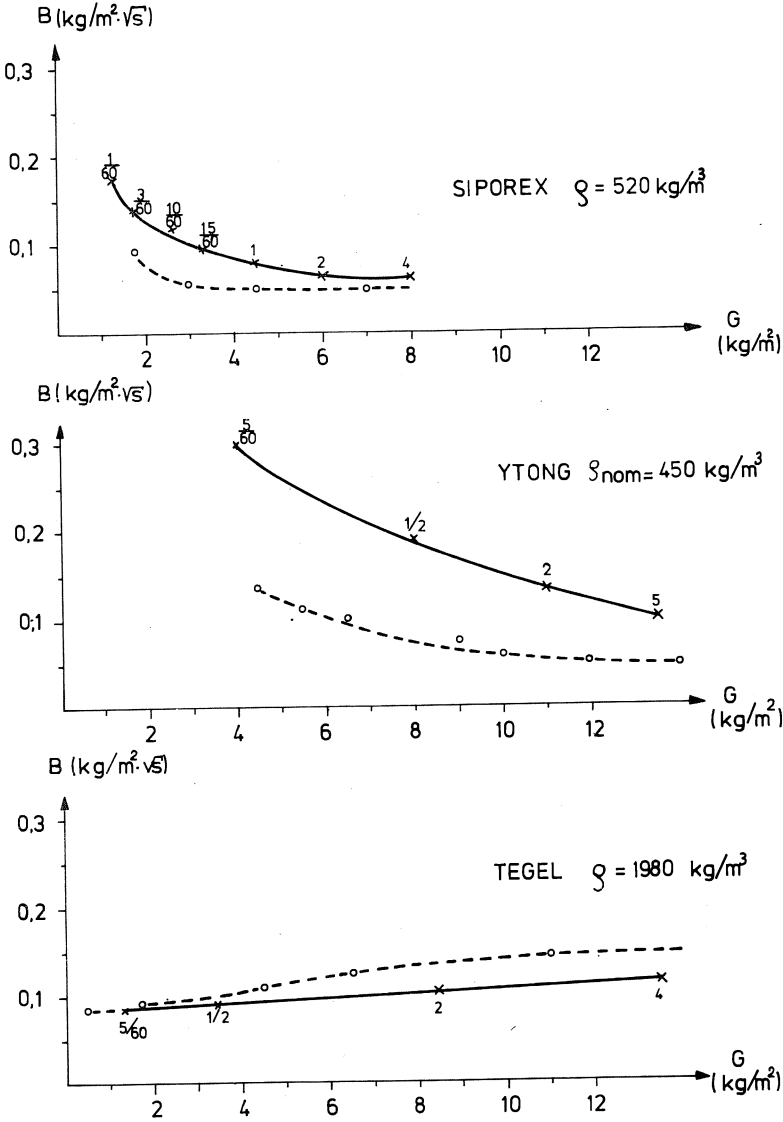
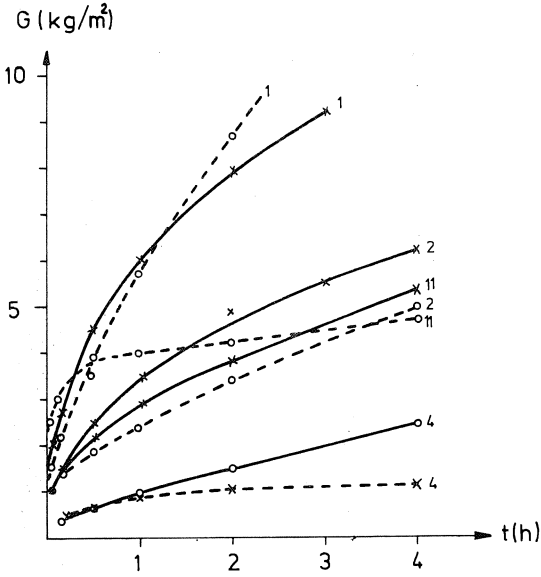
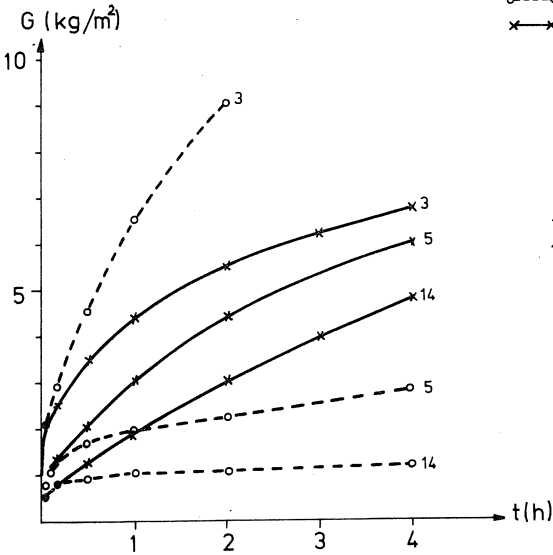


FIG. V:35. Kapillaritetstal. x—x= $B(0-t_y)$, o---o= $B(t_x-t_y)$. Siffrorna vid kurvorna anger ungefärlig sugtid i timmar.

Capillary absorption coefficient. The figures at the curves are suction-time in hours.



o---o = tegelunderlag
 x---x = gasbetongunderlag



- 1 = utan puts
- 2 = KC-C 100/650
- 3 = K 100/800
- 4 = C 100/425
- 5 = grundning+KC-C 100/650
- 11 = trad. 3-skiktsputs
- 14 = M-A 100/600

FIG. V:36. Resultat från kapillärugningsförsök med tjockputser på tegel respektive gasbetong, 0-4 h.

Results from capillary water intake tests with thick renderings on claybrick (----) and on aerated concrete (—), 0-4 h.

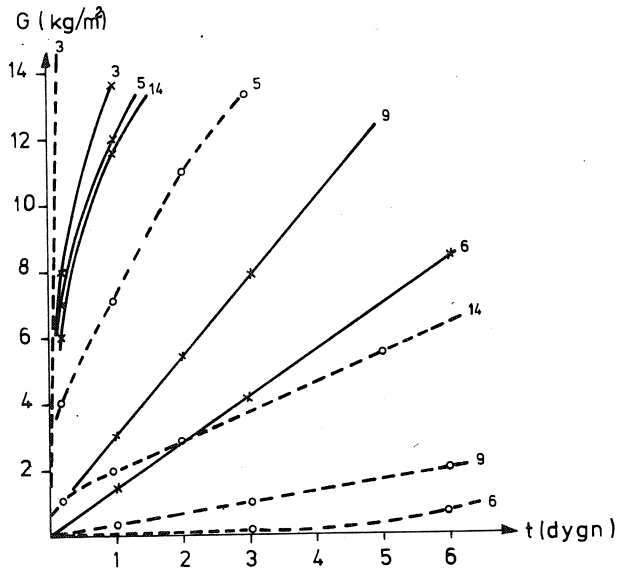
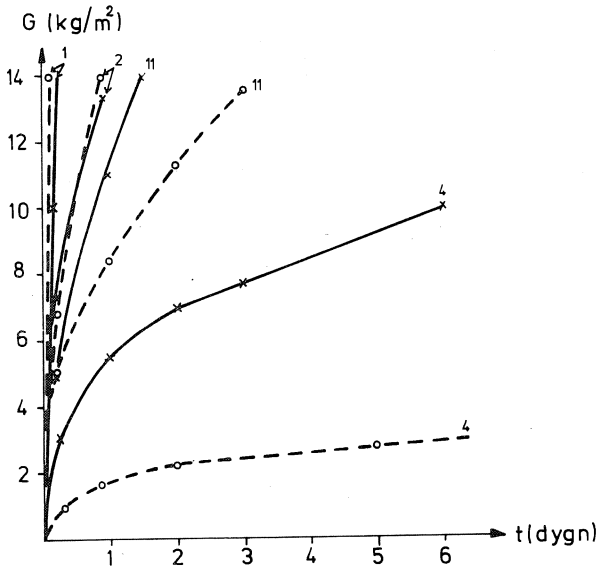


FIG. V:37. Resultat från kapillärugsningsförsök, 0-6 dygn. Prov 6 och 9 är olika organiska tunnutputser. I övrigt enligt FIG. V:36.

Results from capillary water intake tests with organic coatings (6 and 9) and different thick renderings on clay brick (----) and on aerated concrete (—), 0-6 days.

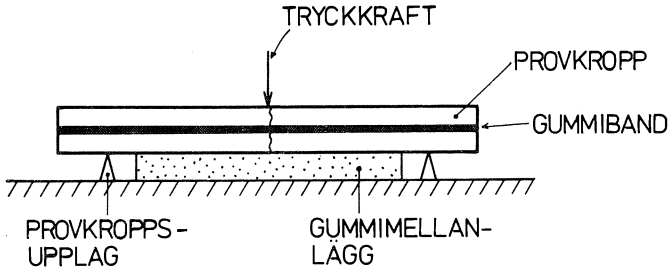


FIG. V:38. Metod vid "tillverkning" av genomgående spricka.

Method used when making a crack through the specimen.

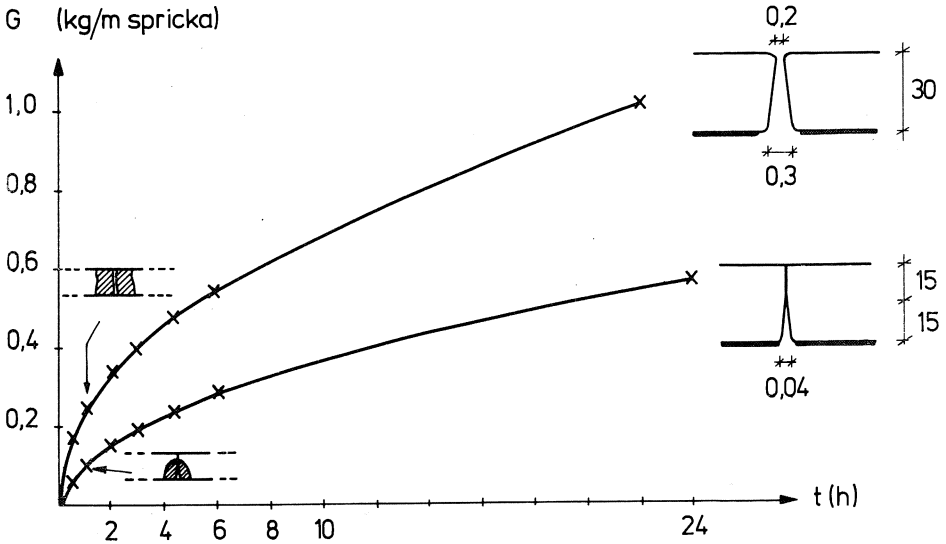


FIG. V:39. Kapillärsugning vid helt respektive delvis genomgående spricka i 30 mm tjock gasbetong med tät ytskikt.

Results from capillary water intake tests on 30 mm aerated concrete with a tight surface coating. The specimens contain different crack according to the figure.

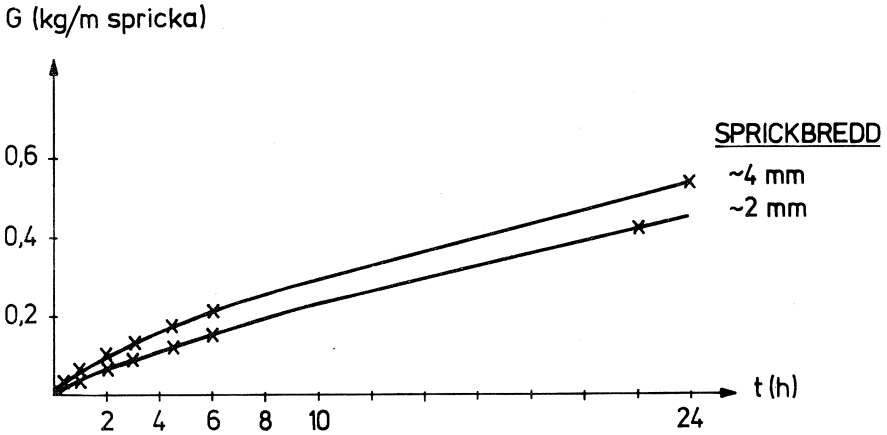


FIG. V:40. Kapillärsugning vid ytspricka i 30 mm gasbetong med i övrigt tätt yt-skikt.

Results from capillary water intake tests on 30 mm aerated concrete with a tight surface coating containing a surface crack.

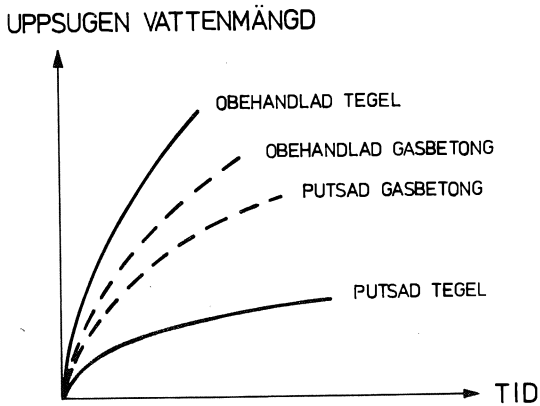


FIG. V:41. Principiell inverkan av puts på vattenuppsugning i tegel respektive gasbetong.

Influence of renderings on water absorption in clay brick and in aerated concrete.

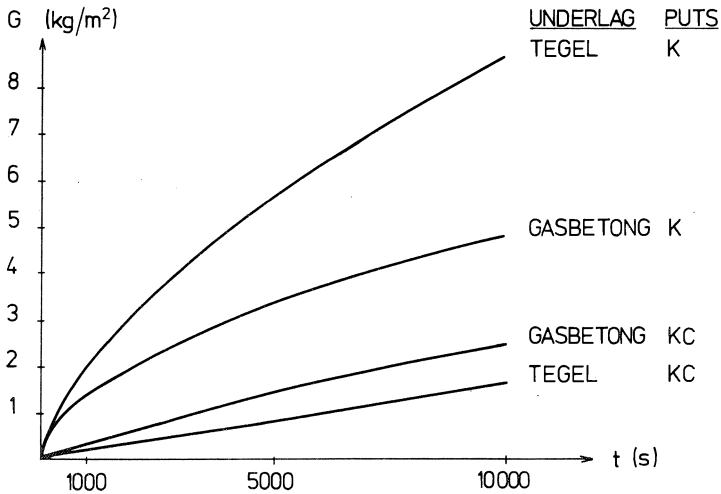


FIG. V:42. Beräknad vattenupptagning i underlaget vid olika kombinationer av puts-underlag.

Calculated water absorption in the underlayer at different combinations of rendering-underlayer.

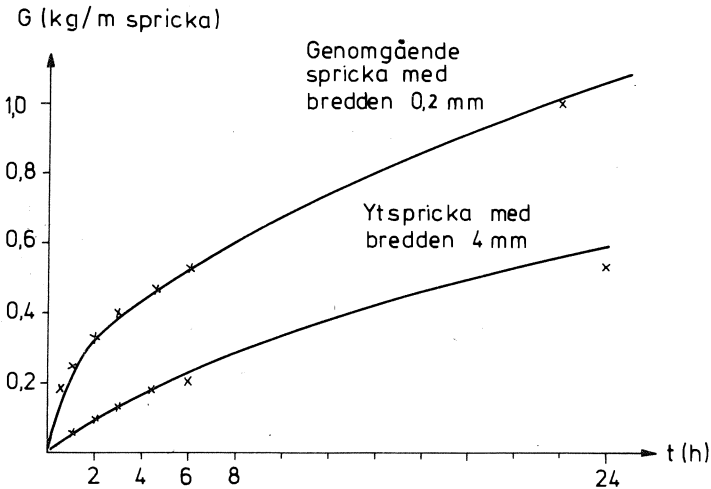


FIG. V:43. Beräknad (—) och mätt (x) uppsugen vattenmängd vid spricka i tät yttskikt. Underlag av gasbetong med $B=0.06 \text{ kg/m}^2 \cdot \sqrt{s}$ och $p_1=0.25$.

Calculated (—) and measured (x) amount of absorbed water in an underlayer with a tight surface coating containing a surface crack. $B=0.06 \text{ kg/m}^2 \cdot \sqrt{s}$, $p_1=0.25$.

avdelningen för Byggnadsmateriallära
Tekniska Högskolan i Lund

PUTSENS INVERKAN PÅ FASADENS FUKTBALANS

Delrapport VI: UTTORKNING

Lund i mars 1980

Kenneth Sandin

Denna delrapport hänför sig till forskningsanslag 740269-8 från Statens Råd för Byggnadsforskning till avdelningen för Byggnadsmateriallära, Tekniska Högskolan i Lund. Hela projektet slutredovisas i en huvudrapport och åtta delrapporter.

INNEHÅLL

1	INLEDNING	VI:2
2	TEORI	VI:3
2.1	Enskilda material	VI:3
2.2	Uttorkning genom puts/ytskikt	VI:6
3	MÄTNING AV UTTORKNINGSFÖRLOPP	VI:10
3.1	Allmänt	VI:10
3.2	Uttorkningsförsök	VI:10
3.3	Kritiskt fukttinnehåll	VI:11
3.4	Fuktgenomsläpplighet hos puts/ytskikt	VI:12
4	EGNA MÄTNINGAR	VI:13
4.1	Uttorkningshastighet	VI:13
4.2	Fuktprofil under uttorkning	VI:15
5	DISKUSSION AV RESULTATEN	VI:17
5.1	Allmänt	VI:17
5.2	Uttorkningsmekanismen	VI:17
5.3	Inverkan av uttorkningsklimat	VI:18
5.4	Beräkning av putsens/ytskiktets ånggenomsläpplighet	VI:19
5.5	Jämförelse mellan olika putser och underlag	VI:20
	LITTERATUR	VI:22
	TABELLER	VI:23
	FIGURER	VI:24

1 INLEDNING

Uttorkningsförloppet för en fasad är av mycket stor betydelse. Ett högt fukttinnehåll, som skall sänkas genom uttorkning, kan exempelvis härröra från byggfukt eller från slagregn. För att kunna göra riktiga bedömningar av uttorkningsförloppet (erforderliga uttorkningstider, fukttinnehålllets variation under uttorkningen, olika faktorerers inverkan på förloppet etc) måste uttorkningsmekanismen vara känd.

För enskilda material är uttorkningsförloppet relativt välkänt inom hela fuktområdet, från vattenmättnad till torrt material. Enligt den klassiska uttorkningsteorin indelas uttorkningsförloppet i olika faser med olika mekanismer. För materialkombinationer, exempelvis en putsad fasad, är däremot kunskaperna mycket bristfälliga. Vid de bedömningar som gjorts i detta fall, har man oftast utgått från samma mekanismer som för enskilda material. I vilken utsträckning de olika faserna har varit tillämpliga på en putsad fasad har däremot inte studerats. Man har helt enkelt grundat sig på rena gissningar, som i vissa fall medfört mycket stora missbedömningar. Provningsmetoder har exempelvis utvecklats, som är direkt felaktiga. Som exempel på dessa missbedömningar jämförs i FIG. VI:1 uttorkningsförloppet beräknat enligt en metod som utnyttjar resultaten från ER-nämndens våtmetod (Varnbo, 1972) med det verkliga förloppet enligt laboratoriemätningar. Som synes så är skillnaden mycket stor och anledningen till detta är att beräkningsmetoden grundar sig på en uttorkningsmekanism, som inte är riktig i aktuellt fall.

Syftet med denna delrapport är att studera uttorkningsmekanismen för putsade fasader, samt hur olika faktorer påverkar förloppet. Som exempel på olika faktorer kan nämnas egenskaperna hos puts och underlag, fukttinnehåll, solstrålning och lufthastighet.

2 TEORI

2.1 Enskilda material

Enligt klassisk uttorkningsteori (Krischer, 1963) kan uttorkningen av ett poröst material indelas i tre faser. I den första fasen sker avdunstningen från ytan och vattentransportkapaciteten i materialet är större än eller lika med avdunstningshastigheten. Uttorkningshastigheten under denna period antas ske enligt

$$g = \beta(v_s - v_\ell) \quad (\text{VI:1})$$

där	g = fuktflödestäthet	$\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$
	β = ångövergångskoefficient	m/s
	v_s = mätnadsånghalt i ytan	kg/m^3
	v_ℓ = ånghalt i luften	kg/m^3

Ångövergångskoefficienten beror främst av vindhastigheten. Sambandet mellan vindhastighet och ångövergångskoefficient har bestämts empiriskt enligt FIG. VI:2 av van der Held (1941). Ekvation (VI:1) gäller vid avdunstning från en fri vattenyta. Vid avdunstning från ett fuktigt material uppstår däremot vissa avvikelser från idealfallet med en fri vattenyta. Är avdunstningsytan skrovlig och materialet har rikligt med porer som leder fram till ytan kan avdunstningen bli större. Är ytan däremot jämn och antalet porer som kan transportera vatten till ytan inte stort nog, kan avdunstningshastigheten bli mindre. Detta senare torde ha störst betydelse, varför man i allmänhet kan anse att ekvation (VI:1) ger den övre gränsen på uttorkningshastigheten. För vanliga porösa byggnadsmaterial är avvikelserna från ekvation (VI:1) obetydlig och för praktiska beräkningar är ekvationen användbar.

Den andra fasen av uttorkningen startar när transportkapaciteten fram till ytan blir mindre än avdunstningshastigheten enligt ekvation (VI:1). Vissa fina porer kan under detta skede fortfarande suga vatten fram till ytan. Detta medför dock att andra grövre porer töms på sitt vatteninnehåll (jfr delrapport IV) varvid den totala avdunstningsytan minskar kraftigt. Genom de grova porerna sker uttorkningen i detta fall i ångfas. Framtransporten till ytan kommer alltså att ske i både ång-

och vätskefas. Efterhand som uttorkningen fortsätter kommer vätske-transporten att minska. Framtransporten till ytan kommer att gå långsammare och långsammare varför även uttorkningshastigheten under detta skede ständigt kommer att avta. Förloppet är mycket komplicerat och någon exakt beräkningsformel går inte att ange.

Den tredje fasen av uttorkningen börjar när all kapillärtransport upphör. All fukttransport sker då (beräkningsmässigt) i ångfas. Uttorkningshastigheten ges då av

$$g = \frac{v_0 - v_\ell}{\frac{z}{\delta_v} + \frac{1}{\beta}} \quad (\text{VI:2})$$

där	v_0 = ånghalt på djupet z	kg/m^3
	v_ℓ = ånghalt i luften	kg/m^3
	z = djup där "avdunstningszonen" ligger	m
	δ_v = ånggenomsläplighetskoefficient	m^2/s
	β = ångövergångskoefficient	m/s

I början av denna fas ligger z någonstans inuti materialet. Efterhand som uttorkningen fortgår förflyttar sig z inåt och når slutligen (vid ensidig uttorkning) in till hela materialdjupet. (Ibland hänförs även denna del av uttorkningen till fas 2. Fas 3 börjar då först när z är lika med hela materialtjockleken.) Det ökande värdet på z medför en avtagande uttorkningshastighet. Även efter det att z är lika med hela materialtjockleken fortsätter uttorkningen med en ständigt avtagande hastighet, eftersom nu v_0 börjar att sjunka.

Uttorkningshastigheten under de olika faserna illustreras i FIG. VI:3. I verkligheten erhålles dock inte så skarpa knickpunkter som i figuren. I allmänhet går det inte heller att särskilja fas 2 och 3.

Uttorkningsmekanismen blir enligt ovan helt beroende av materialets fuktinnehåll och porstruktur. Höga fuktinnehåll medför snabb uttorkning medan låga fuktinnehåll medför en långsam uttorkning. Härvid är det inte medelfuktinnehållet som är avgörande utan främst fuktprofilen. Ett lågt fuktinnehåll vid ytan medför ju att uttorkningen "sista biten" måste ske i ångfas, även om provet i övrigt är "blött". Detta medför att de exakta fuktinnehållen, då de olika faserna gäller, inte går att ange generellt. Olika uttorkningsklimat medför exempelvis att de olika faserna för-

skjuts. Ett klimat som ger en mycket snabb uttorkning under 1:a fasen kan ge en kraftig fuktprofil i materialet så att ytan är torr medan lite längre in i materialet fukttinnehållet är mycket högt. Kapillärtransporten fram till ytan kan i detta fall bli mindre än avdunstningshastigheten enligt ekvation (VI:1). Uttorkningen kommer då att övergå i fas 2. Ändras nu klimatet, så att den maximala uttorkningshastigheten minskar, kan uttorkningen övergå i fas 1 igen.

Några exakta fuktkvoter då olika faser gäller går alltså inte att ange. Generellt kan man dock säga att i den 1:a fasen måste fukttinnehållet vara större än det kritiska fukttinnehållet med avseende på kapillärtransport. Detta kritiska fukttinnehåll definieras, enligt delrapport V, som det lägsta fukttinnehåll vid vilket "praktisk" kapillärsugning kan ske. Under den sista fasen är fukttinnehållet å andra sidan mindre än det kritiska i varje punkt.

Vid praktiska överslagsbedömningar antar man ofta att fas 1 gäller från mättnad till det kritiska fukttinnehållet. Härfter antar man att fas 3 gäller och inkluderar eventuell kapillärtransport i ånggenomsläpplighetskoefficienten.

Ur praktisk synpunkt är skillnaden mellan mekanismerna i fas 1 och i de båda andra faserna mycket viktig. Under den 1:a fasen påverkas nämligen uttorkningen mycket kraftigt av ångövergångskoefficienten medan under de övriga faserna denna ångövergångskoefficient saknar praktisk betydelse. I praktiken innebär detta att vindhastigheten (som påverkar ångövergångskoefficienten mycket kraftigt, se FIG. VI:2) har stor betydelse i början av uttorkningen. När fas 1 har passerats saknar däremot vindhastigheten betydelse. Här har däremot materialets ånggenomsläpplighet stor betydelse.

Förutom av ovanstående faktorer påverkas uttorkningen, i alla faser, av ånghalterna i luft och material. Dessa ånghalter påverkas i sin tur mycket kraftigt av temperaturen.

För att illustrera de yttre faktorernas inverkan på uttorkningshastigheten redovisas i FIG. VI:4 några beräkningsfall under den 1:a fasen. Uttorkningshastigheten under de övriga faserna kommer att ligga väsentligt lägre än i fallet med vindhastigheten noll. De i FIG. VI:4 angivna

vindhastigheterna och temperaturerna är inte några extrema värden, utan är vanligt förekommande under en solig respektive mulen höstdag.

Vid en "exakt" beräkning av uttorkningsförloppet måste hänsyn även tas till bland annat temperatursänkningen på grund av ångbildningsvärmets. Under den 1:a fasen blir denna inverkan mycket kraftig och behandlas i delrapport VIII.

2.2 Uttorkning genom puts/ytskikt

Vid uttorkning av en putsad konstruktion är samma mekanismer tänkbara som i fallet med ett enda material. De olika faserna kan emellertid i detta fall förskjutats mycket kraftigt. Avgörande för mekanismen hos en putsad vägg blir, förutom klimatförhållanden och de enskilda materialets egenskaper, även sambandet mellan egenskaperna hos puts och underlag.

Med en puts eller ett ytskikt som inte kan innehålla eller släppa igenom vatten i vattenfas finns överhuvudtaget inte den 1:a fasen enligt föregående avsnitt. Uttorkningen under den första tiden ges då av

$$g = \frac{v_0 - v_\ell}{\frac{1}{P_v} + \frac{1}{\beta}} \quad (\text{VI:3})$$

där	v_0 = ånghalt i gränsen mellan puts och underlag	kg/m^3
	v_ℓ = ånghalt i luften	kg/m^3
	P_v = putsens ånggenomsläpplighet	m/s
	β = ångövergångskoefficient	m/s

Ånghalten under putsen blir i detta fall lika med mättnadsånghalten vid aktuell temperatur. När uttorkningen fortgått så länge att ånghalten under putsen börjar sjunka, tillkommer även ånggenomgångsmotståndet i underlaget på samma sätt som för ett enskilt material. Härvid kan även putsens ånggenomsläpplighet minska enligt delrapport IV.

Med en puts som själv kan innehålla och transportera vatten i vattenfas börjar uttorkning med fas 1 enligt ekvation (VI:1). Hur länge uttorkningen sker på detta sätt beror, förutom på faktorerna enligt föregående avsnitt, även på sambandet mellan egenskaperna hos putsen och underla-

get. Om putsen inte kan suga vatten från underlaget, kommer enbart själva putsen att torka enligt ekvation (VI:1). Härfter övergår uttorkningsförloppet till att följa ekvation (VI:3).

Om däremot putsen kan suga vatten från underlaget och transportera det fram till ytan i vattenfas så kan uttorkningsförloppet enligt fas 1 gälla under en längre tid. En förutsättning för detta är dock att transportkapaciteten är minst lika stor som avdunstningshastigheten enligt ekvation (VI:1). Transportkapaciteten påverkas främst av sugförmåga och kapillärsugningsmotstånd hos putsen och underlaget enligt delrapport V. Den drivande kraften är skillnaden i porvattenundertryck vid ytan och inne i underlaget. Motståndet mot kapillärtransporten bestäms av det specifika motståndet i respektive material. Ett ytterligare motstånd är tänkbart i gränsen mellan puts och underlag. Storleken på de olika porvattenundertrycken kan uppskattas med hjälp av jämviktsfuktkurvorna i delrapport III och storleken på de specifika motstånden enligt delrapport V. De olika siffervärdena skall väljas med hänsyn till rådande fukttinnehåll, som alltid måste vara högre än det kritiska. De i delrapporterna III och V givna siffervärdena är mycket ungefärliga, varför några exakta beräkningar inte är möjliga att göra. En bedömning av möjliga förlopp går dock att göra.

Enligt tidigare så måste fukttinnehållet i putsen vara minst lika stort som det kritiska. För i undersökningen ingående putser är detta inte bestämt men kan med hjälp av andra mätningar uppskattas till 4-6 vikts-%. De relativa kapillära jämviktsfuktkurvorna i delrapport III ger då omedelbart att kapillärtransport fram till ytan inte är möjlig för någon tjockputs på gasbetongunderlag utan uttorkningen måste ske i ångfas genom putsen. För puts på tegel finns det däremot, enligt samma kurvor, en teoretisk möjlighet att vatten kan transporteras kapillärt till ytan. Ett villkor för att uttorkningen skall ske enligt ekvation (VI:1) är nu att kapillärtransporten är tillräckligt stor. Kapillärtransporten genom putsen ges enligt delrapport V av

$$g = \frac{\Delta P_C}{M \cdot d} \quad (VI:4)$$

där	g = flödestäthet	$\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$
	ΔP_C = porvattentrycksskillnad	N/m^2
	$M \cdot d$ = putsens totala motstånd	Ns/kg

I samtliga undersökta putsar är porvattenundertrycket vid det kritiska fukttinnehållet $(4-6) \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$. Porvattenundertrycket i tegel vid höga fukttinnehåll är av samma storleksordning. Detta innebär att en beräkning blir mycket osäker och små variationer kan förändra resultatet kraftigt. För att ändå få en viss uppfattning om möjliga förlopp redovisas i TAB. VI:1 de beräknade fuktflödena under inverkan av en tryckskillnad på $0,1 \cdot 10^4$ respektive $1 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$ för C- respektive KC-puts på tegel. (Dessa tryckskillnader ligger helt inom felmarginalen vid bestämning av porvattenundertrycken.)

Vid beräkningen har putsens totala motstånd mot kapillärtransport valts till ett belopp som är 10 gånger större än de som angivits i delrapport V. Motivet för detta är att fukttinnehållet i aktuellt fall är lägre än vid bestämningen av motstånden. I TAB. VI:1 anges även de fuktflöden som erhålles enligt ekvation (VI:1) och vid "ångtransport" genom respektive puts. Härvid har ånghaltsskillnaden valts till $10 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ och lufthastigheten till 3 m/s. Dessa siffror motsvarar ett relativt gynnsamt uttorkningsförhållande, exempelvis utomhusklimatet $+15 \text{ }^\circ\text{C}$ och 70% RF samtidigt som väggytan har en övertemperatur på ca $5 \text{ }^\circ\text{C}$. Putsernas ånggenomsläpplighet har valts enligt delrapport IV och inkluderar även den del av kapillärsugningen som av praktiska skäl hänföres till ångtransport.

Som synes av TAB. VI:1 så är den vattenmängd som kan transporteras kapillärt betydligt mindre än den maximala avdunstningshastigheten. Även med hänsyn till osäkerheten i uppskattningarna av olika siffervärden kan man entydigt fastslå att uttorkningsmekanismen enligt fas 1 inte föreligger. För C-bruket är även flödet beräknat som ångtransport genom putsen väsentligt större än den renodlade kapillärsugningen. För KC-bruket är däremot dessa flöden av samma storleksordning. I detta fall kan små variationer i egenskaperna hos puts respektive underlag ändra förhållandena mycket kraftigt och någon entydig transportmekanism går inte att förutsäga.

En viktig konsekvens av ovanstående är att praktiskt taget all uttorkning (hos de undersökta materialkombinationerna) bör ske i "ångfas" genom putsen. Detta innebär i sin tur att vindhastigheten saknar praktisk betydelse under uttorkningen. Solstrålningen har däremot, på samma sätt som för enskilda material, en stor betydelse eftersom denna höjer väggtemperaturen och därmed ånghaltsskillnaden. Den principiella inverkan

av förhöjd temperatur är samma som enligt FIG. VI:4 med vindhastigheten noll. Uttorkningshastigheten blir dock väsentligt mindre, eftersom putsens ånggenomgångsmotstånd tillkommer. En ånggenomsläpplighet på $0.15 \cdot 10^{-3}$ m/s (K-puts) medför exempelvis att absolutbeloppen blir ca 1/20 av de i FIG. VI:4 angivna.

3 MÄTNING AV UTTORKNINGSFÖRLOPP

3.1 Allmänt

"Uttorkningsförmågan" är ingen renodlad materialegenskap utan beror på ett flertal materialegenskaper som diskuteras var för sig i delrapporterna III, IV och V. Det är alltså svårt eller omöjligt att göra en generell mätning för att få ett enda siffervärde på uttorkningsegenskaperna.

Mätningar av uttorkningsegenskaperna blir därför ofta en "praktisk" mätning med vars hjälp man kan bedöma vilka uttorkningsmekanismer som kan vara aktuella. Den enda egentliga materialegenskap man kan bestämma vid uttorkningsförsök på enskilda material är den kritiska fuktkvoten. Vid uttorkningsförsök på putsade prover kan i vissa fall även putsens ånggenomsläpplighet bestämmas. Görs en noggrann bestämning av fuktprofilen under uttorkningen kan även fuktflödeskoefficienter bestämmas.

Från samma försök kan man alltså, genom att utvärdera på olika sätt, erhålla helt olika information om materialen och uttorkningsförloppet. I det följande beskrivs det praktiska tillvägagångssättet vid uttorkningsförsök samt olika sätt att utvärdera resultatet.

3.2 Uttorkningsförsök

Uttorkningsförsök görs i allmänhet på prover som får torra genom en väldefinierad yta så att alla flöden sker i en riktning. Ett vanligt sätt är att alla ytor, utom uttorkningsytan, förseglas diffusionstätt enligt FIG. VI:5. Fuktinnehållet när uttorkningen startar kan variera. Vanligtvis är proverna antingen kapillär- eller vakuummättade.

Uttorkningsbetingelserna kan varieras inom vida gränser, exempelvis olika luftfuktighet, temperatur, vindhastighet samt med och utan solstrålning.

Under själva uttorkningen kan man mäta viktsändringen, vilket ger uttorkningshastigheten. En sådan mätning ger kurvor enligt FIG. VI:1. Dessa kurvor kan lätt omräknas till exempelvis uttorkningshastighet

som funktion av medelfukttinnehåll eller medelfukttinnehåll som funktion av tiden. Genom att anpassa försöksbetingelserna till praktiska förhållanden kan dessa kurvor ge erfarenhetsvärden på erforderliga uttorkningstider etc. Lund-Hansen (1967) redovisar ett antal sådana kurvor.

Bestäms även fuktprofilen under uttorkningen kan ytterligare information erhållas. Fukttransportmekanismerna under uttorkningen, flödeskoefficienter och det kritiska fukttinnehållet kan exempelvis bestämmas relativt väl. I samband med putsade prover kan även putsens ånggenomsläpplighet bestämmas vid olika fukttinnehåll i underlaget.

3.3 Kritiskt fukttinnehåll

Det kritiska fukttinnehållet är enligt tidigare avsnitt det fukttinnehåll då kapillärtransporten i praktiken upphör. Detta kritiska fukttinnehåll kan bestämmas genom enkla uttorkningsförsök på enskilda material. Så länge uttorkningen sker med mekanismen enligt fas 1 så är fukttinnehållet större än det kritiska i hela provet. Vid övergången mellan fas 1 och 2 är fukttinnehållet vid ytan, om uttorkningshastigheten är låg, lika med det kritiska. Genom att bestämma fuktkvoten vid ytan när uttorkningen övergår från fas 1 till fas 2 erhålles alltså den kritiska fuktkvoten. Om uttorkningshastigheten går mot noll så går även fuktgradienten inom provet mot noll. Hela provets fuktkvot blir då lika med den kritiska fuktkvoten. Vid den praktiska mätningen görs ett flertal uttorkningsförsök med olika uttorkningshastigheter. Erhållna uttorkningskurvor inritas i samma diagram enligt FIG. VI:6. Knickpunkterna mellan 1:a och 2:a fasen sammanbindes och extrapoleras till uttorkningshastigheten noll. Skärningspunkten med abscissan, vilket motsvarar knickpunkten vid uttorkningshastigheten noll, ger den kritiska fuktkvoten.

Den kritiska fuktkvoten kan även bestämmas genom ett "fuktutjämningsförsök". Härvid får en från början torr provkropp suga vatten kapillärt till en viss höjd varefter sugningen avbrytes och provkroppen förseglas diffusionstät. Efterhand kommer fukttinnehållet att utjämnas enligt FIG. VI:7. När den kritiska fuktkvoten nåtts upphör kapillärtransporten och en fortsatt utjämnning måste ske i ångfas. När den "torra" delen inte kan absorbera mer vatten genom kapillärkondensation så upphör omfördelningen helt. Den kritiska fuktkvoten fås alltså genom att bestämma

fuktkvoten i den våta delen efter "lång tids utjämning". I FIG. VI:8 redovisas några exempel på fuktkvotsändringen i den våta delen enligt mätningar av Schwarz & Künzel (1974). För material som absorberar mycket vatten hygroskopiskt, kan mätningen bli osäker med hänsyn till omlagringen i ångfas. Genom att anpassa den tillförda vattenmängden till förväntade fukttillstånd kan dock noggrannheten bli acceptabel. Den tillförda vattenmängden måste vara stor nog för att den torra delen skall kunna absorbera vatten i ångfas utan att fuktkvoten i den våta delen sjunker under den kritiska. Å andra sidan får vattenmängden inte vara större än att den torra delen kan absorbera överskottsvattnet.

3.4 Fuktgenomsläpplighet hos puts/ytskikt

Vid uttorkningsförsök på putsade prover kan putsens fuktgenomsläpplighetsegenskaper bestämmas i detalj. En jämförelse mellan putsad och oputsad provkropp, som får torka från samma startfuktinnehåll, visar direkt om putsen kan suga vatten kapillärt till ytan. Om detta inte är fallet kan man bestämma ånggenomsläppligheten hos putsen genom att referera uttorkningshastigheten till ånghaltsskillnaden över putsen. Detta förutsätter att ånghalten mäts under putsen. Alternativt kan fuktkvoten mätas, varefter ånghalten erhålles via en jämviktsfuktkurva. Vid höga RF-nivåer i underlaget, 98-100%, kan putsens ånggenomsläpplighet variera kraftigt enligt delrapport IV. Anledningen till detta är främst att fukttransporten delvis sker i vätskefas. Om ånggenomsläppligheten beräknas med antagandet att RF under putsen är 100%, vilket är rimligt vid höga fuktinnehåll i underlaget, så kommer ånggenomsläppligheten hos putsen att variera med fuktkvoten i underlaget. Ju mer ånggenomsläppligheten varierar med fuktkvoten, desto större betydelse har kapillärtransporten i putsen.

4 EGENA MÄTNINGAR

Uttorkningsförloppen har studerats för samtliga i undersökningen ingående materialkombinationer enligt delrapport I. Syftet med mätningarna har inte varit att bestämma några exakta materialdata, utan främst att studera putsernas principiella betydelse för uttorkning av olika underlag. Inverkan av varierande brukssammansättning, lagringsbetingelser och provkroppsålder har inte alls studerats. Samtliga mätningar, som redovisas här, avser uttorkning från kapillärmättat tillstånd. Materialdata för de olika materialen redovisas i delrapport I. Den exakta behandlingen av provkropparna vid själva provningen anges vid respektive resultatredovisning.

Två typer av mätningar har gjorts, vilka behandlas var för sig i det följande. Vid den ena mätningen har uttorkningshastigheten bestämts som funktion av tiden. Vid den andra mätningen har fuktprofilen bestämts vid olika tider. Dessa mätningar har gjorts under olika klimatbetingelser och är därför ej direkt jämförbara. Under mätning av uttorkningshastigheten har exempelvis inverkan av solstrålning och vindhastighet studerats intermittent under försökets gång i vissa fall.

4.1 Uttorkningshastighet

Uttorkningshastigheten har bestämts genom vägning av provkroppar som torkat enligt FIG. VI:5. Proverna fick innan uttorkningen kapillärsuga vatten till "mättnad" under 2-3 veckor. Sugningen skedde första veckan genom putsytan, andra veckan från baksidan och slutligen genom putsytan igen. Under sugtiden förhindrades uttorkning uppåt genom att en plastfolie placerades över proverna. Gasbetongunderlaget var 70 mm tjockt och tegelunderlaget 120 mm.

Klimatet under uttorkningen varierade och detaljredovisas i resultatdiagrammen. I huvudsak skedde uttorkningen vid 65% RF och 20°C. Vindhastigheten var antingen 0.1-0.2 m/s eller 2-3 m/s. Under en period ut-sattes även proverna för "solstrålning", som gav en yttemperatur på 35-40°C.

Den högre lufthastigheten erhöles med hjälp av en fläkt, som placerades så att luftströmmen gick parallellt med provytan. Lufthastighetens

medelvärde, uppmätt under en 2-minutersperiod, låg i intervallet 2,2-2,4 m/s. Lufthastighetens momentanvärde varierade enligt FIG. VI:9.

"Solstrålningen" erhöjls genom att putsytorna bestrålades med IR-lampor (5 st OSRAM THERATHERM, 250 w) enligt FIG. VI:10. Yttemperaturen kontrollerades med termoelement och värmekamera. Vid kalibreringen med värmekameran mättes temperaturfördelningen på en svart yta utan avdunstning, varför de uppmätta temperaturerna inte helt överensstämmer med de verkliga. I FIG. VI:11 redovisas den med värmekameran registrerade temperaturfördelningen över provytan. Temperaturens medelvärde, som mättes med termoelement på en grå yta (torr), var ca 37°C.

Vid uttorkningsförsökens start var putserna på tegelproverna 5 månader gamla medan gasbetongprovernas putser var ca 1 år. Spridningen mellan olika provkroppar med samma puts och underlag var i allmänhet liten, maximalt 10% avvikelse från medelvärdet.

I FIG. VI:12 redovisas uttorkad fuktmängd som funktion av tiden vid en mätning med gasbetongunderlag. Angivna värden avser enstaka provkroppar. Andra försök, med flera provkroppar av samma sort, har givit "samma" resultat. Vid dessa försök varierades dock inte solstrålning eller vindhastighet.

För prover med tegelunderlag studerades inte inverkan av solstrålning och vindhastighet. Resultaten från dessa mätningar, medelvärde av två provkroppar, redovisas i FIG. VI:13.

I FIG. VI:12-13 är även den ungefärliga medelfuktkvoten i underlaget angiven.

Anledningen till den stora skillnaden i uttorkningshastighet under det första dygnet för tegel och gasbetong är att förutsättningarna var olika. Uttorkningen hos gasbetongproverna påbörjades direkt efter kapillärsugning. Tegelproverna däremot tilläts i vissa fall torka några timmar innan mätningarna påbörjades.

4.2 Fuktprofil under uttorkning

Fuktprofilen har studerats genom uppsågning av torkande prover i 5-25 mm tjocka skivor, vars fuktkvot bestämts genom uttorkning i ugn vid 105°C. För putserna bestämdes enbart medelfuktkvoten i respektive puts-skikt. Tjockleken på de uppsågade skivorna var minst (5 mm) vid uttorkningsytan.

Innan uttorkningen påbörjades fick proverna suga vatten kapillärt till "mättnad". Sugningen skedde vid gasbetongproverna genom putsytan och vid tegelproverna genom teglet. Kapillärsugningen pågick under ca 3 veckor varefter tegelproverna direkt fick börja torka. Gasbetongproverna lagrades däremot under ca 3 veckor i diffusionstäta plastpåsar innan uttorkningen påbörjades.

Under uttorkningstiden var proverna förseglade enligt FIG. VI:5 och uttorkningen skedde i 43% RF och 20°C. Lufthastigheten framför putsytorna var 0,1-0,2 m/s. Proverna var vid uttorkningens början ca 4 månader gamla.

Fuktprofilen bestämdes vid olika tider enligt resultatfigurerna. Vid uppsågningen av provkropparna försvinner en del vatten. Kalibreringsförsök har visat att dessa mängder är relativt små, varför ingen hänsyn tagits till detta.

De uppmätta fuktkvoterna avser medelfuktkvoten i respektive skikt. Den exakta fuktfördelningen inom respektive skikt är sålunda okänd. I resultatredovisningen har fuktprofilerna ritats med kontinuerliga kurvor utan språng. Detta motiveras med fördelen att figurerna på så vis blir överskådligare. Kurvorna har ritats så att "den integrerade fuktkvoten" i de olika skikten överensstämmer med medelfuktkvoten. Denna metod medför en viss osäkerhet vid kraftiga gradienter. I aktuellt fall är gradienterna emellertid små, varför "felet" blir obetydligt. Med hänsyn till överskådligheten har inte heller enskilda mätvärden markerats utan kurvorna har "utjämnats". Spridningen hos enskilda mätvärden var maximalt ca ± 5% av angivna absolutbelopp.

Resultaten redovisas i FIG. VI:14-20.

På grund av att fuktkvoterna efter kapillärsugningen inte blir exakt samma i de olika provkropparna är absolutbeloppen inte helt jämförbara. För att till en del eliminera inverkan av olika startfuktkvoter, har absolutbeloppen vid de korta uttorkningstiderna (mindre än 15 dygn) justerats med hänsyn till den verkligt uttorkade vattenmängden, vilken mättes på varje enskild provkropp. De fuktkvoter som markerats vid tiden 0 är alltid de uppmätta. Den maximala korrigeringen har varit 0,5 vikts-% för tegel och 5 vikts-% för gasbetong. Vid tider större än 15 dygn har ingen justering gjorts. Fuktkvoterna i putsen har inte justerats. Justeringarna har enbart gjorts inom samma materialkombination. Någon korrigerings till samma startfuktkvot för olika materialkombinationer har således inte gjorts.

Ovanstående korrigerings och utjämnings är ur strikt vetenskaplig redovisningssynpunkt tveksamma. En viss gradient måste exempelvis finnas för att någon uttorkning överhuvudtaget skall ske. Spridningen inom materialen är emellertid större än denna gradient. Med hänsyn till denna relativt stora spridning (vid höga fukttinnehåll) torde därför använt redovisningsätt vara det mest praktiskt lämpade.

5 DISKUSSION AV RESULTATEN

5.1 Allmänt

Undersökningarna har entydigt visat att alla provade kombinationer puts/ytskikt och underlag torkar väsentligt långsammare än de enskilda underlagen. För de enskilda underlagen sker en stor del av uttorkningen genom att vatten sugts fram till ytan där avdunstningen sker med samma hastighet som från en fri vattenyta. Uttorkningen av de putsade materialen sker däremot i ångfas genom putsen. Detta innebär bland annat att resultaten från ER-nämndens våtmetod inte är användbara i samband med uttorkningsberäkningar. En annan konsekvens är att vindhastigheten saknar praktisk betydelse vid uttorkningen. Solstrålningen har däremot en stor betydelse. Se vidare i avsnitt 5.2 och 5.3.

I avsnitt 5.4 visas att praktiskt taget hela uttorkningsförloppet går att beskriva som en ångtransport genom putsen. Överensstämmelsen mellan de ånggenomsläpplighetskoefficienter som kan beräknas vid uttorkningsförsöken och de som bestämts i delrapport IV är god.

I avsnitt 5.4 jämförs även uttorkningshastigheten hos olika kombinationer av puts/ytskikt och underlag. Härvid framgår att skillnaden mellan olika putser/ytskikt är väsentligt mindre än enligt "gångse uppfattning". Anledningen till detta är främst att mekanismen vid uttorkningen felbedömts tidigare. Detta har i sin tur medfört felaktiga provningsmetoder etc.

5.2 Uttorkningsmekanismen

FIG. VI:12-13 visar klart att uttorkningen av underlaget inte i något fall med puts eller ytskikt sker enligt den mekanism, som gäller under första uttorkningsfasen för enskilda material. För tjockputser gäller denna mekanism enbart under den tid då själva putsen torkar. Häfter avtar uttorkningshastigheten mycket kraftigt. Under den korta tid då putsen torkar, sjunker fukttinnehållet i putsen snabbt till en nivå understigande den kritiska. När fukttinnehållet nått denna nivå övergår uttorkningen till att ske i ångfas. Detta är fallet även vid mycket höga fukttinnehåll i underlaget. Hur fuktkvoten i putsen varierar med tiden under uttorkningen framgår av FIG. VI:21, som är uppritad med hjälp av FIG. VI:15-20.

De fuktkvoter som redovisas i FIG. VI:21 är medelfuktkvoter för hela puts-skiktet. Det verkliga fukttinnehållet i puts-skiktet är inte jämnt fördelat utan är högre i gränsen mot underlaget. Här motsvarar fukttinnehållet jämvikt med 100% RF. Vid ytan motsvarar däremot fukttinnehållet jämvikt med 43% RF. Någon exakt fördelning går inte att beräkna eftersom ånggenomsläpplighetskoefficienten varierar (på ett okänt sätt) med fuktkvoten. Medelfuktkvoten bör dock ligga i närheten av det aritmetiska medelvärdet av jämviktsfuktkvoterna vid 100 och 43% RF. Detta medelvärde går inte att beräkna eftersom jämviktsfuktkvoten vid 100% inte är känd. I FIG. VI:21 är däremot medelvärdet av jämviktsfuktkvoterna vid 95 och 43% RF, beräknat från jämviktsfuktkurvorna i delrapport III, angivet. Som synes närmar sig de mätta medelfuktkvoterna snabbt ett värde strax över detta beräknade medelvärde. Detta visar att putsens fukttinnehåll snabbt når det "hygroskopiska" området, varefter uttorkningen i huvudsak måste ske i ångfas genom putsen.

För de kombinationer av puts och underlag som studerats gäller alltså att uttorkningen börjar med att själva putsen torkar snabbt. Härvid sjunker fukttinnehållet i putsen under det kritiska, varefter uttorkningen sker i ångfas genom putsen. Detta överensstämmer helt med de teoretiska resonemangen i avsnitt 2.2 och gäller även vid mycket höga fukttinnehåll i underlaget.

Den långsamma uttorkningen medför även, enligt FIG: VI:15-20, att några kraftiga fuktgradienter inte bildas i underlaget.

5.3 Inverkan av uttorkningsklimat

Enligt föregående avsnitt sker uttorkningen i huvudsak i ångfas genom putsen. Detta innebär enligt avsnitt 2.2 att uttorkningshastigheten enbart påverkas av anhaltsskillnaden och putsens ånggenomsläpplighet. Vindhastigheten, som enbart påverkar ångövergångstalet vid ytan, saknar praktisk betydelse. Anhaltsskillnaden över putsen påverkas i mycket hög grad av temperaturen, varför även solstrålning och väggens värmeisoleringssegenskaper får stor betydelse.

Att vindhastigheten saknar praktisk betydelse framgår klart av FIG. VI:12. En ökning av vindhastigheten från 0,1-0,2 m/s till 2,3 m/s gav ingen märkbar skillnad i uttorkningsförloppet. Vid uttorkning från ytan skulle uttorkningshastigheten ha 3-4 dubblats.

Av FIG. VI:12 framgår även att solstrålningen har en stor betydelse. Ändringen i uttorkningshastighet i samband med strålningen beror helt på motsvarande ökning av ånghaltsskillnaden över putsen. Utan solstrålning är ånghaltsskillnaden $(17,3 - 0,65 \cdot 17,3) \cdot 10^{-3} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$. Med solstrålningen blir ytttemperaturen ca 37°C . Under putsen blir temperaturen något lägre, vilket dock saknar praktisk betydelse för denna jämförelse. Ånghaltsskillnaden blir sålunda $(43,9 - 0,65 \cdot 17,3) \cdot 10^{-3} = 33 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$. Ånghaltsskillnaden vid solstrålningen blir alltså 5-6 gånger större.

Uttorkningshastigheten enligt FIG. VI:12 ökar ca 4-5 gånger. Att uttorkningshastigheten ökar något mindre än ånghaltsskillnaden beror på att den höjda temperaturen medför att RF-nivån i putsen minskar, vilket medför en mindre ånggenomsläpplighet. Inverkan av denna reduktion av ånggenomsläppligheten är dock liten jämfört med inverkan av den ökande ånghaltsskillnaden.

5.4 Beräkning av putsens/ytskiktets ånggenomsläpplighet

Putsernas/ytskiktets ånggenomsläpplighet, beräknad enligt avsnitt 3.4 med antagandet att RF under putsen är 100%, redovisas i FIG. VI:22 som funktion av tiden. Anledningen till den avtagande ånggenomsläppligheten är att inverkan av kapillärsugning i putsen minskar med en avtagande fuktkvot i underlaget. Denna kapillärsugningsinverkan ingår dock även i den ånggenomsläpplighet som bestäms med skålmotoden enligt delrapport IV och kan beräkningsmässigt betraktas som ångtransport. Fuktkvoterna under putsen vid olika tider framgår av FIG. VI:15-20 för tjockputserna. För tunnputserna finns inga direkta mätningar. Dessa fuktkvoter kan dock uppskattas ur FIG. VI:15-20 genom att jämföra med en tjockputs med samma ånggenomsläpplighet.

Som synes varierar ånggenomsläppligheten olika för olika putser. Vissa putser har ingen variation alls medan hos andra putser ånggenomsläppligheten kan minska kraftigt med tiden. Av FIG. VI:22 framgår även att ånggenomsläppligheten blir olika, beroende på vilket underlag som använts. Här finns inget generellt samband utan i vissa fall är ånggenomsläppligheten bestämd på tegeprover större och i andra fall mindre. Dessa skillnader beror troligen på normal spridning i de olika putserna och på att underlaget påverkar putsegenskaperna.

Generellt kan man säga att skillnaden mellan olika putser är relativt liten. Förhållandet mellan ånggenomsläppligheten hos den mest och den minst genomsläppliga putsen är av storleksordningen 5. Motsvarande förhållande enligt ER-nämndens våtmetod blir av storleksordningen 100!

För praktiska beräkningar av uttorkningsförlopp bör ett värde bestämt vid 20-40 dygn vara ett lämpligt medelvärde. Den totala felmarginalen vid en sådan beräkning torde ligga inom $\pm 50\%$. Variationen inom en viss brukstyp, med hänsyn till varierande brukssammansättning, lagring etc, är troligen väsentligt större än dessa 50%. Några undersökningar av detta har dock inte gjorts. De i FIG. VI:22 redovisade värdena är därför inte några generella materialdata för olika putser, utan enbart preliminära riktvärden. Dessa värden stämmer väl med de ånggenomsläppligheter som bestämts med skålmetoden (65-100% RF) enligt delrapport IV.

5.5 Jämförelse mellan olika putser och underlag

Som framgår av FIG. VI:12-20 så är resultaten inte helt entydiga. FIG. VI:12-13 visar exempelvis att för vissa putser är uttorkningshastigheten störst på tegelunderlag och för andra på gasbetongunderlag. Vidare finns i vissa fall skillnader om man jämför en viss puts på ett visst underlag enligt resultaten i FIG. VI:12-13 med resultaten enligt FIG. VI:15-20. I allmänhet ligger skillnaden inom $\pm(10-20)\%$ men i vissa fall kan skillnaden uppgå till ca 50%.

Någon analys av anledningen till ovanstående har inte gjorts. Detta skulle nämligen kräva ett betydligt större antal provningar etc. Med hänsyn till att syftet med undersökningen inte är att bestämma några exakta materialdata har några sådana kompletterande provningar inte gjorts.

Troliga orsaker till erhållna avvikelser är bl a varierande egenskaper hos underlag och puts. Varierande egenskaper hos putsen kan bero på olika brukssammansättning, härdning och ålder. Även underlagets egenskaper kan i hög grad påverka putsegenskaperna exempelvis genom varierande sugning vid putsningen. Ej helt perfekt vidhäftning bör även påverka förhållandena i mycket hög grad.

Skillnaderna mellan å ena sidan FIG. VI:12-13 och å andra sidan FIG. VI:14-20 kan även bero på att klimatförutsättningarna inte är lika. Skillnaden i absolutbeloppen beror självklart på detta. Även vissa andra skillnader mellan ovanstående figurer kan bero på klimatskillnader. Enligt FIG. VI:13 torkar kalk- och kalkcementputsen ungefär lika fort. Enligt FIG. VI:15-16 torkar däremot kalkputsen väsentligt fortare. Detta kan bero på att vid uttorkningen i 65% RF (FIG. VI:13) så sker en viss kapillärsugning i KC-putsen. Vid uttorkningen i 43% (FIG. VI:15-16) så sker uttorkningen snabbare med följd att kapillärsugningen delvis upphör. Ångtransportens andel i uttorkningen ökar alltså med följd att uttorkningshastigheten minskar. För kalkputsen sker däremot uttorkningen i båda fallen i ångfas. (Jämför även ånggenomsläpplighetens fuktberoende enligt delrapport IV.)

Skillnaden mellan 65 och 43% RF är i sig för liten att ge ovanstående skillnader. Enligt delrapport IV är det ju främst vid höga fukttillstånd, 90-100% RF, som ånggenomsläppligheten varierar kraftigt. Den relativt måttliga ändringen av RF-nivån vid ytan medför dock även en måttlig ändring av RF-nivån längre in i putsen. En liten ändring av RF-nivån längre in i putsen, vid en hög RF-nivå, kan då medföra en mycket stor ändring av fukttransportförmågan.

LITTERATUR

ER-nämnden, 1968, Provningsmetoder för ytskiktmaterial för putsat och oputsat murverk, likvärdiga underlag samt betong. ER-nämndens rapport nr 3:68. Stockholm.

Van der Held, 1941, Diffusionserscheinungen in Verbindung mit der Trocknung von Werkstoffen. Gesundheits-Ingenieur, 64. Jahrgang, Heft 15.

Key, R B, 1972, Drying - principles and practice. Pergamon press.

Krischer, O, 1963, Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Springer-Verlag.

Künzel, H, 1964, Untersuchungen über die Feuchtigkeitsverhältnisse in häufig berechneten Aussenwänden. Gesundheits-Ingenieur 85. Jahrgang, Heft 9.

Lund-Hansen, P, 1967, Udtørring av porøse materialer. Byggmästaren 5, 1967.

Schwarz, B & Künzel, H, 1974, Der kritische Feuchtigkeitsgehalt von Baustoffen. Gesundheits-Ingenieur, 95 Jahrgang, Heft 9.

Varnbo, B, 1972, Utvecklingstendenser på fasadputsområdet. Lättbetong 1/72.

TAB. VI:1. Jämförelse av fuktflöde med olika transportmekanismer.

		C-puts	KC-puts
KAPILLÄRSUGNING			
Putsens totala motstånd	($\cdot 10^9$ Ns/kg)	500	20
Flöde vid tryckskillnaden $0,1 \cdot 10^4$ N/m ²	($\cdot 10^{-6}$ kg/m ² ·s)	0,002	0,5
Flöde vid tryckskillnaden $1,0 \cdot 10^4$ N/m ²	($\cdot 10^{-6}$ kg/m ² ·s)	0,02	5,0
ÅNGTRANSPORT			
Putsens ånggenomsläpplighet	($\cdot 10^{-3}$ m/s)	0,07	0,15
Flöde vid ångtransport genom putsen	($\cdot 10^{-6}$ kg/m ² ·s)	0,7	1,5
Maximal avdunstning från ytan	($\cdot 10^{-6}$ kg/m ² ·s)	150	150

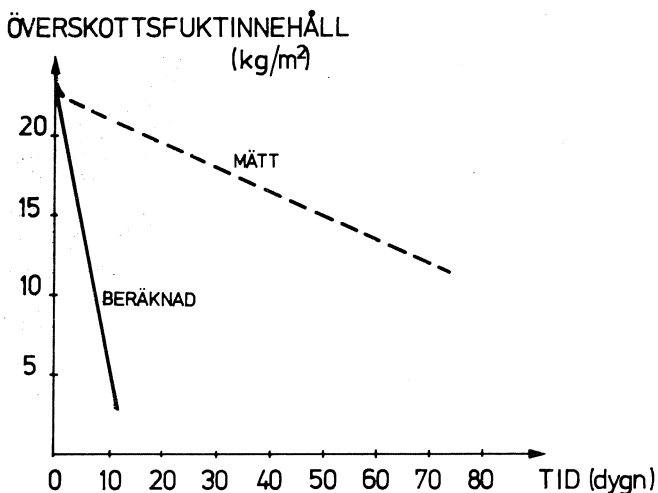


FIG. VI:1. Beräknad (med utgångspunkt från resultat enligt ER-nämndens våtmetod) och mätt uttorkning efter ett mycket kraftigt slagregn. KC-puts och grundning på gasbetong.

Calculated (with the results of the wet-method of the ER-Comission) and measured drying out after a very heavy driving rain. Spatterdash and LC-rendering on aerated concrete.

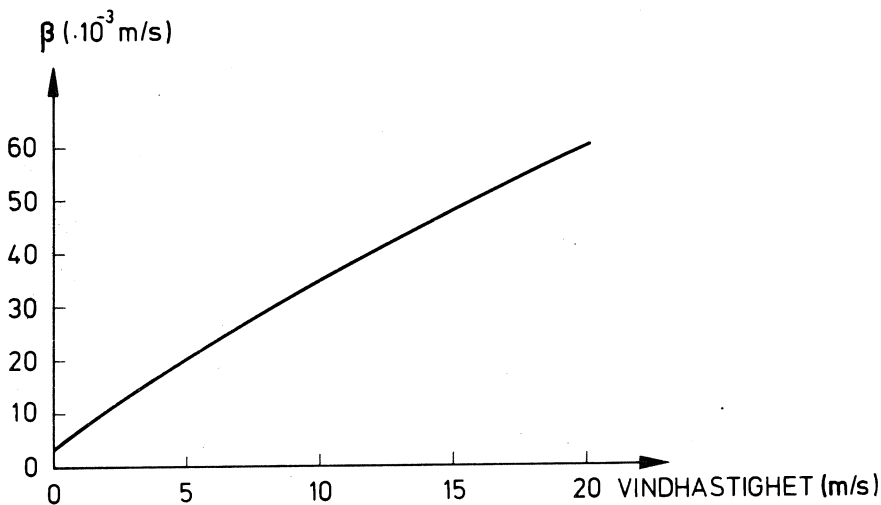


FIG. VI:2. Samband mellan ångövergångskoefficient och vindhastighet enligt van der Held (1941).

Relationship between surface coefficient of mass transfer and wind velocity according to van der Held (1941).

UTTORKNINGS- HASTIGHET

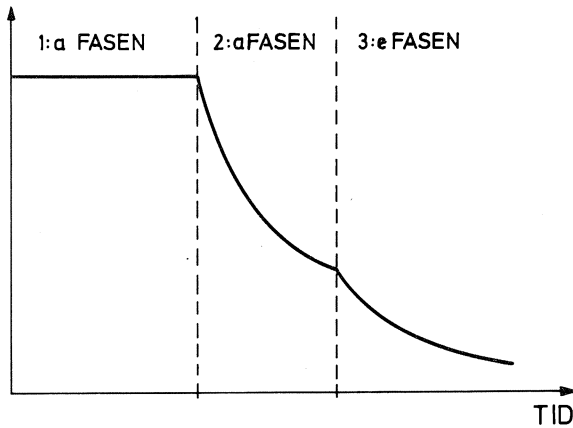


FIG. VI:3. Principiell indelning i olika faser av uttorkningsförloppet.
Different phases during drying out.

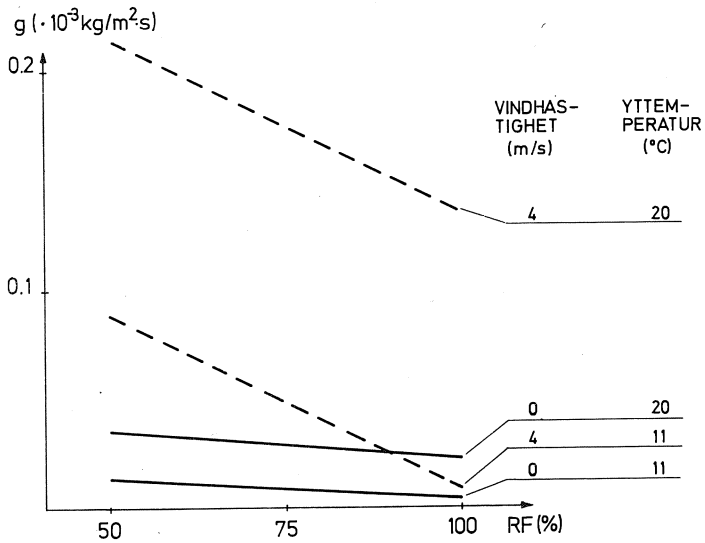


FIG. VI:4. Uttorkningshastighetens beroende av lufthastighet och yttemperatur under fas 1. Lufttemperatur 10 °C.

Velocity of drying out as function of wind velocity and surface temperature during phase 1. Air temperature 10 °C.

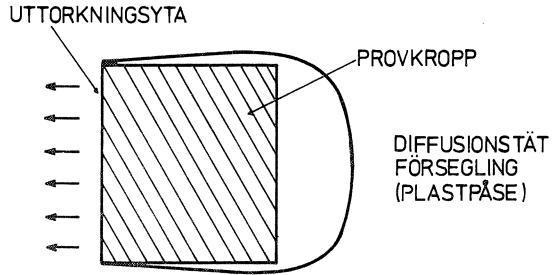


FIG. VI:5. Princip vid uttorkningsförsök.
Drying out test.

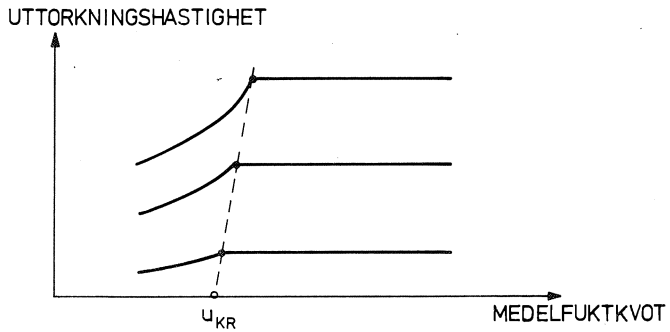


FIG. VI:6. Bestämning av kritisk fuktkvot vid uttorkningsförsök.
Determination of critical moisture content at a drying out test.

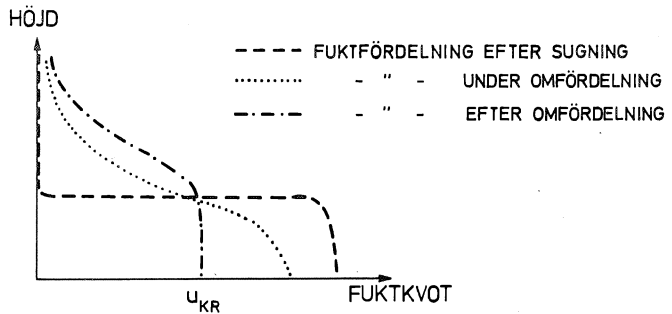


FIG. VI:7. Omfördelning av fukttinnehåll efter kapillärsugning.
Redistribution of moisture content after capillary water intake.

FUKTKVOT (vikt-%)

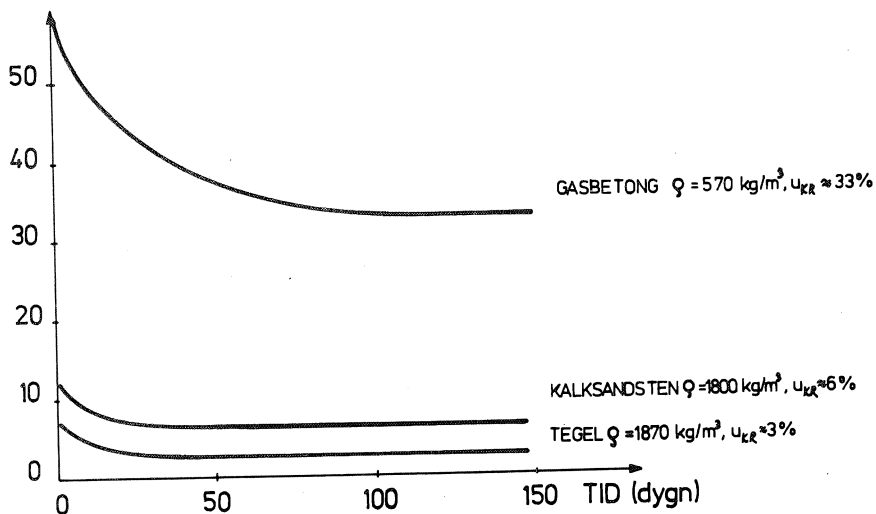


FIG. VI:8. Bestämning av den kritiska fuktkvoten enligt Schwarz & Künzel (1974).

Determination of critical moisture content according to Schwarz & Künzel (1974).

Lufthastighet (m/s)

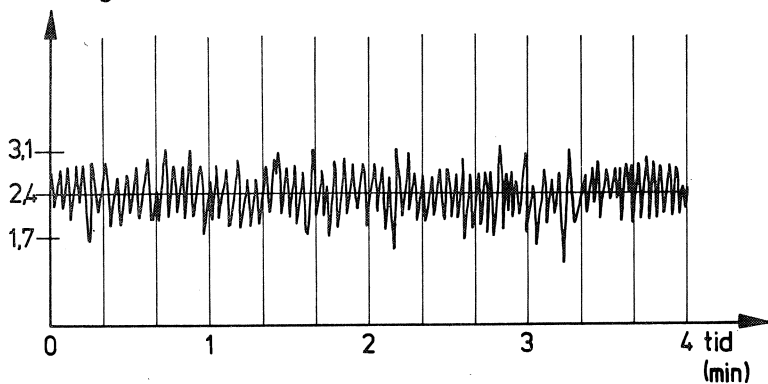


FIG. VI:9. Lufthastighetens momentanvärde (m/s) under en 4-minutersperiod.

Momentary value of wind velocity (m/s) during a 4-minuters period.

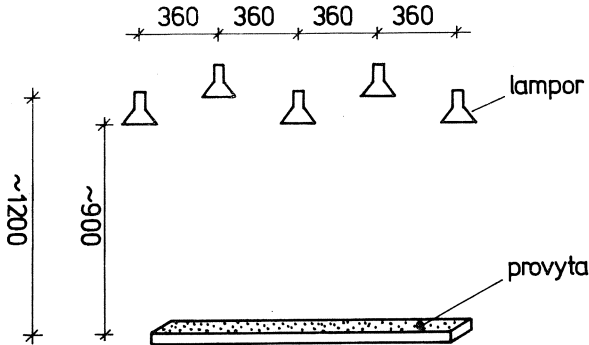


FIG. VI:10. Plan över lampuppställning vid strålningsförsök.
Arrangement of lamps at radiation tests.

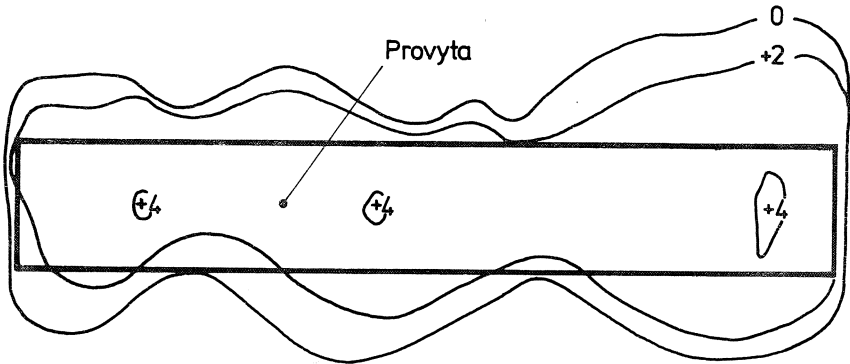


FIG. VI:11. Temperaturvariationer över provytan. Angivna temperaturskillnader i förhållande till yttersta isotermen.

Variation of temperature over the test area. Temperature differences are given in relation to the outer isotherm.

- | | |
|------------------------------|--------------------------------------|
| 1 = utan puts | 6 = organisk tunnputs |
| 2 = KC-C 100/650 | 7 = KC-C 100/650 + organisk tunnputs |
| 3 = K 100/800 | 9 = organisk tunnputs |
| 4 = C 100/425 | 11 = trad. 3-skiktputs |
| 5 = grundning + KC-C 100/650 | 14 = M-A 100/600 |

UTTORKAD VATTENMÄNGD
(kg/m²)

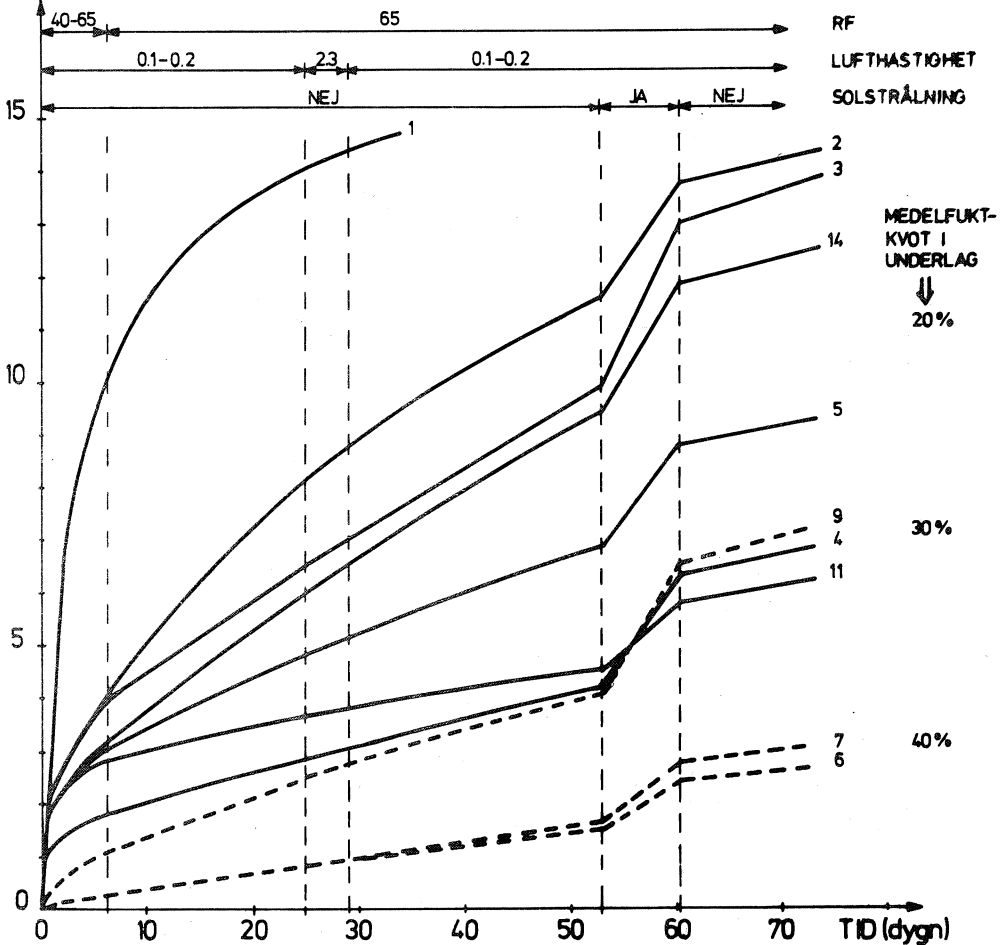


FIG. VI:12. Resultat från uttorkningsförsök med gasbetongunderlag.

Results from drying out tests with aerated concrete as underlayer.

- | | |
|------------------------------|------------------------|
| 1 = utan puts | 6 = organisk tunnputs |
| 2 = KC-C 100/650 | 9 = organisk tunnputs |
| 3 = K 100/800 | 11 = trad. 3-skittputs |
| 4 = C 100/425 | 14 = M-A 100/600 |
| 5 = grundning + KC-C 100/650 | |

UTTORKAD VATTENMÄNGD
(kg/m²)

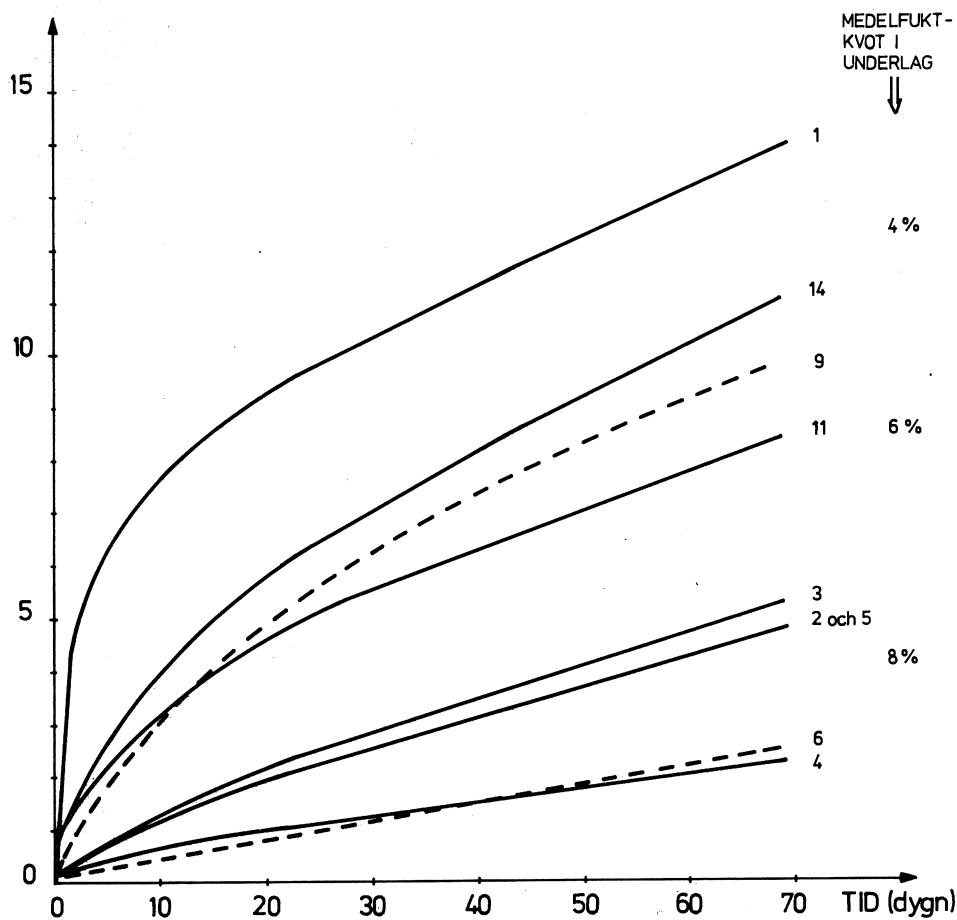


FIG. VI:13. Resultat från uttorkningsförsök med tegelunderlag. Uttorkningsklimat 20 °C, 65% RF, utan solstrålning och med vindhastighet 0.1-0.2 m/s.
Results from drying out tests with clay brick as underlayer. 20 °C, 65% RH, no sun radiation and wind velocity 0.1-0.2 m/s.

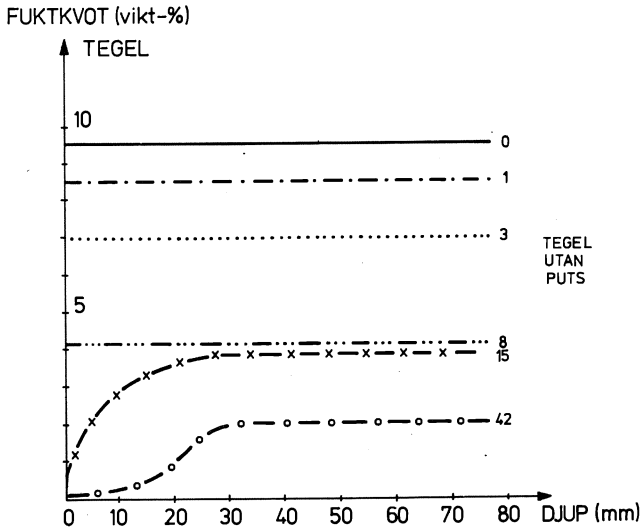


FIG. VI:14. Fuktprofil under uttorkning från kapillärmättad. Siffrorna vid kurvorna anger uttorkningstid i dygn. Uttorkningsklimat 20 °C, 43% RF och lufthastighet 0.1-0.2 m/s.

Moisture profile during drying out. The figures at the curves show drying time in hours. Drying climate: 20°C, 43% RH and wind velocity 0.1-0.2 m/s. Clay brick without rendering.

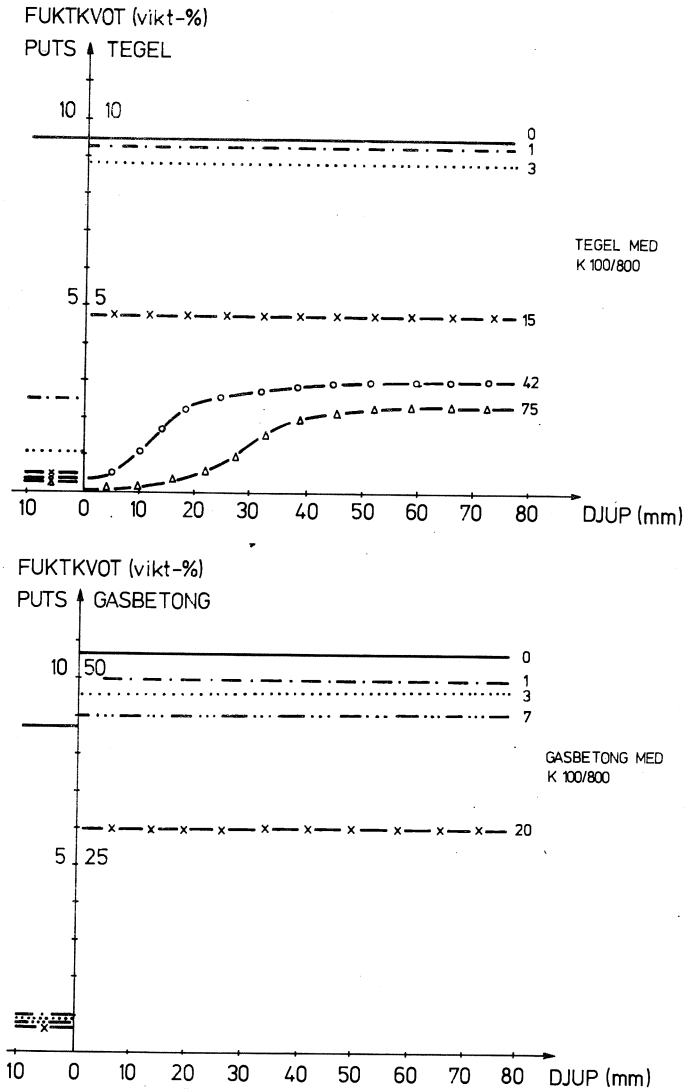


FIG. VI:15. Fuktprofil under uttorkning från kapillärmättnad. Siffrorna vid kurvorna anger uttorkningstid i dygn. Uttorkningsklimat 20 °C, 43% RF och lufthastighet 0.1-0.2 m/s.

Moisture profile during drying out. The figures at the curves show drying time in hours. Drying climate: 20°C, 43% RH and wind velocity 0.1-0.2 m/s. Clay brick (upper) and aerated concrete (bottom) with L-rendering.

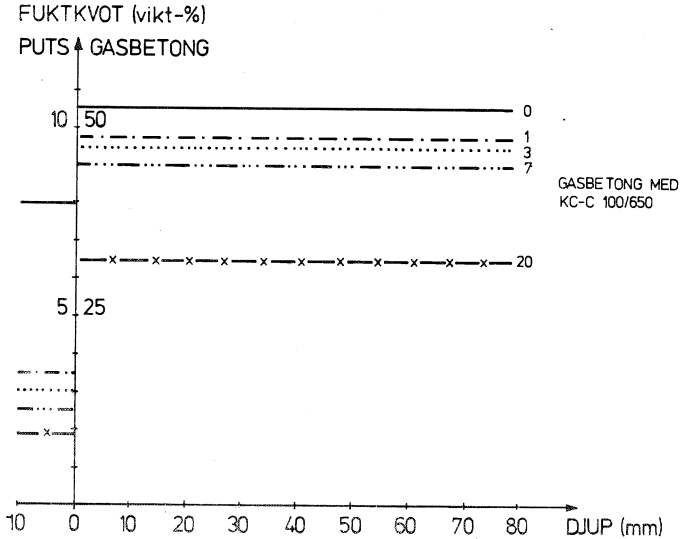
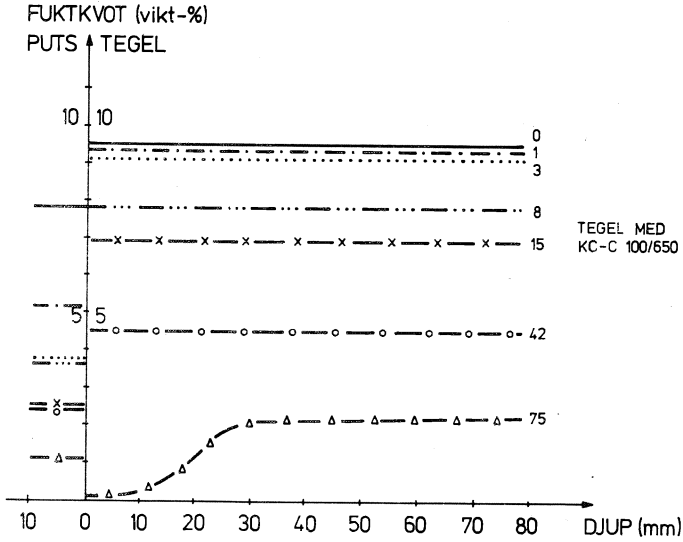


FIG. VI:16. Fuktprofil under uttorkning från kapillärmättnad. Siffrorna vid kurvorna anger uttorkningstid i dygn. Uttorkningsklimat 20 °C, 43% RF och lufthastighet 0.1-0.2 m/s.

Moisture profile during drying out. The figures at the curves show drying time in hours. Drying climate: 20°C, 43% RH and wind velocity 0.1-0.2 m/s. Clay brick (upper) and aerated concrete (bottom) with LC-rendering.

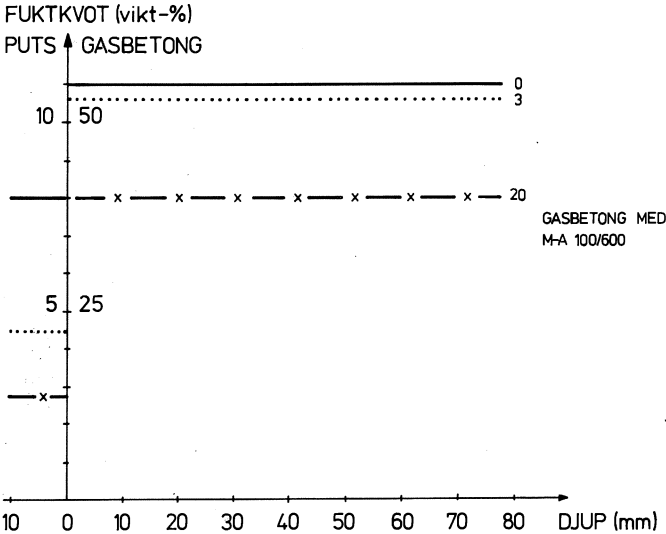
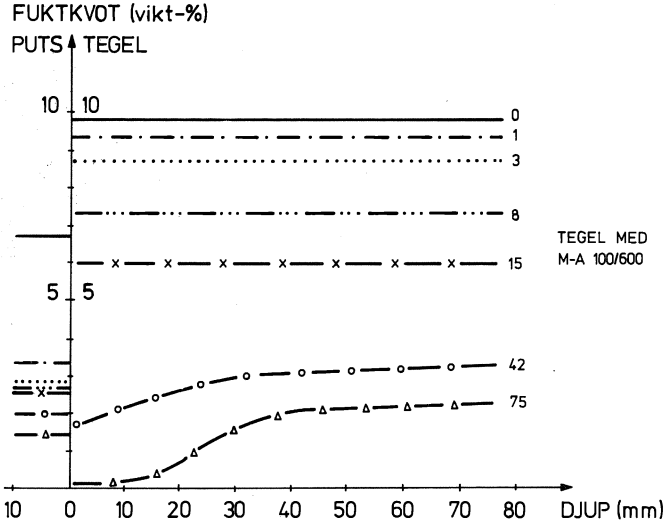


FIG. VI:17. Fuktprofil under uttorkning från kapillärmättnad. Siffrorna vid kurvorna anger uttorkningstid i dygn. Uttorkningsklimat 20 °C, 43% RF och lufthastighet 0.1-0.2 m/s.

Moisture profile during drying out. The figures at the curves show drying time in hours. Drying climate: 20°C, 43% RH and wind velocity 0.1-0.2 m/s. Clay brick (upper) and aerated concrete (bottom) with M-rendering.

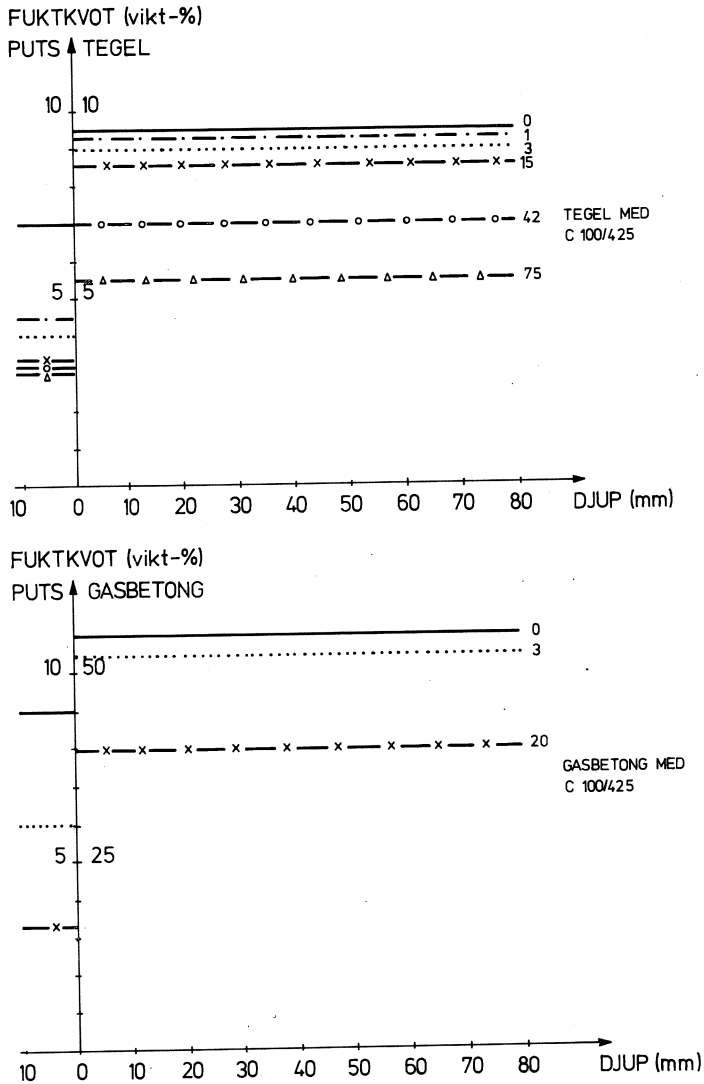


FIG. VI:18. Fuktprofil under uttorkning från kapillärmättnad. Siffrorna vid kurvorna anger uttorkningstid i dygn. Uttorkningsklimat 20 °C, 43% RF och lufthastighet 0.1-0.2 m/s.

Moisture profile during drying out. The figures at the curves show drying time in hours. Drying climate: 20°C, 43% RH and wind velocity 0.1-0.2 m/s. Clay brick (upper) and aerated concrete (bottom) with C-rendering.

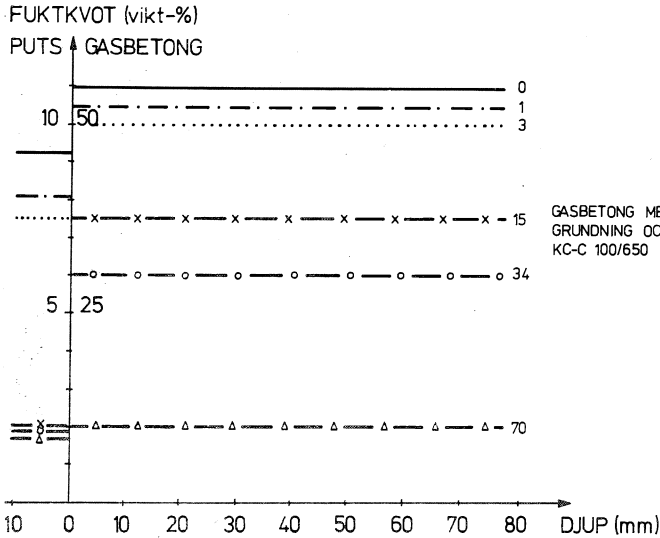
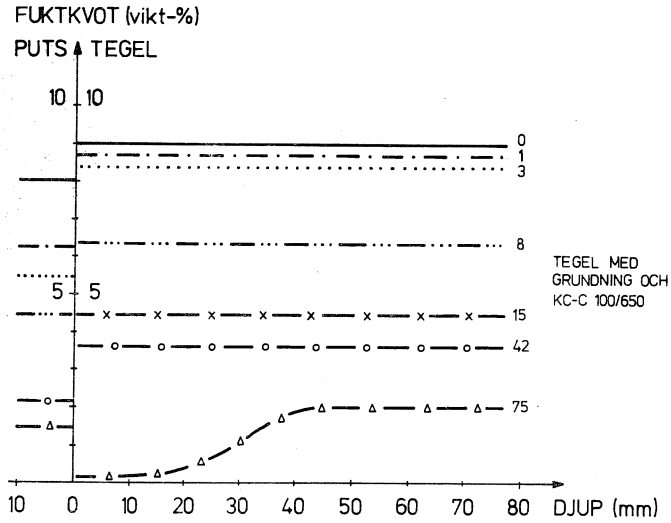


FIG. VI:19. Fuktprofil under uttorkning från kapillärmättnad. Siffrorna vid kurvorna anger uttorkningstid i dygn. Uttorkningsklimat 20 °C, 43% RF och lufthastighet 0.1-0.2 m/s.

Moisture profile during drying out. The figures at the curves show drying time in hours. Drying climate: 20°C, 43% RH and wind velocity 0.1-0.2 m/s. Clay brick (upper) and aerated concrete (bottom) with spatterdash and LC-rendering.

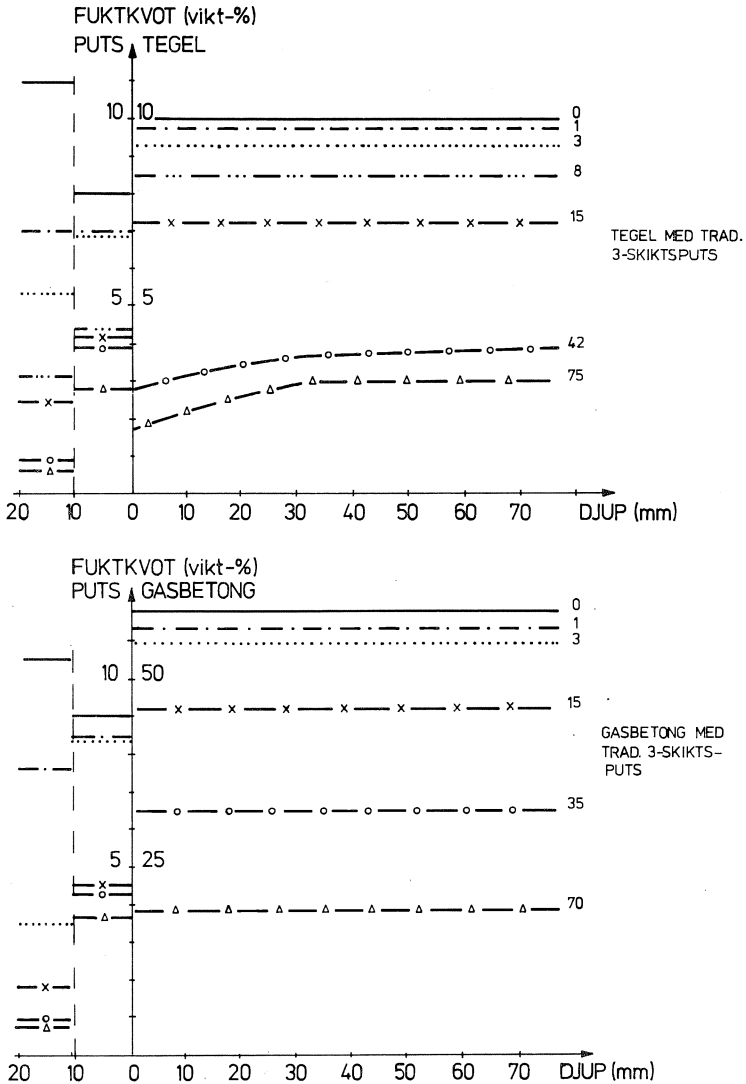


FIG. VI:20. Fuktprofil under uttorkning från kapillärmättnad. Siffrorna vid kurvorna anger uttorkningstid i dygn. Uttorkningsklimat 20 °C, 43% RF och lufthastighet 0.1-0.2 m/s.

Moisture profile during drying out. The figures at the curves show drying time in hours. Drying climate: 20°C, 43% RH and wind velocity 0.1-0.2 m/s. Clay brick (upper) and aerated concrete (bottom) with a traditional 3-layer thick LC-rendering.

FUKTKVOT (vikt-%)

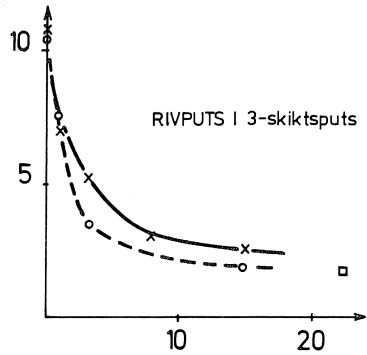
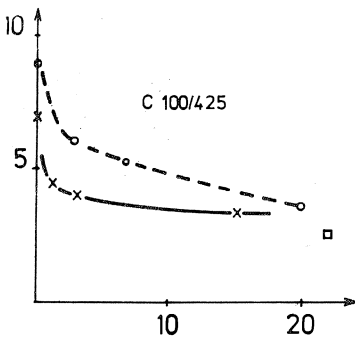
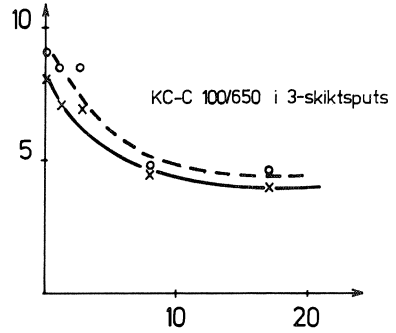
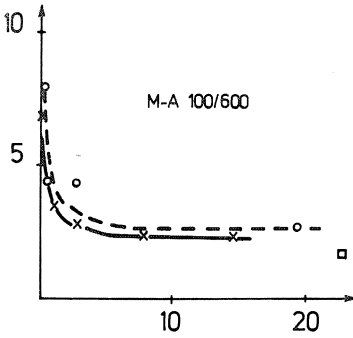
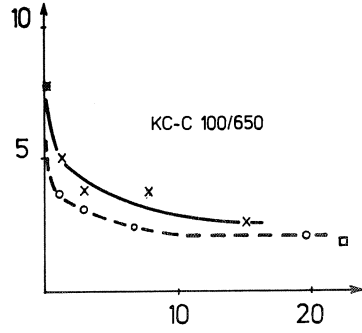
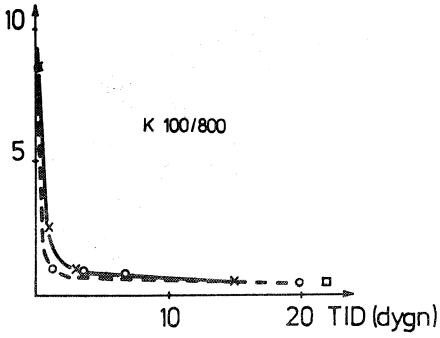


FIG. VI:21. Fuktkvot i puts under uttorkning.

Moisture content in the rendering during drying out.

o---o = Gasbetongunderlag

Aerated concrete

x---x = Tegelunderlag

Clay brick

□ = Jämviktsfuktkvot enligt texten Equilibrium moisture content

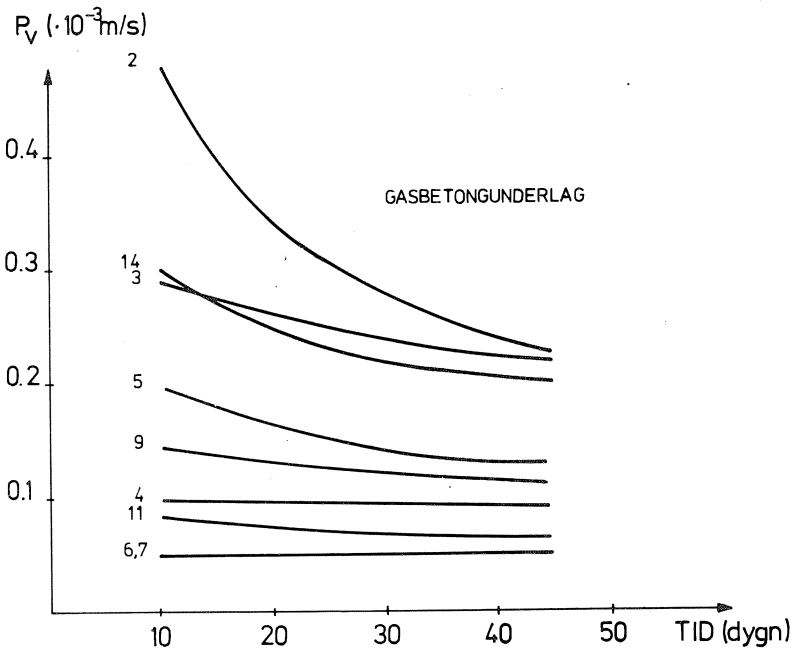
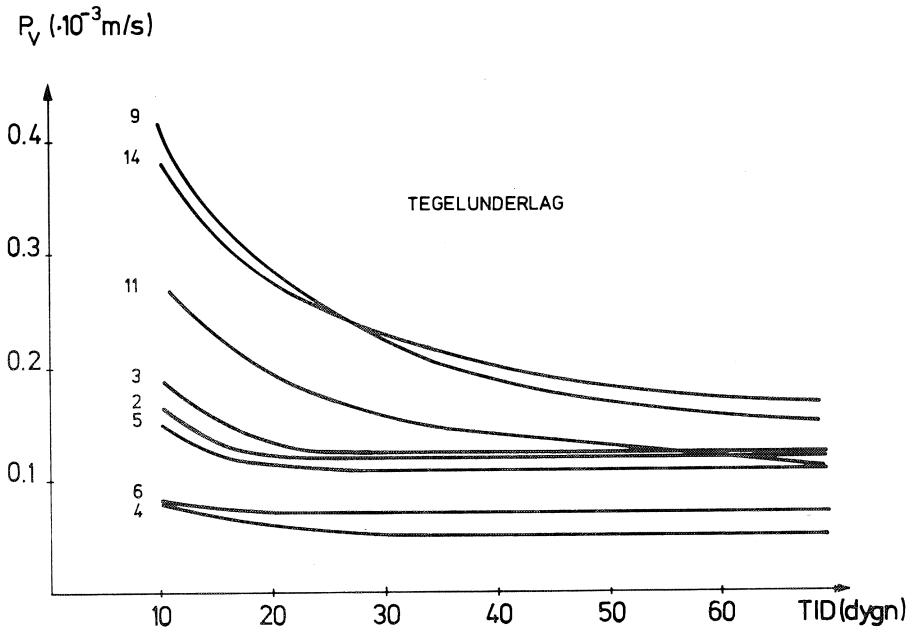


FIG. VI:22. Beräknad ånggenomsläpplighet för olika putser på olika underlag. Litterering enligt FIG. VI:12-13.

Calculated vapour permeability of different renderings on clay brick (upper) and on aerated concrete (bottom).

Avdelningen för Byggnadsmateriallära
Tekniska Högskolan i Lund

PUTSENS INVERKAN PÅ FASADENS FUKTBALANS

Delrapport VII: FUKTMEKANIK I SAMBAND MED SLAGREGN

Lund i mars 1980

Kenneth Sandin

Denna delrapport hänför sig till forskningsanslag 740269-8 från Statens Råd för Byggnadsforskning till avdelningen för Byggnadsmateriallära, Tekniska Högskolan i Lund. Hela projektet slutredovisas i en huvudrapport och åtta delrapporter.

INNEHÅLL

1	INLEDNING	VII:2
2	TEORI	VII:3
2.1	Utan respektive med öskadad puts/ytskikt	VII:3
2.2	Skador i ett relativt lätt ytskikt	VII:13
2.3	Inverkan av olika klimat	VII:14
2.4	Inverkan av väggens konstruktion	VII:16
3	MÄTNING AV SLAGREGNETS INVERKAN PÅ FUKTTILLSTANDET	VII:17
3.1	Materialegenskaper	VII:17
3.2	Fukttillståndsmätningar vid laboratorieförsök	VII:18
4	EGNA MÄTNINGAR	VII:19
4.1	Slagregnsapparat	VII:19
4.2	Elektrisk fuktmetod	VII:22
4.3	Fuktprofil under och efter ett regn, manuell mätmetod	VII:27
4.4	Fuktprofil under och efter ett regn, elektrisk mätmetod	VII:28
4.5	Medelfukttinnehåll under och efter ett regn	VII:31
4.6	Medelfukttinnehåll vid cykliskt återkommande regn	VII:31
5	DISKUSSION AV RESULTATEN	VII:34
5.1	Allmänt	VII:34
5.2	Egenskaper hos puts och underlag	VII:34
5.3	Olika putser	VII:36
5.4	Klimatets inverkan	VII:37
5.5	Avvikande resultat	VII:40
	LITTERATUR	VII:43
	TABELLER	VII:45
	FIGURER	VII:47

1 INLEDNING

I delrapporterna III - VI har olika renodlade fuktmekanismer behandlats var för sig. Vid en analys av hur slagregn påverkar en väggs fuktbalans måste hänsyn tas till alla dessa mekanismer samtidigt. Vid flera på varandra följande slagregn, med en viss uttorkning mellan regnen, kommer exempelvis fukttransportmekanismerna ständigt att variera. Totalförloppet blir mycket komplicerat och en fullständig beräkning kräver relativt omfattande datorprogram. (Olanders & Sandin, 1980)

Vid bedömningar av olika faktorerers inverkan, är det ofta nödvändigt att känna till den fysikaliska bakgrunden till det fuktmekaniska händelseförloppet. I föreliggande delrapport diskuteras först, med utgångspunkt från teori och mätresultat i delrapporterna III-VI, det fuktmekaniska händelseförloppet ur teoretisk synvinkel för fallet med slagregn. De mycket enkla modeller som används härvid, är inte avsedda för några exakta beräkningar utan syftar enbart till att ge den fysikaliska bakgrunden i stort samt till att utgöra underlag för kvalitativa bedömningar.

I föreliggande delrapport redovisas även ett antal laboratoriemätningar av fuktförhållandena under och efter slagregn med olika intensitet och varaktighet.

2 TEORI

En exakt teoretisk behandling av fuktmekniken i samband med slagregn är omöjlig att genomföra. Den teoretiska behandlingen i denna delrapport utgår från mekanismerna enligt delrapporterna III - VI, med i vissa fall kraftiga förenklingar. Av praktiska skäl utgås från ett enkelt "grundfall", som sedan kompletteras på olika sätt. Att direkt särskilja olika faktorer är mycket svårt, eftersom alla faktorer samverkar. Med hänsyn härtill behandlas först det allmänna fallet med oskadad puts/ytskikt relativt utförligt. Därefter detaljstuderas hur vissa specifika faktorer inverkar. Denna disposition medför vissa nackdelar, exempelvis en del upprepningar. Fördelen är att olika faktorer kan behandlas var för sig, vilket är väsentligt vid kvalitativa bedömningar. Bland olika faktorer som studeras kan nämnas skador i tätt ytskikt, slagregnsintensitet, slagregnsvaraktighet, tid mellan slagregn, klimat under uttorkning och väggens konstruktion.

2.1 Utan respektive med oskadad puts/ytskikt

A. Under ett slagregn på från början torrt material

Slagregn med en given intensitet på ett från början torrt material är identiskt med det i delrapport V (avsnitt 2:4 - 2:5) behandlade fallet med konstant vattentillförselintensitet. I FIG. VII:1 redovisas det principiella händelseförloppet för ett enskilt material utan puts vid olika slagregnsintensitet.

Vid en stor slagregnsintensitet (större än kapillärsugningskapaciteten) bildas omedelbart en vattenfilm på ytan, varefter vattenuptagningen kan betraktas som kapillärsugning från en fri vattenyta. Härvid bildas då en vattenfront som förflyttar sig in i materialet. Fuktkvoten bakom fronten blir lika med fuktkvoten vid kapillärmättnad, u_{kap} . Framför fronten är fuktkvoten noll. Den absorberade fuktmängden och inträngningsdjupet bestäms av kapillaritetstalet och det kapillära mättnadsfuktinnehållet.

Vid en liten slagregnsintensitet (mindre än transportkapaciteten vid det kritiska fuktinnehållet) bildas ingen vattenfilm på ytan. Allt vatten absorberas och transporteras kapillärt in i väggen. Den kritiska fuktkvoten nås omedelbart i ytan när slagregnet börjar. Eftersom slagregnsintensiteten är liten så kommer allt ytterligare vatten att transporteras inåt, varvid en front bildas, med fuktkvoten u_{kr} bakom och noll framför fron-

ten. Den absorberade vattenmängden och inträngningsdjupet bestäms av slagregnsintensiteten och den kritiska fuktkvoten, u_{kr} .

Vid slagregnsintensiteter, som ligger mellan ovanstående ytterlighetsfall (praktiskt förekommande intensiteter), så blir även det fuktmechaniska händelseförloppet ett mellanting mellan ovanstående. Omedelbart nås u_{kr} i ytan. Härefter sugs vattnet in i materialet och om transportkapaciteten vid u_{kr} är mindre än slagregnsintensiteten, kommer även fukttinnehållet bakom fronten att öka. Denna mekanism fortsätter tills u_{kap} nås i ytan, varefter detta fukttinnehåll bildar en ny front, som vandrar inåt i materialet. I detta fall finns det alltså två fronter, en med fukttinnehållet u_{kr} som befinner sig längre in än den andra med fukttinnehållet u_{kap} . Mellan dessa fronter finns en övergångszon med varierande fukttinnehåll. Denna övergångszon kan variera kraftigt med slagregnsintensitet och tid. Under den första tiden absorberas allt vatten medan efter lång tid en vattenfilm bildas på ytan. Att teoretiskt förutsäga den exakta tiden då vattenfilm bildas är omöjligt. Enligt delrapport V är det emellertid möjligt att uppskatta den maximala tiden till vattenfilm bildas. Härvid antas en fuktfördelning enligt FIG. VII:1a, varefter kapillärsugningshastigheten beräknas som funktion av den totalt uppsugna vattenmängden. När likhet råder mellan kapillärsugningshastighet och slagregnsintensitet bestäms den uppsugna vattenmängden. Den erforderliga tiden för slagregnet att ge denna vattenmängd är den sökta tiden. Enligt delrapport V ger en sådan betraktelse

$$t_{\text{film}}^{\text{max}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{B}{a}\right)^2 \quad (\text{VII:1})$$

där	$t_{\text{film}}^{\text{max}}$	= maximal tid till vattenfilm bildas	s
	B	= kapillaritetstal	$\text{kg/m}^2 \cdot \sqrt{\text{s}}$
	a	= slagregnsintensitet	$\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$

En motsvarande uppskattning av den minimala tiden till vattenfilm bildas kan göras genom att utgå från fuktfördelningen enligt FIG. VII:1b. En förenkling (på säkra sidan) är att anta att vattenfilm bildas när transportkapaciteten med denna fuktfördelning är samma som slagregnsintensiteten. (I verkligheten måste ytterligare vatten tillföras de ytligt belägna delarna, eftersom u_{kap} måste nås först.)

Görs beräkningen vidare med den minsta möjliga hastighet hos fronten är detta på säkra sidan. Denna minsta hastighet blir lika med kapillärsugningshastigheten vid sugning från en fri vattenyta. Om hastigheten vore

mindre skulle ju fukttinnehållet öka bakom fronten tills det vanliga kapillärugsningsfallet enligt FIG. VII:1a nås.

Ovanstående förenklingar innebär att frontens hastighet (vid beräkning av transportkapaciteten som funktion av upptagen vattenmängd) är densamma som i föregående fall. Den absorberade vattenmängden blir däremot reducerad med skillnaden mellan u_{kap} och u_{kr} . Detta motsvarar en reduktion av kapillaritetstalet till

$$B_{red} = B \cdot \frac{u_{kr}}{u_{kap}} \quad (\text{VII:2})$$

Detta ger att den minimala tiden till vattenfilmen bildas blir

$$t_{film}^{min} = \frac{1}{2} \left(\frac{B}{a} \cdot \frac{u_{kr}}{u_{kap}} \right)^2 \quad (\text{VII:3})$$

Den verkliga tiden kommer att ligga mellan ovan angivna ytterlighetsfall. För praktiska bedömningar kan någon form av medelvärde bildas, antingen av tiderna eller av kapillaritetstalen. Denna uppskattning blir dock mycket grov. Vid höga slagregnsintensiteter ligger exempelvis det verkliga förloppet närmare ekvation (VII:1). Vid små slagregnsintensiteter ligger sanningen närmare ekvation (VII:3).

Ekvationerna (VII:1) och (VII:3) bygger på mycket grova antaganden. En noggrann behandling av förhållandena redovisas av Vos & Tammes (1968).

Ovanstående gäller enbart för enskilda material utan puts. I fallet med puts på ett underlag kompliceras förhållandena kraftigt. Man måste här dela upp förloppet i olika delar, beroende på var vattenfronten finns. Om putsen i sig själv kan absorbera vatten gäller i princip samma resonemang, som för ett enskilt material, så länge vattenfronten finns i putsen. När fronten når gränsen mellan de båda materialen kan det fortsatta förloppet ske på olika sätt, beroende på egenskaperna hos de båda materialen. Om underlaget har stor kapillär sugförmåga och fukttinnehållet i putsen är större än det kritiska kan underlaget mycket snabbt suga vatten från putsen så att fuktkvoten här sänks till u_{kr} . Samtidigt med detta kan även det fortsatta slagregnet sugas genom putsen och in i underlaget. Denna mekanism förutsätter att slagregnsintensiteten är så stor att fukttinnehållet i putsen blir större än det kritiska i initialskedet. Om så inte är fallet så sker ingen "momentan" insugning i underlaget när fronten (med fuktkvoten

u_{kr}). När underlaget. Mekanismen när fronten nått underlaget samt när eventuell "momentan" insugning skett, är i princip densamma som för ett enskilt material. Den väsentliga skillnaden är att putsens kapillärsugningsmotstånd skall adderas till underlagets.

Är underlagets kapillära sugförmåga liten sker ingen snabb insugning av putsens fuktöverskott. Är även putsens kapillärsugningsmotstånd stort blir även insugningskapaciteten av det fortsatta slagregnet liten. Följden härav blir att en vattenfilm snabbt kan bildas på ytan varefter förloppet övergår till att följa ekvation (V:40) i delrapport V.

Avgörande för händelseförloppet är alltså kapillär sugförmåga, kapillärsugningsmotstånd, kritisk fuktkvot och kapillär mättnadsfuktkvot hos puts och underlag samt slagregnsintensitet. Allmänt kan man säga att ett grovporöst underlag med en finporös puts medför liten kapillär sugförmåga hos underlaget och stort kapillärsugningsmotstånd hos putsen. Förutsättningar för att suga in vatten i underlaget är alltså små i detta fall. För en grovporös puts på ett finporöst underlag gäller motsatsen.

De olika ytterlighetsfallen illustreras schematiskt i FIG. VII:2.

De maximala respektive minimala tiderna till vattenfilmbildning vid ett slagregn kan uppskattas med hjälp av samma antaganden som i fallet med enskilda material. Tiderna uppskattas med hjälp av ekvationerna (V:29), (V:35) och (V:36) i delrapport V. Dessa ekvationer ger, med förutsättningen att vattenfilm ej bildas innan vattenfronten når underlaget, tiderna

$$t_{\text{film}}^{\text{max}} = \frac{B_2^2}{2a^2} + \frac{1}{a} \left(G_1 - \frac{M_1}{M_2} \cdot d_1 \cdot \rho_2 \cdot u_2^{\text{kap}} \right) \quad (\text{VII:4})$$

$$t_{\text{film}}^{\text{min}} = \frac{B_2^2}{2a^2} \cdot \left(\frac{u_2^{\text{kr}}}{u_2^{\text{kap}}} \right)^2 + \frac{1}{a} \left(G_1 - \frac{M_1}{M_2} \cdot d_1 \cdot \rho_2 \cdot u_2^{\text{kr}} \right) \quad (\text{VII:5})$$

där

a = slagregnsintensitet	$\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$
B_2 = underlagets kapillaritetstal	$\text{kg/m}^2 \cdot \text{vs}$
G_1 = putsens kapillärmättnadsfuktinnehåll	kg/m^2
M_1 = putsens specifika flödesmotstånd	$\text{Ns/kg} \cdot \text{m}$

M_2 = underlagets specifika flödesmotstånd	Ns/kg·m
d_1 = putsens tjocklek	m
ρ_2 = underlagets densitet	kg/m ³
u_2^{kap} = underlagets kapillära mätnadsfukttinnehåll	kg/kg
u_2^{kr} = underlagets kritiska fukttinnehåll	kg/kg

Till ekvationerna ovan måste även ett randvillkor tillfogas. Tiden till vattenfilmbildning kan nämligen inte vara kortare än erforderlig tid att kapillärmätta putsen. Detta ger

$$t_{\text{film}} \geq \frac{G_1}{a} \quad (\text{VII:6})$$

Om tiden enligt ekvationerna (VII:4) och (VII:5) ej uppfyller villkoret (VII:6) väljs således det senare med likhetstecken.

Efter det att vattenfilm bildats ges vattenabsorptionen direkt av ekvation (V:40) i delrapport V.

Om putsen i sig inte kan absorbera något vatten, exempelvis en tunnputs, bortfaller den första fasen. I övrigt gäller här samma ekvationer för tiden till vattenfilmbildning. I verkligheten absorberar de flesta tunnputser en viss mängd vatten, men denna mängd är ofta så liten att man vid praktiska bedömningar kan bortse från den.

För att illustrera hur putsen inverkar på tiden till vattenfilmbildning, redovisas i FIG. VII:3 det beräknade sambandet mellan slagregnsintensitet och tid till vattenfilmbildning på tegel och gasbetong utan puts respektive med 10 mm KC-puts. Alla materialdata har tagits från delrapport V. De i figuren redovisade kurvorna är det aritmetiska medelvärdet av de maximala och minimala tiderna. (Jämför även FIG. V:41 i delrapport V)

B. Efter ett slagregn på från början torrt material

När slagregnet upphör påbörjas en utjämning och uttorkning av det absorberade vattnet. Utjämningen sker enligt de mekanismer som beskrivits i delrapport III medan uttorkningen sker enligt delrapport VI.

För ett enskilt material "med tät baksida" illustreras förloppet i FIG. VII:4. Omedelbart efter slagregnet är fuktprofilen enligt a). Härefter sjunker fukttinnehållet i den "blötaste" delen samtidigt som en del av vattnet kapillärt transporteras inåt och en del torkar ut enligt b). Samtidigt sker även en viss transport i ångfas vid den inre fronten.

När det maximala fukttinnehållet når det kritiska upphör kapillärtransporten och all utjämning och uttorkning sker sedan i ångfas, vilket går långsamt jämfört med transporten i vattenfas. Fukttransporten inåt i materialet pågår till fuktfördelningen blivit enligt d). Härefter fortsätter uttorkningen enligt e) tills materialet är torrt.

Vid små slagregnsmängder hinner vattnet inte nå den bakre ytan. Förloppet blir dock likartat med ovanstående. Avgörande för erforderliga tider för att nå de olika fuktprofilerna är uttorkningsklimat och materialegenskaper. Olika material kan ge helt olika förlopp. I tegel sker exempelvis knappast någon utjämning i ångfas medan i gasbetong denna utjämning är betydande. I ett uttorkningsklimat som ger långsam uttorkning, hinner vattnet tränga längre in samtidigt som gradienten vid ytan blir mindre.

Förhållandena i fallet med en puts på ett underlag är likartade vid "stora" slagregnsmängder. Den väsentliga skillnaden är att putsen i allmänhet medför en långsammare uttorkning. Enligt delrapport VI sker ju uttorkningen i huvudsak som ångtransport genom putsen. Detta medför att vattnet hinner tränga längre in i materialet, samtidigt som gradienten vid ytan blir liten. En annan skillnad mot förhållandena vid ett enskilt material finns omedelbart efter det att slagregnet upphört. Detta behandlas i samband med den följande diskussionen om förloppet vid små slagregn.

Ovanstående gäller för de praktiskt förekommande putser och underlag som ingår i undersökningen. Teoretiskt finns det dock andra möjliga förlopp. En finporös puts på ett grovporöst underlag kan exempelvis suga fram vatten till ytan där avdunstningen kan ske snabbt. Detta skulle innebära att uttorkningen kunde gå lika snabbt som utan puts.

Vid så pass små slagregn att putsen inte hinner kapillärmättas helt och hållet, blir förhållandena kraftigt beroende av sambandet mellan de båda materialens egenskaper. Om putsen är mer finporös än underlaget kan inget

vatten kapillärt sugas in i underlaget. Uttorkningen av putsen sker som för ett enskilt material. Om däremot putsen är mer grovporös än underlaget, kan underlaget kapillärt suga åt sig vattnet. Samtidigt med detta pågår naturligtvis en uttorkning utåt av putsen. När vattnet sugits in i underlaget måste sedan uttorkningen ske i ångfas genom putsen. Dessa båda fall illustreras i FIG. VII:5.

Olika möjliga förlopp kan lätt bedömas med utgångspunkt från jämviktsfukt-kurvorna i delrapport III. Hysteresiseffekterna medför vissa komplikationer. En grov bedömning går dock att göra genom att vid absorption använda abs-kurvan och vid desorption des-kurvan. Det verkliga förloppet ligger någonstans mellan dessa kurvor. (Jämför avsnitt 5.3 i delrapport III)

C. Under ett regn på från början ej torrt material

Under praktiska förhållanden är sällan materialen torra när de utsätts för slagregn. Detta innebär att de renodlade fallen enligt A och B måste korrigeras med hänsyn till rådande begynnelsefukttinnehåll. Vid "små" fukttinnehåll påverkas förhållandena obetydligt eftersom det främst är de finaste porerna som är vattenfyllda. Vid högre fukttinnehåll minskar däremot det tillgängliga utrymmet som kan vattenfyllas. Kapillär sugförmåga och specifikt flödesmotstånd bör däremot inte påverkas i någon större utsträckning. Anledningen till detta är att det är de grova porerna som främst bestämmer dessa egenskaper. Följaktligen bör vattenfrontens hastighet vid kapillär-sugning vara oförändrad medan däremot den absorberade vattenmängden blir mindre.

Vid en jämn fuktfördelning i materialen kan man helt enkelt flytta noll-nivån till den aktuella fuktkvoten och i övrigt föra samma resonemang som för torra material. Olika koefficienter måste naturligtvis korrigeras med hänsyn till flyttningen av noll-nivån. Kapillaritetstalet vid fuktkvoten u_0 blir exempelvis

$$B_0 = B \cdot \frac{u_{kap} - u_0}{u_{kap}} \quad (\text{VII:7})$$

Med ovanstående resonemang kan tidigare angivna ekvationer för beräkning av tiden till vattenfilmbildning användas. B skall härvid utbytas mot B_0 , u_{kap} mot $(u_{kap} - u_0)$, u_{kr} mot $(u_{kr} - u_0)$ och G_1 mot $(G_1 - G_0)$.

I praktiken bestäms B vid ett visst fukttinnehåll, u_1 . För en helt korrekt beskrivning skall egentligen detta B -värde först korrigeras till noll-nivån. Detta görs på samma sätt som ovanstående korrigering till u_0 . Det korrekta kapillaritetstalet vid fuktnivån u_0 blir sålunda

$$B_0 = B \cdot \frac{u_{\text{kap}} - u_0}{u_{\text{kap}} - u_1} \quad (\text{VII:8})$$

Är fuktfördelningen från början inte jämn i materialen, går det inte att göra ovanstående enkla korrigering. I detta fall kommer kapillaritetstal och tillgänglig porvolym som kan vattenfyllas att variera med djupet. En grov bedömning går dock att göra genom att dela upp materialet i olika delar med konstanta koefficienter. I övrigt görs likadant som vid jämn fuktfördelning.

Antagandet att vattenfronten har samma hastighet vid kapillärsugning från en fri vattenyta, oberoende av begynnelsefukttillstånd, innebär exempelvis att tiden till vattenfilm bildas på ett enskilt material blir

$$t_{\text{film}}^{\text{max}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{B}{a}\right)^2 \cdot \left(\frac{u_{\text{kap}} - u_0}{u_{\text{kap}}}\right)^2 \quad (\text{VII:9})$$

$$t_{\text{film}}^{\text{min}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{B}{a}\right)^2 \cdot \left(\frac{u_{\text{kr}} - u_0}{u_{\text{kap}}}\right)^2 \quad (\text{VII:10})$$

Vid en ojämn fuktfördelning blir en analytisk behandling besvärlig. Som ett exempel beskrivs här tillvägagångssättet för det enkla fallet i FIG. VII:6. Startfuktfördelningen visas FIG. VII:6a. Denna fuktfördelning approximeras med en fördelning enligt FIG. VII:6b. Vattenabsorptionshastigheten, vid kapillärsugning från fri vattenyta, bestäms som funktion av den totalt absorberade fuktmängden (utöver startfukttinnehållet). Detta görs med hjälp av de enligt ekvation (VII:8) korrigerade kapillaritetstalen och ekvation (V:32) i delrapport V. Sambandet kommer alltså att vara olika inom delarna A och B enligt FIG. VII:6c. När vattenabsorptionshastigheten vid fri kapillärsugning är lika med slagregnsintensiteten (a) bildas vattenfilm. Tiden när detta sker ges av att den absorberade vattenmängden (G) skall vara lika med den totala slagregnsmängden, $G = a \cdot t_{\text{film}}$.

Ovanstående resonemang kan göras för maximal och minimal tid till vattenfilmbildning både på enskilda material och på materialkombinationer. Tidigare givna ekvationer måste härvid naturligtvis justeras med hänsyn till aktuella randvillkor.

D. Efter ett regn på från början ej torrt material

Uttorkningens principiella förlopp påverkas inte av begynnelsefuktnnehållet. Tidsförloppen och de exakta fuktnnehållen kommer däremot naturligtvis att förändras. Detta beror emellertid främst på att omfördelningen inne i materialet påverkas av startfuktnnehållet. Denna omfördelning förändras på i princip samma sätt som vattenuppsugningen. En praktisk bedömning görs sålunda genom att helt enkelt höja nollnivån enligt B till det aktuella startfuktnnehållet.

Vid bedömningen av hur omfördelningen sker måste man ha klart för sig att det är de finaste porerna som är vattenfyllda från början. Omfördelningen i ångfas (genom kapillärkondensation) kommer alltså att bli av mindre omfattning.

E. Flera regn med viss uttorkning mellan regnen

Detta fall, som är det i praktiken vanligen förekommande, är en kombination av de tidigare behandlade fallen. En given kombination av regn och uttorkning mellan regnen delas upp i de tidigare behandlade specialfallen, varefter varje del behandlas för sig. Slutresultatet i en viss period blir begynnelsetillståndet i nästa. Genom en successiv framräkning kan sålunda ett godtyckligt fall behandlas. En exakt behandling blir omfattande och kräver datorberäkningar. Här skall enbart en kvalitativ beskrivning göras av problemkomplexet.

Antalet möjliga kombinationer i samband med cykliska slagregn är mycket stort. Här beskrivs enbart några principiellt olika fall. Variabler som studeras är slagregnmängd, uttorkningstid och klimat samt sambandet mellan egenskaperna hos ingående material.

Förhållandena vid små slagregnmängder (mindre än den mängd som krävs för att kapillärmätta ingående putser) illustreras i FIG. VII:7. Uttorkningstid och klimat är här valda så att den vattenmängd som absorberas i det enskilda materialet lagom hinner torka ut mellan regnen. Det enskilda materialet och kombinationerna med de "öppna" tjockputserna förutsätts absorbera allt slagregn enligt a). Den tätare putsen medger ingen kapillär-sugning varför all fukttransport i detta fall sker i ångfas. En konsekvens härav är att fuktnnehållet i underlaget aldrig kan bli större än det som motsvarar jämvikt med 98-100% RF.

I b) visas fuktfördelningen en kort tid efter det att slagregnet upphört och i c) strax innan nästa slagregn. Kombinationen med den grovporösa putsen på det finporösa underlaget har vid denna tidpunkt ett visst fuktöverskott, medan de övriga är torra. Fuktöverskottet beror på att underlaget omedelbart efter regnet suger åt sig en stor del av putsens fukttinhåll. Det grovporösa underlaget suger däremot ej åt sig något vatten från putsen. Uttorkningen av denna kombination kan därför ske snabbt, till stor del genom avdunstning från ytan. Vid det finporösa underlaget måste däremot uttorkningen ske i ångfas genom putsen. Med den täta putsen är uttorkningshastigheten låg, men eftersom även den absorberade fuktmängden är liten hinner denna torka ut.

Vid nästa slagregn upprepas ovanstående mekanism och det finporösa underlaget med en grovporös puts kommer att öka sitt fukttinhåll ytterligare, d) - f). Denna process kan pågå ända till underlaget är helt vattenmättat. Avgörande för sluttillståndet är kapillära jämviktsfuktkurvor och fuktgenomsläppligheter hos putserna.

Vid kortare uttorkningstider mellan regnen kan fukttinhållet öka även i fallet utan puts. Den slutliga nivån blir dock lägre än med en grovporös puts på ett finporöst underlag. Detta beror på att avdunstningen sker från ytan när det verkliga fukttinhållet är större än det kritiska. Kortare uttorkningstider i fallet med finporös puts på grovporöst underlag ger samma resultat som större slagregns mängder enligt nedanstående.

I samtliga fall kan även en viss ökning av det hygroskopiska fukttinhållet ske. Avgörande för detta är de hygroskopiska jämviktsfuktkurvorna och det kritiska fukttinhållet.

Förhållandena vid stora slagregns mängder (större än den mängd som krävs för att kapillärmätta putsen) är i princip desamma som vid små slagregns mängder utom för kombinationen finporös puts på grovporöst underlag. Denna kombination kommer nu inte att absorbera allt vatten eftersom sugkraften i underlaget är liten samtidigt som motståndet i putsen är stort. Den mängd som trots allt sugas in kan dock delvis sugas tillbaka till putsen vid uttorkningen. Det fukttinhåll som understiger det kritiska kan inte sugas tillbaka utan måste torka i ångfas. En viss ökning av fukttinhållet är alltså att förvänta.

Ovanstående beskrivning är mycket schematisk men visar ändå betydelsen av sambanden mellan materialegenskaper hos puts och underlag samt slagregneegenskaper. En principiell sammanfattning av dessa samband redovisas i FIG. VII:8.

Praktiska material är inte renodlat grov- eller finporösa, utan har porstorleksfördelningar som överlappar varandra. Grovt kan man dock säga att gasbetong är mer finporös än tegel. Vanliga oorganiska tjockputser har en porstorleksfördelning mellan dessa underlag. (Se vidare i delrapport III)

Enligt FIG. VII:8 medför en tjockputs på gasbetong att underlaget absorberar mer vatten än om gasbetongen inte hade någon puts. Motsvarande puts på tegel medför däremot att den absorberade vattenmängden är oförändrad eller minskar.

2.2 Skador i ett relativt tätt ytskikt

Enligt föregående avsnitt medför ett tätt ytskikt att väggens vattenupptagning vid slagregn reduceras mycket kraftigt, praktiskt taget till noll. Skador i ett tätt ytskikt medför emellertid att vatten lokalt kan sugas in i underlaget. Detta vatten kan sedan sprida sig bakom ytskiktet. I samband med slagregn mot ett tätt ytskikt bildas "omedelbart" en vattenfilm. Vid en skada, exempelvis spricka eller "pinholes", kommer underlaget att kapillärt suga in vatten från vattenfilmen. Allteftersom vatten sugas in i underlaget tillföres nytt vatten från vattenfilmen. Med tanke på att "uppsamlingsytan" för slagregnet är väsentligt större än "insugningsytan", är det rimligt att anta att förutsättning för fri kapillärsugning alltid föreligger. Under slagregnet kan man alltså behandla problemet enligt delrapport V.

Uttorkningen efter slagregnet sker dels genom skadan och dels genom ytskiktet. Uttorkningsmekanismerna är härvid olika. Vid skadan sker uttorkningen genom avdunstning från ytan så länge som fukttinnehållet är större än det kritiska. Genom ytskiktet sker däremot uttorkningen alltid i ångfas.

En beräkningsmässig behandling av fuktbalansen vid en spricka är relativt enkel. Den genom sprickan uppsugna vattenmängden ges direkt av ekvationerna i delrapport V. Den genom ytskiktet absorberade fuktmängden beräknas som en ångtransport enligt delrapport IV. Dessa båda mängder adderas

vilket ger en fuktfördelning exempelvis enligt FIG. VII:9a. När regnet upphör börjar uttorkning och utjämnning av den absorberade vattenmängden. I den "blöta" zonen sjunker härvid fukttinnehållet snabbt till det kritiska, samtidigt som fronten vandrar inåt enligt FIG. VII:9b. Efter en tid sker all uttorkning i ångfas även om fukttinnehållet lokalt är lika med det kritiska, FIG. VII:9c. Den fortsatta uttorkningen och omfördelningen medför småningom att fukttinnehållet överallt ligger i det hygroskopiska området enligt FIG. VII:9d. Beräkningen av den uttorkade fuktmängden görs genom att anta 100% RF under ytskiktet och betrakta hela förloppet som ångtransport. Vid små skador och ej alltför täta ytskikt kan man bortse från den mängd som torkar genom skadan. Vid större skador och mycket täta ytskikt måste däremot även denna mängd medräknas. Under alla omständigheter bör en överslagsberäkning göras av den genom sprickan uttorkade vattenmängden.

Hinner inte den absorberade fuktmängden torka ut mellan två regn förfar man på samma sätt som vid cykliskt slagregn enligt tidigare avsnitt.

Består materialkombinationen av underlag, tjockputs och ett relativt tätt ytskikt måste även hänsyn tas till fuktens omfördelning mellan tjockputs och underlag. En översiktlig bedömning görs lätt med hjälp av jämviktsfukt-kurvorna enligt delrapport III.

2.3 Inverkan av olika klimat

Den under ett slagregn absorberade vattenmängden bestäms enligt tidigare inte enbart av den totala slagregnsmängden. Slagregnsintensitet och varaktighet hos slagregnet är av största betydelse. För en viss given total slagregnsmängd kan förhållandena bli helt olika beroende på slagregnsintensitet och varaktighet. Inverkan av dessa faktorer är olika på olika materialkombinationer. En materialkombination med en relativt tät puts absorberar exempelvis betydligt mer vatten om en viss given slagregnsmängd har låg intensitet men lång varaktighet. För en öppen puts eller ett enskilt material har intensiteten mindre betydelse. Vid en skada i ett i övrigt tätt ytskikt har den totala slagregnsmängden en underordnad betydelse. I detta fall är det den totala tiden, som det finns en vattenfilm, som är intressant.

Det är inte bara egenskaperna hos själva slagregnet som påverkar förhållandena. Även tiden mellan regnen och klimatet under denna tid har en av-

görande betydelse. Arstidsvariationer hos klimatet kommer alltså att medföra olika förhållanden. Under hösten, med många slagregn och dåliga uttorkningsförhållanden, finns stora förutsättningar för att väggens fukttinnehåll ökar. Detta fuktöverskott kan sedan minska under våren-sommaren då uttorkningsförhållandena är goda.

De direkta klimatfaktorer som har betydelse för uttorkningen är temperatur, solstrålning, luftfuktighet och vindhastighet. Den senare har dock enbart betydelse när vattnet kan transporteras kapillärt fram till ytan. Enligt delrapport VI är detta sällan aktuellt i samband med putsade fasader. Luftfuktigheten påverkar uttorkningen eftersom det är skillnaden mellan ånghalten i avdunstningszonen och i utomhusluften som bestämmer uttorkningshastigheten. Den väsentligaste klimatfaktorn är temperaturen. Anledningen till att temperaturen har så stor betydelse är att den påverkar ånghalterna i mycket hög grad. Det är inte enbart utomhustemperaturen som är väsentlig utan även temperaturen i väggen. Den senare temperaturen påverkas kraftigt av solstrålningen mot väggen. En övertemperatur på väggytan av storleksordningen 10-15°C är inte ovanlig under en höstdag. Detta medför att uttorkningshastigheten kan flerfaldigas i förhållande till hastigheten utan solstrålning. Fasadytor med olika orientering kommer naturligtvis att påverkas mycket olika av solstrålning. Förutom att uttorkningshastigheten ökar av solstrålningen, så kommer även fukttransporten inåt i väggen att öka. Detta beror på att ånghalten kommer att få ett maximum där temperaturen är störst (RF förutsätts härvid vara 100%). Eftersom temperaturen blir störst vid ytan kommer alltså även ånghalten att vara störst här, med följd att fukttransporten går både utåt och inåt. Detta förhållande illustreras i FIG. VII:10. Resultatet kan bli att det i vissa fall åtgår en längre tid att torka ut en viss slagregns mängd när ytan är utsatt för strålning. Anledningen till detta är då att fukten måste transporteras en längre sträcka i ångfas. I verkliga väggar motverkas dock ovanstående transport inåt av den motriktade temperaturgradient som normalt finns över en yttervägg. Inomhusluften är ju normalt varmare än utomhusluften.

Solstrålningen påverkar även transportmekanismen på ett annat sätt. Omedelbart efter ett slagregn är putsen blöt. Under uttorkningen kommer då fuktinnehållet i putsen att följa desorptionsdelen av jämviktsfuktkurvan. Om nu putsen under en tid utsätts för solstrålning kan putsen torka ut "fullständigt". Det lägre fukttinnehållet i putsen medför enligt delrapport IV. att ånggenomsläppligheten minskas. Denna lägre ånggenomsläpplighet kan

kvarstå även efter det att solbestrålningen upphört, eftersom fukttinnehållet då kommer att följa jämviktsfuktkurvans absorptionsdel.

I vissa fall kan fukt absorberas i fasaden även om det inte regnar. Vid disig väderlek är det tänkbart att väggen absorberar en del vatten. Detta motverkas dock delvis av att väggens yttemperatur på utsidan ofta är högre än lufttemperaturen. Under klara nätter kan däremot kallstrålningskondens förekomma. Denna kondens beror på att ytan på grund av värmeutstrålning nattetid kan få en lägre temperatur än luften. Är samtidigt luftens relativa fuktighet hög kan då kondens ske på fasaden. Storleken av eventuell kondensmängd är okänd.

2.4 Inverkan av väggens konstruktion

Väggens konstruktion påverkar fuktförhållandena på ett flertal olika sätt. Tidigare har inverkan av olika porstruktur hos ingående material diskuterats. Genom att kombinera olika material kan förhållandena påverkas i mycket hög grad. Förutom denna inverkan av porstrukturen har naturligtvis väggens konstruktiva utformning stor betydelse. En luftspalt avbryter exempelvis kapillärtransporten fullständigt medan däremot ångtransporten fortgår obehindrat. Även i många reveterade fasader är putsens kapillärkontakt med underlaget avbruten, varför fuktförhållandena blir helt annorlunda än i ett putsat murverk. I det förra fallet kan putsen snabbt kapillärmättas under ett slagregn. Ytterligare vatten som tillföres kommer här efter att rinna av fasaden. I ett murverk kan däremot vattnet sugas in i underlaget.

I ett murverk blir förhållandena mer komplicerade än enligt den tidigare diskussionen. Murblocken och fogmaterialet har nämligen olika egenskaper. I vissa fall kan fogen suga in vatten snabbare, varefter blocket kan suga vatten från fogen. I andra fall kan motsatsen gälla. Detta problem går att studera beräkningsmässigt. En exakt behandling är dock komplicerad eftersom fuktflödet blir tredimensionellt.

Färgen på ytan har stor betydelse för den absorberade solstrålningen. En mörk färg absorberar mera energi, vilket medför högre väggtemperatur och snabbare uttorkning.

3 MÄTNING AV SLAGREGNETS INVERKAN PÅ FUKTTILLSTANDET

Fukttillståndet påverkas av både materialegenskaper och klimat. För att kunna bedöma slagregnets inverkan under praktiska förhållanden måste alltså båda dessa faktorer vara kända. Klimatet, dvs slagregnsegenskaper och uttorkningsklimat, har inte studerats i denna undersökning. Huvudvikten har istället lagts vid frågan hur ett givet klimat inverkar på fuktförhållandena. Det i praktiken rådande klimatet är i allmänhet välkänt, bortsett från slagregnsegenskaperna. Att de exakta slagregnsegenskaperna är mindre välkända beror på att dessa uppvisar mycket stora lokala variationer. En relativt utförlig sammanställning av praktiska klimatförhållanden redovisas av Sandberg (1974). Mer detaljerade klimatdata redovisas bl a av Taesler (1972), Hoppestad (1955), Varnbo (1966), Frank (1973) och Järnmark (1968).

Undersökningar av hur slagregn påverkar fukttillståndet i en vägg kan göras på ett flertal principiellt olika sätt. I huvudsak kan man skilja på direkta mätningar av fukttillståndets variationer och på mätningar av vissa materialegenskaper, varefter fukttillståndet beräknas.

Mätningar av olika materialegenskaper behandlas i andra delrapporter, varför dessa mätningar enbart kommenteras mycket kortfattat här. Direkta mätningar av fukttillståndets variation i samband med slagregn kan göras både i laboratorium och under praktiska förhållanden. I föreliggande undersökning har främst laboratorieundersökningar utförts. Fördelen med denna typ av mätning, jämfört med praktiska mätningar, är att klimatet kan kontrolleras fullständigt. Vid praktiska mätningar är man av naturliga skäl hänvisad till rådande klimat. Detta medför bl a att det är svårt att särskilja inverkan av olika klimatfaktorer. För att få erfarenhetsvärden är emellertid praktiska mätningar av stor betydelse. Fuktmätningmetoder för mätningar i praktiken diskuteras i delrapport II.

3.1 Materialegenskaper

De materialegenskaper som främst påverkar fuktförhållandena är kapillär sugförmåga, specifikt flödesmotstånd, fuktinnehåll vid kapillärmättnad, kritiskt fuktinnehåll, jämviktsfuktinnehåll och ånggenomsläpplighet. Dessa egenskaper kan uttryckas direkt eller indirekt genom exempelvis kapillaritetsstal eller porstorleksfördelningar. De olika egenskaperna behandlas utförligt i delrapporterna III-VI.

Många av egenskaperna varierar kraftigt med rådande fukttinnehåll. Detta medför att egenskaperna måste bestämmas vid de i praktiken förekommande fukttillstånden. Önskvärt är naturligtvis att egenskaperna bestäms direkt som funktion av fukttinnehållet. Av praktiska skäl vill man emellertid nedbringa antalet provningar så mycket som möjligt. En kompromiss blir då att bestämma egenskaperna vid vissa ytterlighetstillstånd varefter "rimliga" värden får bedömas från fall till fall. Denna metod medför vissa risker (jämför ER-nämndens våt- och torrmetod i delrapport IV) varför stor försiktighet måste tillämpas. Genom att analysera de fysikaliska processerna kan dock hyfsade bedömningar göras.

3.2 Fuktmätningar vid laboratorieförsök

Dessa mätningar kan göras på två principiellt olika sätt. Antingen kan man mäta förändringar i medelfukttinnehåll eller förändringar av fuktprofilen inne i materialet. Den senare mätningen är mer komplicerad men ger å andra sidan väsentligt mer information.

Några standardmetoder för dessa mätningar finns ej. I princip görs provningen genom att provkroppen utsätts för ett eller flera slagregn, varefter proverna får torka i ett givet klimat samtidigt som fukttinnehållet mäts. Det exakta genomförandet kan variera kraftigt. Både förstörande och icke förstörande metoder är användbara. I avsnitt 4 detaljbeskrivs några metoder (de som använts i de egna mätningarna).

4 EGNA MÄTNINGAR

I detta avsnitt redovisas enbart laboratoriemätningar av fuktförhållandena i samband med slagregn. Mätningarna har i huvudsak gjorts på de materialkombinationer, som använts i de övriga undersökningarna enligt delrapporterna III-VI. Materialegenskaper och provkroppstillverkning redovisas i delrapport I. Förutom på dessa materialkombinationer har ett stort antal mätningar gjorts på olika varianter av både puts och underlag. Även vissa av dessa provningar redovisas i det följande. Materialegenskaper och provkroppstillverkning för dessa kombinationer redovisas i anslutning till resultatredovisningen.

Mätningar har utförts både i samband med ett regn och vid flera återkommande regn. Mätningar har gjorts både med avseende på fuktprofil och medelfuktinnehåll.

Vid samtliga provningar har slagregnet åstadkommit med en specialkonstruerad slagregnsapparat, som beskrivs i avsnitt 4.1. Fuktprofilbestämning har gjorts både med "manuell" och elektrisk metod. Vid "manuell" fuktkvotsbestämning har proverna uppsågats i skivor, vars fuktkvot bestämts genom uttorkning i ugn vid 105°C. Vid uppsågningen i skivor sker en viss uttorkning av proverna. Denna uttorkning är dock av mindre omfattning och har försumrats vid utvärderingen. Det fel som begås härigenom ligger helt inom den normala spridningen vid en fuktkvotsbestämning i tegel och gasbetong. Den elektriska fuktmätningssmetoden beskrivs i avsnitt 4.2.

4.1 Slagregnsapparat

Vid andra undersökningar av slagregn i samband med fasader har ofta syftet varit att studera inverkan av sprickor och otätheter. Detta har medfört att man inte ställt några stora krav på slagregnsegenskaperna utan i allmänhet använt mycket kraftiga slagregn eller rinnande vatten tillsammans med ett övertryck. Det väsentliga har i dessa fall varit att åstadkomma en vattenfilm på ytan. I aktuellt projekt var i stället syftet att undersöka hur oskadade och sprickfria putser påverkade väggens fuktbalans vid normalt förekommande slagregn. Dessa regn har en intensitet av ca 0-2 kg/m²·h. Eftersom främst oskadade putser skulle studeras ställdes inga krav på att något övertryck skulle finnas. Med tanke på att slagregnen skulle vara reproducerbara ställdes däremot stora noggrannhetskrav på intensiteten. Vidare skulle det vara enkelt att ändra intensiteten.

Beskrivning av slagregnsapparaten

Slagregnet åstadkommes med hjälp av ett magnetventilreglerat munstycke som slungar en "vattendroppe" med vissa tids mellanrum mot provytan, samtidigt som munstycket förflyttar sig så att hela provytan täcks.

Munstycket tillverkas genom att tre hål borraras i en plexiglasbit enligt FIG. VII:11. Vatten rinner med konstant flöde genom hålen a-c. Med hjälp av en magnetventilstyrd tryckluftspuls slungas vattnet som finns i hålet c ut mot provytan samtidigt som vattenflödet temporärt stoppas (se FIG. VII:12). Den mängd vatten som slungas iväg blir väldefinierad av c-hålets volym. Vattenflödet måste vara så stort att hålet på nytt hinner fyllas innan nästa puls. Genom att variera c-hålets volym fås olika mängd vatten per puls. Lämplig tryckluftspuls erhålles genom att magnetventilen öppnas under 70 ms. Trycket hos tryckluften påverkar dropputseendet kraftigt. Ett lågt tryck ger en hel vattendroppe medan ett högt tryck ger en total sönderslagning av droppen. Trycket påverkar även spridning och maximalt avstånd mellan munstycke och provyta. För att få en koncentrerad droppsvärm har en avskärming monterats framför munstycket. Avskärmingen har avpassats i förhållande till munstyckets förflyttning så att två på varandra följande droppsvärmar endast obetydligt överlappar varandra. När droppsvärmen träffar provytan har den hastigheten ca 5 m/s.

Munstycket är monterat på en glidskena och samtidigt som munstycket går fram och tillbaka på skenan så går även skenan upp och ner enligt FIG. VII:13. Munstycket och skenan drivs av två oberoende motorer med reglerbar hastighet och gånglängd. Vid intrimningen av apparaten måste stor omsorg läggas vid val av hastigheter och gånglängd för att få en jämn fördelning av slagregnet. I annat fall finns risk att munstycket kommer att gå i vissa banor, medförande att vissa partier på provytan får mycket regn medan andra inte får något regn (se FIG. VII:14a). I idealfallet skall munstycket alltid välja en ny bana så att varje punkt passeras en gång. För att hela ytan skall täckas måste i detta fall apparaten köras under lång tid. För att kunna köra även kortare försök har apparaten trimmats så att munstycket under en viss tid går i olika väl fördelade banor. Efter denna tid har alltså apparaten utfört en cykel, varefter en ny likadan cykel körs (se FIG. VII:14b). I praktiken är det svårt att justera apparaten så att de olika cyklerna blir helt identiska. Detta innebär att en viss förskjutning fås mellan de olika banorna, vilket enbart är en fördel med hänsyn

till slagregnsfördelningen på provytan. Körs slagregnsapparaten under lång tid kan således en absolut jämn fördelning förväntas. Vid kortare körningar blir minimitiden för en körning beroende bland annat av provytans storlek. Med en liten provyta kan en god fördelning erhållas efter några minuter medan för en stor yta några timmars körning kan krävas.

Varierande slagregnssegenskaper kan enligt ovan alltså erhållas genom att variera munstyckets volym, tryckluftspulsens storlek, tid mellan pulserna, avskärmningens utformning samt gånglängder och hastigheter i sid- respektive höjdljed. Vid intrimningen måste samtliga dessa variabler beaktas samtidigt.

Kalibrering

Vid kalibrering av olika munstycken och apparatinställningar har små provkroppar med stor vattenabsorberande förmåga eller burkar använts. Dessa kalibreringsprovkroppar och burkar, med ytan ca 50 cm², har vägts före och efter slagregnet. Kalibreringsprovkroppens ytstruktur kan ha stor betydelse för den på detta sätt bestämda slagregnsintensiteten. Vid de använda apparatinställningarna har samma vattenmängd upptagits av öppen burk, hushållssvamp, tegel och trådkuren gasbetong medan en sågad gasbetongyta tagit upp ca 25% mindre vatten. Efter dessa iakttagelser har av praktiska skäl enbart trådkuren gasbetong använts som kalibreringsprovkropp. För att hindra eventuella vattendroppar från högt liggande provkroppar från att träffa lågt liggande provkroppar, har varje provkropp försetts med ett droppbleck samtidigt som en avloppsränna placerats mellan de olika provkroppsraderna enligt FIG. VII:15.

Efter inledande kalibreringar, med syfte att hitta en inställning som gav en jämn fördelning, fixerades allt utom munstycksvolymer. Härvid valdes siffervärden enligt TAB. VII:1 och FIG. VII:16. För att få en jämn fördelning över hela provytan måste denna vara något mindre än den yta som täcks av munstycket. Vid aktuell inställning enligt ovan måste munstycket gå ca 10 cm utanför provytan på varje sida. Kalibreringsförsök har gjorts för en mängd olika munstycken genom att apparaten körts i 1 h 3-4 gånger med varje munstycke. Slagregnsmängden har vid varje försök mätts på 12 olika "slumpmässiga" platser på provytan. Denna hade ytan 580 x 440 mm och varje yta där slagregnsmängden uppsamlades var 70 x 70 mm. Kalibreringsresultaten från 4 munstycke redovisas i TAB. VII:2. De olika intensiteterna har erhållits genom att variera längd och diameter hos "c-hålet" i munstycket. Längden har varierats inom intervallet 40-60 mm och diametern inom 3-5 mm.

Spridningen är enligt tabellen ca $\pm 10\%$ från medelvärdet. Detta gäller vid körning under 1 timme. En kortare tid kan ge större spridning medan vid längre tider spridningen minskar. Med tanke på att slagregnsintensiteter under praktiska förhållanden är mycket osäkra måste denna noggrannhet anses vara tillfredsställande.

Slagregnsutrustningen har varit placerad i klimatrum med 65% RF och 20°C. För att minska avdunstningen från provkroppsytorna under pågående försök har hela utrustningen täckts med ett plasttält. Härigenom har luftfuktigheten under slagregnsförsöken blivit 80-85%. Den maximala avdunstningen från en yta blir under dessa förhållande ca 0.03 kg/m²·h. Vid mycket små slagregnsintensiteter kan detta få betydelse men för intensiteter av storleksordning 0.3 kg/m²·h saknar avdunstningen praktisk betydelse. Vid de försök som genomförts med slagregnsapparaten har ingen hänsyn tagits till avdunstning under regn.

Slagregnsapparaten och droppsvärmens utseende illustreras närmare i FIG. VII:17-20.

4.2 Elektrisk fuktmätningmetod

För att kunna göra kontinuerliga mätningar av snabba fuktvariationer vid höga fukttillstånd, har en för ändamålet anpassad mätmetod utvecklats. Grundprincipen bygger på att fukttinnehållet påverkar den elektriska konduktiviteten och därmed resistansen mellan två elektroder. Genom att mäta resistansen mellan parvisa elektroder på olika djup i en provkropp kan alltså fuktförhållandena under uppfuktning, utjämning och uttorkning studeras kontinuerligt. Metoden har enbart använts i gasbetong och sambandet mellan fukttinnehåll och resistans har erhållits genom kalibreringsförsök.

I detta avsnitt görs enbart en summarisk beskrivning av metoden. En utförlig redovisning av metoden finns i Sandin (1978).

Teori

Resistansen mellan två elektroder, ingjutna i ett homogent material enligt FIG. VII:21 ges, under förutsättning att $d \gg a$ och $x \gg a$, av

$$R = \frac{1}{\pi \cdot \sigma} \cdot \frac{1}{\ell} \cdot \ell n \frac{d \sqrt{d^2 + 4x^2}}{a - 2x} \quad (\text{VII:11})$$

där R = resistans mellan elektroder	Ω
σ = konduktivitet hos materialet	$1/\Omega \cdot \text{m}$
ℓ = elektrodlängd	m
d = centrumavstånd mellan elektroder	m
a = elektrodradie	m
x = avstånd mellan elektroddpar och gränsyta material-luft	m

Den elektriska flödestätheten är störst kring centrumlinjen mellan elektroderna. Flödestätheten avtar kraftigt med avståndet från centrumlinjen enligt FIG. VII:22. Det område där flödestätheten är av praktiskt intresse är begränsat till området kring centrumlinjen. Bredden på området beror på elektrodavståndet på så sätt att ju större elektrodavståndet är, desto bredare blir det verksamma området.

Detta innebär att ett litet avstånd mellan elektroderna ger en mer väldefinierad mätpunkt. Eftersom mätmetoden är avsedd för att registrera fuktgradienter är det alltså fördelaktigt med ett litet elektrodavstånd. Ett alltför litet elektrodavstånd medför dock praktiska svårigheter vid provkroppstillverkningen. När elektrodavståndet minskar blir även inverkan av ofrånkomliga variationer i elektrodavståndet större.

Elektroddiametern bör väljas så liten som möjligt för att minimera elektrodens inverkan på fuktflödet. En alltför liten elektroddiameter ger dock praktiska svårigheter vid monteringen.

Elektrodlängden påverkar varken fukttransporten eller den elektriska flödestätheten utan kan väljas enbart med hänsyn till praktiska skäl under montering och mätning.

Med utgångspunkt från vissa pilotförsök valdes elektroder av rostfritt stål \emptyset 1.22 \pm 0.03 mm. Elektrodlängd och elektrodavstånd valdes till 140 \pm 3 respektive 10 \pm 1 mm.

Ovanstående mått ger att ca 80% av det elektriska flödet sker inom avståndet 5 mm från centrumlinjen mellan elektroderna. Inom avståndet 10 mm blir

motsvarande värde 95%. Vid fuktgradienter är inte konduktiviteten konstant inom flödesområdet, vilket medför att ekvation (VII:11) inte gäller. Med hänsyn till ändamålet med mätmetoden saknar detta dock praktisk betydelse.

Förutom ovannämnda avvikelser vid fuktgradienter ger måttvariationer vid tillverkning och montering en viss spridning i resistansen. Den härav uppkomna maximala avvikelsen i resistans kan genom differentiering av ekvation (VII:11) uppskattas till 8%.

Provkroppstillverkning

För kalibreringsförsöken tillverkades provkroppar av samma typ som skulle användas i samband med putsförsöken. I stålformar 150x150x150 mm borrades hål för elektroderna varefter dessa monterades enligt FIG. VII:23. Formarna fylldes och autoklaverades vid Siporexfabriken i Dalby på samma sätt som den löpande produktionen. För att undvika randeffekter värmdes formarna innan fyllningen till samma temperatur som gasbetongmassan. Efter autoklaveringen avformades och delades provkropparna mellan elektrodarraderna.

Mätutrustning

Grundprincipen är enligt tidigare att konduktiviteten i materialet ändras med fukttinnehållet. Enligt ekvation (VII:11) medför detta att även resistansen mellan de ingjutna elektroderna blir beroende av fukttinnehållet. Genom att mäta denna resistans vid olika fukttinnehåll kan alltså en kalibreringskurva mellan resistans och fukttinnehåll erhållas.

I marknaden förekommande instrument för resistansmätning är inte användbara vid denna mätning, eftersom de arbetar med likspänning. En likström genom materialet medför nämligen polariseringseffekter på grund av att i vattnet lösta saltjoner ansamlas vid elektroderna, vilket successivt förändrar mätvärdet. Polariseringen kan motverkas genom att resistansen bestäms med en växelspanning över elektroderna. Denna bestämning kan i princip göras enligt FIG. VII.24 genom att mäta strömstyrkan vid en given spänning mellan elektroderna.

Eftersom ett mycket stort antal mätningar skulle göras befanns automatisk registrering och utvärdering ofrånkomlig. I marknaden förekommande dataloggers kunde inte användas utan omfattande modifieringar, eftersom resistansmätningarna måste ske med växelspanning. För att möjliggöra automatisk databehandling byggdes i stället en automatisk scanner (mätställesom-

kopplare) för 160 mätpunkter. Instrumenteringen vid automatisk registrering framgår av FIG. VII:25.

Kalibrering

Resistansen mellan elektroderna bestämdes vid olika fuktkvoter, både efter uttorkning och uppfuktning. Huvuddelen av mätningarna startade vid ett högt fuktinnehåll, ca 100-130 vikts-%. Efter vägning och resistansmätning fick provkropparna torka en tid varefter de förseglades diffusionstätt. När kvarvarande fukt utjämnats gjordes ny mätning, etc. För att kontrollera fuktfördelningen inom provkropparna gjordes i vissa fall exakta fuktkvotsbestämningar på andra provkroppar som behandlats på exakt samma sätt. Denna fuktkvotsbestämning gjordes genom uppsågning i skikt och uttorkning vid 105°C. Slutligen torkades elektrodprovkropparna helt, varefter den exakta medelfuktkvoten vid varje resistansmätning beräknades. I de fall då stora fuktgradienter förekommit under resistansmätningen har de exakta fuktkvoterna vid respektive elektrodpar bestämts genom uppsågning av elektrodprovkroppen och uttorkning vid 105°C.

Vid mätning under uppfuktning gjordes i princip på samma sätt, men med kapillärsugning i stället för uttorkning.

I FIG. VII:26 redovisas resultaten från en del mätningar. Härvid har ingen skillnad gjorts mellan uttorkning och uppfuktning. Om den helldragna kurvan i FIG. VII:26 används som kalibreringskurva blir maxfelet ca 10% av avläst värde.

Liknande försök med andra densiteter hos gasbetongen har givit en medelkurva med samma lutning som i FIG. VII:26, men parallellförskjuten.

Diskussion

Försöken har klart visat att fuktmätningssmetoden har en för ändamålet tillräcklig noggrannhet, ca $\pm 10\%$ av avläst fuktkvot. Olika tillverkningsomgångar kan ge stora skillnader i absolutbelopp. Kalibreringskurvans lutning är dock densamma. Kalibreringskurvan för olika tillverkningsomgångar erhålles genom att bestämma en punkt på kurvan och därefter parallellförskjuta kalibreringskurvan uppåt eller nedåt.

En ojämn saltkoncentration inom provkroppen är svår att korrigera för. Denna kan exempelvis uppkomma vid kapillärsugning (urlakning vid sugytan) och vid uttorkning (anrikning vid torkytan). Några försök att kalibrera för detta har inte gjorts. Enkla försök har dock visat att anrikning vid uttorkning spelar mindre roll (inom felmarginalen), medan däremot urlakning vid kapillärsugning har större betydelse. Vid utvärderingen av försök där urlakning förekommer måste en "förnuftsmässig" korrigering göras. Denna korrigering kan, förutom vid kapillärsugning, även bli aktuell i samband med kraftiga eller långvariga slagregn. Korrigering krävs i allmänhet endast för de elektroddpar som är belägna närmast den yta där vattentillförseln sker.

Korrigeringen på grund av urlakning under vattenupptagning görs genom särskilda kalibreringsförsök. När vattenupptagningen avbryts, bestäms en korrektionsfaktor så att avläst resistans stämmer med den som skulle ha erhållits om ingen urlakning förelegat. Under den påföljande uttorkningen bibehålles därefter denna korrektionsfaktor för respektive elektroddpar. Den maximalt erforderliga korrektionen i fuktkvot har varit ca 30% av avläst värde. Denna korrektion är sålunda stor i vissa fall, men eftersom korrektionen endast görs på enstaka elektroddpar inverkar den obetydligt på hela mätningens noggrannhet. Med tanke på att det inte är fuktkvotens absolutbelopp utan fördelning och omlagring som är intressant inom aktuellt projekt, kan en sådan korrektion vara acceptabel.

Vid utvärdering av mycket kraftiga fuktgradienter uppstår nya svårigheter beroende på fuktfrontens läge i förhållande till elektrodderna. En exakt beräkning här är komplicerad eftersom konduktiviteten varierar inom elektroddparets verksamma område. För den praktiska tillämpningen av metoden har i allmänhet den förenklingen gjorts att fukttinnehållet antagits konstant inom elektroddparets verksamma område.

Problemet med kraftiga fuktgradienter i samband med kapillärsugning eller slagregn är störst vid ytan. Vid den praktiska utvärderingen av försök med stor vattenupptagning har fuktkvoten vid ytan bestämts genom särskilda kalibreringsförsök. Dessa försök visade att en fuktfront, med fuktkvoten ca 40 vikts-%, bildades vid slagregnsintensiteter överstigande $0.1 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$. Vid utvärderingen har därför, under den första tiden i samband med slagregn, inträngningsdjupet beräknats som funktion av tiden (med antagandet att fuktkvoten är 40 vikts-%). Denna fuktfördelning har antagits gälla så

länge som en front med en kraftig gradient förflyttar sig inåt i materialet. Med kraftig fuktgradient avses här att fuktkvoten ändras från 0-10 vikts-% till ca 40 vikts-% mellan två elektrodpar, dvs på sträckan 10 mm.

I FIG. VII:27-28 visas två exempel på fuktfördelningar vid liten respektive stor vattenupptagningshastighet. Den beräknade fuktkvoten är den som erhållits efter ovanstående korrigeringar av resistansmätningarna. Den verkliga fuktkvoten har bestämts genom uppsägning av provkropparna i tunna skikt, som därefter torkats i ugn vid 105⁰C.

Praktiskt genomförande av mätningarna

Principutförandet framgår av FIG. VII:29. Putsytan var ca 70x150 mm. Underlaget var 100 mm djupt, innehållande 10 st elektrodpar med avståndet 10 mm både mellan elektrodpar och mellan enskilda elektroder i ett elektrodpar. Avståndet från de yttersta elektrodparen till ytan respektive gränsszon mellan puts och underlag var 5 mm.

För att allt fuktutbyte med omgivningen skulle ske genom putsytan, placerades varje provkropp i en plexiglaslåda. Mellan provkropp och låda tätades med gummilist och kitt.

Det exakta provkroppsutseendet framgår av FIG. VII:30-31. I FIG. VII:32 visas provkroppsuppställningen under en uttorkningsperiod. Under slagregnsperioderna fanns det även droppbleck på varje provkropp enligt FIG. VII:15.

4.3 Fuktprofil under och efter ett regn, manuell mätmetod

Fuktprofilen under och efter slagregn har bestämts på provkroppar bestående av underlag med oorganiska tjockputser. Materialdata, putsningsutförande samt lagring av provkroppar innan den slutliga provkroppstillverkningen redovisas i delrapport I. Ur de färdigputsade gasbetongblocken respektive tegelstenarna utsågades 70x70 mm respektive 50x60 mm bitar. Alla ytor utom putsytan förseglades härefter diffusionstätt med hjälp av plastpåsar.

De enligt ovan preparerade proverna utsattes för slagregn med intensiteten 0.45 kg/m²·h under 24 timmar. Under denna tid uttogs prover för fuktkvotsbestämning. Fuktkvotsbestämningen gjordes genom att proverna sågades i 5-20 mm tjocka skivor varpå fuktkvoterna bestämdes genom uttorkning vid 105⁰C.

På en del prover avbröts slagregnet efter 3 1/4 respektive 6 1/2 h. Här-
efter fick dessa prover torka i 20°C, 65% RF och vindhastighet 0.1-0.2 m/s.
Med vissa tidsmellanrum uttogs prover för fuktkvotsbestämning.

Vid provningen var putserna ca 5 månader gamla.

Försöken blev i viss utsträckning misslyckade. Den främsta anledningen till
detta var att försegling med enbart plastpåsar inte var tillräcklig. I
många fall kunde vatten sugas in mellan plasten och provkroppen. Detta
vatten sögs därefter vidare in i underlaget "bakvägen". I några fall krång-
lade även slagregnsapparaten under pågående försök.

Med hänsyn till ovanstående görs här ingen fullständig redovisning av er-
hållna försöksresultat. Insugningen "bakvägen" påverkar främst fuktprofi-
len i underlaget. Fuktinnehållet i putsen torde däremot endast påverkas
obetydligt. Under uttorkningen efter regnet saknar ovanstående insugning
helt betydelse.

Fuktkvotsförändringen i putsen under och efter slagregn redovisas i FIG.
VII:33-35.

Fuktprofilen i hela provet redovisas här enbart för vissa prover under ut-
torkningen efter regnet. De resultat som redovisas i FIG. VII:36-38 har
bedömts som "relativt tillförlitliga". Några helt säkra resultat är det
emellertid inte. Fuktkvoterna redovisas som medelfuktkvot i respektive
snitt. Inom ett snitt kan det finnas kraftiga gradienter, främst vid tiden
0. I stället för fuktkvoten 20 vikts-% i ett helt snitt kan fuktkvoten
mycket väl vara 35 vikts-% i ena halvan och 5 vikts-% i andra halvan. I
de fall då fuktkvoten inte förändrats under uttorkningen redovisas enbart
en kurva (0-värdet).

4.4 Fuktprofil under och efter ett regn, elektrisk mätmetod

Dessa mätningar har enbart gjorts med gasbetong som underlag. Denna gas-
betong är ej identisk med den som använts i försöken i de övriga delrappor-
terna. Anledningen till detta är att mätmetoden krävde att provkropparna
tillverkades på ett speciellt sätt. Utgångsmaterialet är dock detsamma.
Provkroppstillverkningen beskrivs i avsnitt 4.2 och i delrapport I. Den i
försöken använda utrustningen beskrivs i huvudsak i avsnitt 4.1 och 4.2.
Förutom denna utrustning användes i vissa fall, för att variera uttorknings-

betingelserna, även fläkt (varierande vindhastighet) och IR-lampor (solstrålning) enligt avsnitt 4.1 i delrapport VI.

Försöken genomfördes genom att proverna utsattes för slagregn med olika intensitet och varaktighet, åtföljt av uttorkning under olika klimatbetingelser. Under hela försöken registrerades fuktprofilen i underlaget.

Totalt genomfördes 8 olika försök. Alla försök är gjorda på exakt samma provkroppar. Detta medför bland annat att provkroppsåldern inte är samma vid de olika försöken. Vid det första försöket var proverna ca 1 månad gamla och vid det sista ca 1 år. En annan konsekvens av att samma prover använts är att startfukttinnehållet inte alltid är detsamma. Att konditionera proverna till samma startfukttinnehåll mellan varje försök var av praktiska skäl inte möjligt.

Proverna 8 och 10 har enligt delrapport I en skada i ytskiktet. Denna skada skall illustrera ett fall med en relativt bred spricka i ytskiktet. Sprickan är placerad mitt på provytan och löper parallellt med elektroderena. Sprickbredden i prov 10 ökades något innan försök 5.

Syftet med mätningarna var inte att få några exakta siffror, utan främst att jämföra olika putser, olika slagregnsintensitet, olika slagregnsvaraktighet samt olika uttorkningsbetingelser. Att direkt jämföra försök i början med försök i slutet är något osäkert. Olika provkroppsålder, olika startfukttinnehåll, etc medför nämligen att resultatet förändras. Rent principiella jämförelser är dock möjliga.

De genomförda försöken är sammanställda i TAB. VII:3. I tabellhuvudet anges dels den åsyftade intensiteten respektive totala slagregnsmängden och dels den verkligt erhållna slagregnsmängden. Om inget speciellt anges under rubriken "torkklima" så har uttorkningen skett i 20°C, 65% RF och med vindhastigheten 0.1-0.2 m/s. Med "ja" under "vind" avses att vindhastigheten varit 2-3 m/s. Med "ja" under "sol" avses att proverna intermitterant bestrålats med IR-lampor under 6 timmarsintervall och med 6 timmarsintervall mellan bestrålningen.

Försöken 1-3 är gjorda med samma slagregnsdata men med olika uttorkningsbetingelser. Som framgår av TAB. VII:3 var spridningen i slagregnsintensiteten stor i det första försöket. Den använda slagregnsintensiteten och varaktigheten torde överensstämma med ett relativt litet verkligt slagregn.

I försöken 4-5 har slagregnsvaraktigheten fördubblats jämfört med försöken 1-3.

I försök 6 har slagregnsintensiteten varit densamma som i försök 1-5 men varaktigheten har förlängts väsentligt. Detta slagregn kan anses vara ett "mycket långvarigt slagregn".

I försöken 7-8 har slutligen den totala slagregnsmängden varit densamma som i försök 1-3. Intensiteten har däremot varit större samtidigt som varaktigheten varit mindre.

Samtliga mätningar kan av praktiska skäl inte redovisas här (totalt 8x12 provkroppar) utan ett urval måste ske. Dels har provkroppar med likartade resultat sammanförts och dels olika försök med i princip samma resultat.

I huvudsak gäller att prover med K-, KC- och M-bruk gav samma resultat. Vidare gav försöken 1 och 2 respektive 7 och 8 samma resultat, bortsett från enstaka prover. Den väsentliga skillnaden var att de organiska tunnputserna absorberade mindre vatten, ca hälften, vid försöken 7-8 jämfört med 1-2.

Förutom de i FIG. VII:39-43 redovisade kombinationerna provades även ytterligare en organisk tunnputs. Denna applicerades dels direkt på gasbetongen och dels på KC-putsad gasbetong (prov (7) och (8) enligt TAB. I:2 i delrapport I). Dessa prover absorberade inget vatten under slagregnen.

Siffrorna inom parentes i samband med de kommersiella putserna anger littera enligt TAB. I:2 i delrapport I. Vid respektive puts anges även hur stor vattenmängd som absorberats under regnet ($G \text{ kg/m}^2$). För tunnputser med spricka är denna angivelse något oegentlig, eftersom en stor del av vattnet absorberas i själva sprickan.

Den i FIG. VII:39 angivna absorberade mängden avser den som erhöles vid försök 2.

Vid utvärderingen av försöken måste man ha klart för sig att i fallen med spricka så gäller angivna fuktprofiler enbart rakt innanför sprickan. Vid sidorna är fuktprofilen helt annorlunda.

4.5 Medelfuktinnehåll under och efter ett regn

I samband med andra forskningsprojekt har vattenuptagning under regn och uttorkning efter regn bestämts för en mängd olika i marknaden vanligt förekommande putser. Som underlag har olika gasbetongkvaliteter använts. Vid försöken har enbart provkropparnas medelfuktinnehåll bestämts genom vägning. Allt putsningsarbete har utförts av putstillverkaren eller av denna anvisad person.

Ur större block utsågades 100x100 mm provkroppar som torkades och förseglades på sidoytorna. Förseglingen gjordes med "epoxifuktspärr" och plastpåsar. Härfter utsattes proverna för slagregn med intensiteten 1.1-1.3 kg/m²·h och varaktigheten 6 h. Uttorkningen efter detta regn skedde i 20°C, 65% RF och med vindhastigheten 0.1-0.2 m/s.

I FIG. VII:44 redovisas några resultat från mätningar på i huvudsak Siporex med densiteten 475 kg/m³ som underlag. Med Siporex som hade densiteten 235 kg/m³, blev den absorberade vattenmängden under slagregnet i allmänhet mindre. Detta medförde även att uttorkningstiden blev mindre. Ytong med densiteten 255 kg/m³ gav i huvudsak samma resultat som Siporex med densiteten 475 kg/m³. Akryltunnputsen hade dock i detta fall rikligt med "pinholes" med följd att resultatet avvek kraftigt enligt FIG. VII:44.

Ovanstående försök har även gjorts på prover där underlaget gjorts vattenavvisande innan putsningen. Detta gjordes genom besprutning med "silikon". Putserna som användes i detta fall var inte identiska med de i FIG. VII:44. Resultatet från några provningar på "YTONG, kvalitetsgrupp 450", med densiteten ca 400 kg/m³, redovisas i FIG. VII:45.

4.6 Medelfuktinnehåll vid cykliskt återkommande regn

Dessa mätningar har gjorts med samtliga putser enligt TAB. I:2 i delrapport I på gasbetong och tegel. Ur färdigputsade gasbetongblock respektive tegelstenar uttogs mindre provkroppar som förseglades diffusionstätt med en epoxifuktspärr på sidorna. Tvärsnittsytan på proverna var 30-50 cm². Djupet var (exklusive putsen) för gasbetongproverna 70 mm och för tegelproverna 120 mm. Förutom med epoxifuktspärren förseglades sidorna och baksidan även med plastpåsar.

Vid provningens start var gasbetongproverna ca 4 månader gamla medan tegelproverna var ca 8 månader. Tegel- och gasbetongproverna är ej provade vid

samma tillfälle, vilket medfört att provningsbetingelserna ej är identiska.

Provkropparna utsattes för slagregn med viss intensitet och varaktighet åtföljt av uttorkning under viss tid. Härefter återupprepades slagregnet åtföljt av uttorkning, etc. Proverna vägdes alltid innan och efter slagregnet. Skillnaden mellan dessa värden ger då den under slagregnet absorberade vattenmängden. Skillnaden mellan vikten efter ett slagregn och vikten innan nästföljande regn ger den mellan regnen uttorkade vattenmängden.

Slagregnsintensiteten och tiden mellan slagregnen har varierats enligt resultatdiagrammen. Slagregnsvaraktigheten har alltid varit 3 1/4 h. Förutom dessa avsedda variationer har under försöket vissa enstaka avvikelser förekommit. Enstaka sådana avvikelser saknar praktisk betydelse och redovisas därför inte. Den enda väsentliga avvikelsen, vid försöken med gasbetong som underlag, var att slagregnsapparaten var ur funktion under tiden 4-11 dygn.

Resultaten redovisas i FIG. VII:46-61. I den övre figuren visas det totala fuktöverskottet som funktion av tiden. Den angivna kurvan avser vattenöverskottet innan nytt regn (efter föregående regn följt av uttorkning).

I den undre figuren visas den under ett regn absorberade respektive mellan två regn uttorkade vattenmängden. Även den totala slagregnsmängden under ett regn redovisas i den nedre figuren.

Mellan ovanstående figurer redovisas slagregnsintensiteten under regnperioderna samt tiden mellan regnperioderna.

Vid försöken med tegel som underlag var spridningen i slagregnsintensiteten stor under de 3 första körningarna. I allmänhet var intensiteten 20-30% större än den angivna. Av överskådlighetsskäl har kurvorna i de understa figurerna i vissa fall korrigerats med hänsyn härtill. De övre kurvorna är dock de verkliga mätresultaten.

Kurvan för den traditionella 3-skiktsputsen på gasbetong avser en provkropp medan alla andra är medelvärden av två provkroppar. I de översta figurerna är spridningen ca $\pm 5\%$ bortsett från cementputsen på gasbetong där spridningen är ca $\pm 50\%$. I de nedre figurerna är spridningen ca $\pm 20\%$. Spridningen avser avvikelser hos enskilda mätresultat, både mellan olika

provkroppar och mellan olika mättillfällen, från den angivna medelkurvan. Att spridningen blir mindre med avseende på det ackumulerade fuktöverskottet beror på att en stor/liten vattenupptagning under ett slagregn kompenseras av en stor/liten uttorkning mellan regnen.

Anledningen till den stora spridningen i fallet med cementputs är okänd.

I proverna med "organisk tunnputs (6)", "organisk tunnputs med spricka (8)" och "organisk tunnputs (9)" ackumulerades ingen fukt i något underlag. Under slagregnsperioderna absorberades 0.1-0.3 kg/m². Denna mängd torkade dock ut innan nästa regn. Till största delen torde denna vattenmängd motsvara den fukt som absorberas på ytan under regnet.

Den kraftiga ökningen av fuktöverskottet i början beror till stor del på att proverna inte var helt i fuktjämvikt med det klimat som rådde under uttorkningsperioderna.

5 DISKUSSION AV RESULTATEN

5.1 Allmänt

De erhållna mätresultaten uppvisar i allmänhet god överensstämmelse med de teoretiska modellerna i avsnitt 2.2. Vid direkta jämförelser måste man observera att alla mätningar inte är gjorda under exakt samma försöksbetingelser, vilket till en del försvårar direkta jämförelser. Allmänt kan man dock konstatera att sambandet mellan egenskaperna hos puts och underlag har en avgörande betydelse. En viss puts på olika underlag kan påverka resultaten på helt olika sätt.

I det följande diskuteras inte varje mätning för sig. I stället diskuteras inverkan av vissa faktorer med samtidig hänvisning till olika mätningar. Denna indelningsgrund underlättar i mycket hög grad kvalitativa jämförelser, dels inom denna delrapport och dels med andra delrapporter.

5.2 Egenskaper hos puts och underlag

Enligt avsnitt 2.2 har porstrukturen hos puts och underlag en mycket stor betydelse för händelseförloppet under och efter regn. Enligt övriga delrapporter beror porstrukturens stora betydelse på att den påverkar kapillär sugförmåga, kapillär sugningsmotstånd, kapillär mättnadsfuktkvot och kritisk fuktkvot med avseende på kapillärtransport. Ett finporöst material har stor kapillär sugförmåga och stort motstånd mot kapillärtransport. För ett grovporöst material gäller motsatsen.

De i undersökningen ingående materialen kan inte renodlat klassificeras som grovporösa eller finporösa. I huvudsak kan man emellertid säga att tegelunderlaget är mer grovporöst än gasbetongunderlaget. Tjockputserna kan placeras mellan dessa båda underlag.

Enligt avsnitt 2.2 (se bl a FIG. VII:2, VII:5, VII:7 och VII:8) medför grovporös puts på finporöst underlag respektive finporös puts på grovporöst underlag helt skilda resultat. Av FIG. VII:33 framgår klart hur underlaget påverkar fukttinnehållet i putsen under ett slagregn. I början av regnet, innan vattenfronten i putsen når underlaget, ökar putsens fukttinnehåll på samma sätt i båda fallen. När vattenfronten når underlaget (efter ca 2 h

i fallen med enbart utstockning) förändras dock fukttinnehållen på olika sätt. Med gasbetong som underlag minskar här fukttinnehållet i putsen. Denna minskning, som beror på att underlaget har stor sugförmåga och alltså snabbt kan suga åt sig vatten från putsen (snabbare än vattentillförseln), pågår under några timmar. Efterhand som vattenfronten tränger in i underlaget ökar även det totala motståndet varför transportkapaciteten minskar, med följd att fukttinnehållet i putsen åter ökar. Med tegel som underlag sker inte ovanstående minskning av putsens fukttinnehåll då fronten når underlaget, utan putsens fukttinnehåll ökar ständigt.

Även de olika putserna ger olika resultat. Skillnaden är mest markant för den mest grovporösa putsen, K 100/800. FIG. VII:33 visar även hur putsuppbbyggnaden påverkar resultatet. En grundning mellan utstockning och underlag medför exempelvis att insugningen i gasbetongfallet blir långsammare.

Av FIG. VII:34 framgår underlagets betydelse för fukttinnehållet i putsen efter ett slagregn. Med gasbetong som underlag minskar putsens fukttinnehåll mycket snabbt, beroende på ovan nämnda insugning i underlaget. Med tegel som underlag sker däremot ingen insugning utan minskningen i fukttinnehåll här beror enbart på uttorkning. En grundning mellan utstockning och underlag saknar praktisk betydelse för händelseförloppet efter regnet. I FIG. VII:35 visas händelseförloppet i en 3-skiktsputs efter regn. Från det yttersta putsskiktet sker ingen insugning i något fall. Den mellanliggande utstockningen uppvisar dock samma mönster som enbart utstockning.

Den ovan diskuterade skillnaden mellan olika underlag framgår även av FIG. VII:36-37. Med gasbetongunderlag ökar fuktkvoten i underlaget efter det att regnet upphört. Denna insugning sker snabbt i vattenfas. Härfter sker uttorkningen av underlaget i ångfas, vilket är en långsam process. Med tegelunderlag sker däremot ingen ökning av underlagets fukttinnehåll efter det att regnet upphört.

Ovanstående innebär bland annat att om regnet slutar innan fuktfronten når underlaget, så kommer tegelunderlaget aldrig att absorbera något vatten. Hinner putsen sedan att torka ut innan nästa regn, så kommer samma förlopp att upprepas. Ju tjockare putsen är, desto mer vatten kan den absorbera, vilket i sin tur medför att större slagregnmängder kan hållas kvar i putsen utan att underlaget absorberar något vatten. I fallet med ett finporöst underlag kommer däremot underlaget att suga vatten från putsen. Detta

vatten skall sedan torka i ångfas, vilket kräver betydligt längre uttorkningstid. Följden blir att vid många småregn, med en viss uttorkningstid mellan regnen, kan fukttinnehållet i ett finporöst underlag ständigt öka, medan med ett grovporöst underlag ingen fuktackumulering sker. Detta illustreras mycket tydligt av FIG. VII:46-61. Med tjockputser på gasbetong sker här i allmänhet en ständig ökning av fukttinnehållet medan med tegelunderlaget "ingen" fuktackumulering sker.

Av FIG. VII:46-61 framgår även att en tjockputs på gasbetong medför ett högre fukttinnehåll än utan puts. För tegel gäller däremot motsatsen.

Ett sätt att minska fuktupptagningen under slagregn, i fallet med puts på gasbetongunderlag, är att avbryta kapillärsugningen någonstans. Detta bör då göras utan att uttorkningsmöjligheterna försämras. Ett enkelt sätt att åstadkomma detta i praktiken är att göra underlagets yta vattenavvisande, exempelvis genom någon form av hydrofobering. Eftersom uttorkningen genom putsen ändå alltid sker i ångfas har denna hydrofobering ingen praktisk betydelse för uttorkningen. Kapillärsugningen inåt stoppas däremot effektivt. Effekten av en sådan impregnering av underlagets yta framgår av FIG. VII:45.

Av FIG. VII:39-43 framgår hur omfördelningen efter olika slagregn sker. Omedelbart efter regnet finns en vattenfront med fukttinnehållet lika med den kapillära mättnadsfuktkvoten. Härfter sker en relativt snabb sänkning av denna fuktkvot, till den kritiska med avseende på kapillärtransport, samtidigt som fronten tränger inåt i materialet. Härfter fortsätter en samtidig uttorkning och omfördelning i ångfas. (Jfr även FIG. VII:4)

5.3 Olika putser

De olika tjockputserna uppvisar inga principiella skillnader, även om naturligtvis absolutbeloppen varierar. Att jämföra absolutbeloppen är omöjligt eftersom provningsbetingelserna varierar något.

Skillnaden mellan organiska tunnputser och tjockputser är dock markant. De oskadade organiska tunnputserna absorberar obetydligt med vatten under slagregn. Uttorkningen efter slagregnet sker därefter relativt snabbt. Detta förhållande illustreras klart bl a av FIG. VII.44 samt av försöken med cyklistiskt slagregn.

Har den organiska tunnputsens lokala skador kan förhållandena ändras kraftigt. Genom skadan tränger lätt vatten in i underlaget, varvid lokalt höga fuktkvoter kan nås. Detta illustreras av FIG. VII:39-43 där de registrerade fuktkvoterna är höga, trots att den totalt absorberade fuktmängden är relativt liten. Efter det att regnet upphört kommer en utjämning att ske på samma sätt som diskuterats tidigare. Skillnaden blir enbart att flödena blir 2- eller 3-dimensionella. Även i detta fall är en ythydrofobering gynnsam. Detta framgår klart bl a av en jämförelse mellan de "organiska tunnputserna med spricka (8) och (10)". Puts (8) har en primer bestående av "silikon". Även försöken med cykliskt slagregn visar samma sak. Tunnputsen med "silikonprimer" uppvisar ingen fuktackumulering medan däremot den andra ackumulerar mer och mer vatten. Det exakta förloppet bestäms bl a av putsens ånggenomsläpplighet och klimatfaktorerna. Av FIG. VII:53 framgår exempelvis att med 2-3 dygns uttorkning mellan regnen sker en ständigt ökning av fukttinnehållet. Är uttorkningstiden däremot 7 dygn minskar fukttinnehållet. Om försöket fortsatt ytterligare hade troligen underlaget torkat "helt". Med tjockputser var däremot skillnaden mellan 2-3 dygns respektive 7 dygns uttorkning obetydlig.

Att den "organiska tunnputsens med spricka (10)" medför ett minskande fukttinnehåll när uttorkningstiden ökar till 7 dygn får inte tas som någon generell egenskap hos organiska tunnputser. Den aktuella tunnputsens har nämligen en stor ånggenomsläpplighet. En tätare puts medför naturligtvis ett annat förlopp.

5.4 Klimatets inverkan

Klimatfaktorer som studerats är solstrålning, olika vindhastighet, slagregnsintensitet, slagregnsvaraktighet samt tid mellan cykliskt återkommande slagregn.

Solstrålning och varierande vindhastighet har enbart studerats i samband med uttorkningen efter ett slagregn på prover med gasbetongunderlag. I de försök där vindhastigheten ökades var slagregnsmängden liten. Någon påverkan av den ökade vindhastigheten kunde inte mätas. Detta fanns heller ingen anledning att förvänta med hänsyn till tidigare erhållna resultat.

Solstrålningen har däremot en mycket stor betydelse för uttorkning och omfördelning. Jämför FIG. VII:39 med FIG. VII:40 respektive FIG. VII:41 med FIG. VII:42. Vid de små slagregnsmängder som användes i aktuellt fall var inverkan på uttorkningen inte av någon avgörande betydelse när gasbetongen var putsad. Omfördelningen påverkades däremot i mycket hög grad. Solstrålningen medförde att fukten transporterades inåt i provkroppen i mycket större omfattning än utan solstrålning. Ju "tätare" putsen var, desto mer utpräglad blev denna intransport.

Här måste dock påpekas att den utförda provningen inte överensstämmer med det i praktiken förekommande fallet. I verkliga väggar har man nämligen i allmänhet en temperaturgradient åt andra hållet, beroende på att inomhusluften normalt är varmare än utomhusluften. Ovanstående omfördelning motverkas till stor del av denna naturliga temperaturgradient. Även uttorkningshastigheten påverkas naturligtvis i mycket hög grad av denna temperaturgradient. De angivna siffervärdena är alltså inte direkt användbara för praktiska bedömningar av erforderliga uttorkningstider efter ett visst regn.

Sambandet mellan slagregnsintensitet och varaktighet ger den totala slagregnsmängden. För tjockputsar på gasbetong är det främst den totala slagregnsmängden som avgör hur mycket vatten som absorberas. För de organiska tunnputsarna är det däremot slagregnsvaraktigheten som är avgörande. Om ett mycket kraftigt slagregn under kort tid träffar en "öppen" respektive "tät" puts på gasbetong kan allt vatten absorberas vid den "öppna" putsen medan praktiskt taget inget absorberas i fallet med "tät" puts. Träffas väggarna av samma slagregnsmängd, men med liten intensitet och lång varaktighet, kan allt vatten absorberas i båda fallen.

Vid puts på tegel har slagregnsintensiteten betydligt större betydelse. Vid en stor slagregnsintensitet på en tegelvägg med tjockputs behöver inte allt vatten absorberas.

En "kritisk" slagregnsmängd är den mängd som erfordras för att kapillär-mätta putsen. (Jfr 5.2). Mindre mängder, oberoende av intensitet, medför i tegelfallet att underlaget inte absorberar något vatten. Under uttorkningen av detta vatten, som alltså finns i putsen, har både solstrålning och vindhastighet stor betydelse enligt delrapport VI.

Vid flera återkommande regn bestäms förloppet även av tiden mellan regnen. Den under ett regn absorberade vattenmängden skall jämföras med den mängd som torkar ut mellan regnen. Dessa mängder, både den absorberade och uttorkade, påverkas i mycket hög grad av fukttinnehållet i underlaget. Detta framgår klart av de nedre figurerna i FIG. VII:46-61. Vid slagregnsintensiteten $0.5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ och varaktigheten $3 \frac{1}{4} \text{ h}$ absorberas allt vatten i gasbetong utan puts. Med uttorkningstiden 2-3 dygn hinner denna mängd torka ut mellan varje regn. Ökas intensiteten till $0.9 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ absorberas fortfarande allt vatten. Uttorkningen mellan regnen blir nu inte lika stor, med följd att fukttinnehållet ökar successivt. Ökas nu uttorkningstiden till 7 dygn så hinner allt vatten torka mellan regnen igen. (se FIG. VII: 46)

Appliceras nu en tjockputs på gasbetongen så kommer fortfarande allt vatten att absorberas i början. Putsen medför emellertid att uttorkningen under de 2-3 dyggen blir otillräcklig varför fukttinnehållet ständigt ökar. Efterhand som fukttinnehållet ökar i underlaget ökar även uttorkningen och slutligen nås jämvikt mellan absorberad och uttorkad vattenmängd. Detta inträffar dock inte förrän underlaget är kapillärmättat. En ökning av slagregnsintensiteten till $0.9 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ medför ingen som helst förändring med avseende på det totala fukttinnehållet. En samtidig ökning av uttorkningstiden till 7 dygn medför ej heller någon väsentlig förändring. Den enda skillnaden är att lite mer vatten torkar mellan regnen. Detta motverkas dock av att mer vatten absorberas under regnperioderna. Ovanstående gäller för utstockningar av K-, M- och KC-bruk. Med cementbruk blir förhållandena annorlunda. Här är den uttorkade mängden i början konstant medan den absorberade mängden avtar. Detta beror på att själva putsen förmår hålla kvar vatten bättre än de övriga samtidigt som kapillärsugningsmotståndet är större. Putsen hinner sålunda inte torka ut mellan slagregnen, med följd att allt vatten inte kan absorberas av putsen, vilket var fallet med de andra putserna under de första 90 dyggen. Samtidigt har även underlagets fukttinnehåll ökat, vilket medfört att sugförmågan minskat. Eftersom inte allt vatten absorberas under slagregnet spelar det ingen roll om intensiteten ökar. Ökad uttorkningstid medför å andra sidan att den uttorkade vattenmängden ökar.

Med den traditionella 3-skitputsens är förhållandena likartade med exempelvis KC-putsen under den första perioden. Den uttorkade fuktmängden mellan regnen är här dock större, beroende på att själva putsen på grund av sin uppbyggnad kan kvarhålla en större mängd efter regnet. Denna mängd

torkar sedan relativt lätt utåt (Jfr FIG. VII:35). När slagregnsintensiteten (och därmed den totala slagregnsmängden) ökar, så ökar även fuktinnehållet i underlaget snabbt till kapillärmättnad.

Tegelunderlaget medför helt andra resultat. I fallet med tegel utan puts avtar den absorberade vattenmängden under slagregnsperioderna trots att underlaget inte är vattenmättat. Detta stämmer inte med den tidigare teoretiska behandlingen i avsnitt 2 och diskuteras mer i nästa avsnitt.

I fallen med puts på tegel sker inte i något fall någon väsentlig fuktackumulering, oberoende av slagregnsintensitet och uttorkningstid. Under regnen absorberas i huvudsak så mycket vatten så att putsen kapillärmättnas. Denna mängd hinner sedan torka ut mellan regnen, bortsett från en insvängningsperiod i början.

5.5 Avvikande resultat

Mindre avvikelser och spridningar mellan olika försök beror i huvudsak på varierande materialegenskaper och provningsbetingelser. Resultaten uppvisar emellertid två väsentliga avvikelser från de teoretiska resonemangen tidigare, nämligen de cykliska slagregnsförsöken med enbart tegel och med cementputs på gasbetong.

Med cementputs på gasbetong (FIG. VII:50) absorberas först vatten tills underlaget är kapillärmättat. Härefter sjunker fuktinnehållet trots att randvillkoren är oförändrade. När sedan uttorkningstiden ökar mellan regnen ökar uttorkningen kraftigt. Den absorberade vattenmängden under slagregnsperioderna minskar ständigt till ett konstant värde, som är mycket lägre än den vattenmängd som absorberades i början. Det totala fuktinnehållet går ständigt nedåt och tenderar att nå "noll-nivån". En trolig orsak till ovanstående är att cementputsen under försökets gång förändrat sina fuktmekaniska egenskaper. En fortgående hydratisering medför exempelvis att porsystemet förfinas, vilket i sin tur medför att kapillärsugningsmotståndet ökar. Den absorberade vattenmängden bör alltså avta efterhand. Den fortsatta hydratiseringen är helt naturlig i cementputser och har i aktuellt fall påskyndats av att putsen "ständigt" tillförts vatten.

Vid cykliskt slagregn på enbart tegel absorberas i början, enligt FIG. VII:54, allt vatten. Efterhand minskar den absorberade vattenmängden till jämvikt råder med den mellan regnen uttorkade vattenmängden. Detta inträffar innan provkroppen är kapillärmättad. En ökad uttorkningstid mellan regnen medför att den mellan regnen uttorkade vattenmängden till en början ökar något. Den under regnperioderna absorberade vattenmängden är dock oförändrad.

Med utgångspunkt från tidigare resonemang (avsnitt 2) borde betydligt mer vatten absorberas under slagregnsperioderna. En enkel bedömning av den minsta mängd som borde absorberas kan göras genom att anta en fuktfördelning enligt FIG. VII:62 samt förutsätta att en front med det kritiska fuktinnehållet förflyttar sig inåt. Att fuktnivån inställer sig på den kritiska är enligt delrapport III ett rimligt antagande. Ekvation (VII:2) ger ett reducerat kapillaritetstal $B_{red} = 0.05 \text{ kg/m}^2 \cdot \sqrt{s}$. Sambandet mellan uppsugningshastighet och uppsugen vattenmängd blir då enligt ekvation (V:32) i delrapport V

$$g = \frac{0.05^2}{2 \cdot G} \quad (\text{VII:12})$$

där g = uppsugningshastighet	$\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$
G = totalt absorberad vattenmängd	kg/m^2

Ekvation (VII:12) ger att kapillärsugningskapaciteten vid aktuellt fuktinnehåll, 3-4 kg/m^2 , är ca 1-2 $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}$. Under ett slagregn med intensiteten ca 1 $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}$ och varaktigheten ca 3 h borde alltså hela slagregnsmängden absorberas. I verkligheten absorberas emellertid endast en tredjedel.

En tänkbar förklaring till att teglet inte förmår absorbera allt vatten är någon form av "luftblockad". När teglets fuktinnehåll är lika med det kritiska finns ju ett sammanhängande nätverk av vatten. Detta nätverk kan då innehålla isolerade "luftöar" enligt FIG. VII:63. Under uttorkningen mellan regnen töms porsystemet närmast ytan praktiskt taget helt. När nästa regn träffar väggen sugs till en början allt vatten in. Efterhand som ytan kapillärmättas "täpps" porerna av vattnet. Härefter kan luften framför vattenfronten inte fritt avgå åt något håll. Inåt i provet hindrar vattnet i det förut fyllda kritiska porsystemet. Utåt hindrar det nya vattnet. Följden blir att ett övertryck bildas mellan de två vattenfron-

terna i materialet. Detta övertryck motverkar nu den fortsatta vattenupptagningen. Övertrycket medför att det gamla vattnet pressas inåt. Denna inpressning är dock av liten omfattning eftersom det är de minsta portvärsnitten som här bestämmer förloppet (desorption enligt delrapport III). I det nya vattnet bestäms däremot förloppet av de största portvärsnitten (absorption enligt delrapport III). För att mer vatten skall kunna absorberas måste den instängda luften diffundera genom vattnet. Denna diffusion av den instängda luften sker relativt långsamt, varför även vattenupptagningen blir långsam.

Ovanstående resonemang, som enbart är en hypotes, medför ett fuktmekaniskt händelseförlopp enligt FIG. VII:64.

Att samma fenomen ej uppstår i gasbetong beror på att porsystemet har ett annorlunda utseende. Några isolerade "luftöar" uppstår inte i detta fall.

LITTERATUR

- Beijer, O & Johansson, A, 1976, Slagregn mot betongfasader. CBI-forskning/research 7:76. Stockholm.
- Frank, W, 1973, Einwirkung von Regen und Wind auf Gebäudefassaden. Berichte aus der Bauforschung, Heft 86. Wilhelm Ernst & Son.
- Hoppestad, S, 1955, Slagregn i Norge. (Norges Byggforskningsinstitutt). Oslo.
- Järnmark, T, 1968, Slagregn 2 - Slagregnsfördelningen i Sverige. Statens Institut för Byggnadsforskning. Informationsblad 40/68. Stockholm.
- Künzel, H, 1964, Untersuchungen über die Feuchtigkeitsverhältnisse in häufig berechneten Aussenwänden. Gesundheits-Ingenieur, 85 Jahrgang, Heft 9.
- Künzel, H, 1966, Untersuchungen über das Feuchtigkeitstechnische Verhalten von Aussenanstrichen und -beschichtungen auf Gasbeton bei natürlicher Bewitterung. Betonstein-Zeitung, Heft 1/1966.
- Künzel, H, 1966, Feuchtigkeitstechnische Untersuchungen im Zusammenhang mit Anstrichen auf Aussenputzen. Zement-Kalk-Gips, Nr 1/1966.
- Lawson, E M, 1974, External rendering-Scottish experience. CIB/RILEM Symposium on Moisture Problems in Buildings. Rotterdam.
- Navander, L E, 1972, Slagregn på fasadtegelväggar. Nordiskt Symposium om Murverkskonstruktioner. Stockholm.
- Reinsdorf, S & Unverricht, M, 1976, Nachweis der Eignung von Oberflächenbeschichtungen auf Gasbeton durch Freilandversuche. Baustoffindustrie, 1976, B5, Oktober.
- Sandberg, P I, 1974, Klimatförutsättningar. Inst f Byggnadsteknik, LTH. Lund.

Sandin, K, 1978, Metod för fuktprofilmätning i gasbetong. Internrapport Byggnadsmateriallära (stencil), LTH, Lund.

Svensen, S D, 1955, Driving rain. Norwegian Building Research Institute. Report No. 20. Oslo.

Taesler, R, 1972, Klimatdata. Byggeforskningen. Stockholm.

Varnbo, B, 1966, Slagregn. Handling nr 14, Svenska Riksbyggen. Stockholm.

Vos, B H & Tammes, E, 1968, Flow of water in the liquid phase. Institute TNO for building materials and building structures. Report BI-68-38. Delft.

TAB. VII:1. Slagregnsapparaters inställning.

Munstyckets gånglängd i sidled	850 mm
Provkroppens utsträckning i sidled	580 mm
Tryck	0.05 MPa
Tid mellan två pulser	1.71 s
Tid för fram <u>och</u> tillbakarörelse i sidled	40.4 s
Tid för upp- <u>och</u> nedåtgående rörelse	238.5 s

TAB. VII:2. Resultat av kalibreringsförsök.

Munstycke	Slagregnsintensitet medelvärde	(kg/m ² ·h) intervall
1A	1.79	1.71-1.90
1B	0.30	0.27-0.34
2B	1.09	0.99-1.20
10	0.45	0.40-0.48

TAB. VII:3. Sammanställning av genomförda försök med elektrisk fuktmätningssmetod

Försök	Slagregns- varaktighet (h)	Avsedd intensitet (kg/m ² ·h)	Avsedd to- talmängd (kg/m ²)	Verklig to- talmängd (kg/m ²)	Torkklimat	
					vind	sol
1	3 1/2	0.4	1.4	1.0-1.9	-	-
2	3 1/2	0.4	1.4	1.4-1.6	ja	-
3	3 1/2	0.4	1.4	1.2-1.6	-	ja
4	6 1/2	0.5	3.2	3.0-4.0	-	-
5	6 1/2	0.5	3.2	2.8-3.8	-	ja
6	23	0.5	11.5	10.3-11.5	-	-
7	1	1.4	1.4	1.2-1.5	-	-
8	1	1.4	1.4	1.4-1.7	ja	-

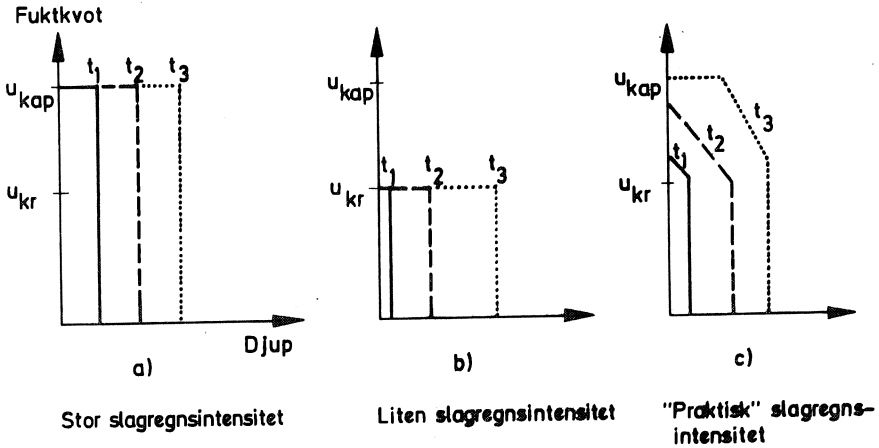


FIG. VII:1. Principskisser för vattenabsorption vid slagregn mot torrt material.

Water absorption in a dry material during a driving rain.

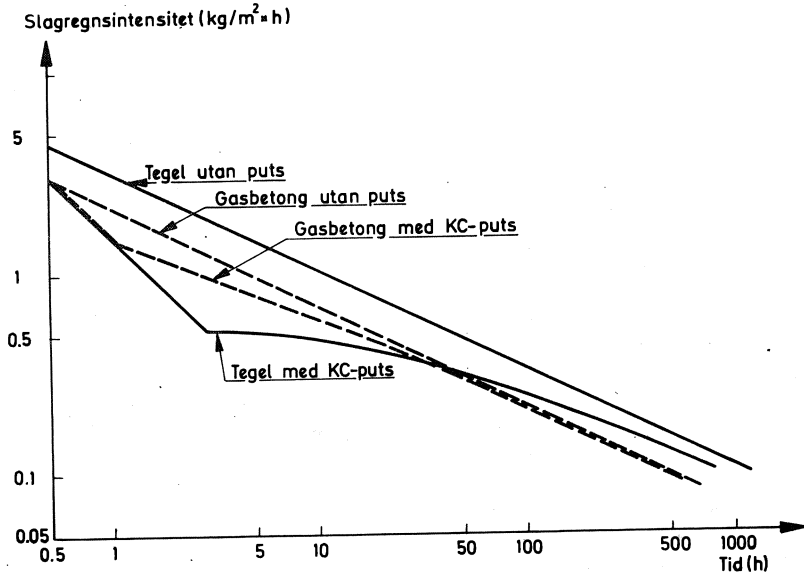


FIG. VII:3. Beräknade tider till vattenfilmbildning.

Calculated times when a film of water is formed on a surface at different rain intensities.

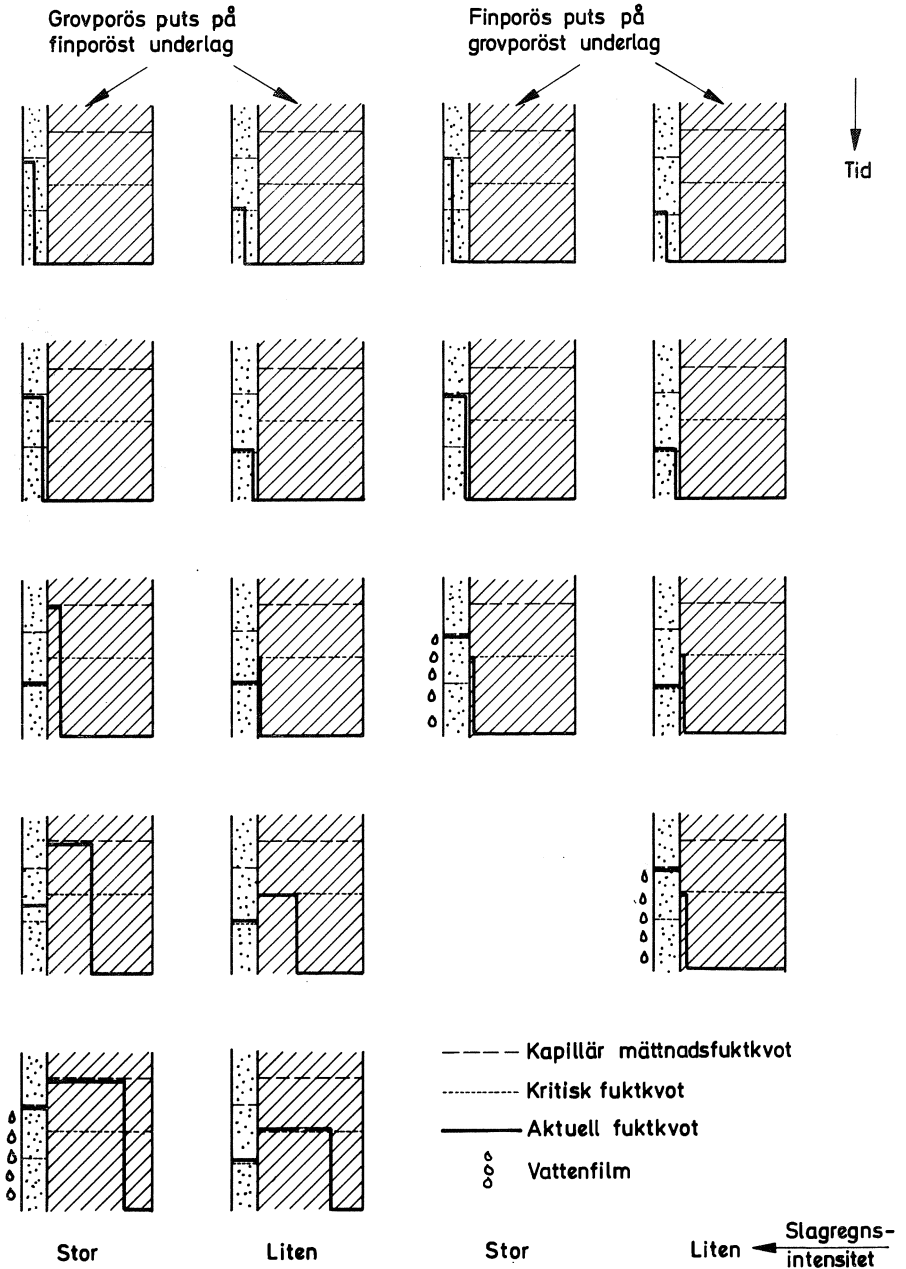


FIG. VII:2. Olika principfall vid slagregn på en materialkombination.
Water absorption in a combination of materials during driving rain.

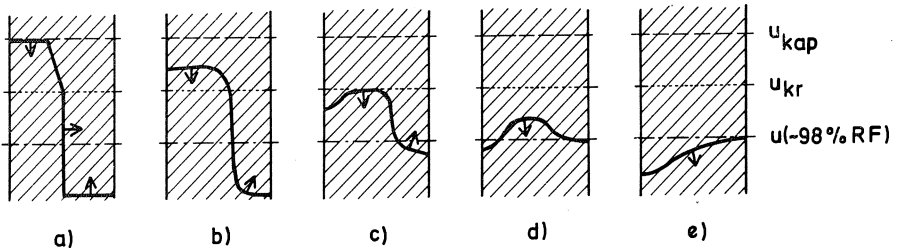


FIG. VII:4. Principiellt förlopp efter slagregn på enskilt material.
Moisture conditions after driving rain on a single material.

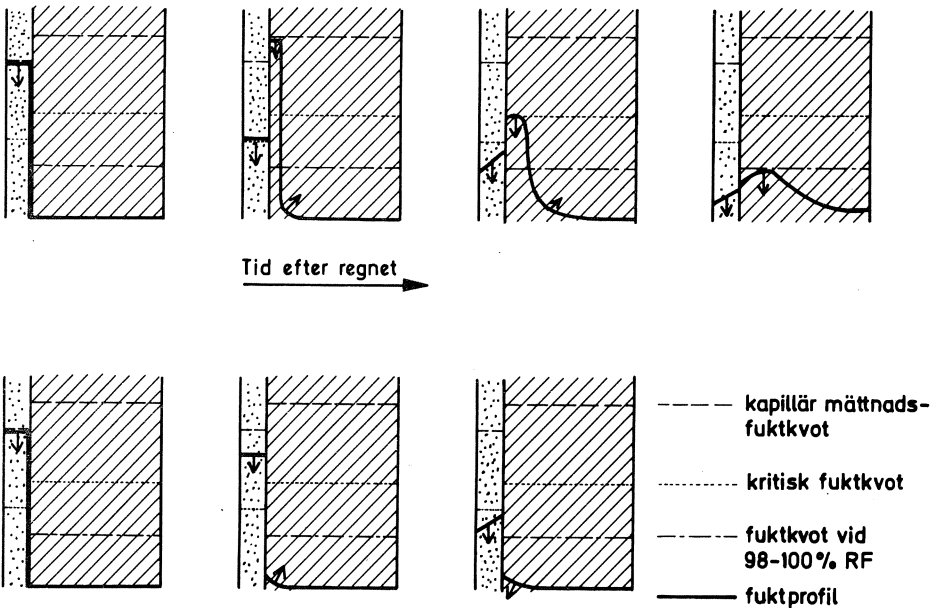


FIG. VII:5. Principiellt förlopp efter litet slagregn på grovporös puts-finporöst underlag (överst) respektive finporös puts-grovporöst underlag (underst).
Moisture conditions after a driving rain on rendered walls. Coarse-porous rendering on a fine-porous underlayer (upper) and fine-porous rendering on a coarse-porous underlayer (bottom).

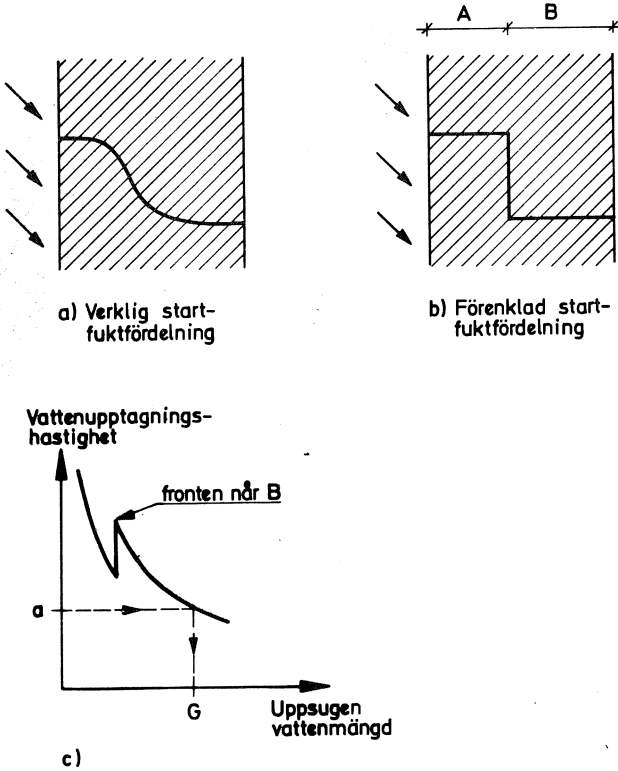


FIG. VII:6. Forenkla metod for att uppskatta tid till vattenfilm-bildning vid slagregn.

Simplified method of estimating the time until a water film is formed on a surface during a driving rain.

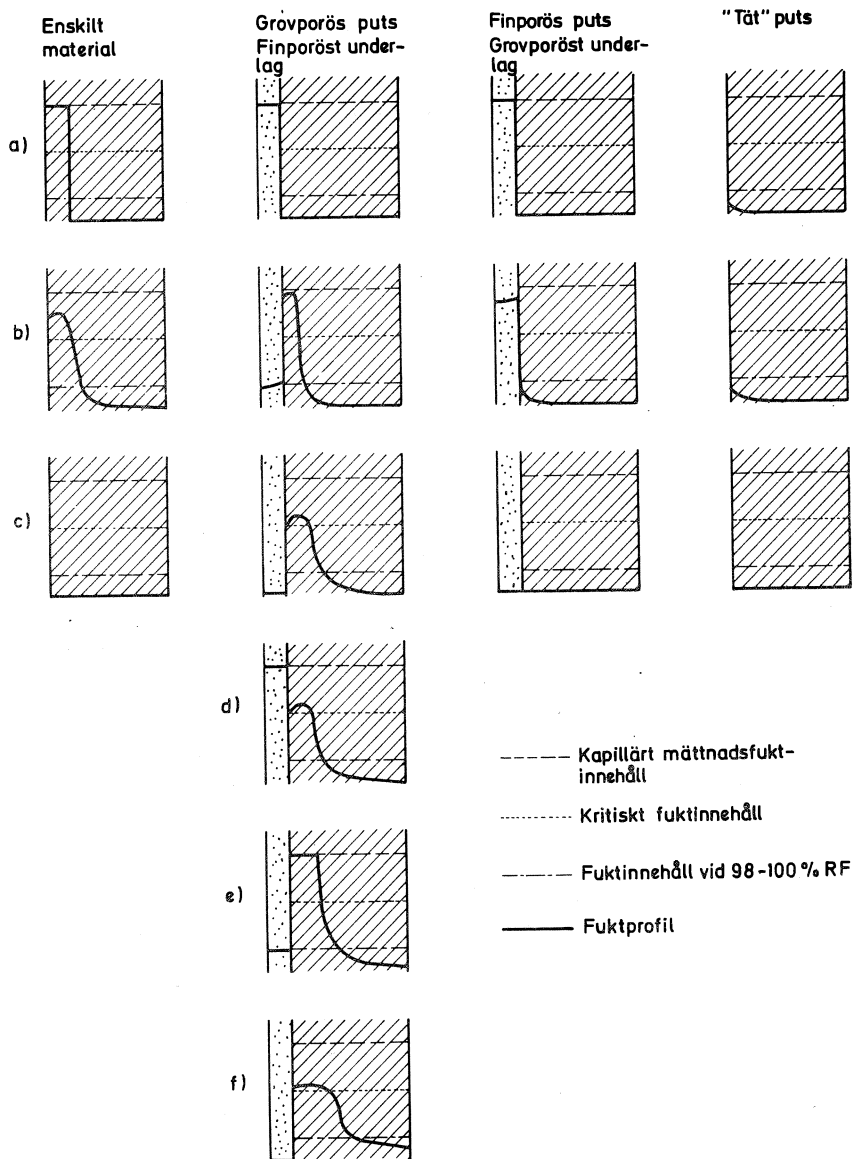


FIG. VII:7. Principförlopp vid små cykliska slagregn på olika materialkombinationer.

Moisture conditions in combinations of materials during and after several driving rains.

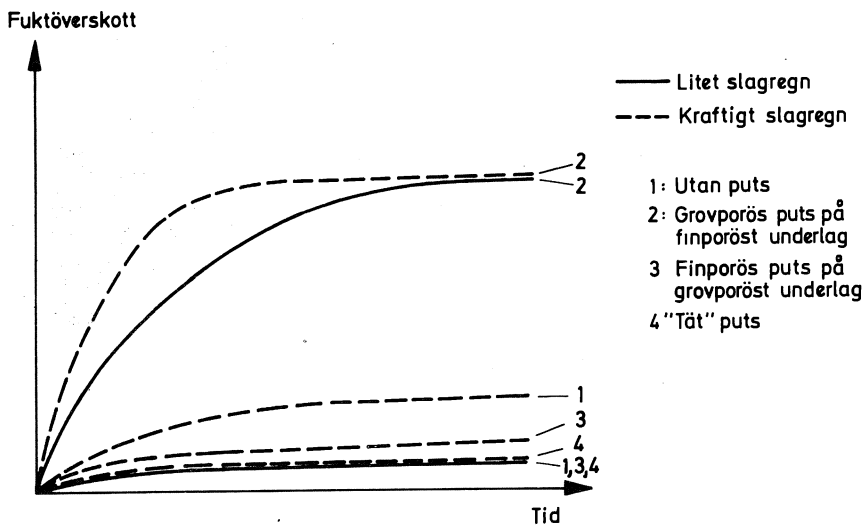


FIG. VII:8. Fuktackumulation vid cykliskt slagregn.

Accumulation of moisture during cyclic driving rains.

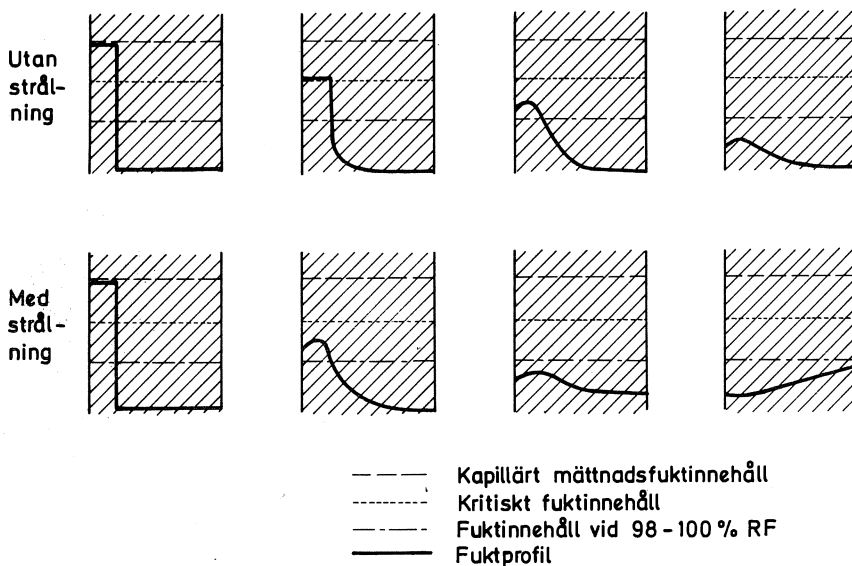


FIG. VII:10. Solstrålningens inverkan på fuktförhållandena efter ett slagregn.

Effect of sun radiation on moisture conditions after a driving rain.

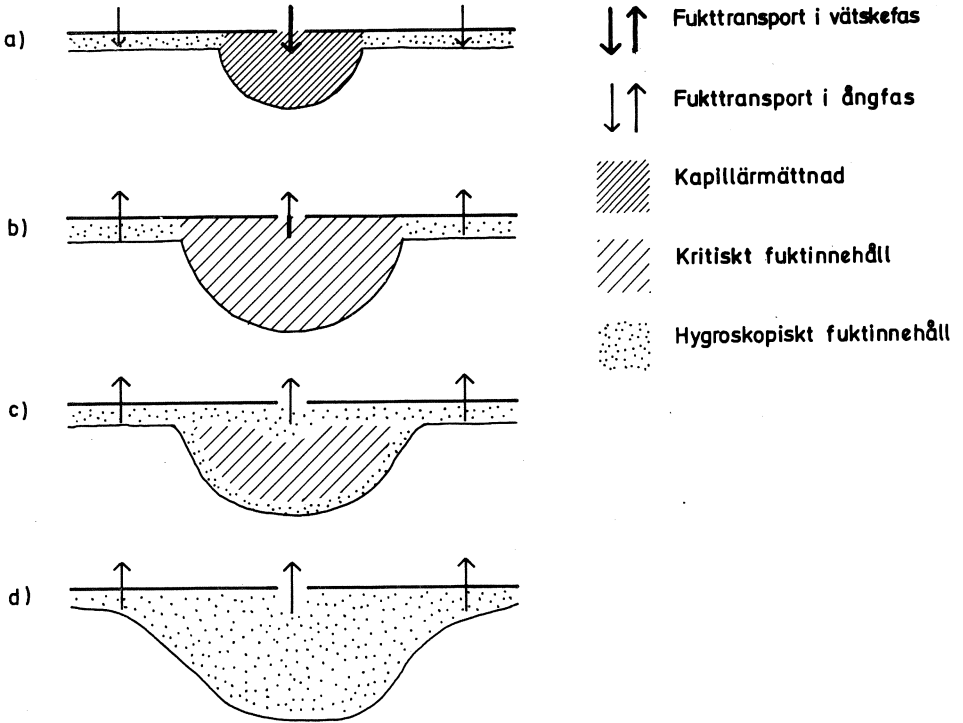


FIG. VII:9. Fuktupptagning och uttorkning vid spricka.

Moisture absorption and drying out when there is a crack in a tight surface coating.

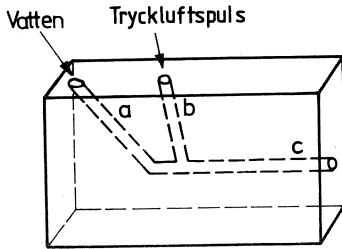
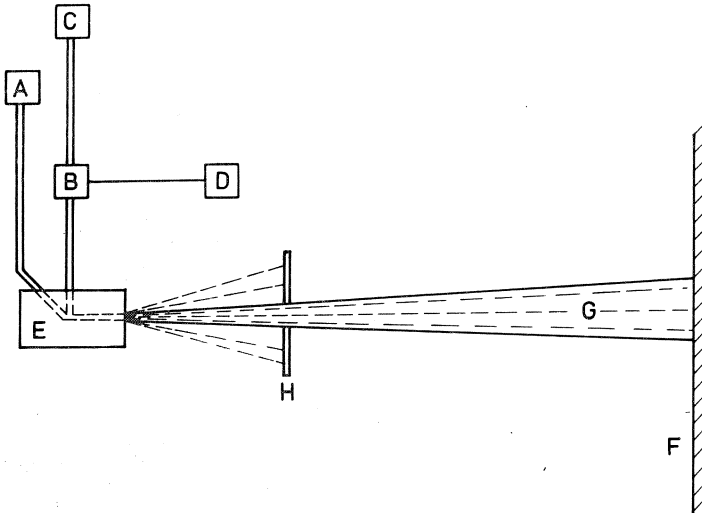


FIG. VII:11. Slagregnsmunstycke.

Nozzle of driving rain machine.



- A: vatten med konstant övertryck i förhållande till munstycke
- B: magnetventil
- C: tryckluft
- D: pulsstyrning
- E: munstycke
- F: provyta
- G: droppsvärm
- H: avskärmning

FIG. VII:12. Principskiss över slagregnsapparat.

Driving rain machine, schematic.

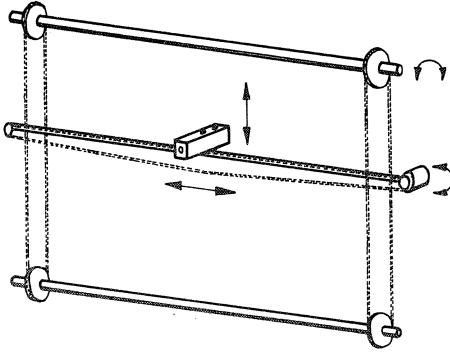


FIG. VII:13. Slagregnsapparatens rörliga delar.
Movable parts of driving rain machine.

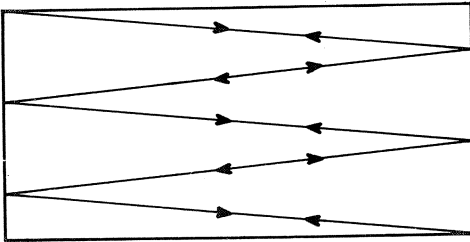


FIG. VII:14a. Apparatinställning så att samma banor körs
efter varje vändpunkt i vertikalled.
*Driving pattern when the machine is adjusted
to do identical cycles.*

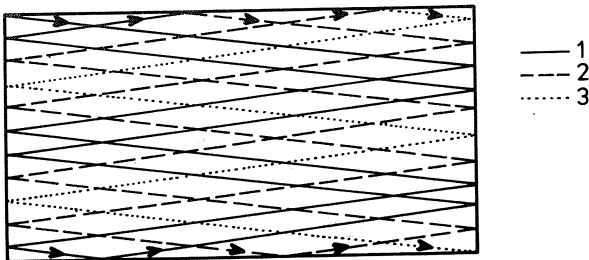


FIG. VII:14b. Apparatinställning så att samma banor körs
efter 5 vändningar i vertikalled.
*Driving pattern when the machine is adjusted
to do different cycles.*

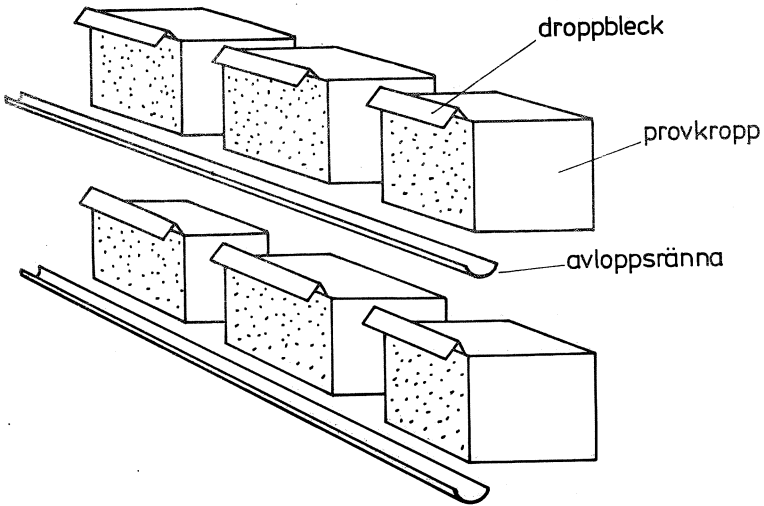


FIG. VII:15. Provkroppar med droppbleck och avloppsrännor.

Arrangement of specimens at driving rain tests.

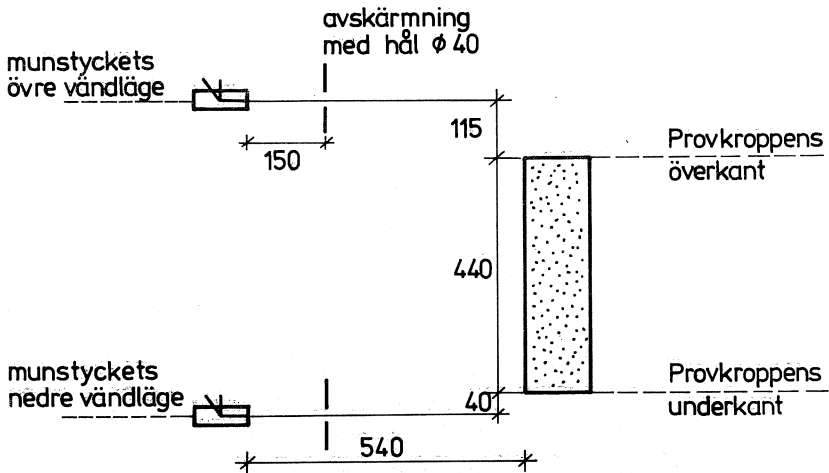


FIG. VII:16. Slagregnsapparatens inställning.

Adjustment of the driving rain machine.

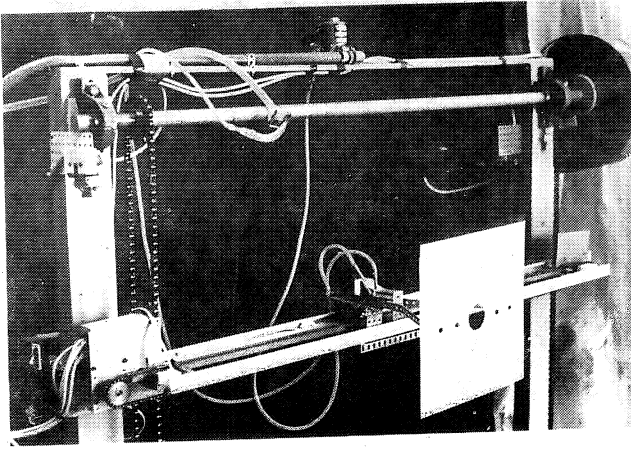


FIG. VII:17. Slagregnsapparat.
Driving rain machine.

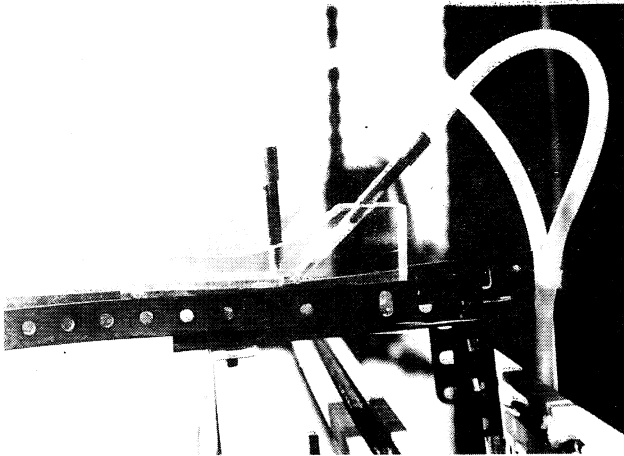


FIG. VII:18. Munstycke till slagregnsapparat.
Nozzle of the driving rain machine.

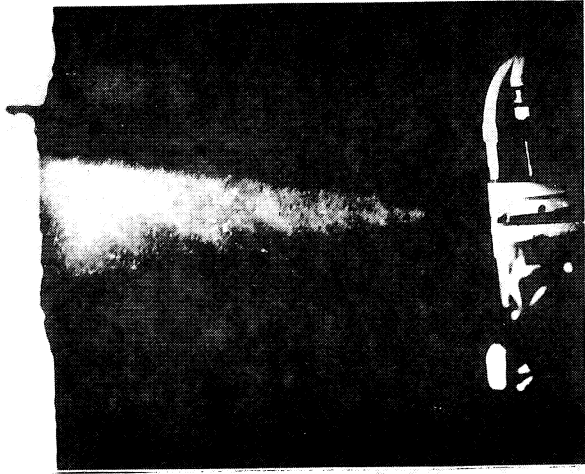


FIG. VII:19. Droppsvärmens utseende.
Swarm of drops.

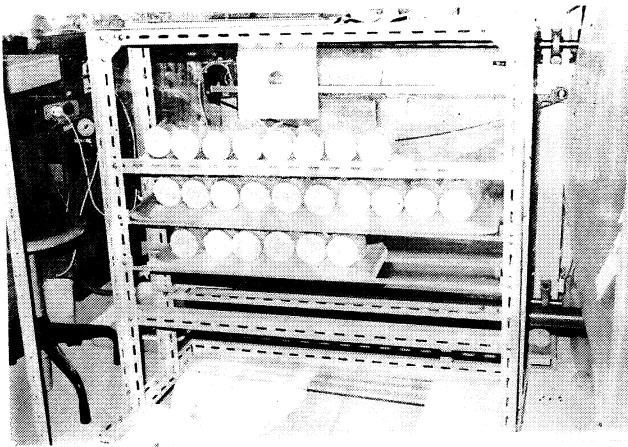


FIG. VII:20. Provkroppsupställning under slagregnsförsök.
Arrangement of specimens during a driving rain test.

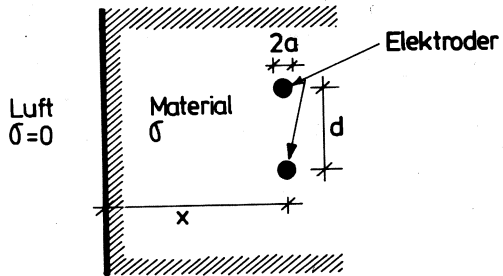


FIG. VII:21. I ett material ingjutna elektroder.
Electrodes casted into a material.

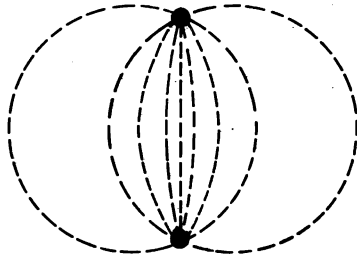


FIG. VII:22. Den elektriska flödestätheten mellan två elektroder.
The electrical flux between two electrodes.

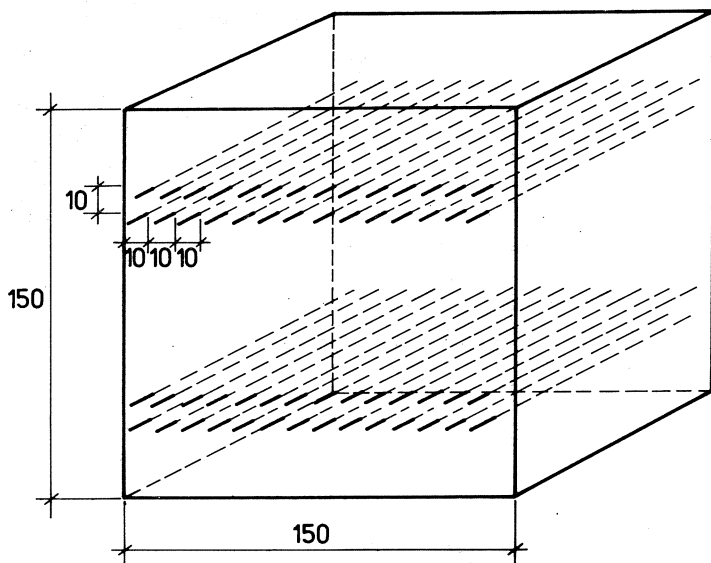


FIG. VII:23. Elektrodplacering.
Placing of electrodes.

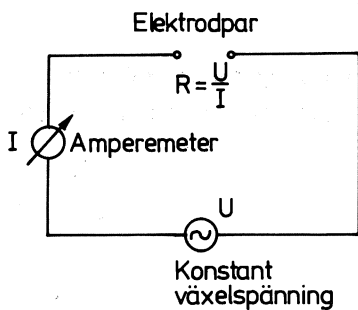


FIG. VII:24. Principskiss vid resistansbestämning.
Schematic sketch of measurement of resistance.

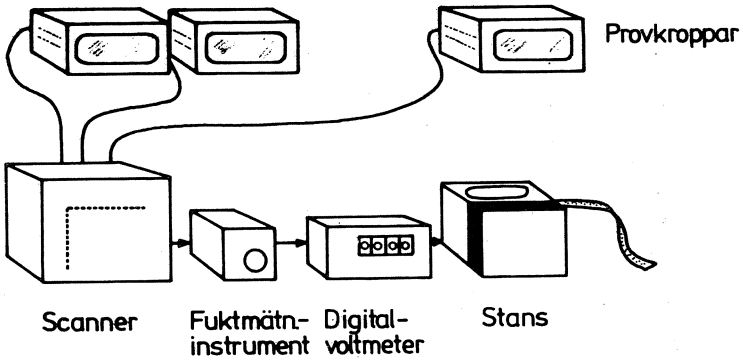
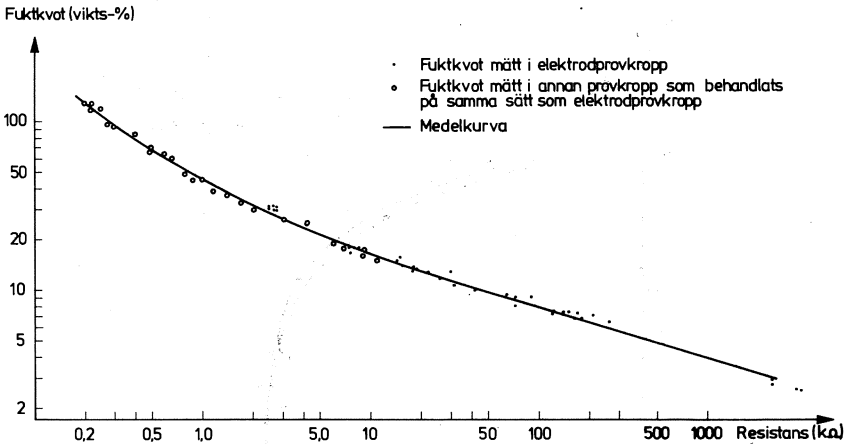


FIG. VII:25. Instrumentering vid automatisk registrering.

Instruments used at automatic measurements.

FIG. VII:26. Samband mellan resistans och fuktkvot. Densitet 550-650 kg/m³.

Relationship between resistance and moisture content. Aerated concrete with density 550-650 kg/m³.

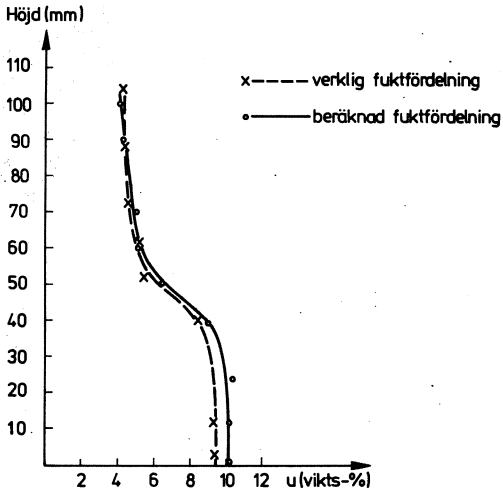


FIG. VII:27. Verklig och beräknad fuktfördelning efter 131 dygn vid liten vattenupptagningshastighet.

Measured and calculated distribution of moisture after 131 days when water absorption intensity is low ("tight" surface coating).

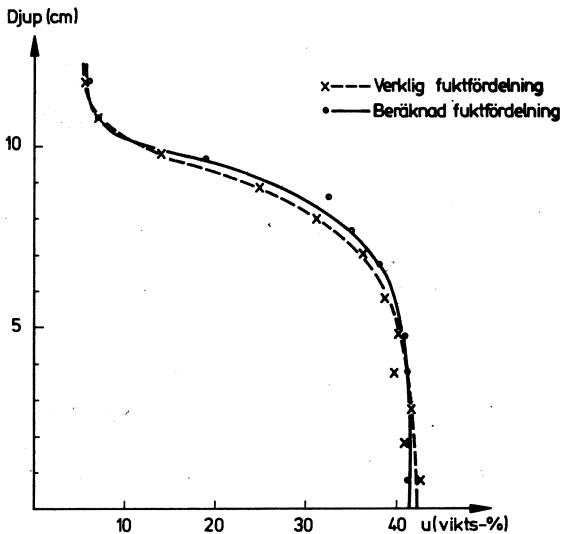


FIG. VII:28. Verklig och beräknad fuktfördelning efter 70 timmar vid stor vattenupptagningshastighet.

Measured and calculated distribution of moisture after 70 h when water absorption intensity is high (without any surface coating).

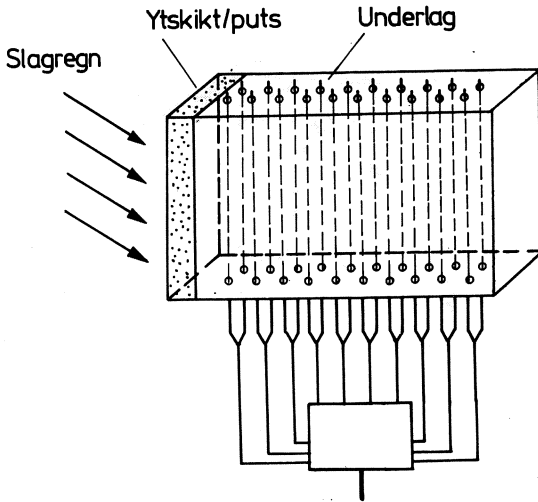


FIG. VII:29. Fuktmätning med ingjutna elektroder.

Moisture measurement with electrodes casted into the material.

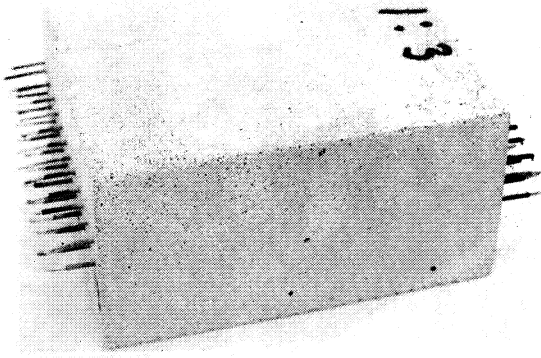


FIG. VII:30. "Elektroprovkropp".

Specimen with electrodes.

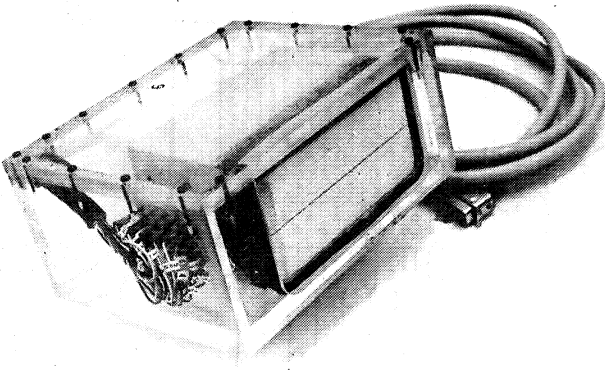


FIG. VII:31. "Elektrodprovkropp".

Specimen with electrodes prepared for measurement of moisture conditions during a driving rain.

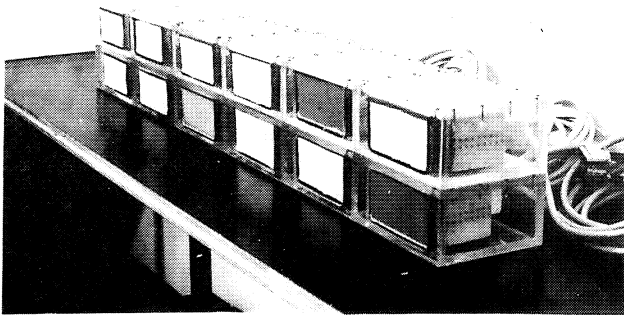


FIG. VII:32. Uppställning av "elektrodprovkroppar" under uttorkning.

Arrangement of specimens during drying out.

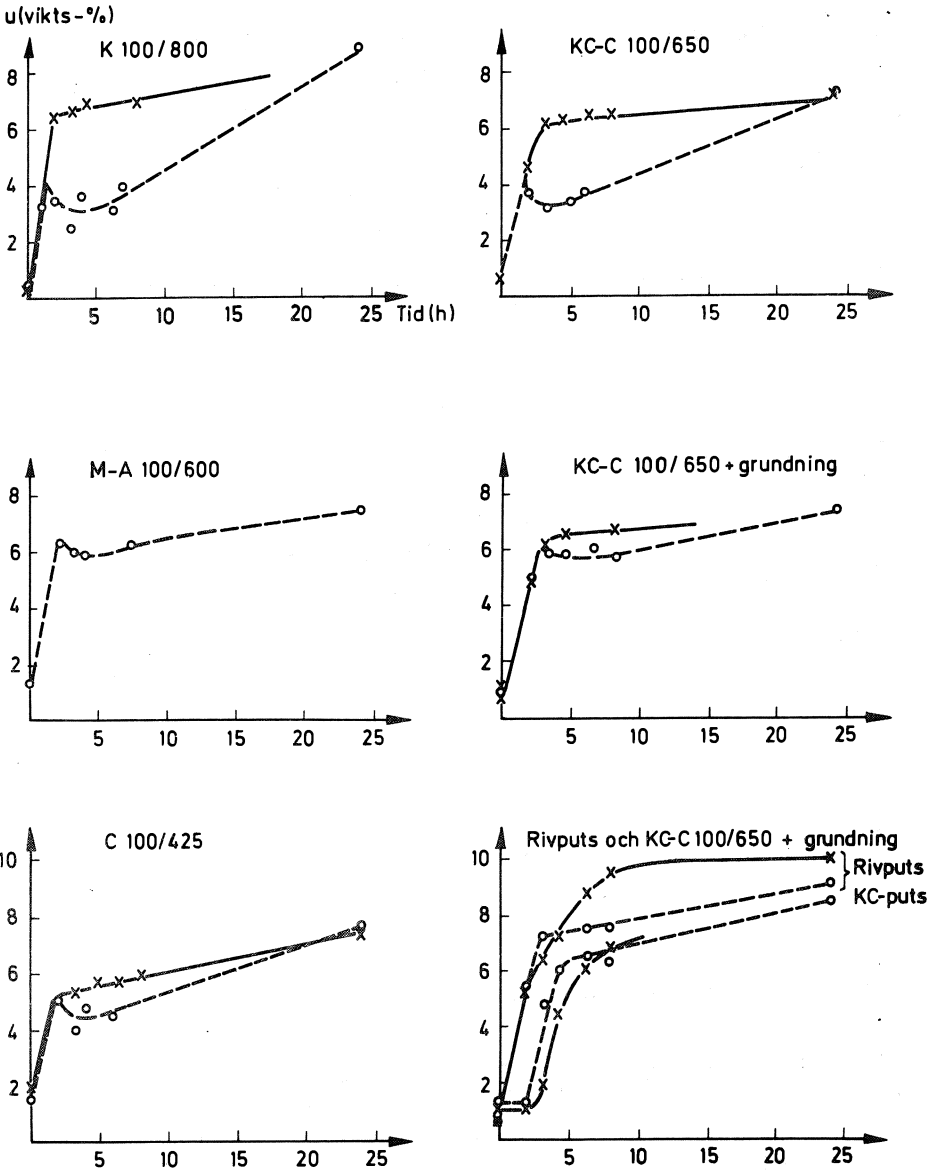


FIG. VII:33. Fuktkvot i putsen som funktion av tiden under slagregn med intensiteten $0.45 \text{ kg/m}^2\text{-h}$.

x—x = tegelunderlag, o—o = gasbetongunderlag

Moisture content of the rendering as a function of time during a driving rain with intensity $0.45 \text{ kg/m}^2\text{-h}$.
 x—x = underlayer of clay brick, o—o = underlayer of aerated concrete

u(viks-%)

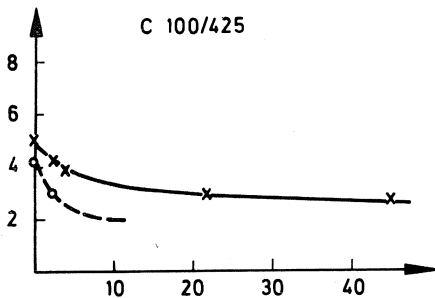
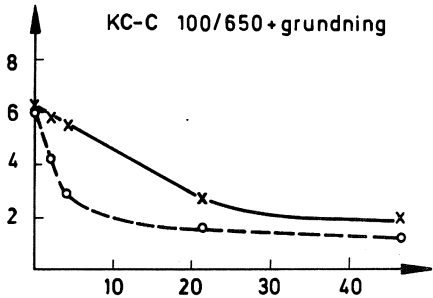
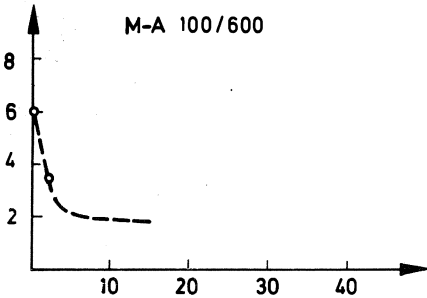
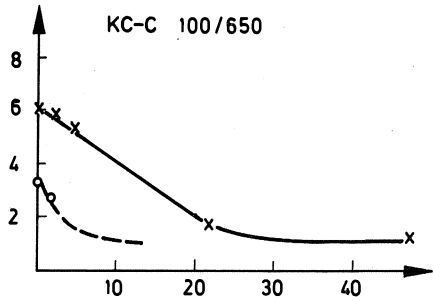
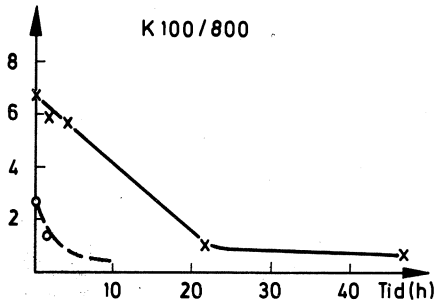


FIG. VII:34. Fuktkvot i putsen som funktion av tiden under uttorkning efter slagregn med intensiteten $0.45 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ och varaktighet $3 \frac{1}{4} \text{ h}$.

x—x = tegelunderlag

o—o = gasbetongunderlag.

Moisture content of the rendering as a function of time during drying out after driving rain with intensity $0.45 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ and duration $3 \frac{1}{4} \text{ h}$.

x—x = underlayer of clay brick

o—o = underlayer of aerated concrete

u(vikts-%)

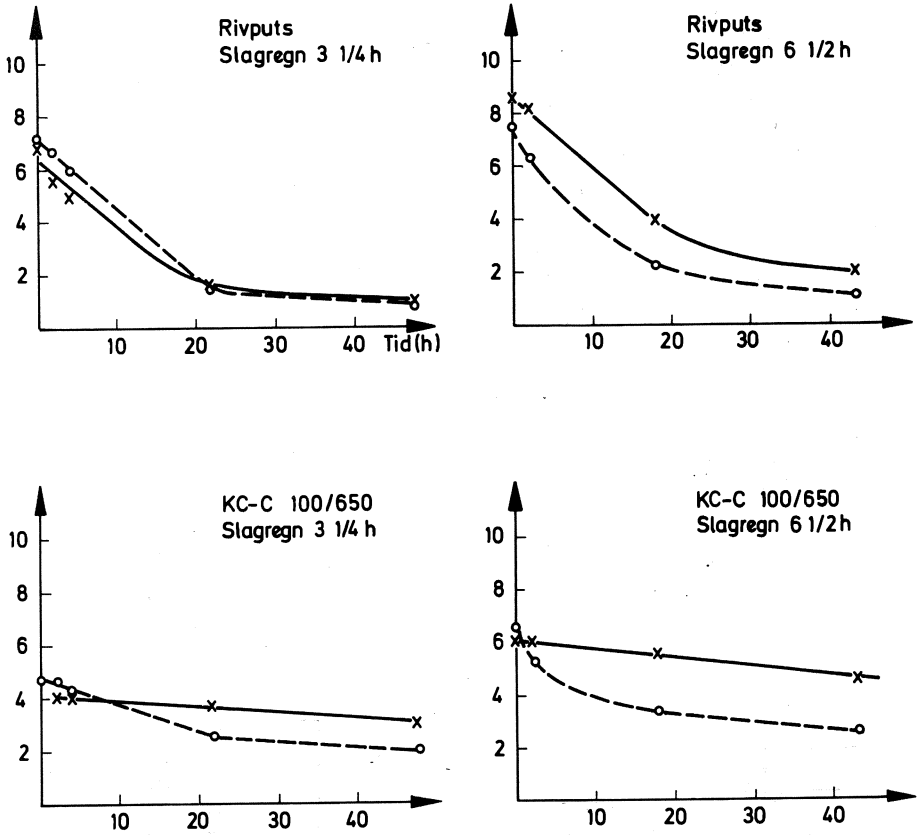


FIG. VII:35. Fuktkvot i olika putsskikt i 3-skiktsputs som funktion av tiden under uttorkning efter slagregn med intensiteten $0.45 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ och varaktighet $3 \frac{1}{4}$ respektive $6 \frac{1}{2} \text{ h}$.
 x—x = tegelunderlag o—o = gasbetongunderlag

Moisture content of different layers in a 3-layer rendering as a function of time during drying out after driving rain with intensity $0.45 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ and duration $3 \frac{1}{4} \text{ h}$ (left) and $6 \frac{1}{2} \text{ h}$ (right).

x—x = underlayer of clay brick o—o = underlayer of aerated concrete

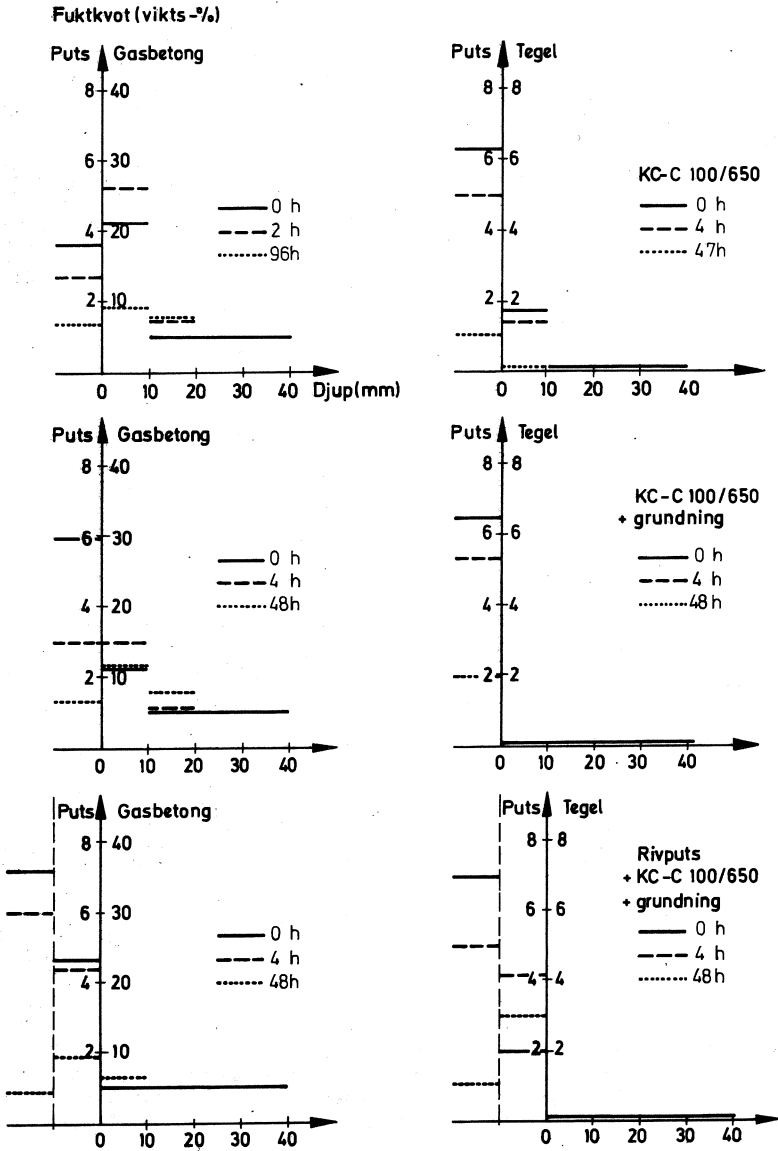


FIG. VII:36. Fuktkvotprofil under uttorkning efter regn med intensiteten $0.45 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ och varaktighet $3 \frac{1}{4} \text{ h}$. Siffrorna vid kurvorna anger uttorkningstid i timmar.

Moisture profile during drying out after a driving rain with intensity $0.45 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ and duration $3 \frac{1}{4} \text{ h}$. The figures at the curves show the time of drying in hours.

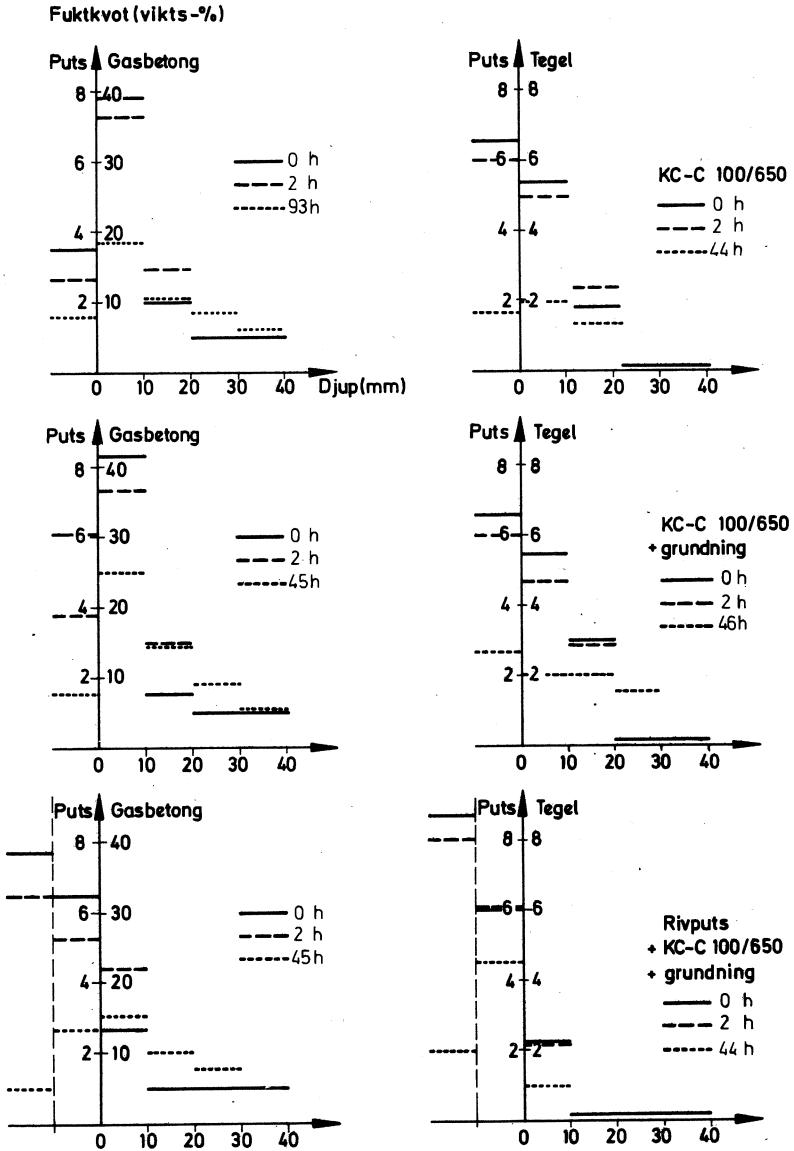


FIG. VII:37. Fuktkvotprofil under uttorkning efter regn med intensiteten $0.45 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ och varaktigheten $6 \frac{1}{2} \text{ h}$. Siffrorna vid kurvorna anger uttorkningstid i timmar.

Moisture profile during drying after a driving rain with intensity $0.45 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ and duration $6 \frac{1}{2} \text{ h}$. The figures at the curves show the time of drying in hours.

Fuktkvot (vikts-%)

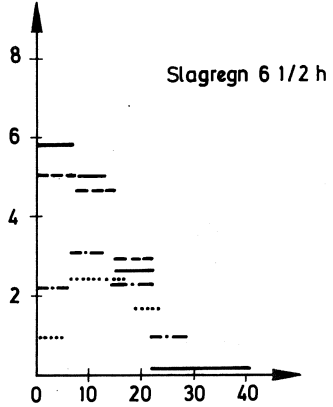
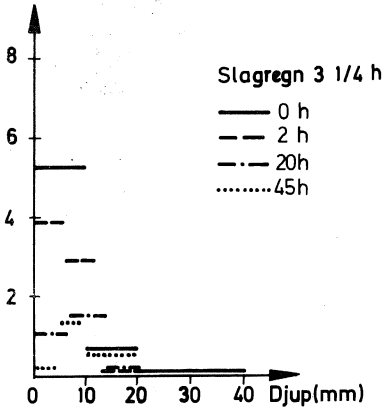


FIG. VII:38. Fuktkvot under uttorkning efter regn med intensiteten $0.45 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ och varaktigheten $3 \frac{1}{4}$ respektive $6 \frac{1}{2}$ h. Oputsat tegel.

Moisture profile during drying out after a driving rain with intensity $0.45 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ and duration $3 \frac{1}{4}$ h (left) and $6 \frac{1}{2}$ h (right). Clay brick without rendering.

Fuktkvot (vikts-%)

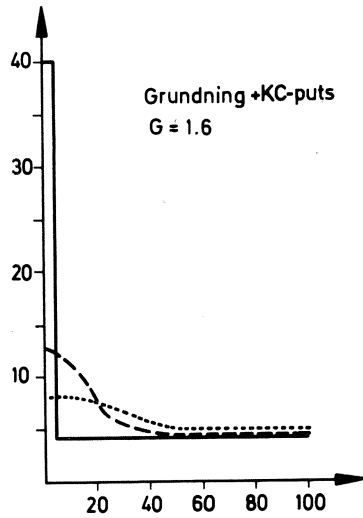
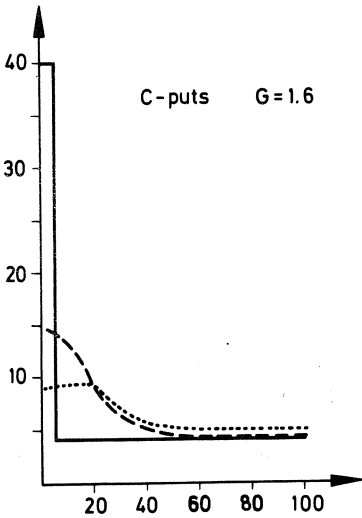
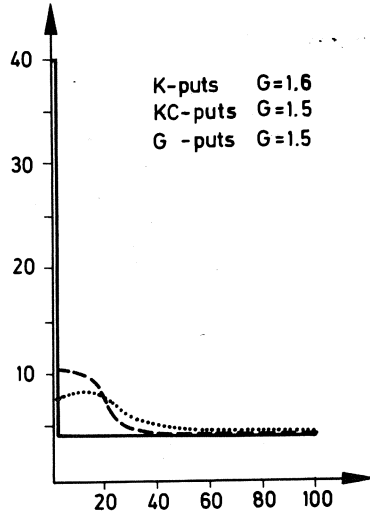
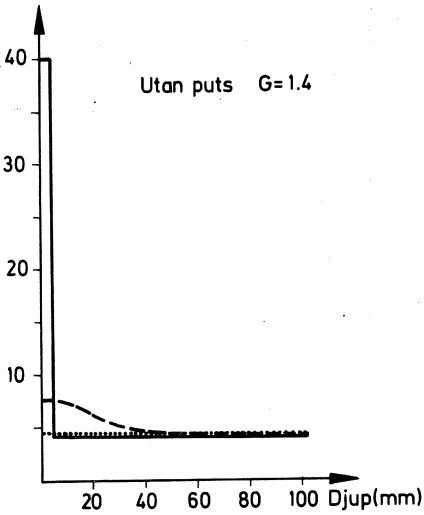


FIG. VII:39. Fuktkvotprofil under försök 1-2.

— omedelbart efter regnet

--- 19 h efter regnets slut

..... 3 dygn efter regnets slut.

*Moisture profile during test 1-2 immediately after the rain**19 h after the end of the rain**3 days after the end of the rain*

Fuktkvot (vikts-%)

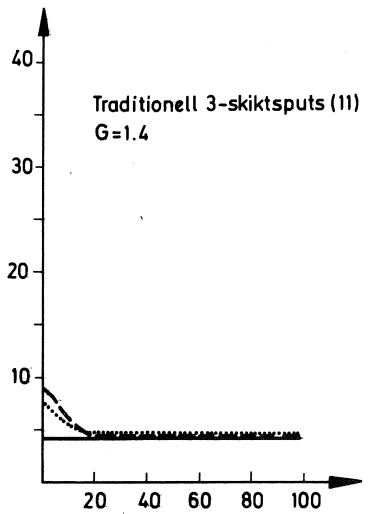
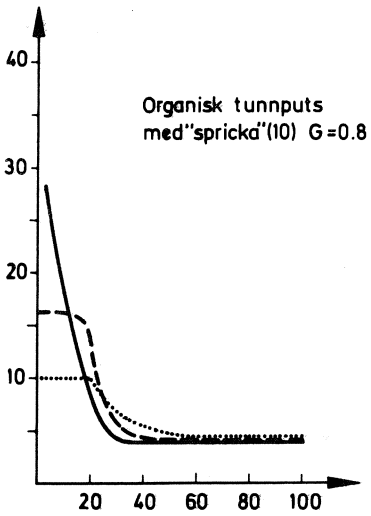
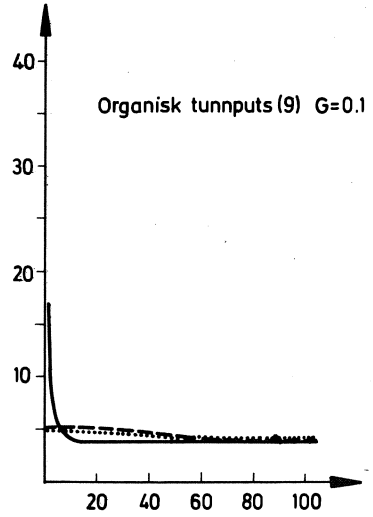
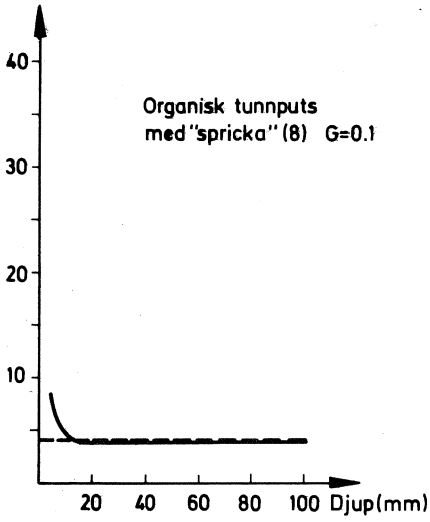


FIG. VII:39. forts.

continued.

Fuktkvot (vikts-%)

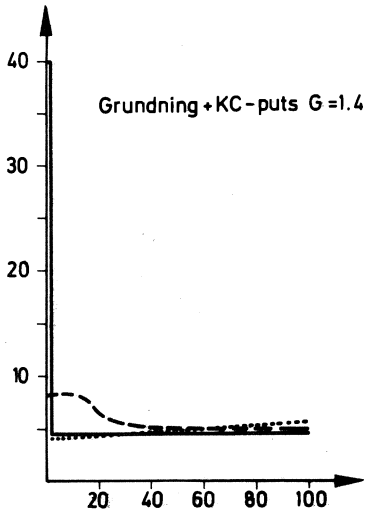
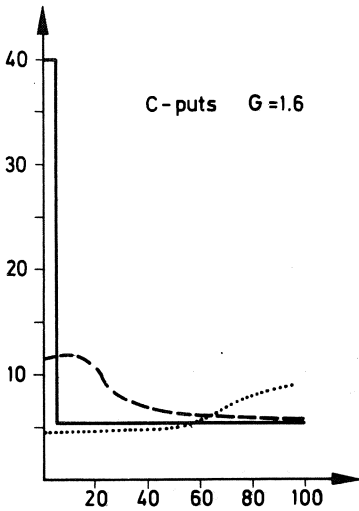
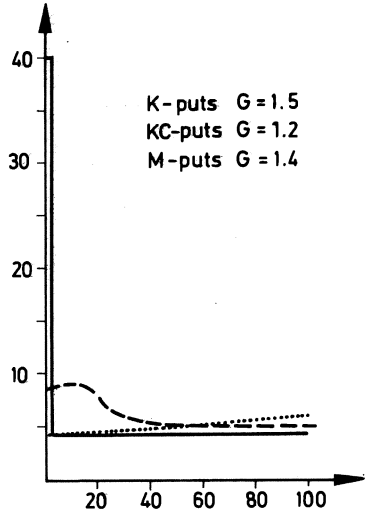
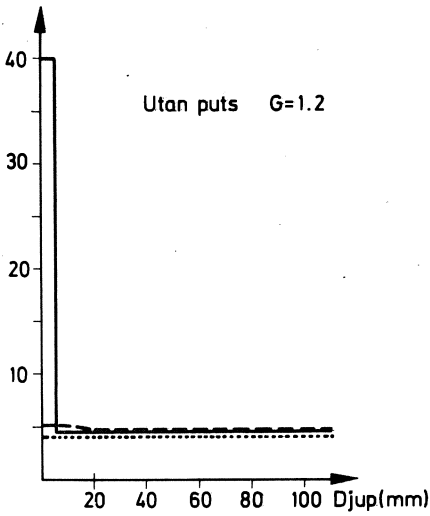


FIG. VII:40. Fuktkprofil under försök 3
 — omedelbart efter regnet
 --- 19 h efter regnets slut
 5 dygn efter regnets slut

Moisture profile during test 3
 immediately after the rain
 19 h after the end of the rain
 5 days after the end of the rain

Fuktkvot (vikts-%)

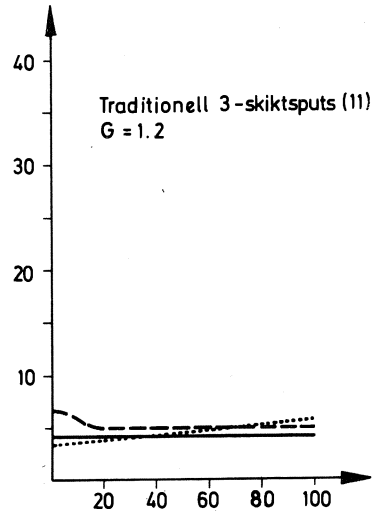
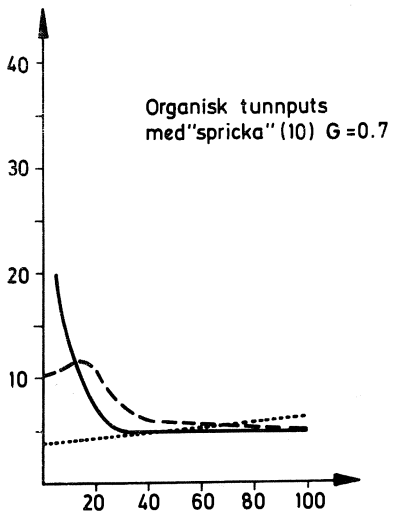
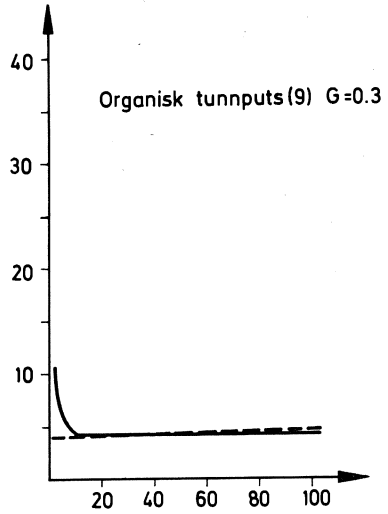
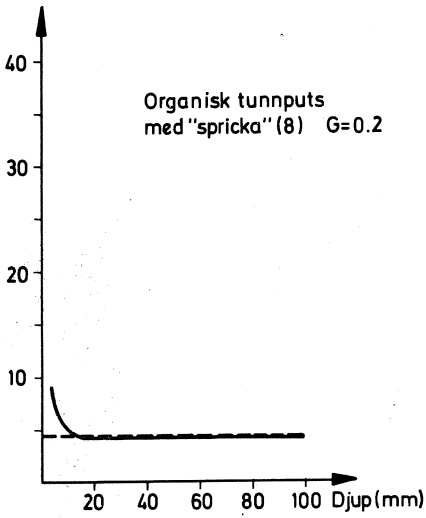


FIG. VII:40. forts.

continued.

Fuktkvot (vikts-%)

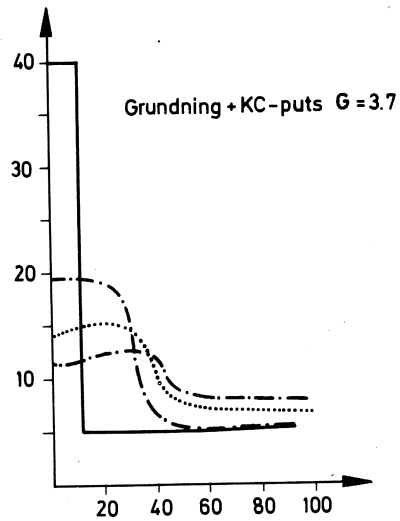
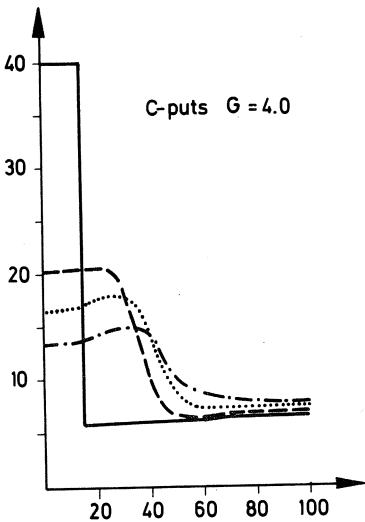
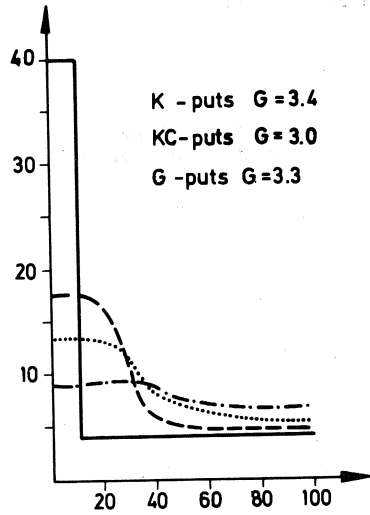
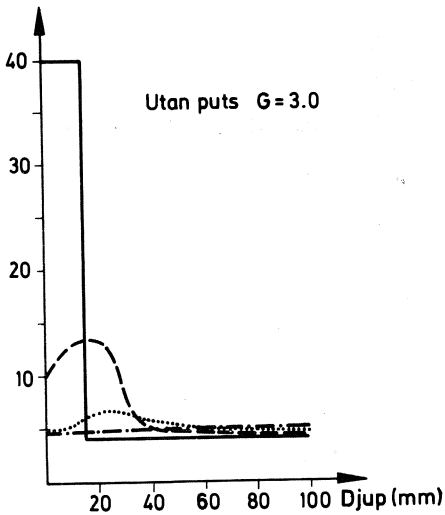


FIG. VII:41. Fuktkvotprofil under försök 4.
 — omedelbart efter regnet
 - - - 22 h efter regnets slut
 ····· 4 dygn efter regnets slut
 - · - 11 dygn efter regnets slut

*Moisture profile during test 4
 immediately after the rain
 22 h after the end of the rain
 4 days after the end of the rain
 11 days after the end of the rain*

Fuktkvot (vikts-%)

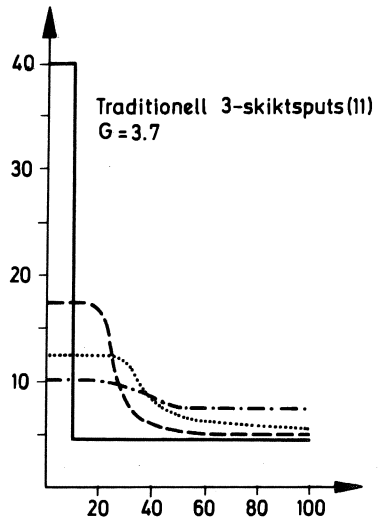
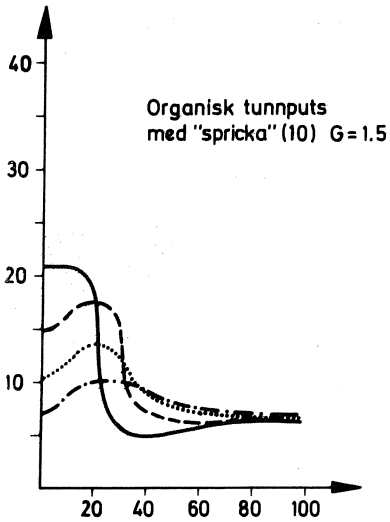
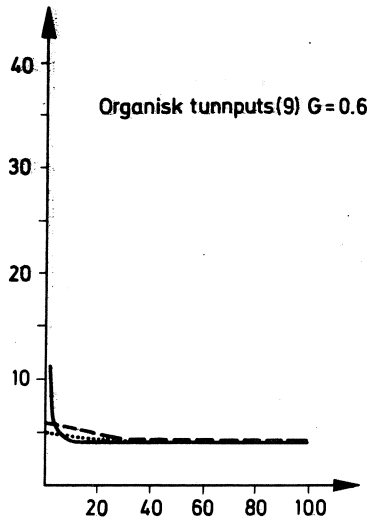
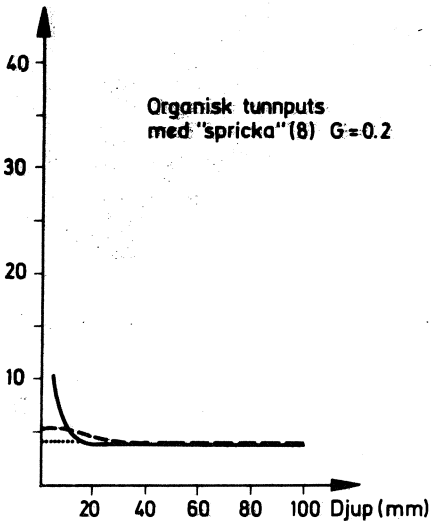


FIG. VII:41. forts.

continued.

Fuktkvot (vikts -%)

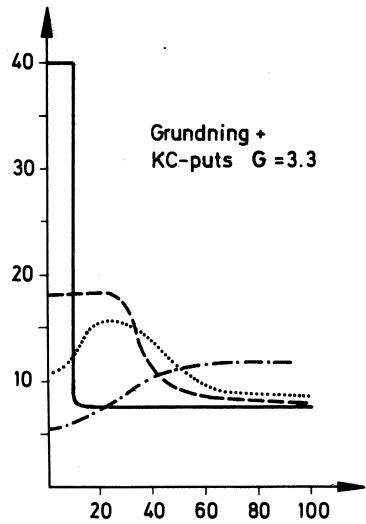
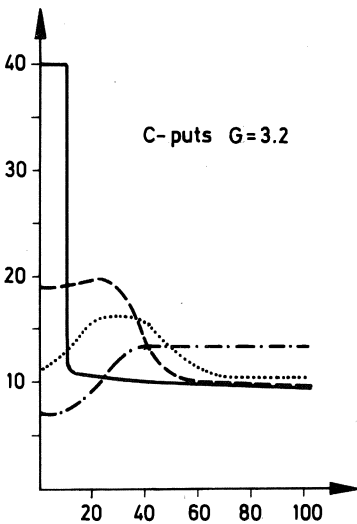
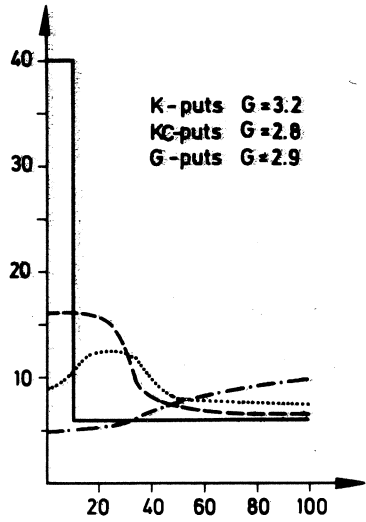
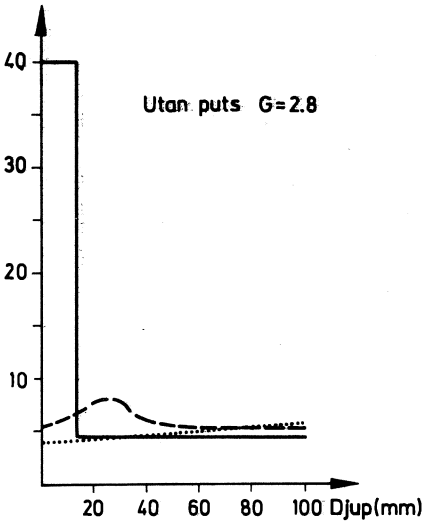


FIG. VII:42. Fuktkvot under försök 5
 — omedelbart efter regnet
 - - - 21 h efter regnets slut
 ····· 3 dygn efter regnets slut
 - - - 8 dygn efter regnets slut

Moisture profile during test 5
 immediately after the rain
 21 h after the end of the rain
 3 days after the end of the rain
 8 days after the end of the rain

Fuktkvot (vikts-%)

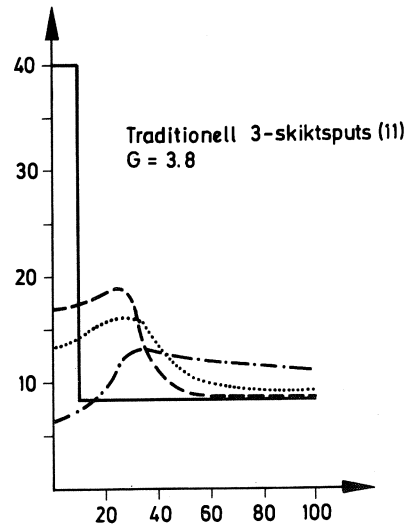
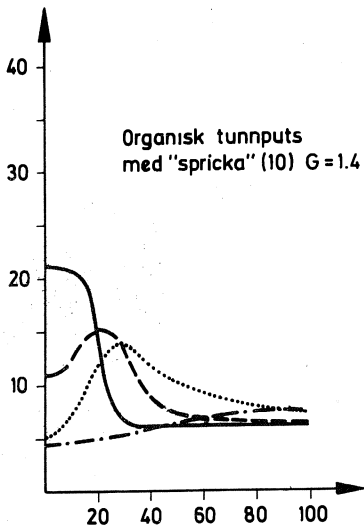
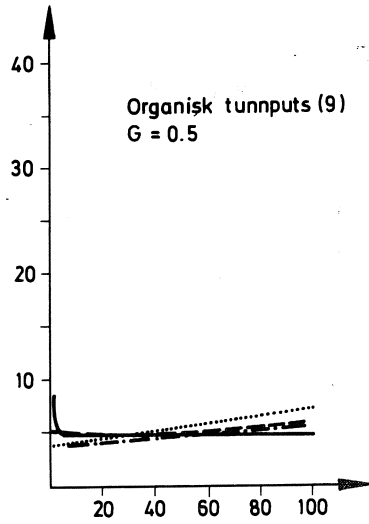
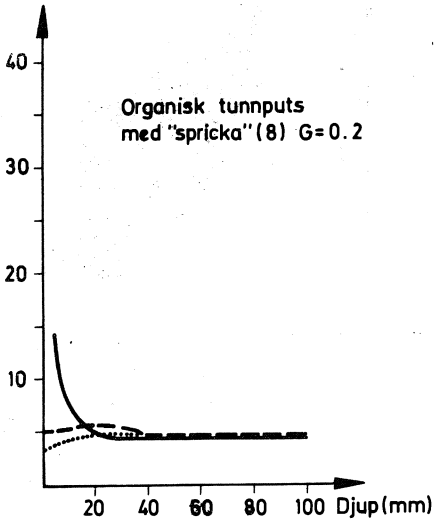


FIG. VII:42. forts.

continued.

Fuktkvot (vikts-%)

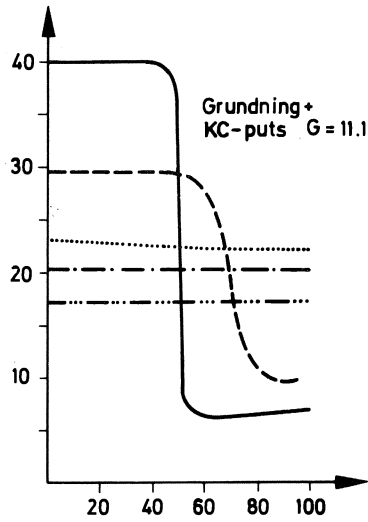
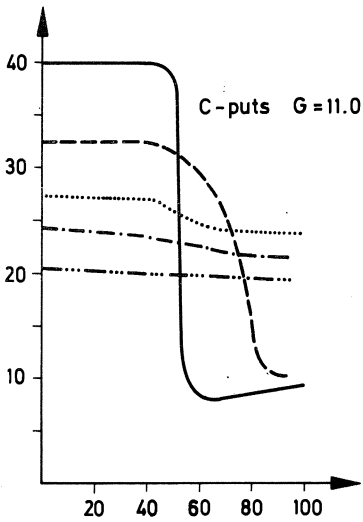
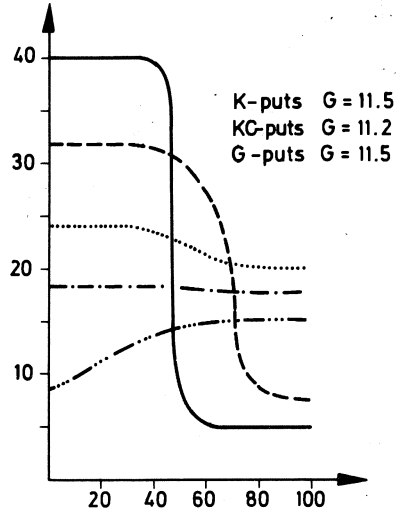
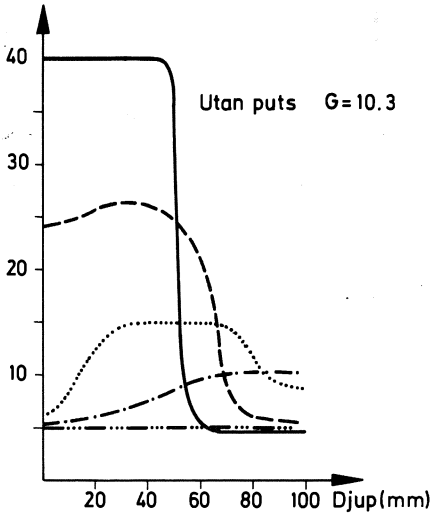


FIG. VII:43. Fuktkvotprofil under försök 6
 — omedelbart efter regnet
 --- 30 h efter regnets slut
 9 dygn efter regnets slut
 -.-.- 30 dygn efter regnets slut
 - - - 61 dygn efter regnets slut

Moisture profile during test 6
 immediately after the rain
 30 h after the end of the rain
 9 days after the end of the rain
 30 days after the end of the rain
 61 days after the end of the rain

Fuktkvot (vikts-%)

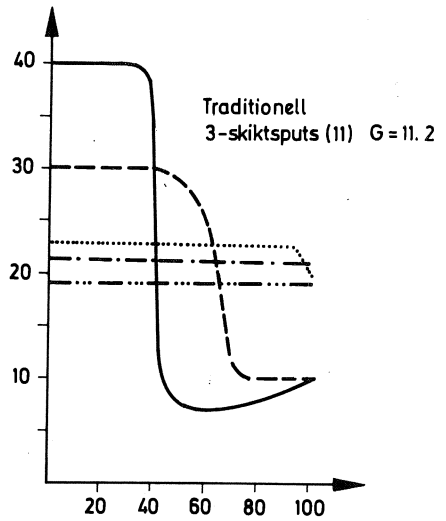
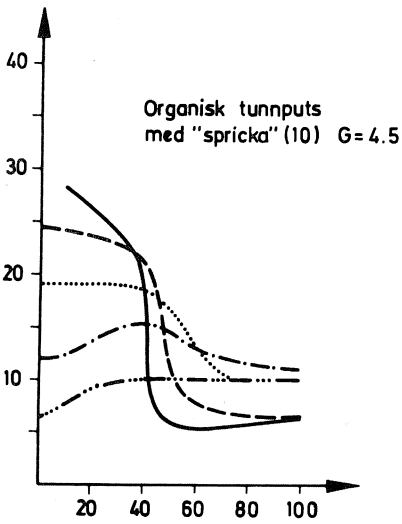
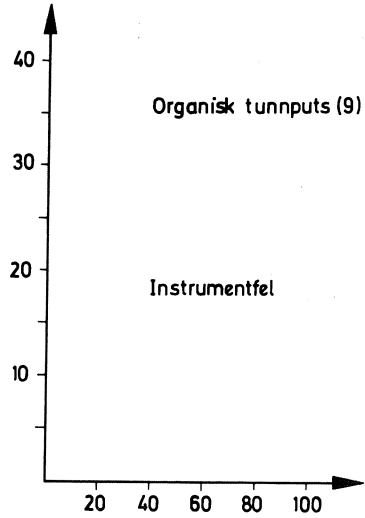
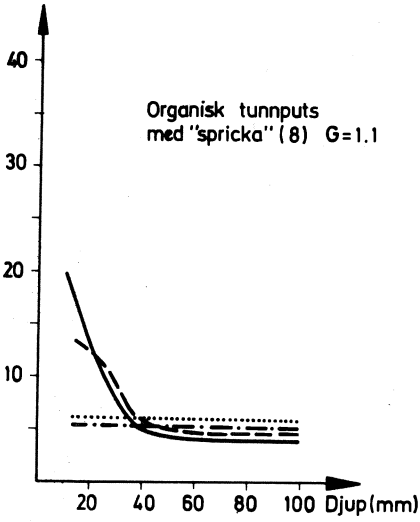


FIG. VII:43. forts.

continued.

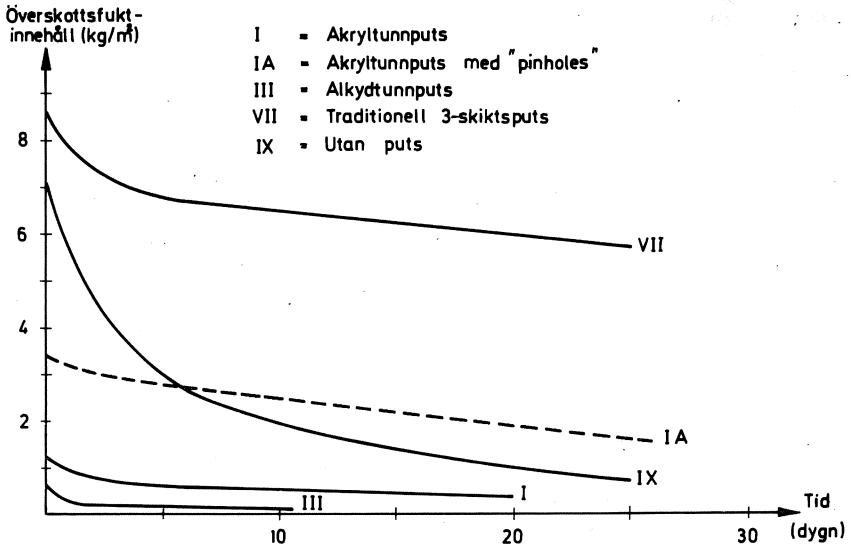


FIG. VII:44. Absorberad vattenmängd under slagregn samt uttorkning efter regnet.

Water absorbed during a driving rain and drying out after the rain. Aerated concrete with different renderings.

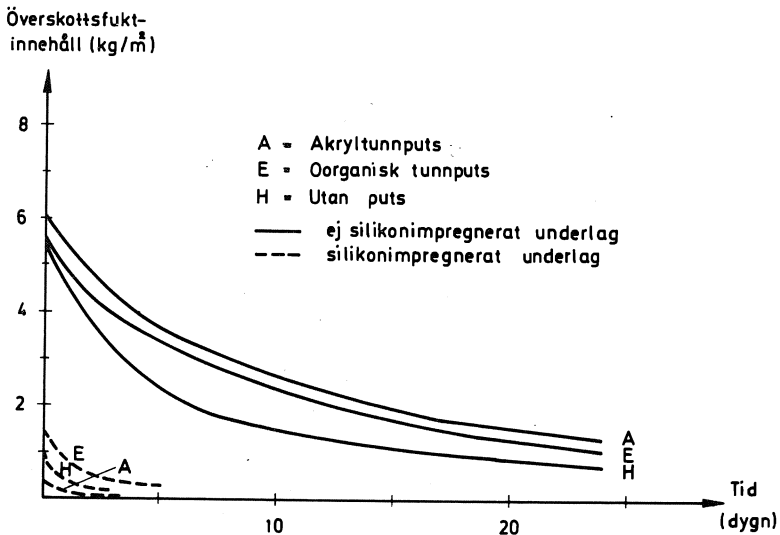


FIG. VII:45. Absorberad vattenmängd under slagregn samt uttorkning efter regnet.

Water absorbed during a driving rain and drying out after the rain. Common aerated concrete (—) and water repellent aerated concrete (- - -).

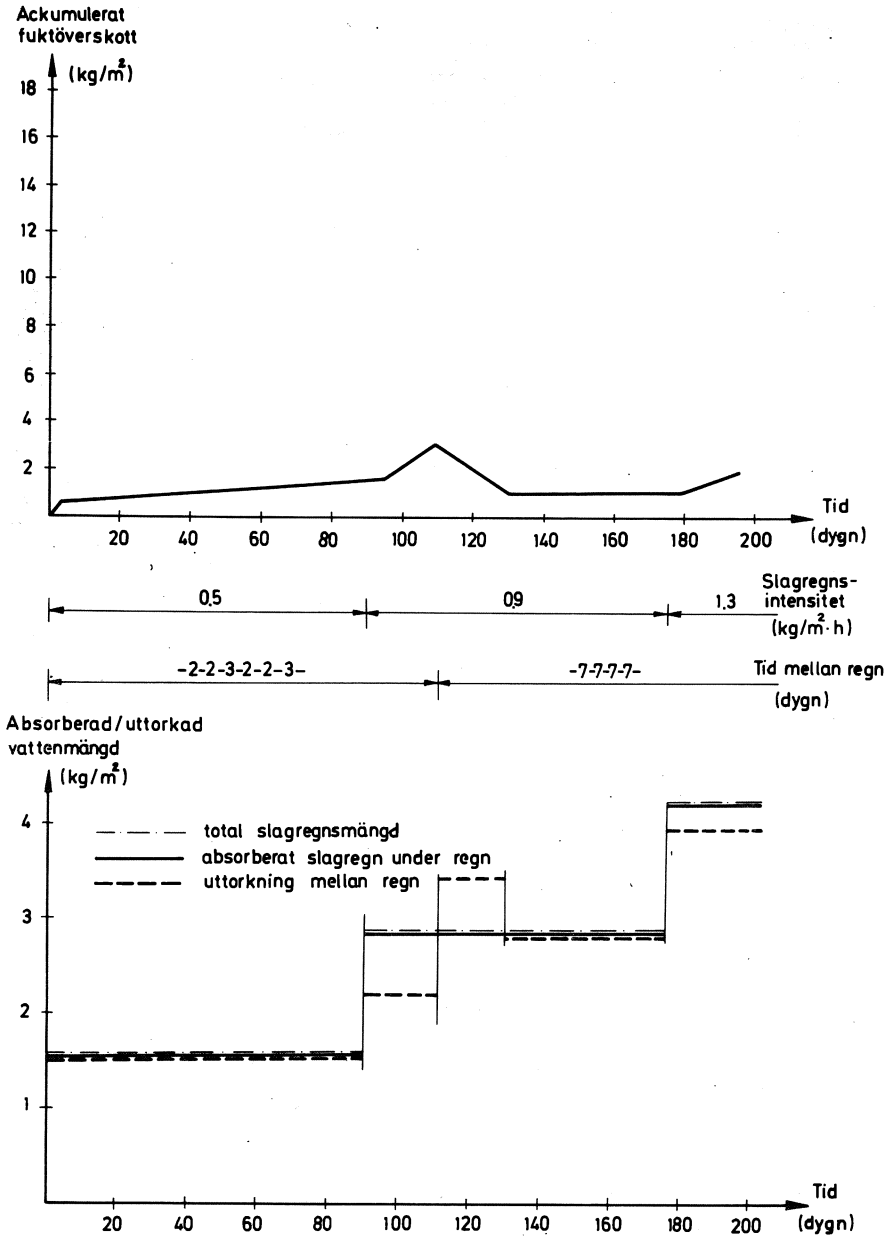


FIG. VII:46. Fuktförhållande vid cykliskt slagregn. Gasbetong utan puts.

Moisture conditions at cyclic driving rain. Aerated concrete without any rendering.

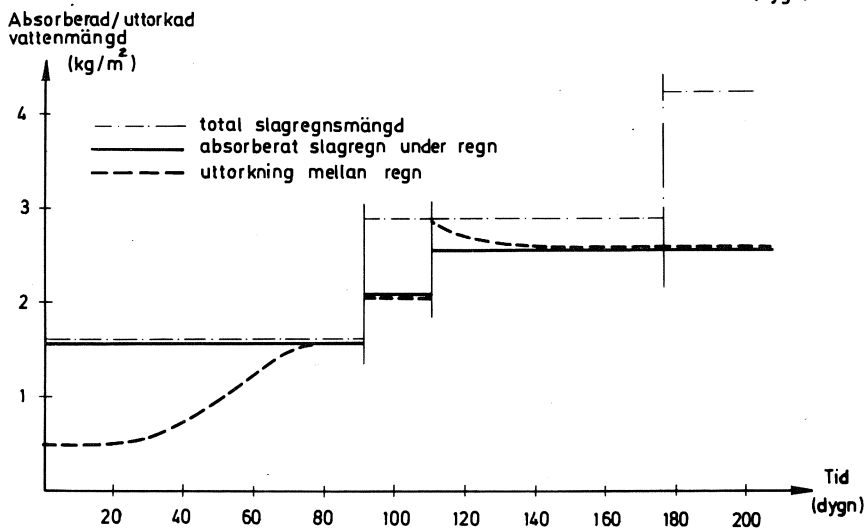
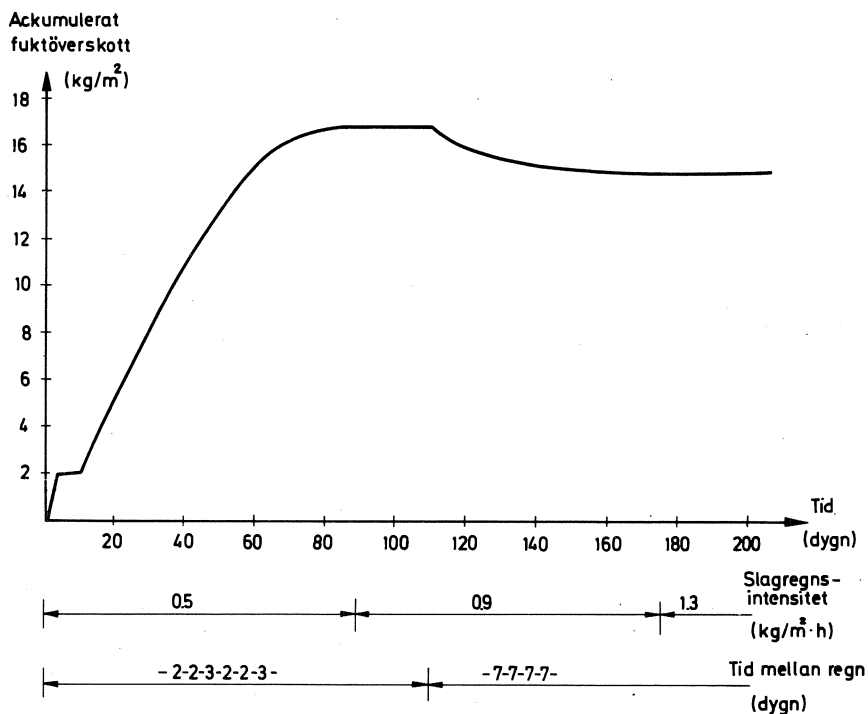


FIG. VII:47. Fuktförhållande vid cykliskt slagregn. K 100/800 på gasbetong.

Moisture conditions at cyclic driving rain. Aerated concrete with L 100/800 rendering.

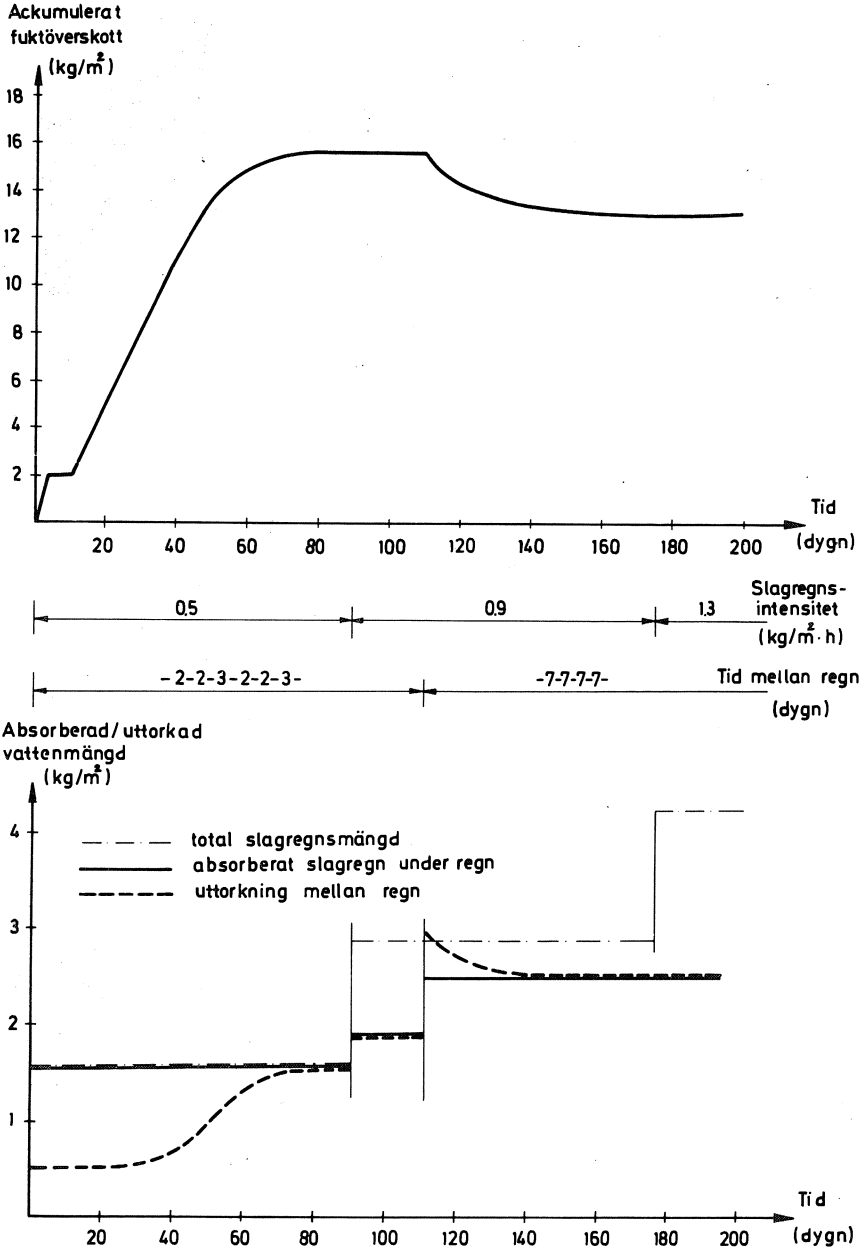


FIG. VII:48. Fuktförhållande vid cykliskt slagregn. KC-C 100/650 på gasbetong.

Moisture conditions at cyclic driving rain. Aerated concrete with LC 50/50/650 rendering.

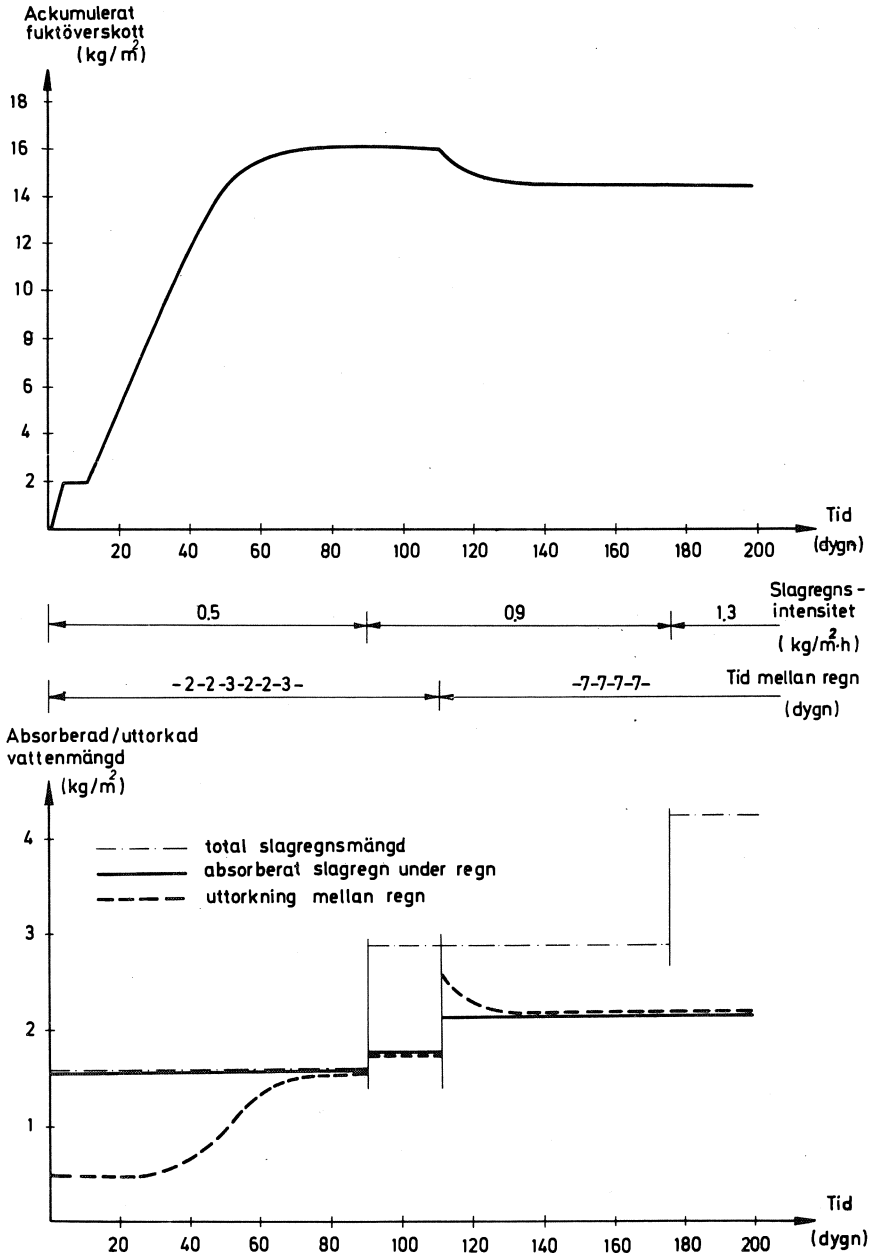


FIG. VII:49. Fuktförhållande vid cykliskt slagregn. M-A 100/600 på gasbetong.

Moisture conditions at cyclic driving rain. Aerated concrete with M-A 100/600 rendering.

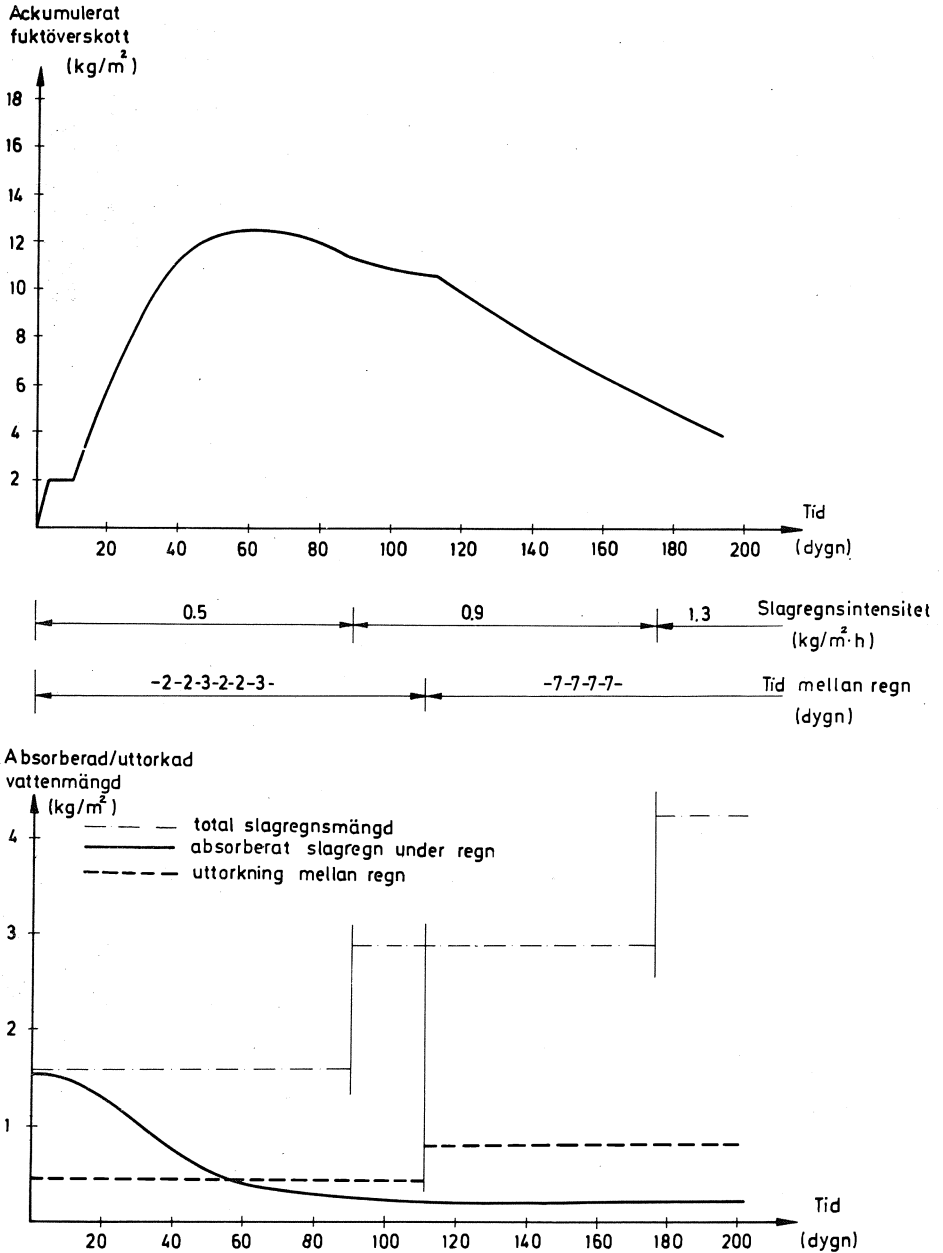


FIG. VII:50. Fuktförhållande vid cykliskt slagregn. C 100/425 på gasbetong.
Moisture conditions at cyclic driving rain. Aerated concrete with C 100/425 rendering.

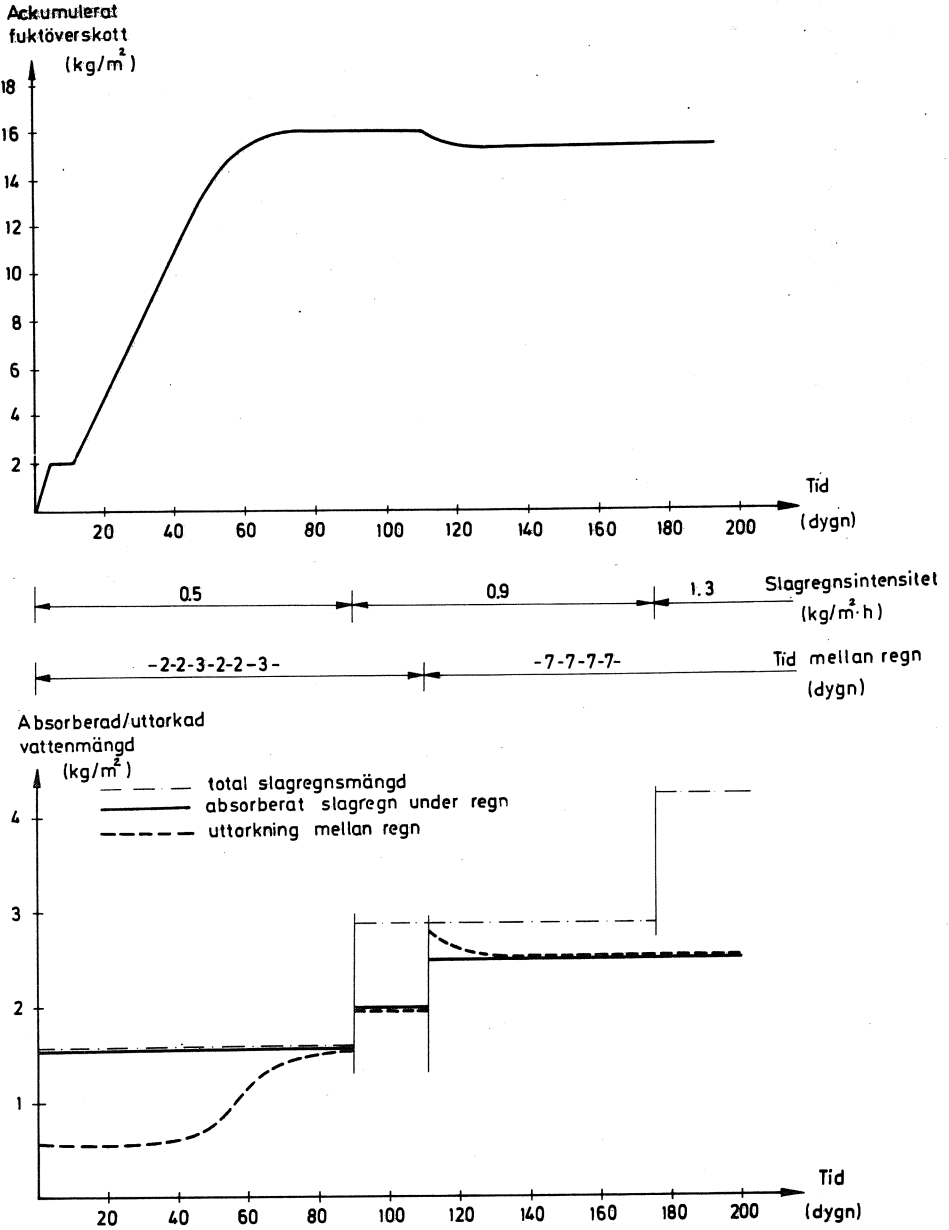


FIG. VII:51. Fuktförhållande vid cykliskt slagregn. Grundning + KC-C 100/650 på gasbetong.

Moisture conditions at cyclic driving rain. Aerated concrete with spatterdash and LC 50/50/650 rendering.

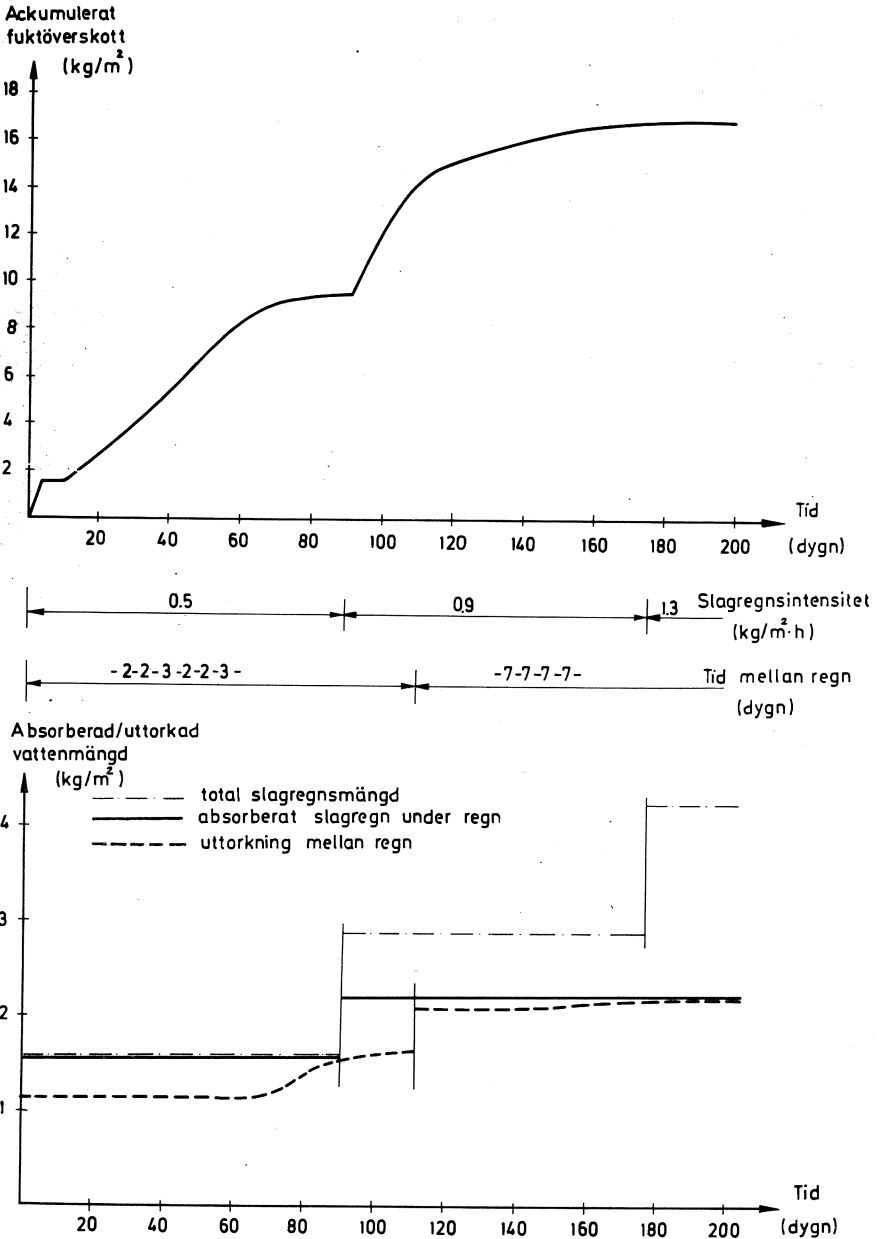


FIG. VII:52. Fuktförhållande vid cykliskt slagregn. Traditionell 3-skitts-puts (11) på gasbetong.

Moisture conditions at cyclic driving rain. Aerated concrete with a 3-layer LC-rendering.

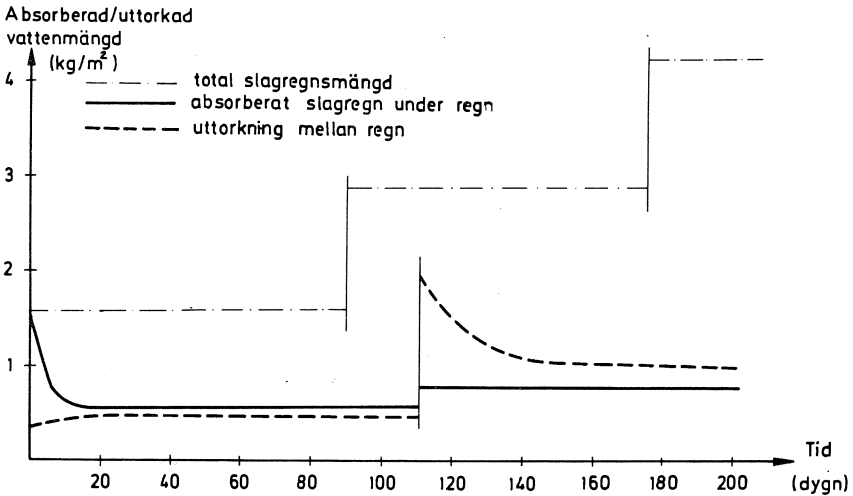
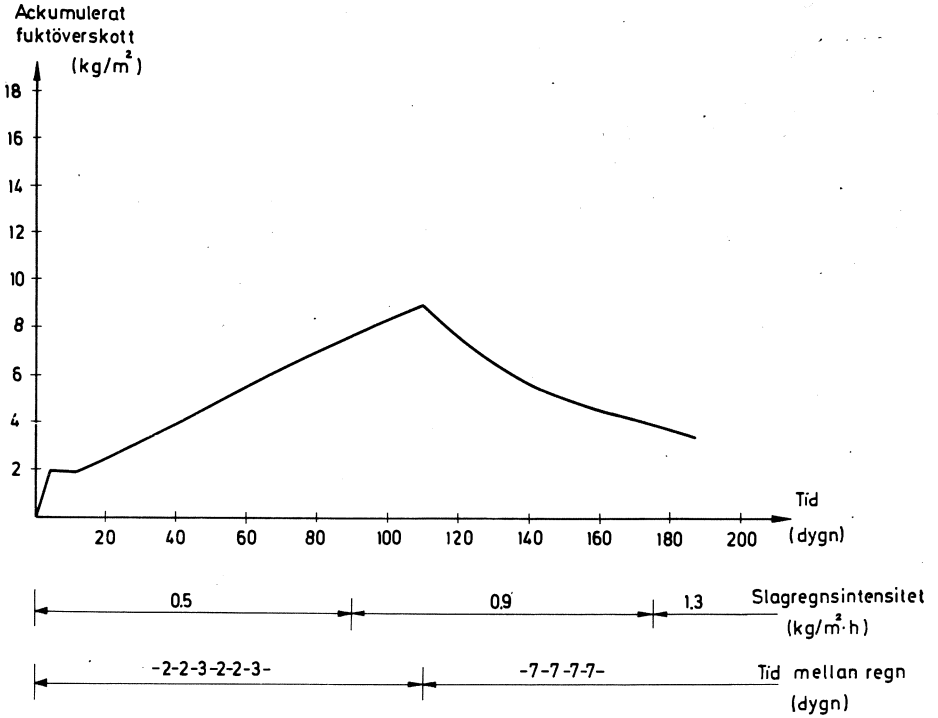


FIG. VII:53. Fuktförhållande vid cykliskt slagregn. Organisk tunnputs med spricka (10) på gasbetong.

Moisture conditions at cyclic driving rain. Aerated concrete with an organic surface coating containing a crack.

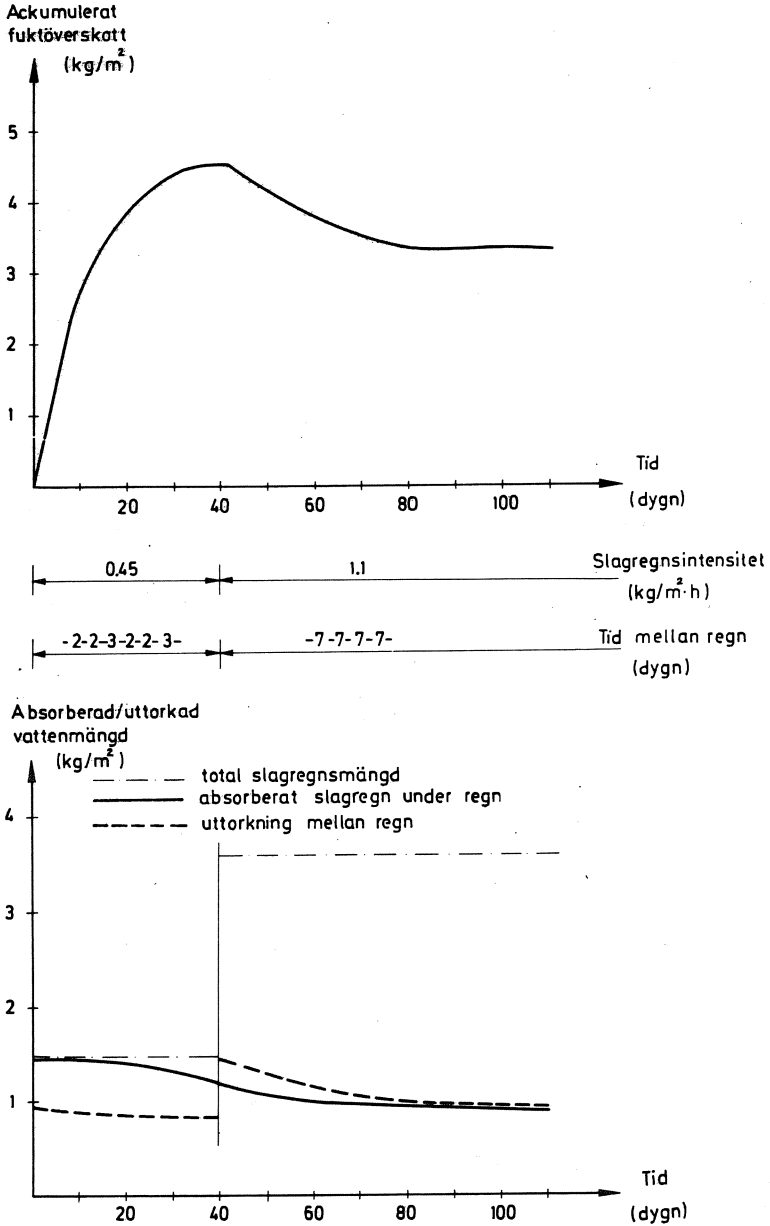


FIG. VII:54. Fuktförhållande vid cykliskt slagregn. Tegel utan puts.
Moisture conditions at cyclic driving rain. Clay brick without any rendering.

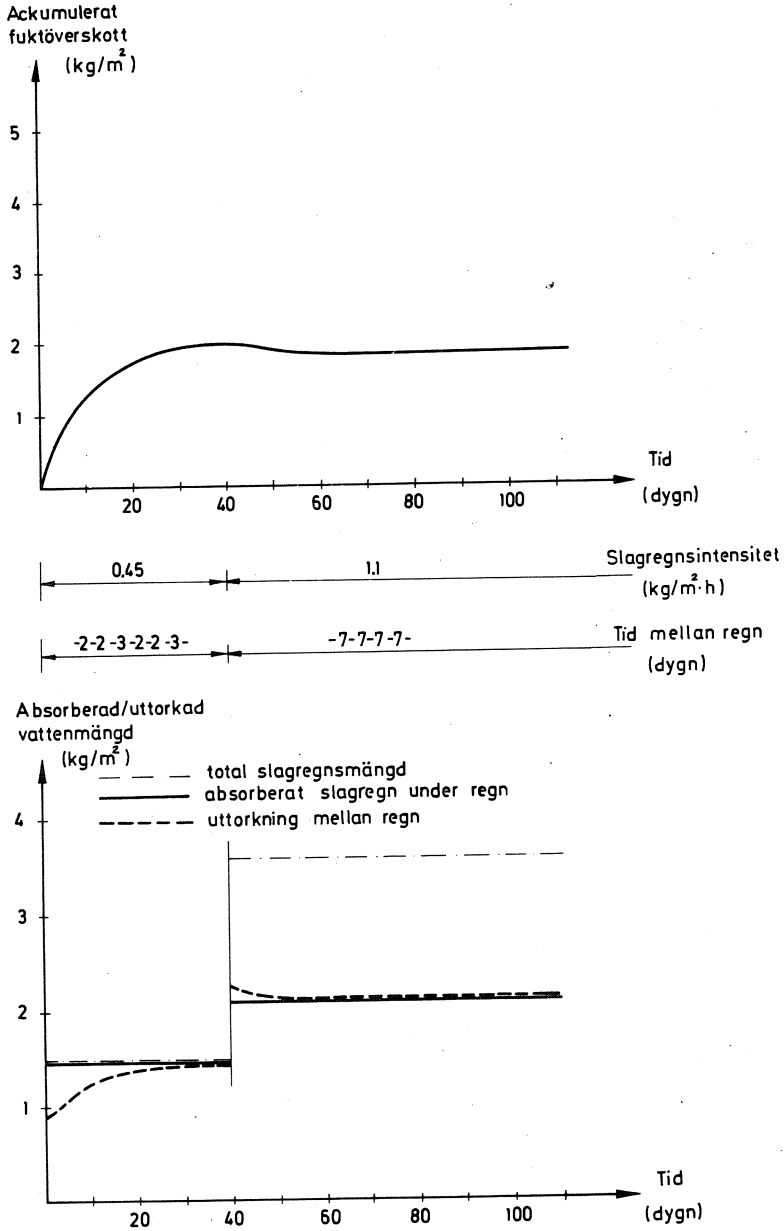


FIG. VII:55. Fuktförhållande vid cykliskt slagregn. K 100/800 på tegel.

Moisture conditions at cyclic driving rain. Clay brick with L 100/800 rendering.

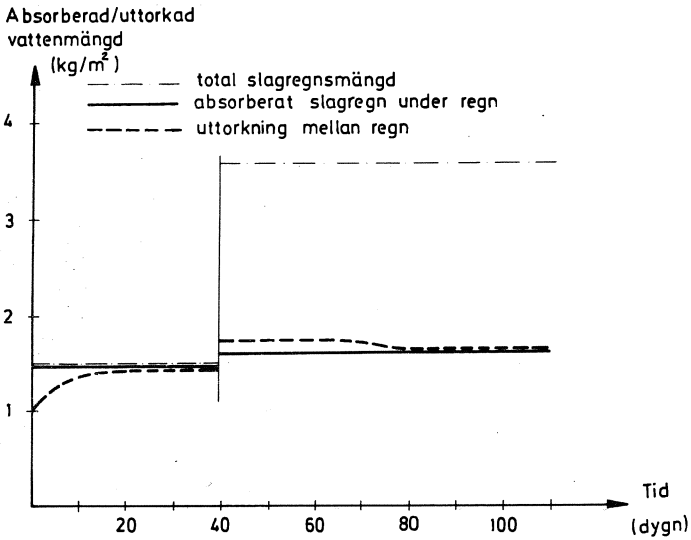
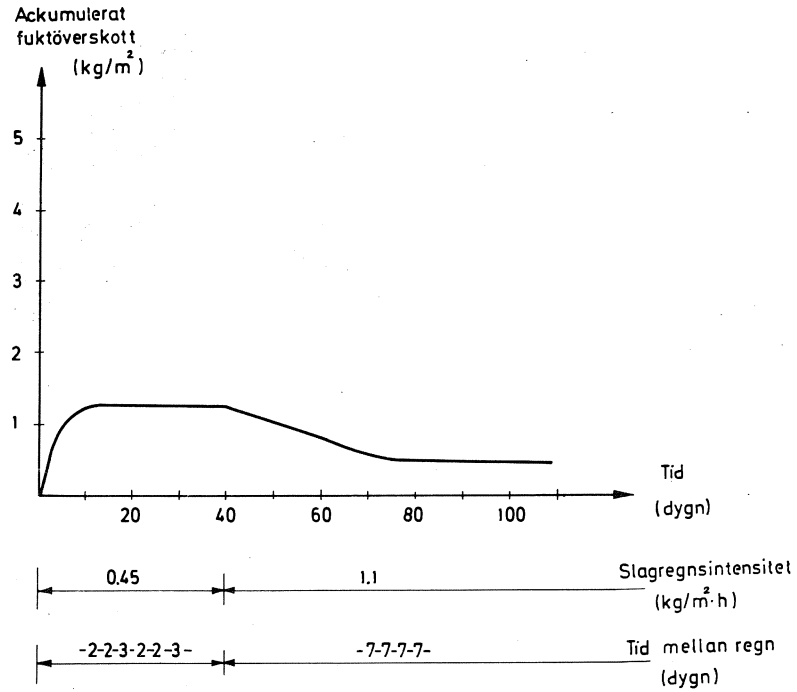
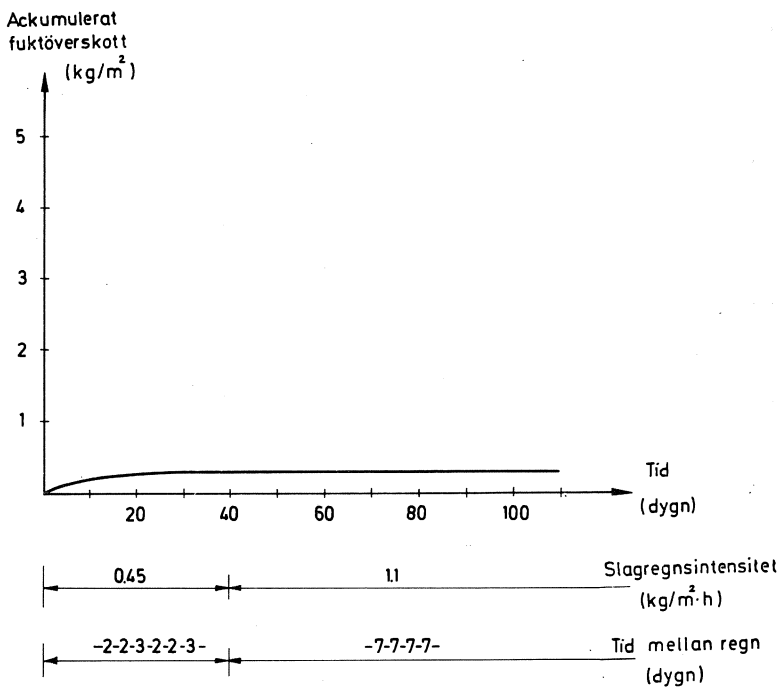


FIG. VII:56. Fuktförhållande vid cykliskt slagregn. KC-C 100/650 på tegel.

Moisture conditions at cyclic driving rain. Clay brick with LC 50/50/650 rendering.



Absorberad/uttorkad vattenmängd (kg/m^2)

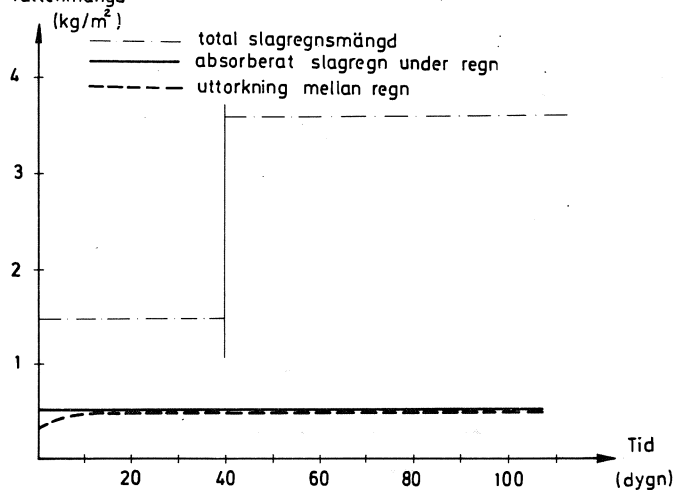


FIG. VII:57. Fuktförhållande vid cykliskt slagregn. M-A 100/600 på tegel.
 Moisture conditions at cyclic driving rain. Clay brick with
 M-A 100/600 rendering.

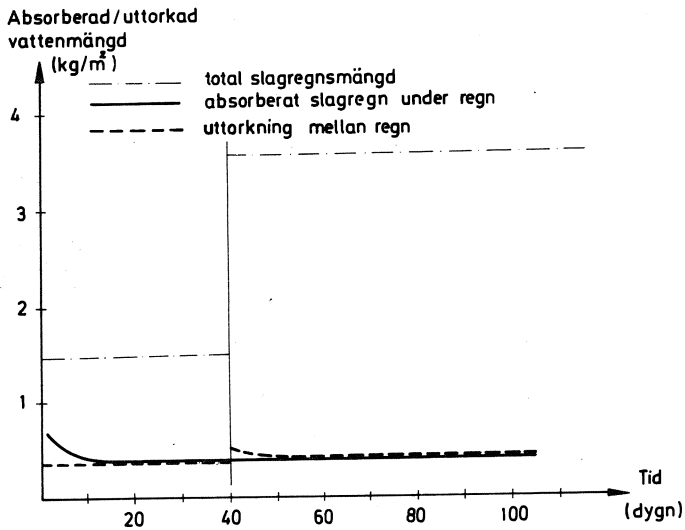
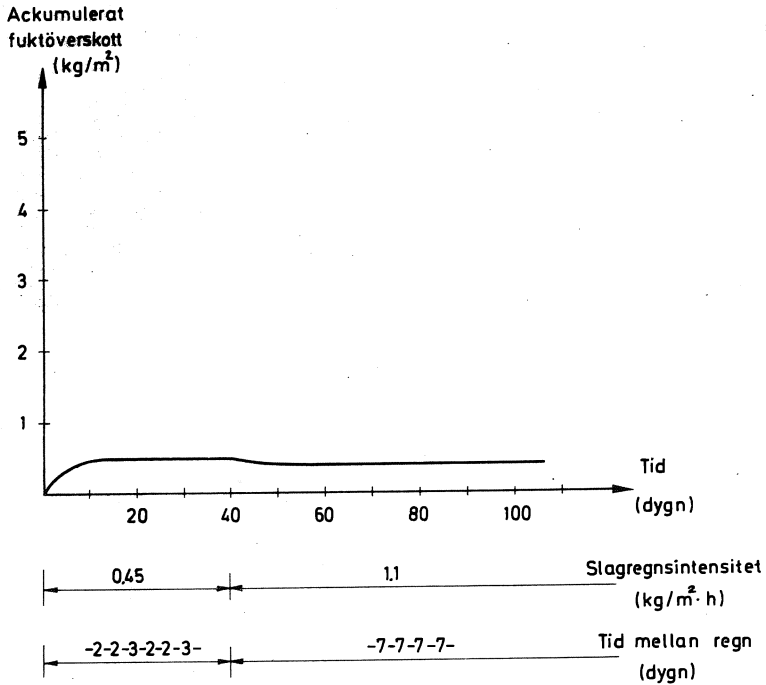


FIG. VII:58. Fuktförhållande vid cykliskt slagregn. C 100/425 på tegel.
 Moisture conditions at cyclic driving rain. Clay brick with
 C 100/425 rendering.

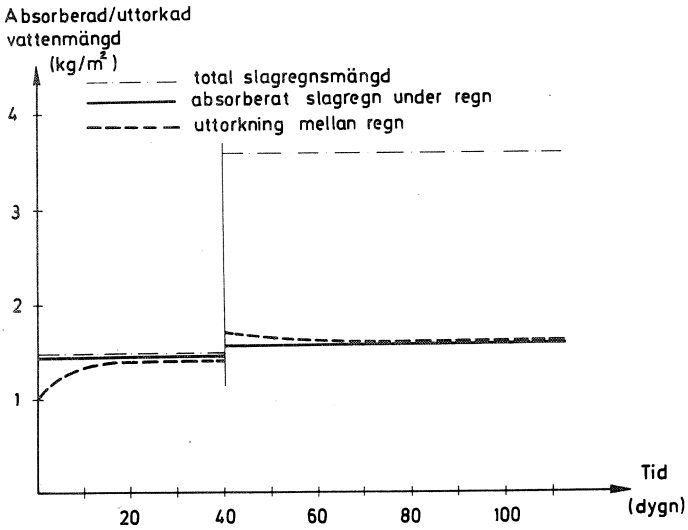
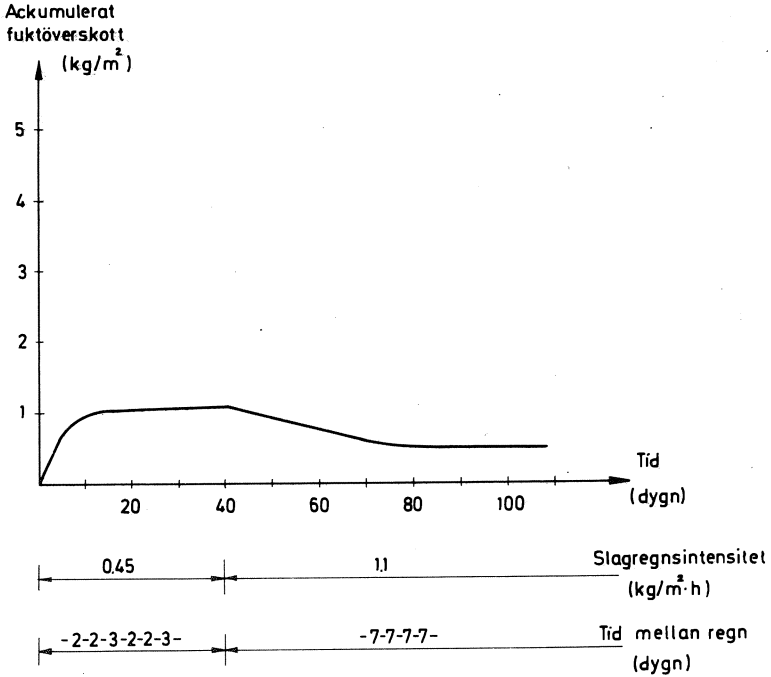


FIG. VII:59. Fuktförhållande vid cykliskt slagregn. Grundning + KC-C 100/650 på tegel.

Moisture conditions at cyclic driving rain. Clay brick with spatterdash and LC 50/50/650 rendering.

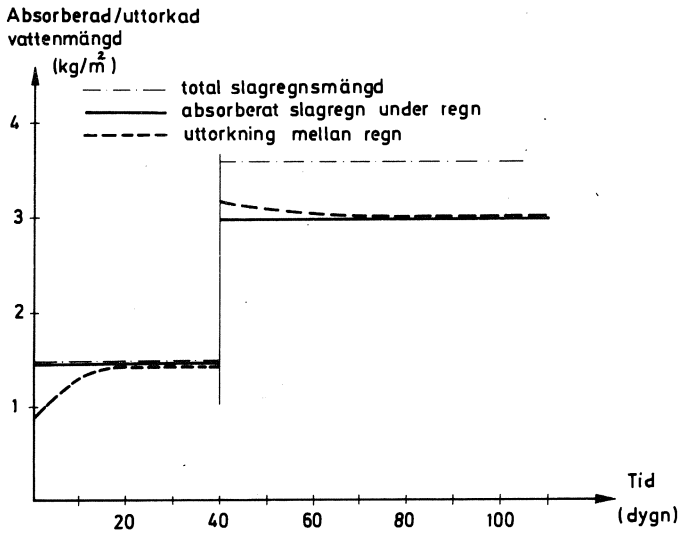
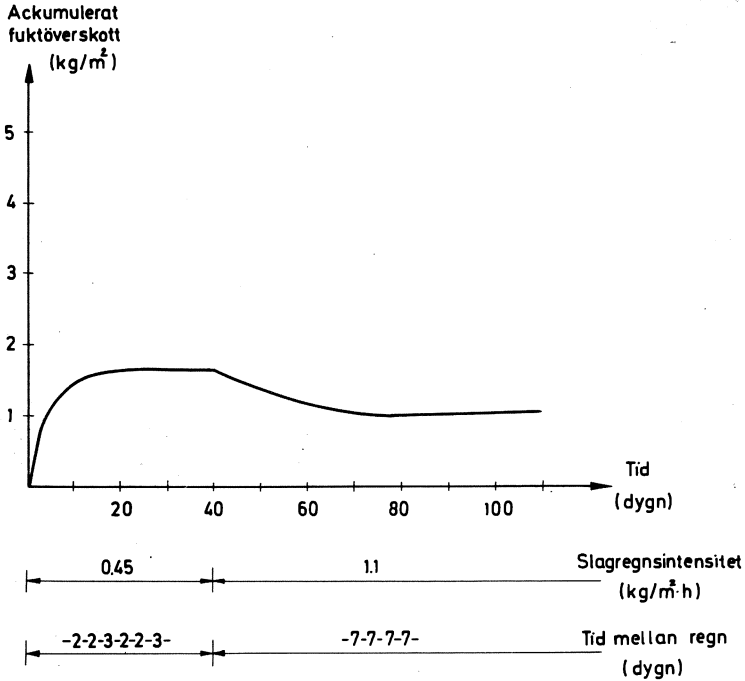


FIG. VII:60. Fuktförhållande vid cykliskt slagregn. Traditionell 3-skitts-puts på tegel.

Moisture conditions at cyclic driving rain. Clay brick with a 3-layer LC rendering.

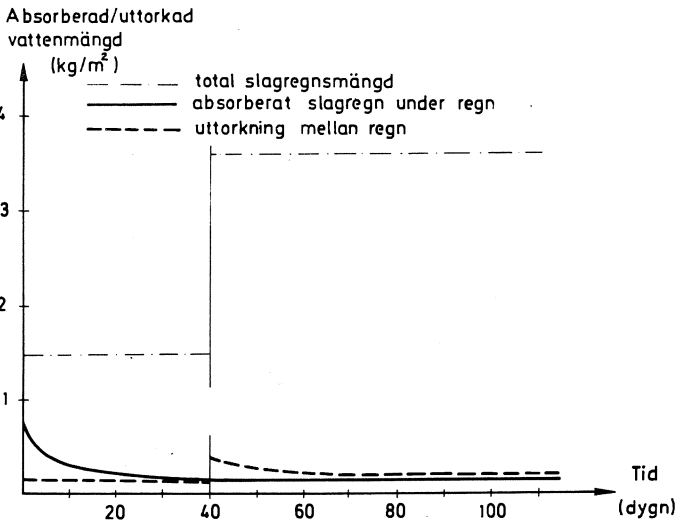
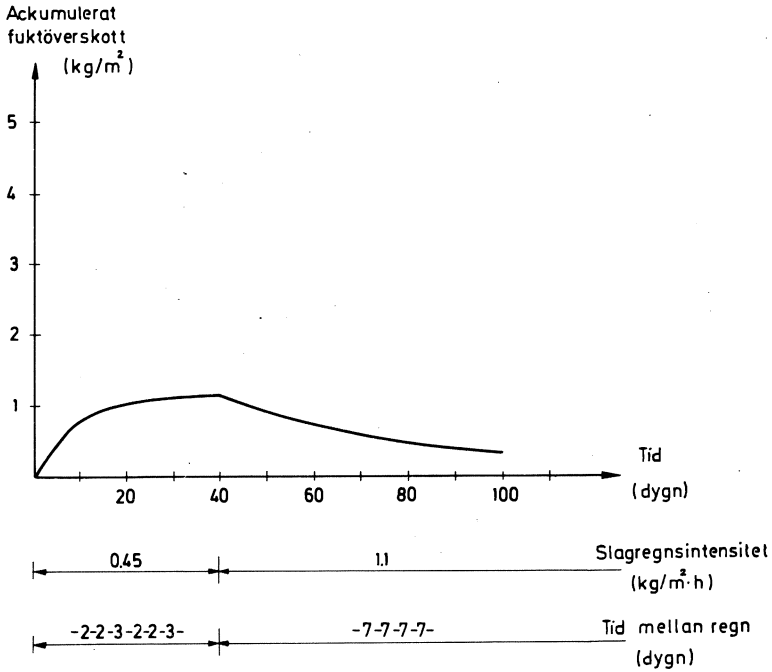


FIG. VII:61. Fuktförhållande vid cykliskt slagregn. Organisk tunnputs med spricka (10) på tegel.

Moisture conditions at cyclic driving rain. Clay brick with an organic surface coating containing a crack.

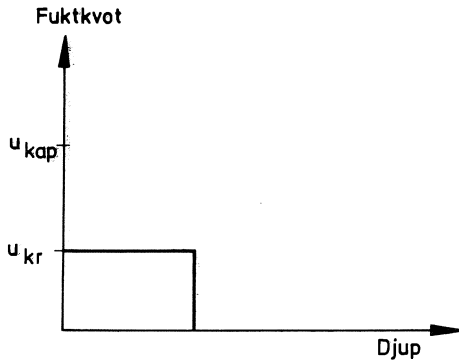


FIG. VII:62. Antagen fuktfördelning vid beräkning av kapillärsugningskapacitet.

Moisture distribution assumed when calculating the capacity of capillary water absorption.

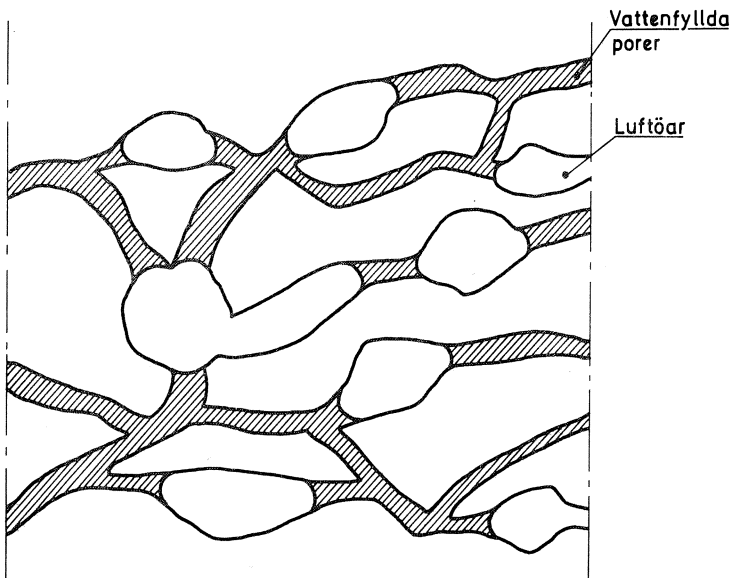


FIG. VII:63. Porsystemet vid det kritiska fukttinnehållet.

Water distribution in the pores at the critical moisture content.

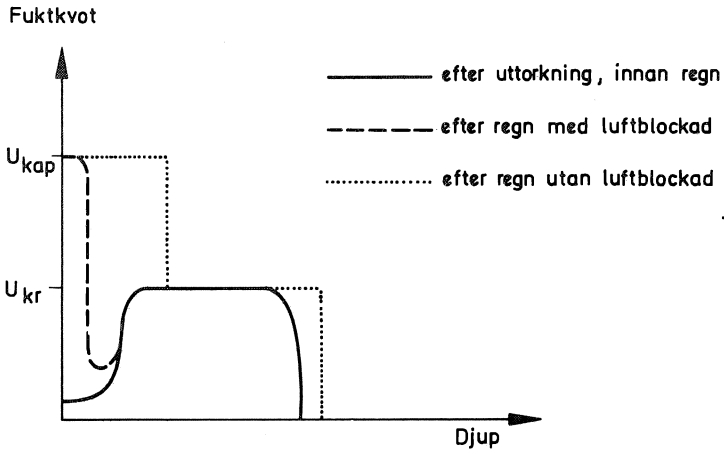


FIG. VII:64. Principiella fuktprofiler vid cykliskt slagregn på tegel.

Different possible moisture distributions in clay brick exposed to cyclic driving rain.

Avdelningen för Byggnadsmateriallära
Tekniska Högskolan i Lund

PUTSENS INVERKAN PÅ FASADENS FUKTBALANS

Delrapport VIII: FUKTENS INVERKAN PÅ ENERGIFÖRLUSTERNA

Lund i mars 1980

Kenneth Sandin

Denna delrapport hänför sig till forskningsanslag 740269-8 från Statens Råd för Byggnadsforskning till avdelningen för Byggnadsmateriallära, Tekniska Högskolan i Lund. Hela projektet slutredovisas i en huvudrapport och åtta delrapporter.

INNEHÅLL

1	INLEDNING	VIII:2
2	TEORI	VIII:3
2.1	Energiflöden, allmänt	VIII:3
2.2	Fuktens inverkan på värmeledningen	VIII:4
2.3	Uttorkningens inverkan på energiförlusten	VIII:7
3	MÄTNING AV FUKTENS INVERKAN PÅ ENERGIFÖRLUSTERNA	VIII:9
4	BERÄKNINGAR	VIII:10
4.1	Randvillkor	VIII:10
4.2	Avdunstningens inverkan på energiförlusterna	VIII:15
4.3	Fuktens totala inverkan på energiförlusterna	VIII:15
5	DISKUSSION AV RESULTATEN	VIII:17
5.1	Allmänt	VIII:17
5.2	Randvillkorens betydelse	VIII:19
	LITTERATUR	VIII:20
	TABELLER	VIII:21
	FIGURER	VIII:22

1 INLEDNING

Att fuktiga material har dålig värmeisoleringsförmåga är allmänt bekant och beaktas i Svensk Byggnorm vid beräkningar av väggars värmegångkoefficient, det så kallade k-värdet. Fukten påverkar emellertid värmeförlusterna även genom att det krävs en viss energi för att avdunsta vattnet från väggen. Vid beräkningar av k-värden tas ingen hänsyn till detta. Att denna avdunstningsenergi kan ha stor inverkan på energibalansen framgår klart av sådana vardagliga företeelser som att man fryser efter ett bad och att en våt trasa kring en ölflaska medför att ölen blir kall. Ett annat exempel är den gammaldags jordkällaren.

Syftet med denna delrapport är att göra en teoretisk belysning av problemställningen kring fuktens inverkan på en väggs energibalans. I fallet med avdunstningsenergi är den stora frågan hur mycket som kommer inifrån. Att det totalt är stora belopp är odiskutabelt. En stor del av denna energi kommer dock utifrån och påverkar de egentliga energiförlusterna i mindre grad.

Någon fullständig behandling av verkliga praktiska förhållanden görs inte här. Detta är nämligen mycket komplicerat med ständigt varierande och i vissa fall okända randvillkor. I föreliggande delrapport behandlas enbart vissa typfall vid stationära tillstånd för att belysa den principiella betydelsen av fukten.

Analysen görs under kraftigt förenklade förutsättningar. Värmeledningsförmågans temperaturberoende, vilket i vissa fall kan vara stort, försummas exempelvis helt. Vidare antas ett mycket enkelt samband mellan värmeledningsförmåga och fukttinnehåll samtidigt som all avdunstning sker från ytan.

Ovanstående medför att de siffervärden som anges inte kan betraktas som allmängiltiga för i praktiken förekommande väggar. Några generaliseringar får således inte göras.

Några laboratoriemätningar av energiförlusterna har inte gjorts ännu. För närvarande (mars -80) pågår uppbyggnad av utrustning för sådana mätningar. Resultat från dessa mätningar beräknas föreligga under 1981.

2 TEORI

2.1 Energiflöden, allmänt

Det totala energiflödet genom en vägg påverkas av ett antal olika "delflöden" enligt FIG VIII:1.

q_i är energiflödet mellan inomhusluften och väggens inneryta. Detta energiflöde ges av

$$q_i = \alpha_i (v_i - v_{oi}) \quad (\text{VIII:1})$$

där q_i = energiflöde	W/m^2
α_i = värmeövergångskoefficient på insidan	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
v_i = inomhusluftens temperatur	$^\circ C$
v_{oi} = innerytans temperatur	$^\circ C$

q_l är energiflödet på grund av "värmeledning" genom väggmaterialet. Detta energiflöde ges av

$$q_l = \frac{\lambda}{d} (v_{oi} - v_{ou}) \quad (\text{VIII:2})$$

där q_l = energiflöde	W/m^2
λ = värmeledningsförmåga	$W/m \cdot ^\circ C$
d = vägg tjocklek	m
v_{oi} = innerytans temperatur	$^\circ C$
v_{ou} = ytterytans temperatur	$^\circ C$

q_v är energiflödet på grund av fuktflödet genom väggen. För en gasbetongvägg är detta flöde relativt litet (Sandberg, 1973) och diskuteras inte i det följande. För andra material, exempelvis mineralull, kan detta flöde däremot bli stort enligt Claesson & Samuelson (1978).

q_a är energiåtgång för att förångna det vatten som torkar ut från väggen. I den fortsatta behandlingen antas detta alltid ske vid ytterytan. Denna avdunstning kan dock mycket väl ske inne i materialet. Detta förändrar inte de principiella resonemangen utan medför enbart att beräkningarna blir mer komplicerade. Med hänsyn till syftet med delrapporten behandlas därför enbart fallet med avdunstning från ytan.

Avdunstningsenergin ges av

$$q_a = r \cdot g \quad (\text{VIII:3})$$

där q_a = avdunstningsenergi/tidsenhet	W/m^2
r = ångbildningsvärme	Ws/kg
g = avdunstningsintensitet	$kg/m^2 \cdot s$

q_k är energiflödet på grund av konvektion och långvägig strålning mellan väggens ytteryta och utomhusluften.

Detta energiflöde ges av

$$q_k = \alpha_u (\vartheta_{ou} - \vartheta_u) \quad (\text{VIII:4})$$

där q_k = energiflöde

α_u = värmeövergångskoefficient på utsidan

ϑ_{ou} = ytterytans temperatur

ϑ_u = utomhusluftens temperatur

W/m²

W/m²·°C

°C

°C

q_s är energiflödet på grund av kortvägig sol- eller himmelstrålning mot väggen. Storleken på detta flöde varierar bland annat med årstid, klimat och väggorientering. Flödet ligger i intervallet 0-10³ W/m².

Vid traditionella beräkningar av värmeflödet genom en homogen vägg används ekvationen

$$q = \frac{\vartheta_i - \vartheta_u}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_u}} \quad (\text{VIII:5})$$

Enligt SBN 75 Supplement 1 kan $\frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_u}$ sättas till 0,25 m²·°C/W. Hänsyn till solstrålningen kan tas genom att ersätta utetemperaturen med en "ekvivalent utetemperatur". Hänsyn till fuktens inverkan på värmeledningsförmågan tas genom att välja ett λ med hänsyn till rådande fukttinnehåll. Någon hänsyn till avdunstningsenergin går dock inte att ta vid användandet av ekvation (VIII:5). Vid en beräkning av ökningen av energiflödet på grund av avdunstning måste en fullständig energibalansstudie göras vid ytterytan.

I avsnitt 2.2 studeras hur fukttinnehållet påverkar energiflödet om ingen hänsyn tas till avdunstningen. I avsnitt 2.3 studeras därefter hur energiflödet påverkas av avdunstning från ytterytan.

2.2 Fuktens inverkan på värmeledningen

Den ökade värmeledningen på grund av fukt bestäms inte enbart av det totala fukttinnehållet i väggen utan även av hur fukten är fördelad. En jämn fuktfördelning genom väggen ger ett annat resultat än en ojämn fuktfördelning, även om det totala fukttinnehållet är detsamma. I det följande behandlas först fallet med en jämn fuktfördelning och därefter studeras hur olika fuktfördelningar förändrar resultatet.

Jämn fuktfördelning

Fuktens inverkan på värmeledningsförmågan är relativt välkänd för de flesta vanliga förekommande materialen. För gasbetong med densiteter ca 400 kg/m^3 uppger exempelvis Elmroth & Höglund (1965) att sambandet mellan värmeledningsförmåga och fuktkvot kan uttryckas genom

$$\lambda_u = \lambda_0 + 4 \cdot 10^{-3} \cdot u \quad (\text{VIII:6})$$

$$\lambda_u = \text{värmeledningsförmåga vid fuktkvoten } u \quad \text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\lambda_0 = \text{värmeledningsförmåga för torrt material} \quad \text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$u = \text{fuktkvot} \quad \text{vikts-\%}$$

Mätningarna som gav ekvation (VIII:6) gjordes med fuktkvoter i intervallet 0-15 vikt-%. Enligt andra litteraturuppgifter är sambandet mellan värmeledningsförmåga och fuktkvot inte rätlinjigt. Vidare påverkar temperaturen förhållandena kraftigt. Denna påverkan är olika vid olika fuktkvoter. Med hänsyn till syftet med föreliggande analys väljs dock för den fortsatta behandlingen det kraftigt förenklade sambandet enligt ekvation (VIII:6). Enligt Elmroth & Höglund (1965) erhöles $\lambda_0 = 0.09 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ för densiteten 400 kg/m^3 .

Det totala energiflödet genom en vägg erhålles ur ekvation (VIII:5). Genom insättning av ekvation (VIII:6) i ekvation (VIII:5) erhålles direkt ett mått på hur fukten påverkar energiförlusterna om ingen hänsyn tas till avdunstningen. I FIG VIII:2 redovisas hur kvoten q_u/q_0 varierar med fuktkvoten för en 30 cm tjock vägg av gasbetong med densiteten 400 kg/m^3 . q_u är energiflödet vid fuktkvoten u och q_0 är energiflödet när väggen är helt torr.

Ojämn fuktfördelning

Vid en ojämn fuktfördelning i väggen kan energiflödet approximativt beräknas genom att dela in väggen i ett antal snitt med olika fuktkvot (och därmed olika värmeledningsförmåga) enligt FIG VIII:3. Energiflödet ges då av

$$q = \frac{\vartheta_i - \vartheta_u}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_u} + \sum_{i=1}^n \frac{\Delta x_i}{\lambda_i}} \quad (\text{VIII:7})$$

Om $n \rightarrow \infty$ fås en exakt lösning genom

$$q = \frac{\vartheta_i - \vartheta_u}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_u} + \int_0^d \frac{dx}{\lambda_0 + 4 \cdot 10^{-3} \cdot u}} \quad (\text{VIII:8})$$

2.3 Uttorkningens inverkan på energiförlusten

För att analysera uttorkningens inverkan på energiförlusterna måste en fullständig energibalansberäkning genomföras. Genom att studera energiförlusterna med respektive utan hänsyn tagen till uttorkningen erhålles direkt uttorkningens inverkan.

För att förenkla analysen antages i det följande att all uttorkning sker från ytterytan och att stationära förhållanden med jämn fuktfördelning råder. I praktiken förekommer aldrig detta tillstånd utan temperatur, fuktfördelning och energiflöden ändras ständigt. Erhållna resultat är därför inte några direkt praktiskt användbara siffror utan visar enbart förhållandena vid vissa givna randvillkor.

Energi-balans vid ytterytan i FIG VIII:1 medför

$$q_L + q_V + q_S = q_K + q_A \quad (\text{VIII:12})$$

De olika delflödena har beskrivits tidigare. I den fortsatta behandlingen bortses från q_V . Insättning av tidigare angivna uttryck för delflödena i ekvation (VIII:12) ger

$$\frac{\lambda}{d}(\psi_{oi} - \psi_{ou}) + q_S = \alpha_U(\psi_{ou} - \psi_U) + r \cdot g \quad (\text{VIII:13})$$

Avdunstningsintensiteten, g , beror på fukt-, temperatur- och vindförhållandena. Det största värdet på g fås då ytan är helt blöt. Avdunstningsintensiteten ges då av

$$g = \beta \cdot (v_{ou} - v_U) \quad (\text{VIII:14})$$

där β = ångövergångskoefficient

v_{ou} = (mättnads-)ånghalt i ytan

v_U = ånghalt i utomhusluften

m/s

kg/m³

kg/m³

Energiflödet genom väggen är vid stationärt förhållande detsamma i varje snitt. Flödet blir sålunda detsamma oberoende av vilket snitt man studerar. Yttemperaturen på insidan i ekvation (VIII:13) kan exempelvis ersättas med inomhustemperaturen genom att räkna flödet från inomhusluften. Detta medför att ekvation (VIII:13) förändras till

$$\frac{\psi_i - \psi_{ou}}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{d}{\lambda}} + q_S = \alpha_U(\psi_{ou} - \psi_U) + r \cdot \beta(v_{ou} - v_U) \quad (\text{VIII:15})$$

I denna ekvation är ψ_{ou} och v_{ou} okända. Allt annat ges av randvillkoren. v_{ou} kan emellertid approximativt tecknas som en funktion av ψ_{ou} . Inom det praktiskt intressanta området kan detta samband skrivas

$$v_{ou} = (0,0166 \cdot v_{ou}^2 + 0,29 \cdot v_{ou} + 4,84) \cdot 10^{-3} \quad (\text{VIII:16})$$

Med ekvation (VIII:16) insatt i ekvation (VIII:15) erhålles ett uttryck som enbart innehåller ytterytans temperatur som obekant. När denna temperatur beräknats erhålles det totala energiflödet genom

$$q = \frac{v_i - v_{ou}}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{d}{\lambda}} \quad (\text{VIII:17})$$

Avdunstningens inverkan studeras genom att variera β i ekvation (VIII:15). Om ingen avdunstning förekommer sätts β till noll, vilket ger flödet q_0 . Exempel på beräkningar redovisas i avsnitt 4. Där diskuteras även randvillkoren samt olika begränsningar.

Ovanstående härledning av energiflödena bygger på den traditionella uppfattningen om energibalansen vid avdunstning. I Klenke (1964) framförs en annan teori. Om utomhusluftens temperatur är högre än väggytans överensstämmer teorierna. Om däremot utomhusluftens temperatur är lägre blir skillnaden markant. Enligt Klenke kan man nämligen inte direkt addera energiflödena från avdunstning och konvektiv värmeövergång utan enbart räkna med den största av dessa. Anledning till detta är att omedelbart utanför ytterytan kondenserar den avdunstande vattenånga. Härvid frigörs den energimängd som åtgick för att omvandla vattnet i väggen till vattenånga.

Klenkes teori har ännu inte verifierats genom praktiska försök i samband med uttorkning av väggar. Med hänsyn härtill görs de fortsatta beräkningarna enligt den traditionella teorin.

De mätningar som för närvarande planeras skall förhoppningsvis visa vilken teori som visar bäst överensstämmelse med verkligheten.

3 MÄTNING AV FUKTENS INVERKAN PÅ ENERGIFÖRLUSTERNA

Resultat från mätningar av olika materials värmeledningsförmåga redovisas ofta som funktion av medelfukttinnehållet under mätningen. På grund av att man ofta har fuktgradienter under mätningen blir enligt tidigare avsnitt det uppmätta λ -värdet något mindre än det verkliga. Vid de vanligaste metoderna är inverkan av denna felkälla dock försumbar.

Några direkta mätningar av avdunstningens inverkan på energiförlusterna har inte hittats i litteraturen. Mätningar av de totala energiförlusterna genom en fuktig vägg som torkar finns dock redovisade, bl a av Elmroth & Höglund (1965). Dessa mätningar är gjorda på hus utsatta för naturligt klimat och fastställandet av exakta randvillkor och särskiljandet av de olika energiflödena är därför omöjligt.

För att kunna göra direkta mätningar av energiförlusterna i samband med avdunstningen pågår för närvarande uppbyggnad av mätutrustning. Utrustningen består i princip av en "hot box" med mycket stor precision hos regler- och mätutrustning. En provvägg, $600 \times 600 \text{ mm}^2$, monteras som vägg i en välisolerad låda (200 mm polyuretan). Inne i lådan hålles klimatet konstant, samtidigt som energiåtgången för att hålla konstant temperatur mäts. Vid laboratorieförsök hålls även klimatet utanför lådan konstant, med en lägre temperatur än inne i lådan. Energiåtgången mäts med olika mycket fukt i väggen, med och utan avdunstning, med och "utan" fuktgradient och vid olika yttre klimatfaktorer. Mätningar skall även göras före, under och efter ett slagregn och med olika ytbehandlingar.

Genom ovanstående kan olika faktorer särskiljas från varandra. Mätningar planeras även vid naturligt utomhusklimat. Dessa kommer eventuellt att göras med flera lådor samtidigt. Härigenom kan exempelvis inverkan av olika ytbehandlingar studeras under naturliga förhållanden.

4 BERÄKNINGAR

I det följande diskuteras först vissa randvillkor, som har betydelse för beräkningarna och som i vissa fall kan variera avsevärt. Därefter redovisas några beräkningar av uttorkningsintensitet och ökning av energiflödet på grund av avdunstning. I samband härmed varieras även randvillkoren för att studera hur detta påverkar resultatet. Slutligen redovisas ett exempel på den totala inverkan av fukten.

4.1 Randvillkor

Den följande diskussionen av randvillkor grundar sig i huvudsak på Sandberg (1973) och Höglund & Stephenson (1968).

Värmeövergångskoefficient på insidan, α_i

Värmeövergången vid insidan sker genom strålning och konvektion. Värmeövergångskoefficienten i ekvation (VIII:1) kan således delas upp i en strålnings- och en konvektionsdel enligt

$$\alpha_i = \alpha_{is} + \alpha_{ik} \quad (\text{VIII:18})$$

Strålningsutbytet vid ytan är beroende av ytans och omgivande ytors temperatur och emittans. Under normala förhållanden vid en väggs insida blir α_{is} ca $5 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

Värmeövergången på grund av konvektion är starkt beroende av luftrörelserna. Inomhus sker luftrörelserna i huvudsak genom egenkonvektion, vilken är beroende av temperaturskillnad mellan yta och luft. För en "normalisolerad" vägg blir α_{ik} $2-3 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. En sämre isolering medför att värdet ökar.

I de följande beräkningarna väljes alltid $\alpha_i = 8 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

Värmeövergångskoefficient på utsidan, α_u

Den yttre värmeövergångskoefficienten kan, i likhet med den inre, uppdelas i en strålnings- och en konvektionsdel enligt

$$\alpha_u = \alpha_{us} + \alpha_{uk} \quad (\text{VIII:19})$$

Strålningsdelen innefattar här den långvågiga strålningen. α_{us} varierar kraftigt med temperatur hos luft och yta samt med emittansen hos ytan. I normala fall är storleksordningen $5-10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ rimlig.

Detta sätt att beskriva den komponent av värmeövergångskoefficienten som beror på den långvågiga strålningen är en mycket grov approximation, som dock är användbar vid medeltalsberäkningar över längre tider. Det långvågiga strålningsutbytet beror egentligen inte på skillnaden mellan yt- och lufttemperatur. Vid beräkningar omskrivs dock det verkliga förhållandet så att denna temperaturskillnad kan användas.

Vid en noggrann studie måste begreppet "effektiv motstrålningstemperatur" införas. Vidare kan strålningsdelen inte inkluderas i ekvation (VIII:4) utan måste behandlas separat. Den effektiva motstrålningstemperaturen kan för väggar under klara nätter bli upp till 5°C lägre än lufttemperaturen. Detta medför att yttemperaturen kan bli lägre än lufttemperaturen, vilket i sin tur kan ge ytkondens på väggens utsida. Dagg och frost på bilar, som står ute på nätterna, är andra vardagliga exempel på följder av att den effektiva motstrålningstemperaturen kan vara lägre än lufttemperaturen.

Konvektionsdelen är starkt beroende av vindhastigheten. Olika analytiska samband mellan vindhastighet och α_{uk} finns i litteraturen. Dessa förutsätter ofta att vindhastigheten mäts parallellt med ytan. I samband med värmeövergång på utsidan av en vägg är det intressantare att ha ett samband mellan α_{uk} och "medelvindhastighet" utan hänsyn till riktning. I FIG VIII:8 redovisas ett sådant samband enligt mätningar av Schwarz (1972).

I olika länder rekommenderas normalt att α_u sätts till $20-30 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Denna siffra är dock ett medelvärde under hela året.

I de följande beräkningarna väljs $\alpha_{us} = 10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ medan α_{uk} varierar i intervallet $10-30 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

Detta motsvarar en fasad på lovartsidan när vindhastigheten varierar mellan ca 1 och 6 m/s.

Ängövergångskoefficient på utsidan, β

Ängövergångskoefficienten är liksom värmeövergångskoefficienten beroende av vindhastigheten. Genom termodynamiska likformighetsbetraktelser kan man få ett direkt samband mellan äng- och värmeövergångskoefficienterna.

För en fritt exponerad fasad har Schwarz (1972) genom mätningar funnit sambandet

$$\beta = 0,8 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha_k \quad (\text{m/s}) \quad (\text{VIII:20})$$

I de följande beräkningarna väljs β med hänsyn till aktuellt α_k enligt ekvation (VIII:20). När ingen avdunstning sker från ytan, exempelvis på grund av en tät färg, sätts β till noll. Vid delvis genomsläppliga yt-skikt ersätts β med ytskiktets ånggenomsläpplighet.

Utomhustemperatur, v_u

Utomhustemperaturen är den verkliga lufttemperaturen utomhus. Denna mäts på en strålningsskyddad plats och tar alltså ingen hänsyn till den kortvågiga strålningen.

Dygnsmedeltemperaturens variation över året redovisas i FIG VIII:9.

Under dygnet svänger lufttemperaturen omkring dygnsmedelvärdet och når ett maximum vid 14-tiden. Svängningens storlek varierar med bl a årstid och är störst på sommaren. Enligt Sandberg (1973) varierar dygnsamplituden enligt FIG VIII:10. Meddygnsamplitud avses här skillnaden mellan medelvärdet av dygnens maxtemperatur och medelvärdet av dygnens mintemperatur under en månad. Under enstaka dagar kan således amplituden blir väsentligt större.

Beräkningarna i det följande görs med utomhustemperaturen +5 och +10 °C, vilket ungefär motsvarar min- och maxtemperaturen för Lund under ett normaldygn vid månadsskiftet oktober-november.

Vattenånghalt utomhus, v_u

Månadsmedelvärdena av utomhusluftens vattenånghalt redovisas i FIG VIII:11 (Sandberg, 1973). Vid stabil väderlek är ånghalten något högre på dagen än på natten. Denna tendens rubbas dock lätt vid skiftningar i väderleken och i normala fall kan ånghalten anses konstant under dygnet.

Beräkningarna i det följande görs med $v_u = 6,4 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$, vilket motsvarar ånghalten i Lund vid månadsskiftet oktober-november.

Energiflöde från kortvågig strålning, q_s

Den från den kortvågiga strålningen absorberade effekten ges av

$$q_s = \alpha \cdot I \quad (\text{VIII:21})$$

där α = ytans absorbtans

I = mot ytan infallande kortvågig strålning W/m^2

Ytansabsorbans beror bl a på färgen. Som riktvärden anges 0,9 för mörka ytor, 0,7 för ljusare ytor (betong och tegel) och 0,5 för vita eller blanka ytor.

Den totala kortvågiga strålningen sammansätts av direkt solstrålning I_D , diffus himmelstrålning I_d och diffus reflekterad strålning I_r . Storleken på dessa varierar kraftigt med solhöjd, väggens orientering, årstid, molnighet etc. Den diffusa himmelstrålningen är exempelvis större under molniga dagar än under klara dagar. Den direkta strålningen är å andra sidan obefintlig under mulna dagar. Den direkta strålningen träffar enbart fasadpartier som inte ligger i skugga. Den diffusa strålningen träffar däremot även "skuggade" fasader.

För att kunna analysera strålningens inverkan på avdunstningshastighet och energibalans måste varje komponent av strålningen studeras. På nordsidan är det exempelvis främst den diffusa strålningen som bidrar medan på övriga sidor alla strålningstyper är verksamma.

Den direkta strålningen och den totala strålningen under klara dagar har studerats av ett stort antal forskare medan däremot strålningen under mulna dagar är mindre studerad.

I Höglund & Stephenson (1968) redovisas hur den totala solstrålningen mot tak och väggar med olika orientering varierar med årstid, klockslag och latitud. Denna redovisning avser enbart helt klara dagar och strålningen innefattar sålunda alla tre strålningskomponenterna.

Med hjälp av samband givna i Sandberg (1973) kan även strålningen under mulna dagar uppskattas. Här behandlas enbart fallet för en fasad som inte direktskuggas av intilliggande hus eller dylikt.

Under mulna dagar uppges den diffusa himmelstrålningen mot en horisontell yta (I_{dH}^{mulen}) vara 25% av totalstrålningen en klar dag (I_{TH}^{klar}). Detta ger

$$I_{dH}^{\text{mulen}} = 0,25 \cdot I_{TH}^{\text{klar}} \quad (\text{VIII:22})$$

Om alla delar av himlen strålade med samma intensitet, så skulle den diffusa himmelstrålningen mot en vertikal yta (I_{dV}) bli hälften av strålningen mot en horisontell yta (I_{dH}). Runt solen är dock strålningen intensivare och I_{dV} blir sålunda beroende av ytans orientering relativt solen. Förhållandet mellan I_{dV} och I_{dH} vid olika infallsvinkel (i_v) framgår av FIG VIII:12. Den diffusa himmelstrålningen under en mulen dag mot en vertikal yta, som inte direktskuggas, kan alltså tecknas

$$I_{dV}^{\text{mulen}} = f(\cos i_v) \cdot 0,25 \cdot I_{TH}^{\text{klar}} \quad (\text{VIII:23})$$

För den markreflekterande diffusa strålningen (I_{rV}^{mulen}) under en mulen dag gäller

$$I_{rV}^{\text{mulen}} = 0,5 \cdot r \cdot I_{dH}^{\text{mulen}} \quad (\text{VIII:24})$$

där r = reflexionsfaktorn för marken

För mörka ytor (asfalt) blir reflexionsfaktorn ca 0,1 och för snö ca 0,7-0,85. Enligt Höglund & Stephenson är $r=0,2$ ett rimligt medelvärde.

Den totala diffusa strålningen mot en oskuggad fasad under mulna dagar kan med hjälp av ovan angivna samband tecknas

$$I_{TV}^{\text{mulen}} = (f(\cos i_v) \cdot 0,25 + 0,1) \cdot I_{TH}^{\text{klar}} \quad (\text{VIII:25})$$

$f(\cos i_v)$ fås ur FIG VIII:12 och I_{TH}^{klar} fås ur tabeller i Höglund & Stephenson (1968).

I FIG VIII:13-14 redovisas den enligt ovan beräknade kortvågiga strålningen mot en fasad på latituden 56°N (Skåne) orienterad mot norr respektive söder under en sommardag (21/6) respektive höstdag (21/10).

I TAB VIII:1 redovisas "medelstrålningen" under hela dygnet.

Av FIG VIII:13-14 och TAB VIII:1 framgår bland annat att för en sydvägg så är det en mycket stor skillnad mellan en solig och en mulen dag. För en norrvägg är däremot skillnaden mycket liten. Vidare framgår tydligt att även mot en norrvägg är strålningen relativt stor under sommaren. Att strålningen mot sydsidan är större under en klar höstdag än under en klar sommardag beror på att solen står lägre på hösten, vilket medför en mindre infallsvinkel. På sommaren blir strålningen mot väst- och östfasaderna större än mot sydfasaden.

Med utgångspunkt från ovan angivna strålningsintensiteter görs beräkningarna i avsnitt 4.2 med q_s liggande i intervallet $0-200 \text{ W/m}^2$.

Ångbildningsvärme, r

Ångbildningsvärmets är temperaturberoende. I praktiskt förekommande temperaturområde kan r sättas till $2500 \cdot 10^3 \text{ Ws/kg}$.

4.2 Avdunstningens inverkan på energiförlusterna

För att kunna särskilja avdunstningens inverkan görs beräkningarna både med och utan avdunstning. I fallet med avdunstning förutsätts att avdunstningen sker från en våt yta. Resultaten redovisas som energiflödet genom väggen med hänsyn till avdunstning (q) och energiflödet utan avdunstning (q_0). Ökningen av energiförlusterna på grund av förhöjd värmeledningsförmåga i väggmaterialet redovisas inte här.

Beräkningarna görs för 25 cm gasbetong, kvalitetsgrupp 500. Enligt SBN är det praktiskt tillämpbara λ -värdet för detta material $0,15 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$. Detta värde gäller vid fuktkvoten 6 vikts-%. Med antagandet att ekvation (VIII:6) gäller för aktuell kvalitetsgrupp blir λ -värdet vid 20-25 vikts-% ca $0,22 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$. För att studera hur λ -värdet hos väggen påverkar uttorkningshastighet och ökningen i energiflöde på grund av avdunstning görs beräkningarna med $\lambda=0,15$ respektive $0,22 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$. I resultatredovisningen redovisas dock enligt ovan inte det ökade energiflödet på grund av förhöjt λ -värde.

Alla beräkningar görs med inomhustemperaturen $+20^\circ\text{C}$.

Resultaten redovisas i FIG. VIII:15-16. I FIG. VIII:17 redovisas även uttorkningsintensiteten vid samma klimatbetingelser.

4.3 Fuktens totala inverkan på energiförlusterna

I tidigare avsnitt har fuktens inverkan på olika "delenergiflöden" studerats. Vid en totalbedömning av hur fukten påverkar energiförlusterna måste alla faktorer studeras samtidigt. I detta avsnitt görs en beräkning av det totala energiflödet genom en 25 cm gasbetongvägg (K500) med olika medelfukttinnehåll. Fukten antas vid beräkningarna vara jämnt fördelad i väggen.

Beräkningarna görs med två olika randvillkor enligt TAB VIII:2.

Dessa randvillkor kan anses representera en mulen höstdag respektive mulen höstnatt. Gasbetongens värmeledningsförmåga har satts till $0,14 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$ vid fuktkvoten 4 vikts-%. Med hjälp av ekvation (VIII:6) har sedan värmeledningsförmågan beräknats till $0,17$, $0,21$ och $0,25 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$ vid fuktkvoterna 10, 20 och 30 vikts-%.

Resultatet, i form av totalt energiflöde både med avdunstning (q) och utan avdunstning (q_0), redovisas i TAB VIII:3. Fallet utan avdunstning representerar en vägg som är målad med en tät färg. Någon avdunstning förekommer inte heller om hela väggen har fuktkvoten 4 vikts-%. Omedelbart efter ett regn kan emellertid ytan vara blöt, vilket medför avdunstning. Denna blöta zon påverkar dock inte "värmeledningen" i någon större utsträckning (jämför avsnitt 2.2), varför en beräkning med $\lambda=0,14 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$ kan vara rimlig.

5 DISKUSSION AV RESULTATEN

5.1 Allmänt

Några långtgående generella slutsatser är inte möjliga att dra med utgångspunkt från gjorda beräkningar. Anledningen till detta är främst att randvillkoren delvis är osäkra samt att kraftiga förenklingar gjorts vid beräkningarna. Som exempel på förenklingar kan nämnas att stationära tillstånd förutsatts samt att, i fallet med uttorkning, ytan förutsatts blöt. Den största osäkerheten finns emellertid vid bedömningen av praktiska fukttinnehåll i väggar. Beräkningarna är gjorda med fuktkvoter i intervallet 4-30 vikts-%, vilket torde vara de ungefärliga värden man kan förvänta i en gasbetongvägg K500. Det lägre värdet gäller för gasbetong med "regnkappa". Det högre värdet kan vara realistiskt omedelbart efter byggnationen och i enstaka väggpartier, som utsätts för mycket kraftiga slagregn. SBN anger att man skall räkna med 6 vikts-% för gasbetong "utan regnkappa". Denna siffra får dock inte betraktas som ett värde som alltid gäller. Bland faktorer som påverkar fukttinnehållet kan nämnas

byggnadens läge och orientering
 omgivande terräng och bebyggelse
 fasadutformning
 fasadorientering
 läge på fasaden
 årstid

I kommentarer till SBN finns angivet vilka slagregnsmängder som kan anses träffa en fasad. Med utgångspunkt från dessa siffror kan man konstatera att förutsättningar finns för att en helt oskyddad gasbetongfasad kan få ett mycket högt fukttinnehåll. En medelfuktkvot på 20-30 vikts-% torde inte vara orimlig i samband med mycket kraftiga och långvariga slagregn på fasadpartier som har ett utsatt läge i slagregnsrik zon. Å andra sidan är det också troligt att vissa partier av fasaderna på en byggnad, belägen i zon med ringa slagregn, har en medelfuktkvot understigande i SBN angivna 6 vikts-%.

Att göra en "exakt" beräkning av den totala inverkan av fukten på energiförlusterna under en längre tid, exempelvis ett år, är komplicerat och kräver datorberäkningar. Med hänsyn till att kunskaperna om de regnmängder som träffar en fasad är mycket bristfälliga, blir dessutom en sådan beräkning osäker.

De förenklade beräkningar som gjorts i föregående avsnitt visar dock entydigt att fukten har stor betydelse för energiförlusterna.

Fuktens inverkan beror dels på att värmeledningsförmågan ökar med ökande fuktinnehåll och dels på att energi åtgår för att torka ut väggen. De ökade energiförlusterna genom väggen medför i sin tur att yttemperaturen på insidan sjunker. Härigenom ökar även "kallstrålningen" inomhus, vilket medför att inomhustemperaturen måste höjas för att temperaturen skall upplevas som oförändrad.

Förutom den direkt fuktberoende ökningen av energiflödet genom väggen tillkommer alltså en ökning på grund av att inomhustemperaturen måste höjas.

Ökningen av energiflödet på grund av att fukten medför en större värmeledning är känt sedan länge och beaktas vid val av praktiskt tillämpligt λ -värde. Den energi som åtgår för att torka ut väggen brukar dock normalt inte beaktas. Enligt TAB VIII:3 ökar energiflödet på grund av avdunstning i en "torr vägg" under en mulen höstdag med ca 50%. För att energiflödet skall öka lika mycket enbart beroende på försämrat λ -värde måste fuktkvoten i väggen öka från den "torra väggens" 4 vikt-% till drygt 20 vikt-%. Fallet med "torr vägg" och avdunstning från ytan kan anses representera förhållandena omedelbart efter ett litet slagregn. Nattetid har avdunstningen mindre betydelse. Å andra sidan blir inverkan under soliga dagar större. Av ovanstående framgår klart att avdunstningen har stor betydelse för energiförlusterna, samma storleksordning som den ökade värmeledningen. Den sammanlagda inverkan kan i vissa fall medföra att energiförlusterna mer än fördubblas på grund av fukten.

För att göra en grov uppskattning av den totala inverkan på längre sikt kan man bilda medelvärden av förhållandena under natt och dag enligt TAB VIII:3.

Jämförs exempelvis en vägg som har fuktkvoten 4 vikts-% och ingen avdunstning ("regnkappa") med en vägg som har fuktkvoten 10 vikt-% och avdunstning framgår att den senare väggen har ca 40 % större energiflöde. Av dessa 40 % beror ca hälften på avdunstningen!

Ovanstående siffror förutsätter att väggen alltid har ett högt fuktinnehåll och är våt på ytan. Görs beräkningen för en byggnad under ett helt år torde ett så högt fuktinnehåll tillhöra undantagsfallen. I kommentarer till SBN nr 1975:3 anges "dimensionerande" slagregn till 50-275 kg per m² och år. Den lägre siffran avser fasad i "icke utsatt läge" i slagregnsfattig zon.

Den högre siffran avser fasad i "utsatt läge" i slagregnsrik zon. Huvuddelen av detta regn inträffar under uppvärmningssäsongen. En rimlig uppskattning torde vara att 2/3 inträffar under denna tid. Med antagandet att allt vatten absorberas skall alltså ca 30-200 kg vatten avdunsta per m^2 under uppvärmningssäsongen. Med hjälp av FIG VIII:16 kan man grovt bedöma "medelavdunstningshastigheten" under uppvärmningssäsongen till ca 1-2 $kg/m^2 \cdot dygn$. I ett utsatt läge i slagregnsrik zon skulle alltså avdunstning kunna pågå i 100-200 dygn, vilket i "sämsta fall" är av samma storleksordning som uppvärmningssäsongen. Detta gäller dock inte alla fasaderna, utan enbart de som är orienterade mot den dominerande slagregnsriktningen. I fasader med annan orientering och i fasader på byggnader belägna i slagregnsfattig zon blir inverkan av fukten betydligt mindre, ca 10 % av angivna värden.

5.2 Randvillkorens betydelse

Randvillkorens inverkan på energiförlusterna på grund av avdunstning från ytan redovisas i FIG. VIII:15-16. Härav framgår bland annat att dessa energiförluster ökar med ökande kortvågig strålning mot fasaden, ökande utomhustemperatur samt ökande λ -värde. Vindhastigheten inverkar däremot olika beroende på hur stor den kortvågiga strålningen är. Ökande vindhastighet kan medföra både ökande och minskande avdunstningsberoende energiförluster. Att ange något randvillkor som har speciellt stor betydelse är inte möjligt, eftersom slutresultatet är beroende av samtliga randvillkor samtidigt. En viss ändring i ett randvillkor medför olika inverkan som blir beroende av de övriga randvillkoren. En ändring av ett randvillkor, som i ett fall medför att energiförlusterna ökar, kan i ett annat fall (övriga randvillkor annorlunda) medföra att energiförlusterna minskar.

Randvillkorens inverkan på uttorkningshastigheten redovisas i FIG VIII:17. Härav framgår bland annat att uttorkningshastigheten ökar kraftigt med ökande strålning, ökande vindhastighet och ökande temperatur. Väggens värmeisoleringsförmåga saknar däremot helt betydelse. Detta innebär att en ökad isolering i en yttervägg inte medför någon försämrad uttorkningsförmåga.

Av FIG VIII:17 framgår även att skillnaden mellan exempelvis dag ($v=10^{\circ}C$ och $q_s=200 W/m^2$) och natt ($v=5^{\circ}C$ och $q_s=0$) är mycket stor. På dagen sker avdunstningen ungefär 10 gånger snabbare än på natten!

Alla beräkningar har som tidigare nämnts gjorts med förutsättningen att all avdunstning sker från ytan. Under praktiska förhållanden gäller detta omedelbart efter ett regn. Efter en viss tid kommer avdunstningen att ske en bit in i väggen, varvid förhållandena ändras mycket kraftigt.

LITTERATUR

Bankvall, C, Pettersson, B & Samuelson, I, 1978, Fältprovning i samband med byggnaders energiförbrukning.

(Statens Provningsanstalt) SP-rapport 1978:6. Borås.

Claesson, J & Samuelson, I, 1978, Heat losses caused by moisture flow through insulation layers.

(Statens Provningsanstalt) SP-rapport 1978:10. Borås.

Elmroth, A & Höglund, I, 1965, Fukt- och värmestånd hos lättbetongväggar. Lättbetong 4/65.

Gertis, K, 1968, Einfluss der Feuchtigkeitsverteilung in Aussenwänden auf die Wärmeleitung. Berichte aus der Bauforschung, Heft 51. Verlag Wilhelm Ernst & Sohn. Berlin.

Höglund, I & Stephenson, DG, 1968, Tabeller för beräkning av solinstrålning mot byggnader.

Rapport från Byggeforskningen, 49/68. Stockholm.

Klenke, W, 1964, Die Wärme- und Stoffübertragung bei der Verdunstungskühlung und die Beurteilung von Kühltürmen. Dissertation.

Technischen Hochschule Braunschweig.

Sandberg, PI, 1973, Byggnadsdelars fuktbalans i naturligt klimat.

(Institutionen för byggnadsteknik. Tekniska Högskolan i Lund), Rapport 43. Lund.

Schwarz, B, 1972, Die Wärme- und Stoffübertragung an Aussenwandoberflächen. Berichte aus der Bauforschung, Heft 79. Verlag Wilhelm Ernst & Sohn. Berlin.

Statens Planverk, 1975, Kommentarer till svensk byggnorm 1975:3. Stockholm.

Statens Planverk, 1977, Kommentarer till svensk byggnorm 1977:3. Stockholm.

Statens Planverk, 1976, SBN 1975 Supplement 1. Stockholm.

Taesler, R, 1972, Klimatdata.

Byggeforskningen. Stockholm.

TAB. VIII:1. Medelstrålning (W/m^2) under helt dygn.

	Klar dag		Mulen dag	
	Sydfasad	Norrfasad	Sydfasad	Norrfasad
21/6	170	85	95	79
21/10	230	20	35	20

TAB. VIII:2. Randvillkor vid beräkning av totalt energiflöde.

		Mulen höstdag	Mulen höstnatt
Inomhustemperatur	$^{\circ}C$	20	20
Utomhustemperatur	$^{\circ}C$	10	5
Kortvågig strålning	W/m^2	100	0
Värmeövergångskoefficient på utsidan	$W/m^2 \cdot ^{\circ}C$	40	40
Värmeövergångskoefficient på insidan	$W/m^2 \cdot ^{\circ}C$	8	8
Ångövergångskoefficient på utsidan	m/s	$24 \cdot 10^{-3}$	$24 \cdot 10^{-3}$
Utomhusånghalt	kg/m^3	$6,4 \cdot 10^{-3}$	$6,4 \cdot 10^{-3}$

TAB. VIII:3. Totalt energiflöde (W/m^2) genom 25 cm gasbetongvägg (K500) med olika medelfuktkvot.

Medelfuktkvot i väggen (vikts-%)	Mulen höstnatt		Mulen höstdag	
	q	q ₀	q	q ₀
4	7,96	7,75	5,78	3,87
10	9,48	9,23	6,89	4,61
20	11,47	11,15	8,34	5,58
30	13,38	12,99	9,73	6,50

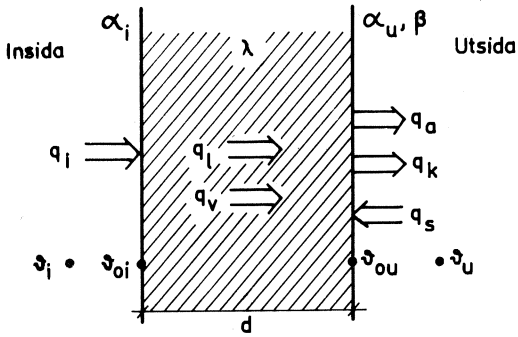


FIG. VIII:1. Beteckningar vid analys av olika energiflöden.
Symbols when calculating different energy flows.

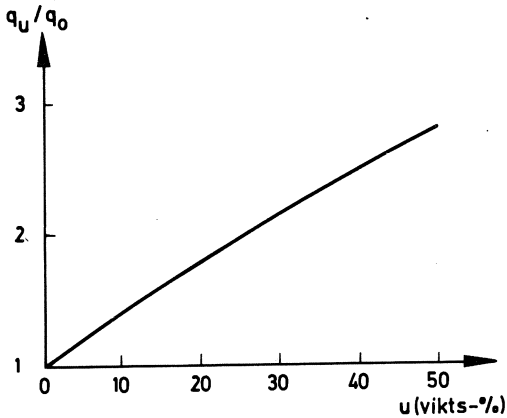


FIG. VIII:2. Ökning i energiflöde genom en 30 cm gasbetongvägg som funktion av fuktkvoten vid jämn fuktfördelning.
Increase of energy flow as function of moisture content. 300 mm aerated concrete without any moisture gradient.

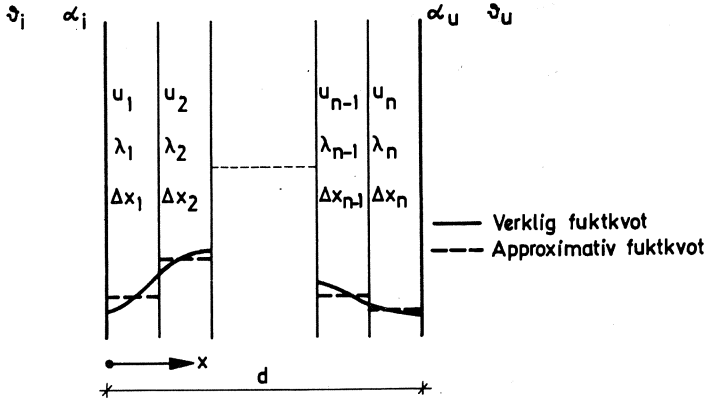


FIG. VIII:3. Indelning av vägg med godtycklig fuktfördelning i snitt med konstant fuktkvot inom respektive snitt.

A wall with a moisture gradient, divided in sections with constant moisture content.

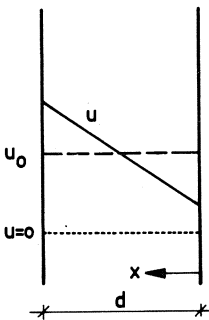


FIG. VIII:4. Fuktfördelning med rätlinjig gradient utan språng.

Moisture distribution with a straight-lined continuous moisture gradient.

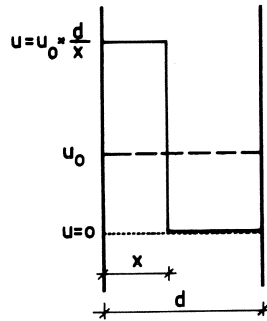


FIG. VIII:5. Fuktfördelning med språngvis förändring.

Moisture distribution with partly dry and partly wet sections.

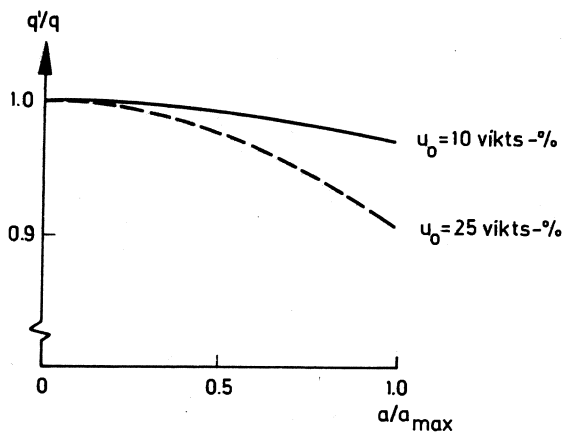


FIG. VIII:6. Fuktgradientens inverkan på energiflödet i gasbetong vid rätlinjig fuktfördelning utan språng enligt FIG. VIII:4.

The effect of moisture distribution (according to FIG. VIII:4) on the energy flow. Aerated concrete.

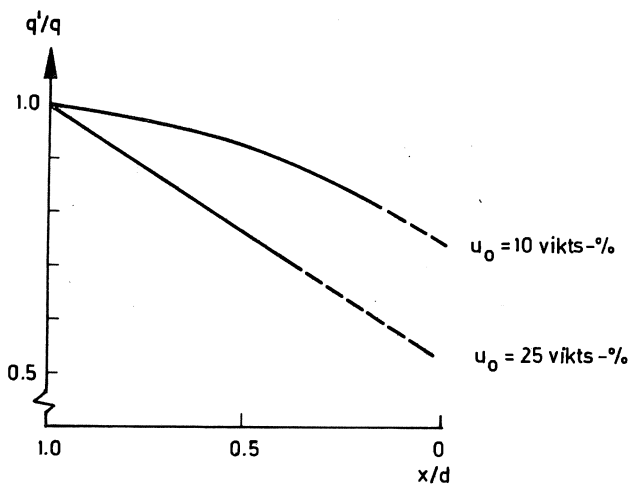


FIG. VIII:7. Fuktgradientens inverkan på energiflödet i gasbetong vid språngvis ändring av fukttinnehållet enligt FIG. VIII:5.

The effect of moisture distribution (according to FIG. VIII:5) on the energy flow. Aerated concrete.

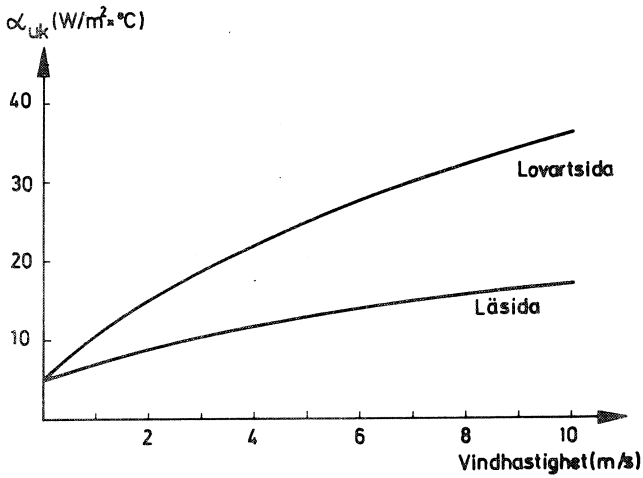


FIG. VIII:8. Konvektionsövergångskoefficient som funktion av vindhastighet. Vindhastigheten är mätt på 10 m höjd medan α_{UK} är mätt på 2 m höjd.
Surface coefficient of convective heat transfer as function of wind velocity.

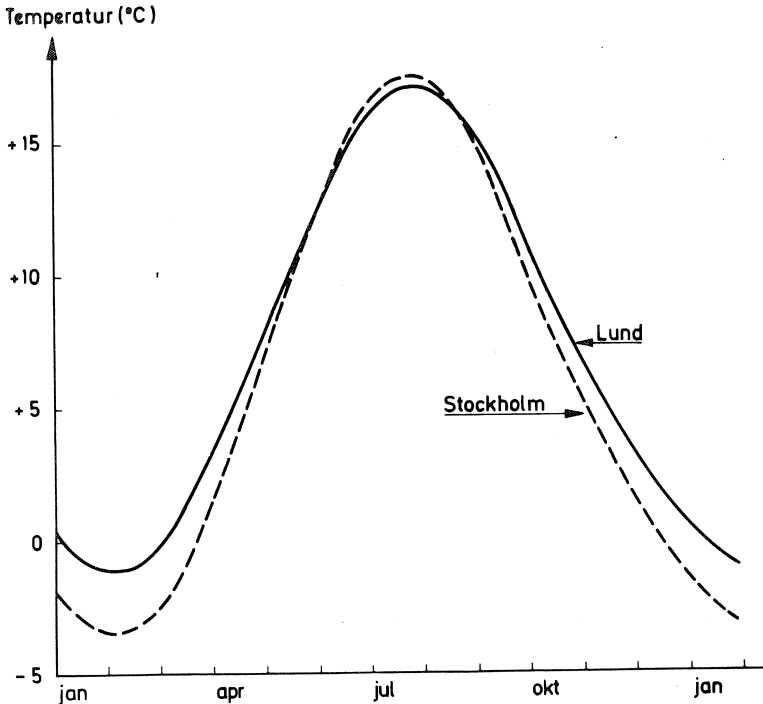
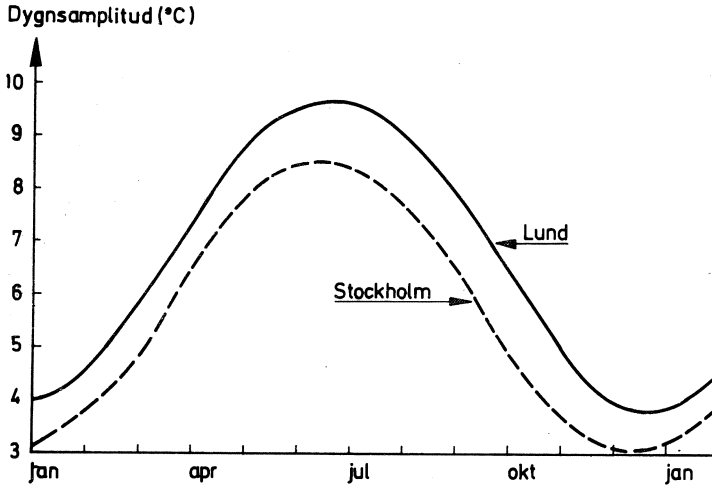


FIG. VIII:9. Dygnsmedeltemperaturens variation under året.
Annual variation of daily mean temperature.



IG. VIII:10. Variation hos temperaturrens dygnsamplitud under året.

Annual variation of difference between daily maximum and minimum temperature.

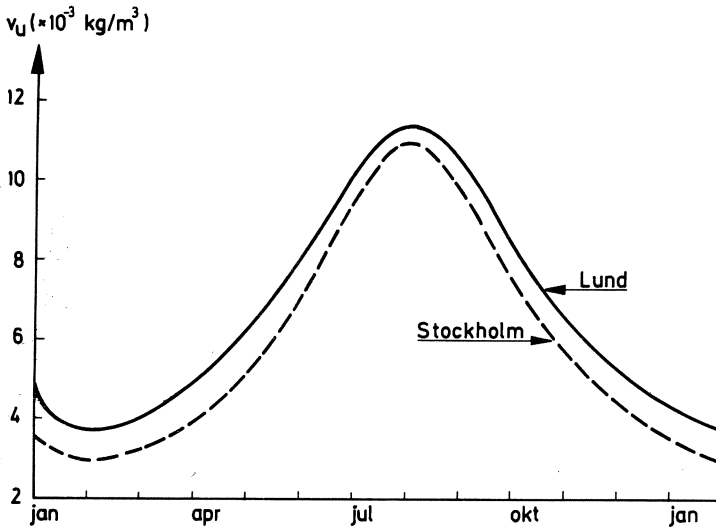


FIG. VIII:11. Utomhusånghaltens variation under året.

Annual variation of vapour concentration.

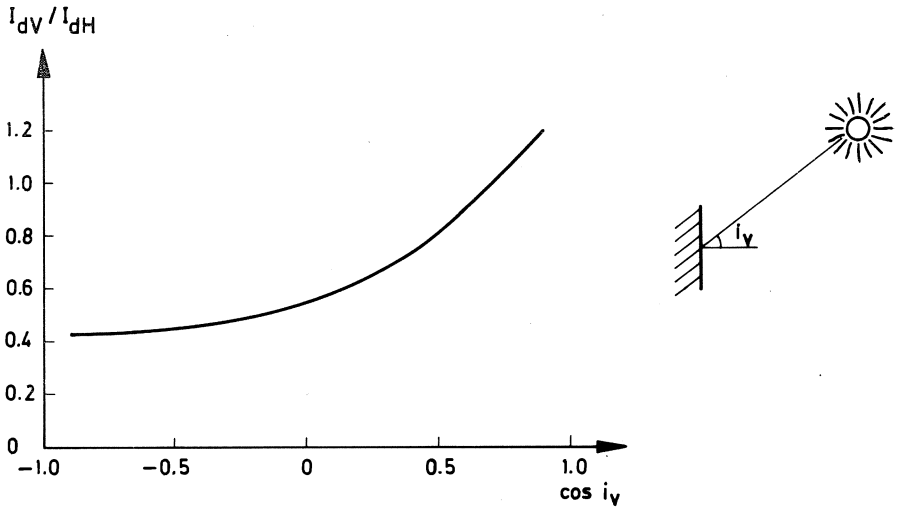


FIG. VIII:12. Samband mellan I_{dV}/I_{dH} och solens infallsvinkel. (Sandberg (1973) redovisar detta samband med referens till Threlkeld).

Relationship between I_{dV}/I_{dH} and inclination of sun radiation.

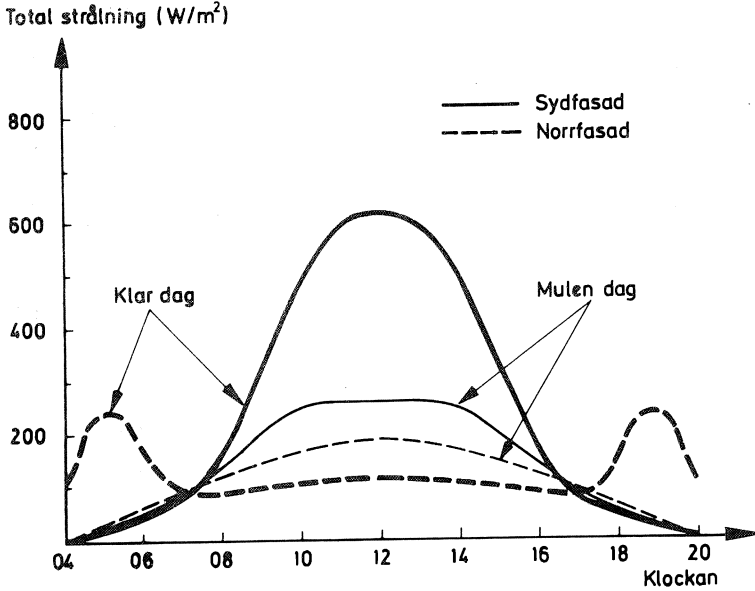


FIG. VIII:13. Total kortvågig strålning mot fasad på latitud 56°N , 21/6.
Total heat radiation against a facade on latitude 56°N , 21/6.

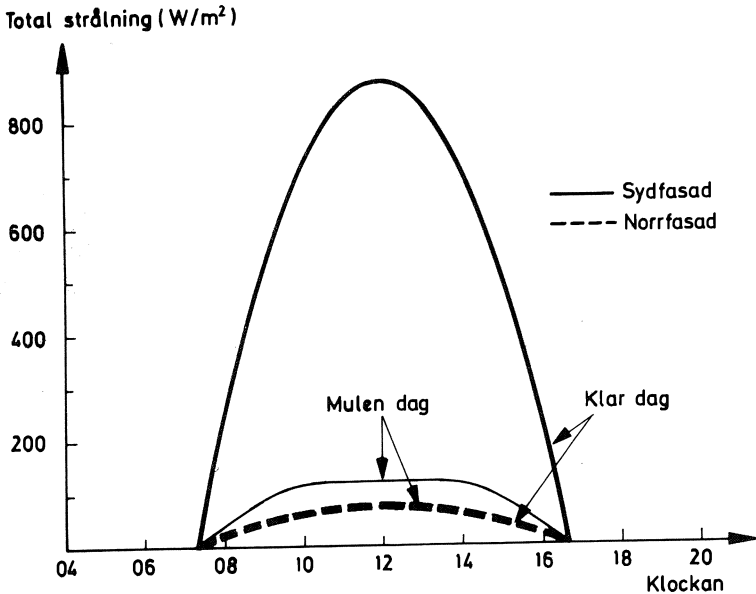


FIG. VIII:14. Total kortvågig strålning mot fasad på latitud 56°N , 21/10.
Total heat radiation against a facade on latitude 56°N , 21/10.

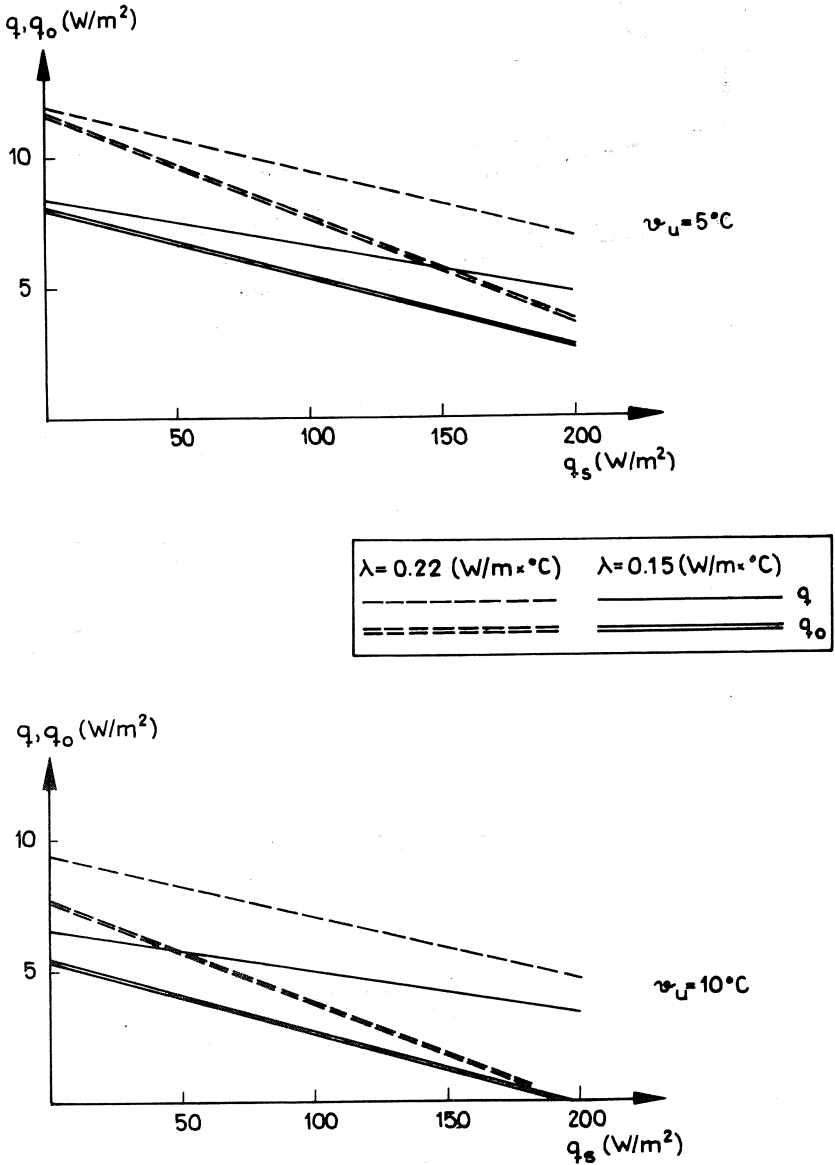


FIG. VIII:15. Energiflöde med respektive utan hänsyn till avdunstning (q resp q_o) vid vindhastigheten 1 m/s.

Energy flows with (q) and without (q_o) consideration taken to evaporation. Wind velocity 1 m/s.

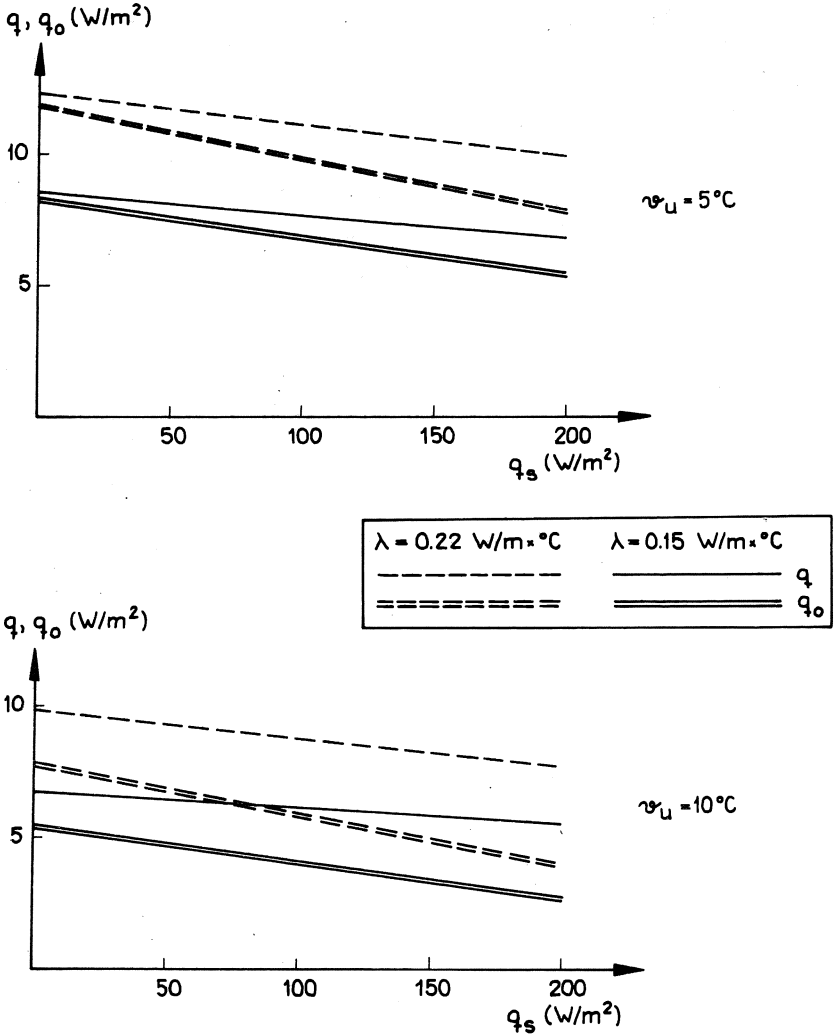


FIG. VIII:16. Energiflöde med respektive utan hänsyn till avdunstning (q resp q_o) vid vindhastigheten 6 m/s.

Energy flows with (q) and without (q_o) consideration taken to evaporation. Wind velocity 6 m/s.

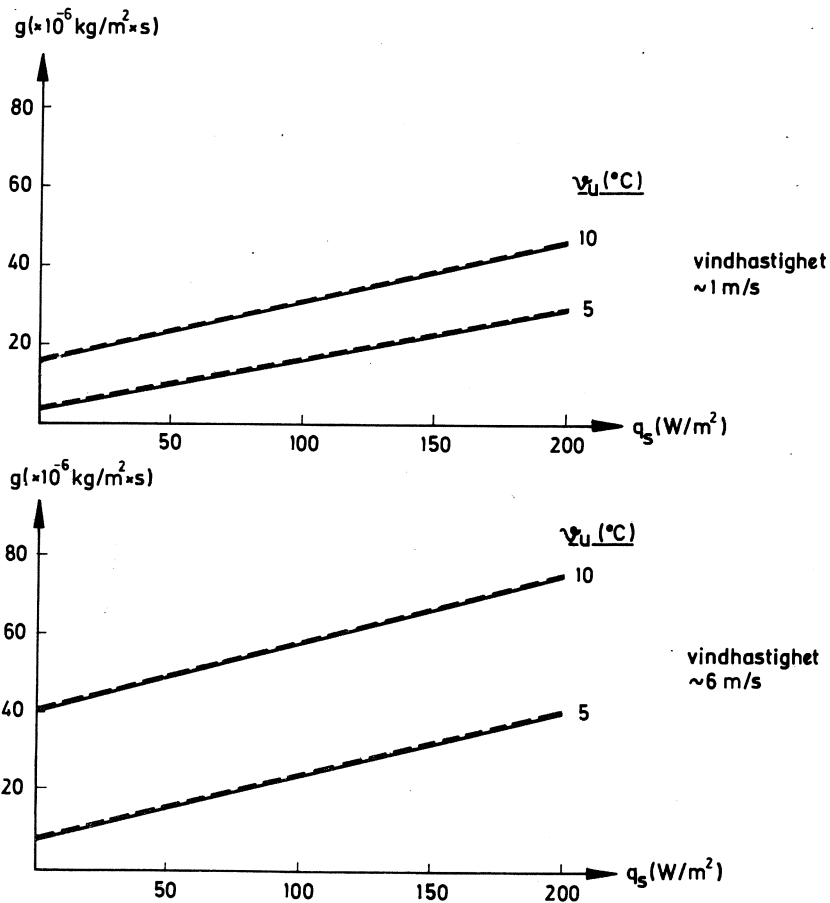


FIG. VIII:17. Uttorkningsintensitet vid olika klimatbetingelser.

— $\lambda = 0.15 \text{ W/m } ^{\circ}\text{C}$, - - - - $\lambda = 0.22 \text{ W/m } ^{\circ}\text{C}$.

Drying out intensity in different climates.

