LUND UNIVERSITY

Fuktproblem vid betonggolv

Nilsson, Lars-Olof

1976

Link to publication

Citation for published version (APA):
Nilsson, L.-O. (1976). *Fuktproblem vid betonggolv*. (Rapport TVBM; Vol. 3002). 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

AVDELNINGEN FÖR BYGGNADSMATERIALLÄRA
LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA / LUNDS UNIVERSITET
DIVISION OF BUILDING MATERIALS
LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY / UNIVERSITY OF LUND

FUKTPROBLEM VID BETONG-GOLV

MOISTURE PROBLEMS AT CONCRETE FLOORS

LARS-OLOF NILSSON

RAPPORT TVBM-3002
LUND SWEDEN 1977

CODEN: LUTVDG/(TVBM 3002)/1-188/1977

FUKTPROBLEM VID BETONG-GOLV

MOISTURE PROBLEMS AT CONCRETE FLOORS

LARS-OLOF NILSSON

FEMTE UPPLAGAN, JANUARI 1980

DENNA RAPPORT HÄNFÖR SIG TILL FORSKNINGSANSLAG 730220-9 FRÅN STATENS RÅD FÖR BYGGNADSFORSKNING TILL AVDELNINGEN FÖR BYGGNADSMATERIALLÄRA, LTH, MED TITELN "TILLÄMPADE FUKTPROBLEM I SAMBAND MED MATERIALKOMBINATIONER OCH YTSKIKT".

INNEHALLSFÖRTECKNING

		SID
BETECKNINGAR		5
SAMMANFATTNING		6
SUMMARY		9
1.	INLEDNING	12
2.	PROBLEMSTÄLLNING	14
3.	ALLMÄNT OM FUKT, DEFINITIONER	17
3.1	Fukt i luft	17
3.2	Fuktfixering	20
3.3	Fukttransport	26
3.3.1	Transportekvationer	26
3.3.2	Materialkombinationer och ytskikt	31
3.3.3	Temperaturskillnader	33
4.	FUKTKÄLLOR, KRITISKA FUKTTILLSTÅND	36
4.1	Fuktkällor	36
4.2	Kritiska fukttillstånd	38
4.2.1	Fuktrörelser	38
4.2.2	Beständighet hos golvlim	42
4.2.3	Biologiskt angrepp	49
4.2.4	Sammanfattning	51
5.	MATERIALET BETONG UR FUKTSYNPUNKT	52
5.1	Sammansättning-struktur	52
5.2	Hydratisering-begynnelsefukthalt	60
5.3	Fuktfixering-jämviktsfukthalt	70
5.4	Byggfukt-överskottsvatten	80
5.5	Fukttransport-transportkoefficienter	83
5.5.1	Diffusionsmätningar	89
5.5.2	Uttorkningsförsök	96
6.	YTSKIKT UR FUKTSYNPUNKT	111
6.1	Transportkoefficienter	111
6.2	Nyttan av fuktspärr	117

7.	UTTORKNING AV BETONG	119
7.1	Kvalitativ beskrivning	119
7.2	Randvillkor	123
7.3	Beräkningsmodell	127
7.4	Uttorkningsförsök	128
7.4.1	Fuktfördelning	130
7.4.2	Fuktbelastning på ytskikt	135
7.5	Inverkan av plattjocklek	141
7.6	Inverkan av klimat	144
7.7	Underliggande värmeisolering	149
7.8	Sammanfattning	152
8.	MARKFUKT	154
8.1	Skydd mot markfukt	155
8.1.1	Underliggande värmeisolering	156
8.1.2	Överliggande värmeisolering	159
8.2	Enkla regler för skydd mot markfukt	162
8.3	Exempel på fältmätningar och skadefall	165
REFERENSER		176
APPENDIX		187

BETECKNINGAR

L	karakteristisk dimension, plattjocklek	m
A	area	m^2
t	tid	s
M	massa	kg
γ	skrymdensitet	kg/m^3
ρ	kompaktdensitet	kg/m^3
T	temperatur	K
θ	temperatur	^oC
R	allmänna gaskonstanten	$J/(kmol \cdot K)$
λ	värmeledningsförmåga	$W/(m \cdot K)$
c	vattenånghalt	kg/m^3
p	vattenångtryck	Pa
RF, ϕ	relativ luftfuktighet, porfuktighet	-
P_w	porvattentryck	Pa
σ	ytspänning	N/m
w	fukthalt	kg/m^3
u	fuktkvot	kg/kg
D	duffusivitet	m^2/s
k	ångpermeabilitet	$kg/(m \cdot Pa \cdot s)$
Z	ånggenomgångsmotstånd	s/m
F	fuktflöde	$kg/m^2 \cdot s$
C	cementhalt	kg/m^3
B	ballasthalt	kg/m^3
w_o	vattenhalt	kg/m^3
l	lufthalt	l/m^3
vct	vattencementtal w_o/C	-
w_e	förångningsbar vattenhalt	kg/m^3
w_n	icke-förångningsbar vattenhalt	kg/m^3
w_{eo}	begynnelsefukthalt	kg/m^3
$w_{e\infty}$	jämviktsfukthalt	kg/m^3
$\bar{w}_e$	medelfukthalt	kg/m^3
α	hydratationsgrad	-

SAMMANFATTNING

Årligen inträffar ett stort antal fuktskador i samband med att täta skikt i någon form kombineras med betongkonstruktioner, främst golv på mark. Det kan vara plastmattor som lossnar eller träövergolv som sväller eller utsättes för svampangrepp, med rötskador eller luktproblem som följd. I många fall beror skadorna på konstruktionsfel eller fel i inbyggda material, varvid kostnaderna för åtgärdande av skadorna blir betydande. Man har uppskattat kostnaderna för dessa typer av skador till mer än 10 milj. kronor per år.

Syfte

Projektet syftar till att lösa problemen i samband med ytbehandling av underlag med ett fuktöverskott och anvisa metoder att undvika skador i framtiden. Målsättningen har därför varit att i huvudsak ge svar på följande frågor:

1) Hur stora maximala fuktbelastningar klarar olika typer av ytskikt och övergolvkonstruktioner utan att skador uppkommer, dvs hur stora är de kritiska fukttillstånden?
2) Hur snabbt sker uttorkningen av byggfukten, dvs hur lång är den erforderliga torktiden för att fuktbelastningen skall underskrida ett visst värde?
3) Hur stor blir fuktbelastningen av ett fukttillskott, t ex markfukt, och hur skall konstruktionen skyddas mot denna?

Behandlingen av dessa huvudfrågor och en sammanfattning av resultatet anges nedan.

Kritiska fukttillstånd

Genom litteraturstudier, laboratorieförsök, fältmätningar i samband med skadeutredningar samt diskussion med materialfabrikanter har en bild skapats av vilka maximala fuktbelastningar olika typer av material, som främst användes i golvkonstruktioner, kan utsättas för. Som riktvärde för limmade plastbeläggningar föreslås ett kritiskt fukttillstånd på 90% relativ fuktighet (RF) och för syllar och övergolv av träbaserade material bör 75-80% RF ej överskridas.

Erforderlig torktid för byggfukt

Föreliggande projekt har koncentrerats på att ta fram praktiskt användbara beräkningsmetoder för uttorkning av byggfukt i betong, där ett stort antal teorier funnits sedan länge, men som inte kunnat användas på grund av att erforderliga materialdata saknats.

Genom litteraturstudier och omfattande laboratorieundersökningar har de ur fuktsynpunkt väsentliga materialegenskaperna bestämts för ett stort antal betongkvaliteter. Betongens absorptions- och desorptionsisotermer vid varierande sammansättning och ålder har framtagits, liksom hydratationsutvecklingen för olika cementtyper. Med hjälp av uttorkningsförsök, diffusionsmätningar och fuktfördelningsmätningar har inverkan av olika faktorer i sammansättningen på fukttransportförmågan bestämts. Härvid har framför allt vattencementtalet, dvs betongkvaliteten, och lufthalten befunnits ha störst inverkan.

Med utnyttjande av erhållna materialdata, har en beräkningsmodell på dator utarbetats, med möjlighet att utföra uttorkningsberäkningar vid varierande betongsammansättning och ålder samt för olika konstruktionsutformningar. Beräkningsmodellen har också jämförts med en serie kontrollförsök i fullskala varvid god överensstämmelse erhållits.

För praktiskt bruk har en tabell sammanställts för att på ett enkelt sätt bedöma erforderlig torktid för vanligen förekommande fall. Sammanfattningsvis gäller för att erhålla så kort erforderlig torktid som möjligt bl a

Hög betongkvalitet, ev. luftinblandning

Tidig torkstart; uppvärmning

Tunn platta; ingen plastfolie på underliggande värmeisolering

Skydd mot markfukt

Vid grundläggning med platta på mark har en mängd fuktskador inträffat därför att använda konstruktioner inte gett tillräckligt skydd mot markfukt. Det har funnits en övertro på kapillärbrytande skikt med följd att skyddet mot markfukt i ångfas ofta försummats.

Inom projektet har problematiken behandlats genom litteraturstudier, mindre laboratorieundersökningar samt ett stort antal fältmätningar i samband med skadeutredningar, av vilka några illustrativa exempel redovisas. Detta har bl a resulterat i att några enkla fysikaliska regler för skydd mot markfukt uppställts. Dessa regler är ibland mycket elementära men trots detta har många fall påträffats där de inte följts. Reglerna är fullt tillräckliga för att göra en riktig utformning av en grundkonstruktion ur fuktsynpunkt och kan också användas av t ex golvläggare för att värdera en redan utförd konstruktion före mattläggning.

Sammanfattningsvis kan följande råd ges vid utförande av golvkonstruktioner på mark:

Lägg dränering tillräckligt djupt!

Tillse att byggdelar ej kan suga kapillärt!

Skydda mot markfukt med värmeisolering; enbart randisolering är otillräckligt!

Lita inte på att en "fuktspärr" alltid gör skäl för namnet!

Var extra försiktig då fuktiga material har förhöjd temperatur!

SUMMARY

Every year a great number of moisture damages occur when l coverings are combined with concrete constructions, especially floors on the ground. It can be plastic carpets that loosen or wooden floors that swell or expose to fungus growth with decay or odour as a result. In many cases the damages depend on faults in the construction or faults in the materials, and therefore the costs for the repairing will be considerable. The costs have been estimated at more than 10 million Sw crowns a year.

Purpose

The project aims at solving the problems connected with surface coating of materials with an excess of moisture and finding methods to avoid damages in the future. The aim has been to find the answers to the following questions:

1) What maximum moisture contents can different kinds of surface layers and floor constructions manage without any damages, i.e. how great are the critical moisture conditions?

2) How fast is the drying-out of the building moisture, i.e. how long is the necessary drying-time to obtain moisture content less than a certain value?

3) What moisture load will an addition of moisture give, e.g. soil moisture, and in what way shall the construction be protected against this?

The way of dealing with these main questions and a summary of the results is given below.

Critical moisture contents

By literature studies, laboratory experiments, field measurements in connection with damage investigations and discussions with material manufacturers a picture has been formed of what maximum moisture loads different types of materials, used in floor constructions, can be exposed to. For glued plastic coverings a critical moisture condition of 90% relative humidity (RH) is suggested and for wooden based materials 75-80% RH must not be exceeded.

Necessary drying times for building moisture

This project has been concentrated on getting practical applicable methods for calculating the drying of building moisture in concrete. A great number of theories have been available but could not be used since the necessary material properties were missing.

By literature studies and extensive laboratory investigations the essential material properties have been determined for several concrete qualities. The absorption and desorption isotherms for concrete of different composition and age have been determined, as well as the hydration development for different cements. Drying experiments, diffusion measurements and measurements of the moisture distribution have given the influence on the diffusivity of different factors in the composition. Especially the water-cement-ratio and the air-content have been found most important.

With these material properties a computer model has been developed, with possibilities to calculate drying at different concrete compositions and ages as well as different constructions. The model has been compared to a number of control experiments in a full scale and a good correspondence has been found.

For practical applications a table has been put together in order to get the required drying-time in a simple way for usual cases. You get as short drying-time as possible by

high concrete quality; air-entrainment

early drying start; heating

thin slab; no vapour barrier on the underlying heat insulation

Protection against soil moisture

At foundations with a slab on the ground a lot of damages have occurred because the constructions have not been given enough protection against soil moisture. The superstitious belief in a capillary breaking has been too great and as a consequence the protection against soil moisture in a vapour form has often been neglected.

The problem has been dealt with by literature studies, smaller laboratory investigations and a great number of field measurements at damage investigations, of which some illustrative examples are shown. As a result some simple physical rules for protection against soil moisture have been put up. These rules are sometimes very simple but in spite of this, many cases have been found where they have not been followed. The rules are quite sufficient to create a ground construction and to value a construction before a surface covering.

The following advices can be used in connection with floor constructions on the ground:

put the draining deep enough

do not allow any part of the construction to absorb water capillary

protect against soil moisture with a heat insulation; at the edges only is not enough

"moisture barrier" does not always correspond to its name

be careful when moist materials have a higher temperature

1. INLEDNING

Avdelningen för Byggnadsmateriallära vid Tekniska Högskolan har under en följd av år bedrivit forskning och utredningsverksamhet rörande fuktproblem. Teoretiskt och laborativt arbete har kombinerats bl a med utredningar av skadefall och praktisk information till byggbranschen. Detta har inneburit att en hög kunskapsnivå om fuktfrågor har erhållits hos avdelningens personal och det var därför naturligt att fuktforskningen fortsattes 1972 då undertecknad efterträdde Lennart Ahlgren som byggt upp verksamheten inom fuktområdet och disputerat på fuktfixering hos byggnadsmaterial.

Föreliggande projekt startades 1973 under titeln "Tillämpade fuktproblem i samband med materialkombinationer och ytskikt" med anslag från Statens Råd för Byggnadsforskning. Ursprungligen syftade projektet till att utveckla möjligheten att förutbestämma uppkommande fukttillstånd då material med olika fuktmekaniska egenskaper kombineras. De tillämpningar som var aktuella var t ex

a) Klargörande av fukttillstånd under mer eller mindre täta golvbeläggningar. Bestämning av erforderlig uttorkningstid.
b) Uppfattning om fuktförhållanden i material målade med olika färgskikt. Inverkan av färgens genomsläpplighet.
c) Bedömning av risk för frostskador vid kombination av material i t ex fasadytor utsatta för slagregn.
d) Val av lämpligt material ur fuktmekanisk synpunkt vid lagning av t ex frostskador på putsade fasadytor och vid renovering av äldre byggnader genom påläggande av nya ytskikt.

Under projektets första år visade det sig att denna målsättning var alltför omfattande och projektet begränsades därför, med BFR:s godkännande, till att lösa fuktproblem i samband med ytbehandling av underlag som innehåller fuktöverskott med främsta tillämpning på beläggningar på betonggolv.

Större delen av övriga problemområden har senare tagits upp i ett annat forskningsprojekt vid avdelningen "Ytskiktets inverkan på väggens fukttillstånd under påverkan av slagregn" också detta finansierat av BFR och med Kenneth Sandin som projektledare. Här behandlas bl a ytskiktsproblematiken vid utifrån kommande fuktbelastningar, främst slagregn.

Föreliggande projekt har koncentrerats på ta fram praktiskt an-

vändbara beräkningsmetoder för uttorkning av material med fukt-
överskott, främst betong, där ett stort antal metoder funnits
sedan länge, men som inte kunnat användas p g a att erforderliga
materialdata saknats.

Projektets förväntade resultat ansågs ha stor praktisk betydelse
då en mängd skadefall inträffar årligen p g a att byggfukt ej
uttorkats i erforderlig grad. Även för andra forskningsprojekt,
som innefattar sådana materialegenskaper som är beroende av fukt-
innehållet, ansågs projektet vara av betydelse.

Vid kontakter med byggbranschen visade det sig att man fortfarande
hade stora problem med skador p g a tillskjutande fukt, främst
markfukt och av denna anledning togs även detta problemområde
upp till behandling inom projektet.

2. PROBLEMSTÄLLNING

Inom projektet har problem vid beläggning av material som innehåller fuktöverskott behandlats. Då många ytbeläggningar är känsliga för fukt måste underlaget ha torkat tillräckligt innan ytbehandlingen sker, så att ytskiktet inte utsättes för för stor fuktbelastning av kvarvarande fukt. Dessutom får eventuellt tillkommande fukt inte öka fuktbelastningen på ytskiktet i sådan omfattning att detta skadas.

Problematiken kan belysas med följande frågor, som måste kunna besvaras för att risker för skador skall elimineras. De åskådliggörs i figur 2.1, som t ex kan vara ett betonggolv, ev platta på mark, som skall ytbeläggas med ett fuktkänsligt ytskikt.

1. Hur snabbt sker uttorkningen av byggfukten, dvs hur lång torktid erfordras för att materialets fukttillstånd skall underskrida ett visst värde?
2. Hur inverkar ytskiktet egenskaper på omfördelningen av kvarvarande fukt? Vilken blir den maximala fuktbelastningen och när inträffar denna?
3. Hur stor blir fuktbelastningen av ett fukttillskott, t ex markfukt? Hur skall konstruktionen skyddas mot tillkommande fukt?
4. Klarar ytskiktet av den maximala fuktbelastningen eller är det risk att skador uppkommer?

Detta är frågor som ställes vid dimensionering av en konstruktion mot fukt och som behandlas i föreliggande projekt.

Problemställningen kan jämföras med en statisk dimensionering av byggnadsdelar, där konstruktionen måste utföras så att aktuella belastningar inte medför att tillåtna spänningar överskrides. På samma sätt måste man förfara vid dimensionering av byggnadsdelar mot fuktbelastningar:

Statisk dimensionering	Dimensionering mot fukt
Laster	Fuktkällor
Byggnadsmekanik	Fuktmekanik
Materialegenskaper	Materialegenskaper
Brottkriterier	Kritiska fukttillstånd
Säkerhetsfaktor	Säkerhet

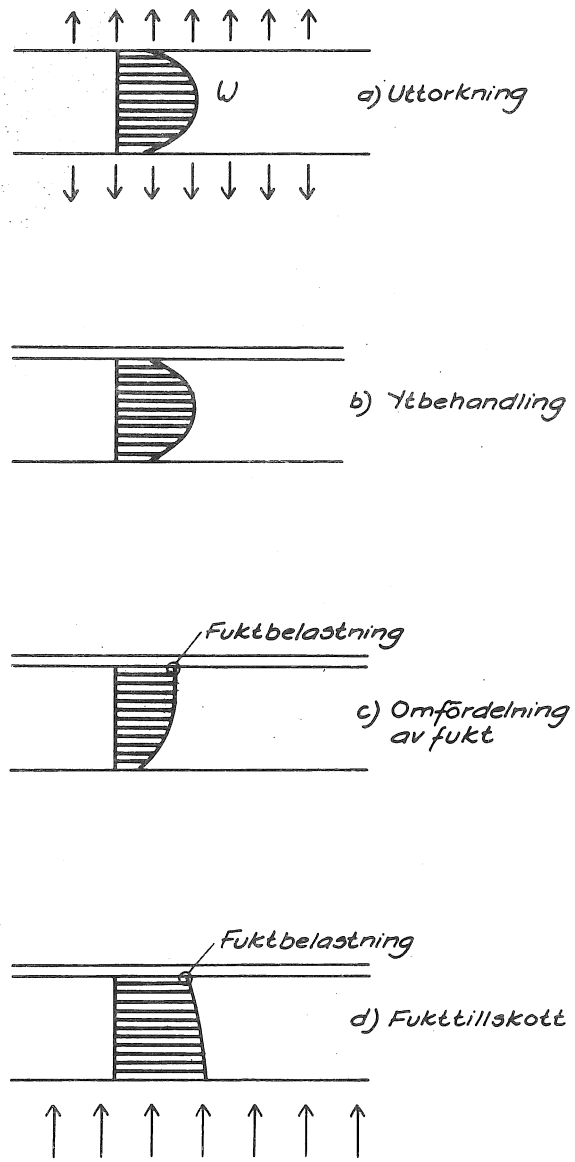

w
a) Uttorkning
b) Ytbehandling
Fuktbelastning
c) Omfördelning av fukt
Fuktbelastning
d) Fukttillskott

Fig. 2.1

Vid en statisk dimensionering är de olika delarna väl kända. Det finns normer som anger vilka laster som en byggnadsdel skall dimensioneras för, vilka hållfasthetstekniska materialegenskaper man får räkna med samt vilka påkänningar som är tillåtna. Dessutom är beräkningsmetoderna väl utvecklade och kända av varje byggnadskonstruktör.

Vid en dimensionering mot fuktbelastningar råder det däremot en stor brist på kunskap inom nästan alla ovan nämnda dimensioneringssteg. Endast beräkningsmetoderna, fuktmekaniken, är någorlunda utvecklad, mer är inte till mycket nytta så länge varken erforderliga materialegenskaper eller kritiska fukttillstånd för olika material är kända. Förhoppningsvis kan föreliggande rapport öka möjligheterna att utforma framförallt golvkonstruktioner innehållande betong riktigt ur fuktsynpunkt.

3. ALLMÄNT OM FUKT, DEFINITIONER

Som en bakgrund till följande kapitel skall först en kortfattad redovisning av grundläggande fuktbegrepp göras. Dessutom definieras här de storheter som användes i fortsättningen.

3.1 Fukt i luft

Olika byggnadsmaterials innehåll av fukt är nära förknippat med luftens innehåll av vattenånga, samtidigt som det inne i ett poröst material råder jämvikt mellan vatten som är bundet i porsystemet och vattenånga i de delar av porerna som är luftfyllda.

Vattenånginnehållet i luft kan beskrivas på olika sätt, vanligtvis genom att ange antingen ångkoncentrationen eller ånghalten c i kg/m^3 eller genom att vattenångans partialtryck i luften, ångtrycket p i Pa(N/m^2) anges. Om vattenånga betraktas som en ideal gas kan sambandet mellan ångtrycket och ånghalten skrivas som

$$p = c \cdot \frac{RT}{M} \qquad (3.1)$$

där molvikten M för vattenångan är 18 kg/kmol.

Vattenånghalten i luft av en viss temperatur är uppåt begränsad av mättnadsånghalten c_m. Hur denna beror av temperaturen är åskådliggjort i figur 3.1.I tabell 3.1 nedan anges mättnadsånghalten och motsvarande mättnadsångtryck, p_m, för temperaturer mellan -20°C och +30°C.

Då luft av en viss temperatur successivt avkyles, inträffar så småningom att luftens vattenånghalt är lika stor som mättnadsånghalten vid denna lägre temperatur. Denna temperatur benämnes daggpunkten och är alltså också ett mått på ånghalten i luften.

Kvoten mellan ånghalten vid en viss temperatur och mättnadsånghalten vid samma temperatur kallas luftens relativa fuktighet, RF eller ϕ, som ibland också benämnes relativ ånghalt.

Den relativa fuktigheten ges alltså av

$$\phi = \frac{c}{c_m} \qquad (3.2)$$

men av ekv (3.1) inses att det också gäller att

$$\phi = \frac{p}{p_m} \qquad (3.3)$$

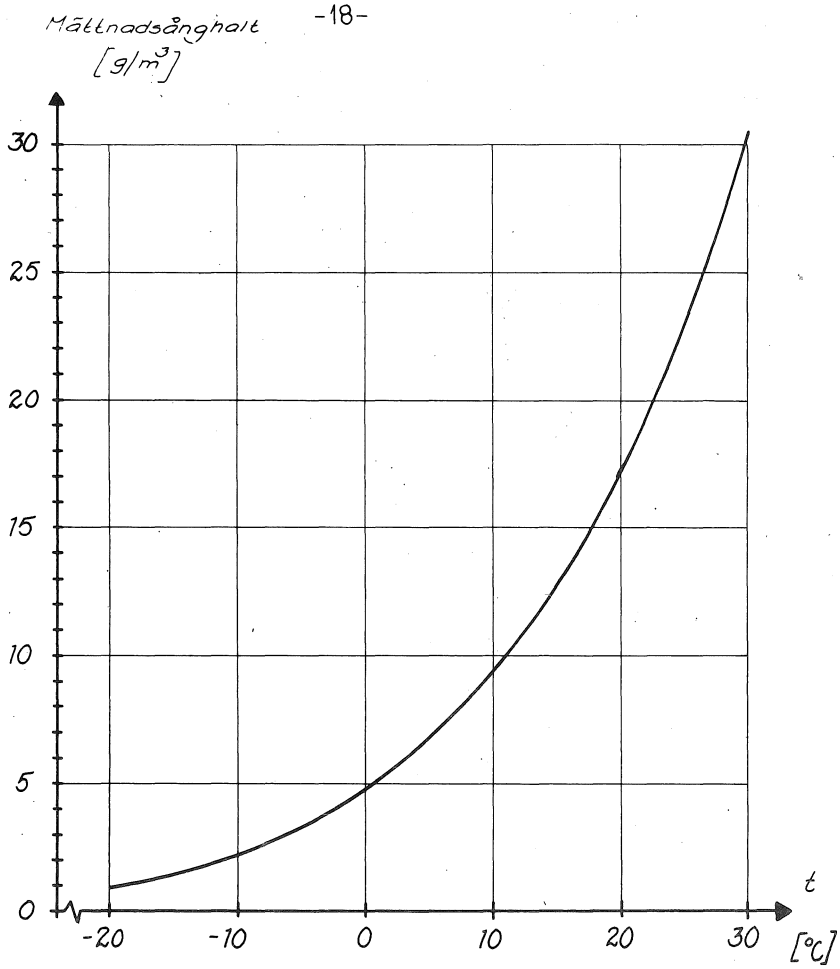


Fig. 3.1 Mättnadsånghalten som funktion av temperaturen.
Vapour concentration at saturation as a function of temperature.

Den relativa fuktigheten inne i ett materials porsystem benämnes ofta porfuktighet och definieras på samma sätt som ϕ.

Av ovanstående framgår att då luft är mättad på vattenånga är den relativa fuktigheten ϕ lika med 1 eller vanligare ϕ =100 %.

TABELL 3.1. Mättnadsånghalt och mättnadsångtryck för olika temperaturer.

Temperatur (^oC)	Mättnadsånghalt c_m (10^{-3} kg/m^3)	Mättnadsångtryck p_m (Pa)	(mmHg)
-20	0.89	102.6	0.77
-18	1.06	124.0	0.93
-16	1.27	150.6	1.13
-14	1.52	181.3	1.36
-12	1.81	217.3	1.63
-10	2.15	259.9	1.95
-8	2.54	309.3	2.32
-6	3.00	367.9	2.76
-4	3.53	437.2	3.28
-2	4.15	517.2	3.88
0	4.86	610.5	4.58
1	5.18	657.2	4.93
2	5.57	705.2	5.29
3	5.96	758.2	5.69
4	6.37	813.1	6.10
5	6.79	871.8	6.54
6	7.26	934.4	7.01
7	7.74	1001.0	7.51
8	8.27	1073	8.05
9	8.83	1148	8.61
10	9.40	1228	9.21
11	10.03	1312	9.84
12	10.67	1402	10.52
13	11.38	1494	11.23
14	12.05	1598	11.99
15	12.83	1705	12.74
16	13.66	1817	13.63
17	14.45	1937	14.53
18	15.36	2063	15.48
19	16.29	2197	16.48
20	17.3	2338	17.54
21	18.3	2486	18.65
22	19.4	2643	19.83
23	20.6	2809	21.07
24	21.8	2983	22.38
25	23.0	3167	23.76
26	24.4	3360	25.21
27	25.8	3564	26.74
28	27.2	3779	28.35
29	28.7	4004	30.04
30	30.4	4242	31.82

3.2 Fuktfixering

I ett poröst material är vatten bundet, fixerat, på olika energinivåer; se t ex Ahlgren (1972) eller Powers & Brownyard (1948):

Kemiskt bundet vatten har reagerat kemiskt med materialet. Vattnet kan finnas antingen som hydroxid i OH-grupper eller som kristallvatten, då vattnet har behållit sin molekylära form och är bundet med kovalenta bindningar eller vätebindningar till hydrat.

Fysikaliskt bundet vatten kan vara fixerat på olika sätt.

Zeolitiskt vatten är hårt bundet mellan olika lager i kristallstrukturen men är inte kemiskt bundet.

Adsorberat vatten är bundet med van der Waal's-krafter till porväggarna och bindningskraften beror av avståndet, dvs det första molekyllagret är hårdast bundet. Det adsorberade vattenskiktets tjocklek, t, ökar med ökande relativ fuktighet i materialets porer, vilket åskådliggöres i figur 3.2. Eftersom adsorberat vatten bindes till porväggarna, bestäms mängden adsorberat vatten i ett material av porväggarnas sammanlagda yta, den s k "specifika ytan".

Kapillärkondenserat vatten binds genom att krökta vattenytor, menisker, uppkommer i porsystemet p g a ytspänningen.

Över sådana menisker är vattenångans mättnadstryck lägre än över en plan vätskeyta, dvs vid en relativ fuktighet ϕ, som är mindre än 1 uppnås mättnadsångtrycket över menisken. Sambandet mellan porfuktigheten ϕ och meniskens krökningsradie, r, ges av Kelvinekvationen, som för en cylindrisk por har följande utseende

$$\ln \phi = -\frac{\sigma \cdot V_s}{R \cdot T} \cdot \frac{2}{r} \qquad (3.4)$$

där σ = vattnets ytspänning ~ 0.074 N/m

V_s = vattnets molvolym ~ 0.018 m^3/kmol

I allmänhet antar man att meniskens krökningsradie är lika stor som porradien minskat med det adsorberade skiktets tjocklek.

Med hjälp av Kelvinekvationen och med kännedom om det adsorberade skiktets tjocklek, kan man ange vilka porer i ett material som är vattenfyllda vid en viss relativ fuktighet. I figur 3.3 åskådliggörs detta samband vid uttorkning.

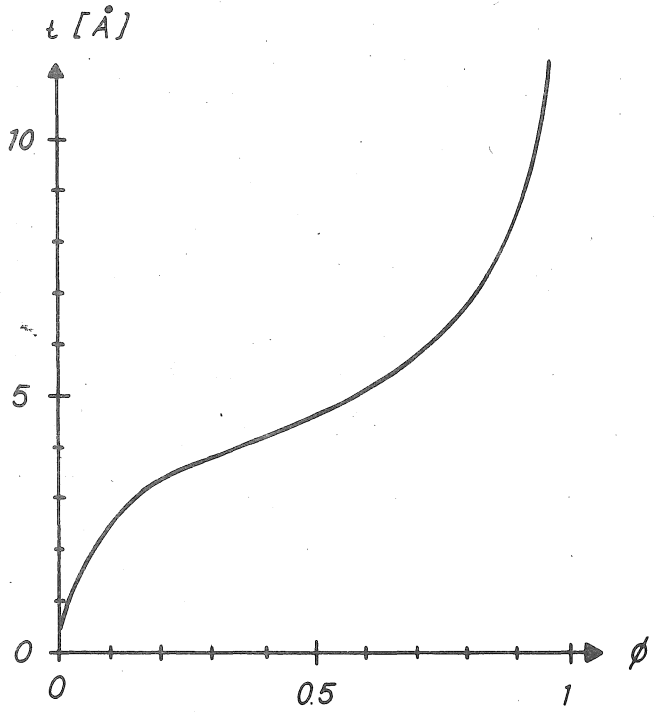


Fig. 3.2 Samband mellan det adsorberade vattenskiktets medeltjocklek t och relativ fuktighet ϕ, Hillerborg (1975).

Thickness of adsorbate as a function of relative humidity, Hillerborg (1975).

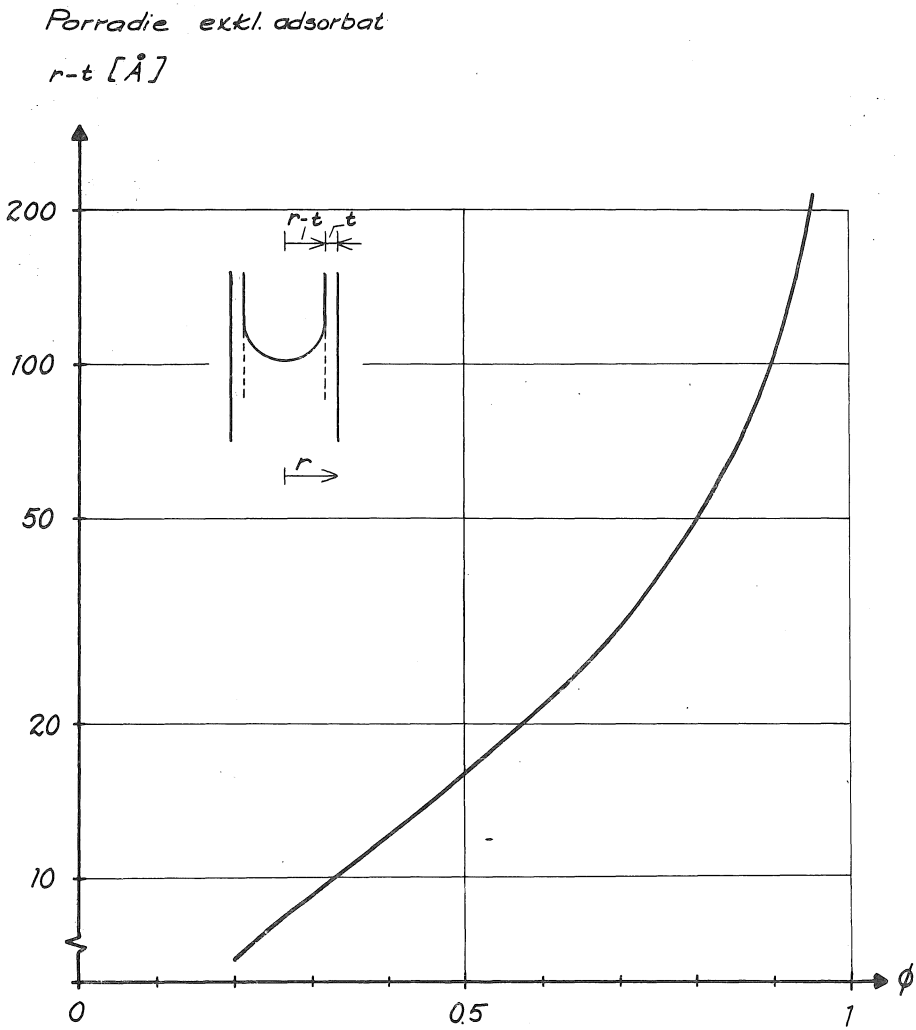


Fig. 3.3 Storleken av vattenfyllda porer som funktion av relativa fuktigheten, Kelvin ekvationen, vid 293 K (20°C).

Size of water-filled pores as a function of relative humidity, Kelvin-equation, at 293 K.

För ett byggnadsmaterial med känd porositet och porstorleksfördelning kan man med hjälp av ovanstående samband beräkna hur mycket vatten som är bundet i materialet vid jämvikt med en viss relativ fuktighet.

Mängden fysikaliskt bundet vatten kan anges på olika sätt. Vanligast är härvid att ange materialets fukthalt w_e i kg/m^3, där index e står för "evaporable" dvs förångningsbar.

Fukthalten definieras av

$$\underline{w_e} = \frac{\text{förångningsbara vattnets vikt}}{\text{materialets volym inkl porer}} \left(\frac{kg}{m^3}\right) \quad (3.5)$$

där vattnets vikt oftast bestämmes genom att materialet torkas i ugn vid 105°C och viktminskningen mätes. Fukthalten anges ibland i volymsprocent vilket fås genom att dividera fukthalten i kg/ m^3 med 10.

För vissa material är det lämpligare att ange <u>fuktkvoten</u> som definieras som

$$u_e = \frac{\text{förångningsbara vattnets vikt}}{\text{materialets torra vikt}} \left(\frac{kg}{kg}\right) \quad (3.6)$$

som ofta uttryckes i vikt-%.

Sambandet mellan fukthalt eller fuktkvot och relativ fuktighet vid jämvikt benämnes <u>jämviktsfuktkurva</u> eller sorptionsisoterm. Det principiella utseende framgår av figur 3.4, där det också framgår att sambandet inte är entydigt utan beror av på vilket sätt fuktinnehållet har uppnåtts. Ett blött material som torkat har en högre jämviktsfukthalt vid jämvikt med en viss relativ fuktighet än om samma material från början varit torrt. Denna skillnad kallas <u>hysteresis</u>.

Fuktkapaciteten hos ett material definieras som lutningen för jämviktsfuktkurvan vid ifrågavarande fuktinnehåll.

Av ovanstående framgår att det är klart felaktigt att jämföra fukthalter eller fuktkvoter för olika material, då dessa vid jämvikt med en viss relativ fuktighet är beroende av respektive materials porositet och porstorleksfördelning. Detta framgår klart i figur 3.5 där exempel på jämviktsfuktkurvor för olika material visas, Ahlgren (1972).

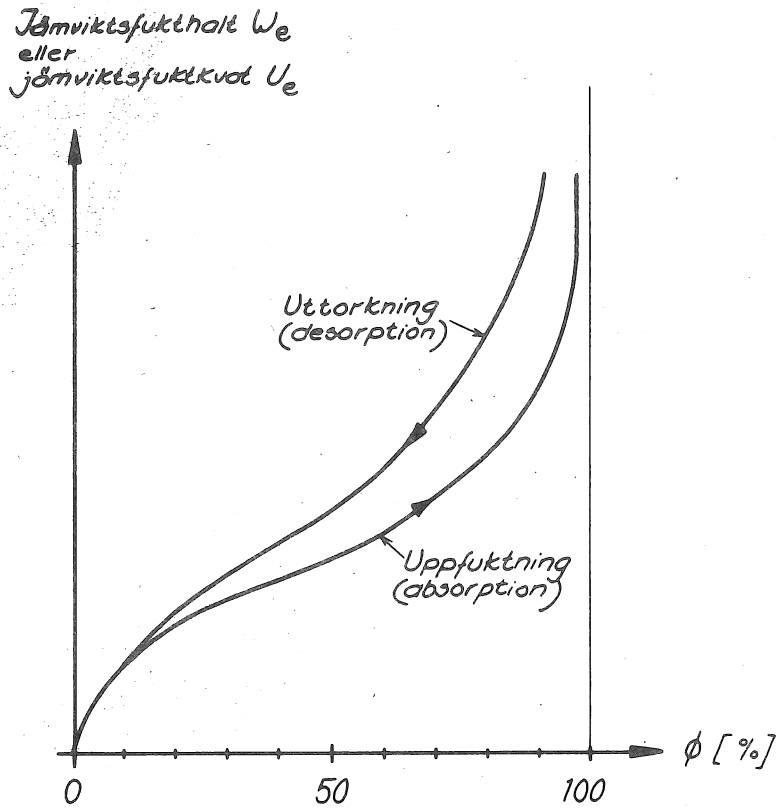


Fig. 3.4 Principiellt utseende hos jämviktsfuktkurvan.

Principal sorption isotherms.

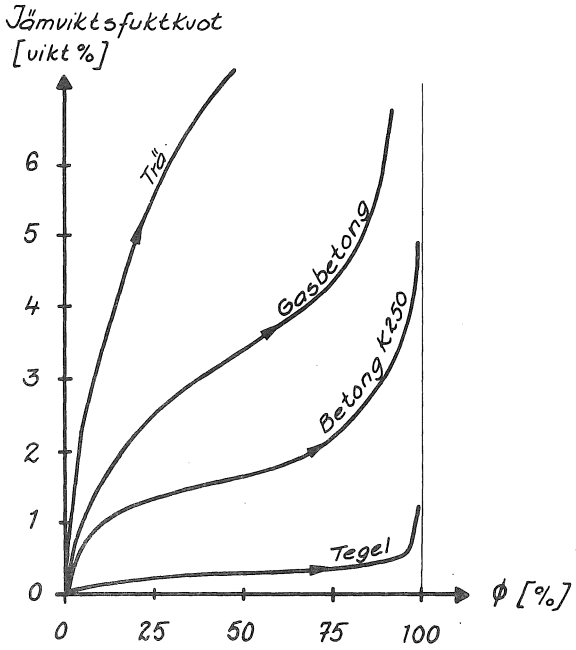


Fig. 3.5 Jämnviktsfuktkurva för några byggnadsmaterial vid absorption, Ahlgren(1972).
Sorption isotherms for some building materials at absorption, Ahlgren (1972).

3.3 Fukttransport

I ett poröst material transporteras fukt från en fuktigare del till en torrare. Denna transport sker antingen i ångfas eller i vätskefas eller som en kombination av dessa. I vilken riktning fukten transporteras bestäms av tillståndet hos fukten i de olika delarna. Man har genom tiderna använt många sätt att beskriva fuktens tillstånd i en punkt, varav de vanligaste är att ange temperaturen i kombination med någondera av följande: ånghalt c, ångtryck p, fukthalt w, fuktkvot u eller relativ fuktighet ϕ. I sällsynta fall användes trycket i vattnet i porsystemet. Detta tryck som är ett undertryck, ges av Thomson´s formel

$$\text{porvattentrycket } P_w = P_a + \frac{RT}{V_s} \ln\phi \qquad (3.7)$$

där P_a är lufttrycket i porsystemet.

3.3.1 Transportekvationer

Fuktflödet under isoterma förhållanden kan beskrivas i en dimension som

$$F = -K \cdot \frac{\partial\psi}{\partial x} \quad (kg/m^2 \cdot s) \qquad (3.8)$$

dvs med en gradient i någon av ovanstående storheter, ψ, multiplicerat med en koefficient som bestämmer storleken av flödet. Koefficienten K har naturligtvis olika värden beroende på vilken storhet som användes.

I vissa fall har man olika beskrivningar av fuktflödet inom olika fuktighetsområden för att skilja på ångtransport och vätsketransport men då det ofta är en kombination av dessa, är en sådan uppdelning ytterst besvärlig.

Då det i litteraturen anges en mängd värden på koefficienten K för olika beskrivningssätt, är det nödvändigt att sambanden klargöres.

De beskrivningssätt som vanligen är aktuella är följande:

Ånghalt. Fukttransport i ångfas sker p g a skillnad i ångkoncentration, dvs ånghalt och beskrives med Fick´s lag

$$F = -K_c \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \qquad (3.9)$$

där koefficienten K_c (ofta betecknad δ) har dimensionen (m^2/s). Ibland, bl a i SBN 75, anges diffusionsmotståndet hos ett materialskikt med tjockleken d

$$z = \frac{d}{K_c} \quad (s/m) \qquad (3.10)$$

Ångtryck. Ångtransport kan naturligtvis lika gärna uttryckas med ångtrycket

$$F = -K_p \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \qquad (3.11)$$

där koefficienten har dimensionen (kg/m·Pa·s) och benämnes ångpermeabilitet, k.

Fukthalt. Fukttransport uttryckt i fukthalt skrives

$$F = -K_w \cdot \frac{\partial w}{\partial x} \qquad (3.12)$$

där koefficienten, kallad diffusivitet, har dimensionen (m^2/s) och måste alltså skiljas från K_c ovan.

Fuktkvot. Då fukttransporten uttryckes i fuktkvot

$$F = -K_u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \qquad (3.13)$$

får koefficienten dimensionen (kg/m·s).

Relativ fuktighet. Fuktflödet uttryckt i relativ fuktighet eller porfuktighet skrivs som

$$F = -K_\phi \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} \qquad (3.14)$$

där koefficienten ges i (kg/m·s).

Porvattentryck. Det naturligaste sättet att uttrycka kapillär vätsketransport är att använda porvattentrycket

$$F = -K_P \cdot \frac{\partial P_w}{\partial x} \qquad (3.15)$$

med K_P i (kg/m·Pa·s) men då porvattentrycket är svårt att mäta och sambanden med övriga storheter oftast inte är känd, brukas den mycket sällan. Vid teoretiska överväganden är den emellertid mycket användbar.

I tabell 3.2 har en sammanställning gjorts över sambanden mellan transportkoefficienterna vid olika beskrivningssätt. Härvid har allmänna gaslagen använts. Det förutsättes att jämviktsfuktkurvan för aktuellt material är känd och att endast ett beskrivningssätt användes, dvs inte kombinationer.

De koefficienter som ovan beskrivits är ingalunda några konstanter, utan de varierar kraftigt med bl a fukttillståndet. I figur 3.6 ges ett exempel på diffusiviteten för gasbetong, van der Kooi (1971).

I tabell 3.3 och 3.4 ges en sammanställning över ångpermeabiliteten hos de vanligaste byggnadsmaterialen, hämtade ur "Kommentarer till SBN 75:3".

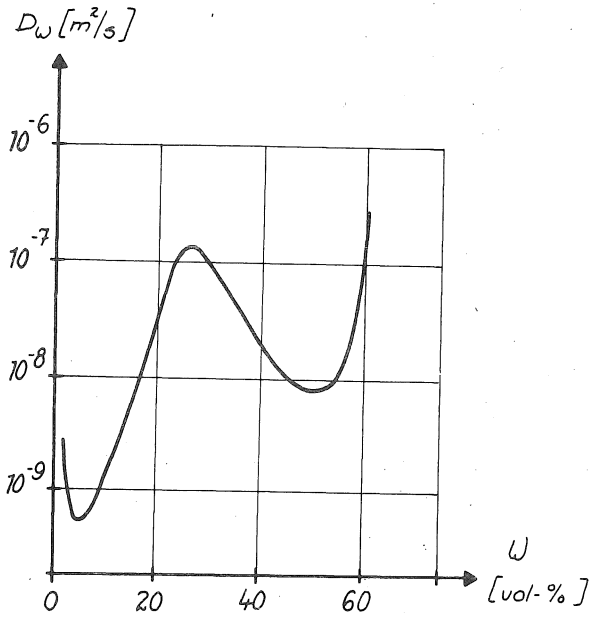


Fig. 3.6 Exempel på transportkoefficientens variation med fuktigheten. Gasbetong enl. van der Kooi (1971).

Variation of diffusivity with humidity according to van der Kooi (1971).

TABELL 3.3 Ånggenomsläpplighet för byggnadsmaterial

Material	Densitet γ kg/m^3	Ånggenomsläpplighet δ (10^{-6} m^2/s)
kalkbruk	1700	1.6 - 4.0
kalkcementbruk	1800	0.8 - 1.9
cementbruk	2000	0.3 - 1.6
betong K300	2300	0.3 - 1.4
betong K500	2300	0.1 - 1.0
gasbetong	500	5 - 15
kalksandsten	1800	0.6 - 1.3
fasadtegel	1800	2.7 - 5.5
asbestcement	1800	0.3 - 0.4
gips	1250	0.8
trä, furu	500	0.2
träfiberskiva	300	4-8
träfiberskiva	700	1.5 - 2.5
träfiberskiva	1000	0.2 - 0.3
mineralull	15-200	8 - 25

TABELL 3.4 Ånggenomgångsmotstånd hos skiktmaterial

Material	Ånggenomgångs-motstånd Z (10^3 s/m)
gipsskiva 13 mm	2 - 4
spånskiva 13 mm	20 - 30
spånskiva 19 mm	27 - 35
asfaltimpregnerad träfiberskiva 13-19 mm	5 - 15
asbestcellulosacementskiva 3.2 mm	3 -
asbestcementskiva 5 mm	15
asbestcementskiva 8 mm	18
hård träfiberskiva 3.2 mm	10 - 40
byggpapp YAC 400/150	700
byggpapp YL 400/400	900
byggpapp SAL 1800/600	1200
byggpapp YAL 1200/320 eller YAM 1200/50	2000
PVC-folie 1000 g/m^2	600 - 1200
polyetenfolie 40 g/m^2	600
polyetenfolie 100 g/m^2	2000 - 4000
akryllatexfärg 100-200 µm	20 - 30
PVA-latexfärg 100-200 µm	7 - 10
alkydfärg 90-120 µm	70 - 120
klorkautschukfärg 40-50 µm	35 - 60
polyuretanfärg 30-40 µm	85 - 120
PVC-färg 30-40 µm	45 - 65
silikatfärg 80-100 µm	5 - 6

TABELL 3.2 Samband mellan olika transportkoefficienter under isoterma förhållanden.

Tillstånds-storhet	Flödet F =	Koefficienten ges av	* K_p	* K_w	* K_u	* K_ϕ
Ånghalt c	$-K_c \frac{\partial c}{\partial x}$	K_c =	$\frac{RT}{M}$ *	$\frac{RT}{M} \cdot \frac{\partial w}{\partial p}$ *	$\frac{RT}{M\gamma} \cdot \frac{\partial w}{\partial p}$ *	$\frac{1}{c_m}$ *
Ångtryck p	$-K_p \frac{\partial p}{\partial x}$	K_p =	-	$\frac{\partial w}{\partial p}$ *	$\frac{1}{\gamma} \cdot \frac{\partial w}{\partial p}$ *	$\frac{1}{p_m}$ *
Fukthalt w	$-K_w \frac{\partial w}{\partial x}$	K_w =	$\frac{1}{\frac{\partial w}{\partial p}}$ *	-	$\frac{1}{\gamma}$ *	$\frac{1}{p_m \cdot \frac{\partial w}{\partial p}}$ *
Fuktkvot u	$-K_u \frac{\partial u}{\partial x}$	K_u =	$\frac{\gamma}{\frac{\partial w}{\partial p}}$ *	γ *	-	$\frac{\gamma}{p_m \cdot \frac{\partial w}{\partial p}}$ *
Relativ fuktighet ϕ	$-K \frac{\partial \phi}{\partial x}$	K_ϕ =	p_m *	$p_m \cdot \frac{\partial w}{\partial p}$ *	$\frac{p_m}{\gamma} \cdot \frac{\partial w}{\partial p}$ *	-

($\frac{\partial w}{\partial p}$ är fuktkapaciteten, dvs lutningen av jämviktsfuktkurvan, i $(kg/m^3 \cdot Pa)$; γ är densiteten i (kg/m^3)).

3.3.2 Fukttransport vid materialkombinationer och ytskikt

Då två eller flera material kombineras måste ett sätt att beskriva fukttransport,som är kontinuerligt,användas. Lämpligast och vanligast är härvid att använda ånghalt eller ångtryck.

Vid en kombination av två material är det av intresse att kunna beräkna fuktflödet samt fukttillstånd i gränsskiktet. För ett sådant fall, se fig 3.7, gäller vid jämvikt att flödet är konstant genom hela materialkombinationen, dvs

$$F_A = k_A \cdot \frac{p_1 - p}{d_A} = F_B = k_B \cdot \frac{p - p_2}{d_B}$$

varav fås att ångtrycket i gränsskiktet blir

$$p = \frac{p_1 + p_2 \cdot \frac{k_B}{d_B} \cdot \frac{d_A}{k_A}}{1 + \frac{k_B}{d_B} \frac{d_A}{k_A}}$$

eller

$$p = \frac{p_1 + p_2 \cdot x}{1 + x} \qquad (3.16)$$

där x = kvoten mellan ångmotstånden eller diffusionsmotstånden för de båda materialen, med materialet A:s motstånd i täljaren. Sambandet åskådliggöres i figur 3.8. Med hjälp av denna kan materialkombinationer som t ex golvbeläggningar på betong, PVC-matta på fuktspärr och spånskiveövergolv med ångspärr behandlas.

Som tidigare påpekats måste man vid en jämförelse av fukttillstånden i olika material använda en storhet som är kontinuerlig och som ger besked om vilket som är fuktigast. Av bl a fig 3.5 framgår att härvid är fuktkvot och fukthalt klart olämplig. Istället bör ånghalt, ångtryck eller relativ fuktighet användas varav den senare har valts i det följande då den, då det gäller fukt i ett material, inte behöver kompletteras med en temperaturangivelse.

Följande exempel är härvid åskådligt:

Om en golvbeläggning av trä, t ex spånskiva, läggs på betong med fuktkvoten 4 %, dvs fukthalten ca 90 kg/m^3 och en tät plastmatta appliceras på spånskivan, kommer det så småningom att bli jämvikt mellan spånskiva och betong, varvid betongens fukttillstånd har givit en fuktbelastning på spånskivan.
Vid jämvikt fås i ovanstående exempel

	Betong	Spånskiva
Relativ fuktighet	95 %	95 %
Fuktkvot	4 %	ca 25 %
Fukthalt	90 kg/m^3	ca 160 kg/m^3

Det framgår klart att endast den relativa fuktigheten i betongen ger någon som helst uppfattning om fuktbelastningen på spånskivan.

3.3.3 Fukttransport vid temperaturskillnader

I de tillämpningar som här är aktuella, är det enbart då värmeisoleringsmaterial, som t ex vid golv på mark, ingår i konstruktionen som fukttransport vid temperaturgradient har någon större betydelse.

Under isoterma förhållanden är det ofta elementärt att avgöra i vilken riktning fukttransporten sker utifrån aktuella tillståndsstorheters värden. Vid en temperaturgradient är det emellertid inte fullt så enkelt, då fukttillståndet och porstrukturen avgör transportriktningen. Detta kan åskådliggöras med följande exempel, se figur 3.9, som kan vara ett värmeisoleringsmaterial omgivet av två olika fuktiga material med olika temperatur.

Ta exemplet med ett material med endast en porstorlek. Fukttillstånd och temperatur på respektive sidor borde bestämma i vilken riktning fukttransporten sker, men porradien har en avgörande roll. Välj följande värden som exempel

$+20^{o}C$	$+17^{o}C$
90 % RF	100 % RF
p_1 = 2104 Pa	p_2 = 1937 Pa
ΔP_{w1} = -14,1 MPa	ΔP_{w2} = 0

En eventuell ångtransport skulle gå från sida 1 till 2, medan en kapillärtransport skulle gå i andra riktningen. Vilken typ av transport som sker bestäms av porradien vid Kelvinekvationen (3.4). Om ϕ_1 istället vore 83 % blir $p_1=p_2$ och ingen ångtransport skulle ske i ett material med stora porer.

Det är av denna anledning som ett kapillärbrytande och värmeisolerande material kan hindra markfukt, se senare kapitel. Enbart ett kapillärbrytande material ger inte så stor temperaturgradient att ångtransporten stoppas.

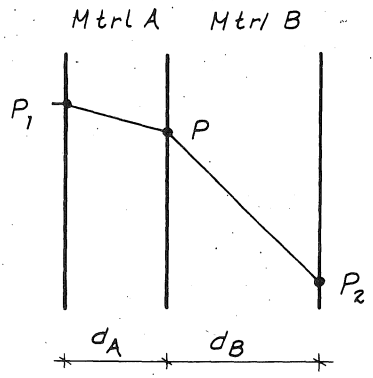


Fig. 3.7 Fukttransport genom materialkombination.
Moisture transport through a material combination.

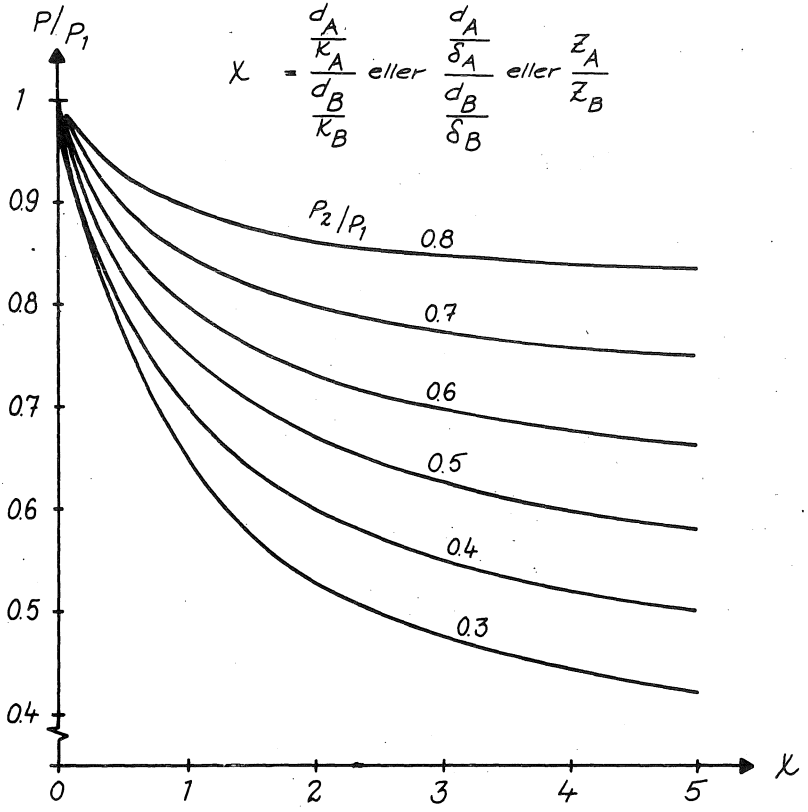


Fig. 3.8 Fukttillstånd i materialkombination, ekv. (3.15).
Moisture conditions in a material combination.

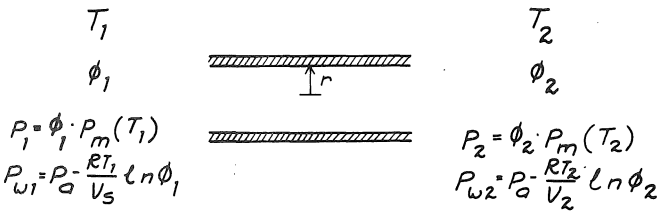


Fig. 3.9 Fukttransport vid temperaturgradient.

Moisture transport at a temperature gradient.

4. FUKTKÄLLOR, KRITISKA FUKTTILLSTÅND

I detta kapitel skall en kort genomgång göras av vilka fuktkällor som påverkar en byggnad, främst golv- och grundkonstruktionen. Därefter skall de vanligaste, fuktkänsliga materialen och deras motståndsförmåga mot en fuktbelastning analyseras noggrannare.

4.1 Fuktkällor

Fukt tillföres materialen i en byggnad på olika sätt, sammanfattningsvis

Regn påverkar takkonstruktion och fasader framförallt som slagregn. Regn,som når marken intill byggnaden, ytvatten, kan tränga ned i marken och påverka grundkonstruktionen.

Markfukt härrör från grundvattnet och kan i många jordarter sugas upp till grunden och påverka denna om inte speciella åtgärder vidtagits.

Byggfukt ingår i många byggnadsmaterial, t ex betong, gasbetong, tegel, puts och träbaserade material. Byggfukten bygges in med materialen och måste till en viss del torkas bort.

Luftfukt kan vara en besvärlig fuktkälla i byggnader med hög fuktproduktion antingen genom de olika verksamheter som äger rum varvid fukt produceras eller genom att fukt tillföres luften, p g a t ex konstruktionsfel, från någon annan fuktkälla.

Vattenläckage från vatten- och avloppsinstallationen är en fuktkälla som kan vara svår att upptäcka i tid och åtgärda.

I detta projekt behandlas i huvudsak golvkonstruktioner och de fuktkällor som härvid är aktuella åskådliggöres i fig 4.1:

Ytvatten. Regnvatten som tränger ner i grunden måste tas om hand och bortföras. Vid dränerande jordarter är detta ett mindre problem, men om grundläggningen skett på lerhaltiga material måste ytvattnet avledas med hjälp av dränering. Naturligtvis måste man tillse att denna ligger tillräckligt djupt. En dränering fungerar i bästa fall som ett bräddavlopp och ligger någon del av grundkonstruktionen på en nivå som är lägre än dräneringen, är det stor risk att vatten sugs kapillärt upp i golvkonstruktionen. Skador p g a att man förbisett denna enkla regel är tyvärr inte ovanliga, se t ex Nilsson (1973-77).

Markfukt. Småhusproduktion i dag sker ofta på lerhaltiga jordar eller på sämre markområden ur fuktsynpunkt, varvid markfukt ofta orsakar skador. I alla de fall som avdelningen för Byggnadsmateriallära utrett skador på golv på mark, har fuktigheten i marken inte i något fall underskridit 100 % RF. Speciella åtgärder för att skydda grundkonstruktioner mot markfukt är därför nödvändiga i de flesta fall. Inte någon ansvarsmedveten byggnadskonstruktör kan här göra en risktagning genom att underlåta att föreskriva erforderliga skyddsåtgärder. Tyvärr har detta ofta blivit fallet beroende på bristande kunskaper och att byggnormen inte givit tillräcklig hjälp.

Byggfukt. Många material bygges in med ett stort fuktinnehåll. Detta gäller speciellt betong som innehåller stora mängder blandningsvatten. Byggfukten motsvarar ofta ett fukttillstånd av 100 % RF och måste därför torkas bort till en viss del. Många skador har inträffat p g a att uttorkningen inte skett i erforderlig omfattning, dels beroende på bristande kunskap om uttorkningsförloppet för främst betong och dels beroende på att föreskrifterna i Hus AMA är ytterst tveksamma.

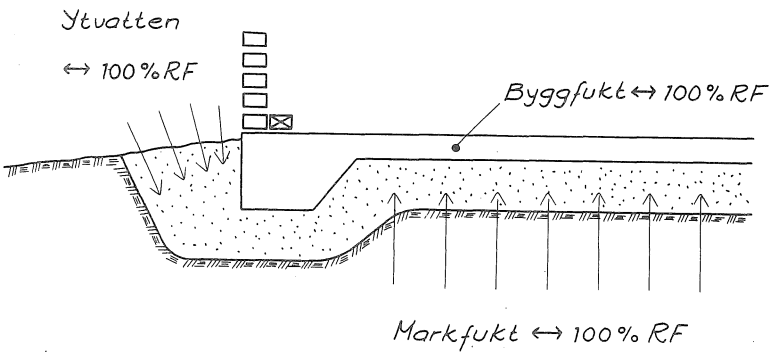


Fig. 4.1 Fuktkällor aktuella för golv- och grundkonstruktion.

Moisture sources for floor and foundation.

4.2 Kritiska fukttillstånd

Många material i en byggnad är känsliga för fukt.
Detta gäller speciellt material som ingår i golvbeläggningar och övergolv. Nedan skall en genomgång göras av de olika resultat som kan fås av en fuktbelastning och några väsentliga material skall behandlas. Frostbeständighetsproblematiken, som knappast är aktuell i golv- och grundkonstruktioner har härvid utelämnats.

Skador på fuktkänsliga material är oftast en effekt av att stora fuktrörelser har ägt rum eller att något material har brutits ned av fuktbelastningen och därmed fått försämrade egenskaper. Förutom fuktrörelser hos träbaserade material och plastmaterial skall nedan behandlas beständighet hos golvlim mot fukt och alkalier samt biologiskt angrepp som svampangrepp på trä och mögelbildning i material med biologiska beståndsdelar.

Som påpekats tidigare är det lämpligaste måttet på en fuktbelastning från ett fuktigt material, som ett fuktkänsligt material kommer i kontakt med, dess relativa fuktighet RF och inte fukthalt eller fuktkvot. Av denna anledning anges kritiska fukttillstånd nedan uttryckta i RF.

4.2.1 Fuktrörelser

De flesta byggnadsmaterial har mer eller mindre utpräglade fuktrörelser; de sväller om fuktinnehållet ökas. Speciellt markant är detta för träbaserade material. I fig 4.2 visas principiellt hur svällningen ökar med fuktbelastningen.
Av denna framgår att svällningen ökar kraftigt vid höga fukttillstånd och att hälften av svällningen äger rum vid fuktigheter över 75 % RF.

Med kännedom om den totala svällningen för olika träbaserade material, kan man med hjälp av figur 4.2 uppskatta fuktrörelserna då materialet utsättes för en fuktbelastning.

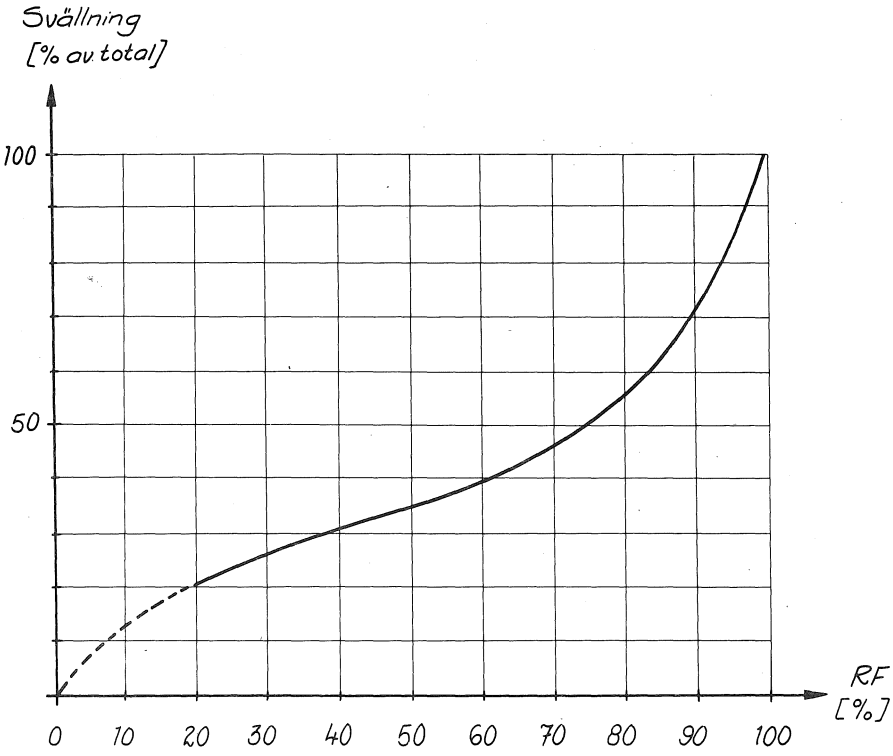


Fig. 4.2 Svällning av träbaserade material, Hillerborg (1974).

Swelling of wooden based materials, Hillerborg (1974).

I nedanstående tabell ges några exempel, Bygg del 2.

Material	Total svällning (%)	(mm/m)
Furu, fiberriktningen	0,4	4
tvärs fiberriktningen	4-8	40-80
Spånskiva, i skivans plan	0,8-1	8-10
Träfiberskiva, i skivans plan	1,5-2	15-20
Plywood, i skivans plan	0,2	2

För parkett och plywood har de stora fuktrörelserna hos trä minskats avsevärt genom att fiberriktningen i olika skikt ligger vinkelrätt mot varandra. Dock blir den maximala svällningen i storleksordningen 5 mm/m.

Många golvbeläggningar innehåller plastmaterial, främst PVC. Fuktrörelserna hos dessa är högst varierande. I figur 4.3 ges ett exempel för en PVC-matta, enl Bergström el al (1974), som nog får betraktas som ett ytterlighetsfall.

Då det gäller plastmattor inträffar ibland skador genom att de krymper och man får springor i fogarna. Dessa rörelser har däremot inget att göra med fuktrörelser. Istället kan det ha två andra orsaker. Vissa PVC-mattor har inbyggda spänningar som uppkommer vid tillverkningen, medan andra är benägna för mjukgörarvandring varigenom en viss beståndsdel, mjukgöraren, lämnar mattan och avdunstar eller går ned i limmet. Båda dessa effekter medför att mattan är benägen att krympa. Ett lim med stor skjuvhållfasthet håller mattan på plats, men om limmet utsättes för en fuktbelastning, eventuellt i kombination med mjukgörning av limmet, försämras hållfastheten och limmet förmår inte hålla emot krympspänningarna utan mattan krymper med sprickor i fogarna som följd.

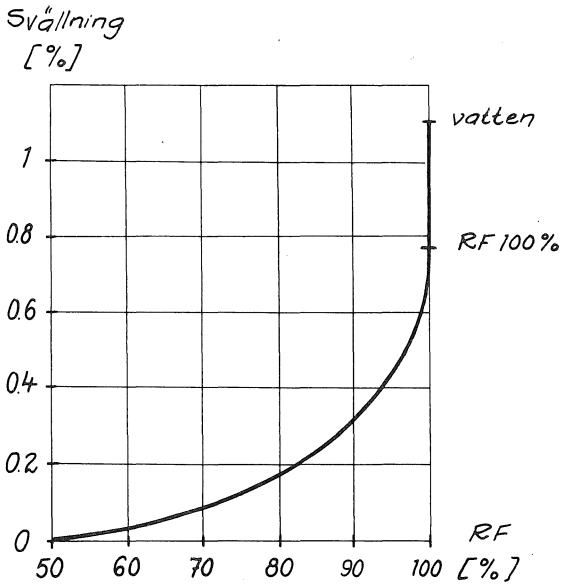


Fig. 4.3 Exempel på fuktrörelsen hos PVC-matta.
Swelling of a PVC-carpet.

4.2.2 Beständighet hos golvlim

En mängd fuktskador på plastmattor och plastplattor har inträffat p g a att golvlimmet brutits ned av fukt och alkalier. Detta har fått till följd att vidhäftningen försämrats och mattor lossnat eller att det i kombination med svällning hos plastmattan och belastning av t ex gångtrafik uppkommit blåsor eller bubblor på golvet. Exempel på skador visas i fig 4.4 och 4.5, Nilsson (1973-77).

De golvlim som för närvarande användes i huvudsak är följande typer

Vattendispergerade akrylatlim
Vattendispergerade PVA-lim
Vattendispergerade neoprenlatexlim
Spritbaserade hartslim

En mängd olika fabrikat finns med sinsemellan olika sammansättning och egenskaper. Om deras beständighet mot fukt och alkalier är kunskapen emellertid ringa och mest baserad på erfarenhet.

Det som händer då ett golvlim utsättes för en fuktbelastning kan sammanfattas i följande punkter, som framkommit vid diskussion med limtillverkare:

Effekter på kort sikt (veckor):

a) Torkningen av vattendispergerade lim försvåras då vattenavgången hindras av ett fuktigt underlag eller tätt material, t ex en fuktspärr. Limningen måste i sådana fall utföras som en häftlimning, dvs limmet ges tillfälle att torka innan beläggningen appliceras.

b) Redispergering av vissa beståndsdelar kan inträffa. Troligtvis behärskar man detta idag.

c) Limmet förtvålas, se nedan, om en viss fuktighet bibehålles och alkalier kan tillföras.

Effekter på lång sikt (år):

a) Förtvålningen pågår och kan, men behöver inte nödvändigtvis, försämra limmets hållfasthet.

b) De beståndsdelar som förtvålats kan bli vattenlösliga och därmed, vid hög fuktighet, försämras limmets hållfasthet.

Fig. 4.4 Fuktskador på plastmatta.
Moisture damages at a plastic carpet.

Fig. 4.5 Detalj av fuktskada på plastmatta.
Detail of moisture damage at a plastic carpet.

Då ett golvlim användes på fuktig betong utsättes detta för alkaliskt fukt, dvs kalciumhydroxid ($Ca(OH)_2$) i vattenlösning. Vissa beståndsdelar i limmet, estergruppen i akrylatlim samt acetat i PVA-lim, kan därvid reagera kemiskt med kalciumhydroxiden. Detta kallas förtvålning och ger upphov till vattenlösliga beståndsdelar samt ett delvis nedbrutet limskikt med försämrade egenskaper. För att förtvålningen skall kunna ske, krävs det tillgång till vatten, dvs hög fuktighet, och detta är fuktbelastningens roll i mekanismen.

Vid en esterförtvålning brytes estergruppen loss av hydroxid, under tillgång till vatten, och det bildas fria alkoholer, som kännetecknas av en speciell lukt samt kalciumsalt av en syra, vilket är vattenlösligt.

Vid PVA-förtvålning fås inga fria alkoholer och därmed ingen speciell lukt utan istället vattenlöslig polyvinylalkohol och kalciumacetat.

En teoretisk uppskattning av vilka fukttillstånd som krävs för att förtvålning skall fortskrida låter sig inte göras utan måste bestämmas experimentellt. Med den flora av golvlim som finns är det naturligtvis inte möjligt att göra en fullständig kartläggning då det dessutom tillkommer nya limtyper ständigt. Ett sådant arbete måste därför åläggas limfabrikanterna. Byggbranschen borde kunna begära att fabrikanterna ger värden på det kritiska fukttillståndet för varje lim så att man har något som kan jämföras med en tillåten spänning vid fuktdimensioneringen. Avdelningen för Byggnadsmateriallära arbetar på att detta skall komma till stånd.

Några få experimentella undersökningar av de kritiska fukttillstånden har gjorts. Statens Provningsanstalt har undersökt några vanliga limtyper genom vidhäftningsmätningar vid olika fuktbelastningar, se Bengtsson & Lundberg (1975).

I figur 4.6 ges exempel på resultat från denna undersökning, varav det framgår att det är mycket stor skillnad mellan olika limtyper. Av figuren skulle man kunna dra slutsatsen att det finns lim som tål hur hög fuktbelastning som helst, men resultaten är erhållna efter mycket korta fuktbelastningstider och säger därför mycket lite om effekten på lång sikt.

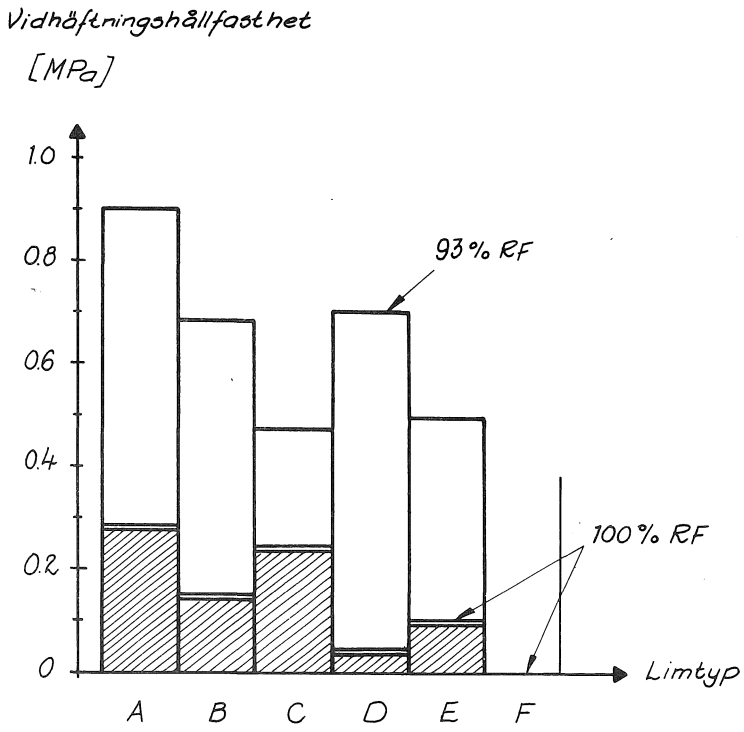


Fig. 4.6 Vidhäftningshållfasthet för olika limtyper utsatta för två olika fuktbelastningar under 14 dygn, Bengtsson & Lundberg (1975).

Adhesion strength for different types of glues at two different moisture loads during 14 days, Bengtsson & Lundberg (1975).

Emellertid framgår den stora förändringen i vidhäftning, som erhålles då fuktbelastningen ökar från 93 % RF till 100 % RF.

Inom projektet har ett examensarbete utförts vid avdelningen, där ett golvlim studerats noggrannare, Petersson (1974). Beständigheten har även här bestämts genom mätning av förändringar i vidhäftningshållfasthet vid olika fuktbelastningar. I figur 4.7 visas resultatet av 1 veckas fuktbelastning. Det framgår att med häftlimning har man erhållit en bättre vidhäftning än med våtlimning vid högre fuktbelastning. Detta är helt naturligt, då limmet vid en våtlimning i detta fall förblir fuktigt under längre tid varigenom härdningen fördröjs.

Vid längre fuktbelastningar har skillnaden mellan häft- och våtlimning till största delen försvunnit, vilket framgår av figur 4.8. Vid fuktbelastningar över 90 % RF är vidhäftningen mycket låg, ca 1/4 av vidhäftningen hos ett relativt torrt lim. Försök har också gjorts med fuktbelastning under 9 veckor, där man fortfarande har en hållfasthetstillväxt för fuktigheter under 90 % RF. Av detta kan man dra slutsatsen att förtvålningen inte fortgår för fuktigheten under 90 % RF eller åtminstone att den har mindre effekt än hållfasthetstillväxten.

Vid avdelningen har under en följd av år ett stort antal skadefall utretts, där golvlim varit inblandat. Inte i något fall har fuktigheten underskridit 90 % RF, där skador skett. Däremot har vissa golvlim fortfarande hjälpligt fyllt sin funktion vid högre fuktigheter upp till 95-100 % RF.

Slutsatsen av ovan redovisade resultat blir följande

A. Beständigheten hos golvlim av olika typ och fabrikat är mycket varierande.

B. De flesta golvlim bör kunna klara en fuktbelastning av 90 % RF under lång tid.

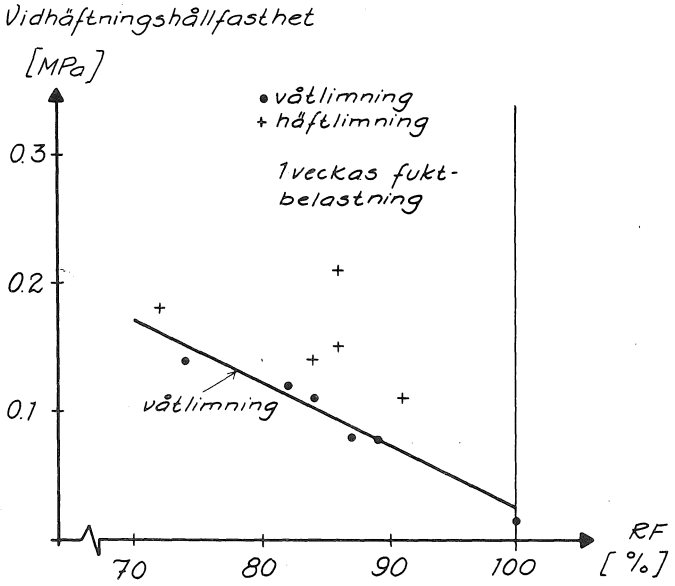


Fig. 4.7 Vidhäftningshållfasthet som funktion av fuktbelastning under 1 vecka, Petersson (1974). Varje punkt representerar fyra provkroppar.

Adhesion strength as a function of the moisture load during 1 week, Petersson (1974). Each point represents four specimens.

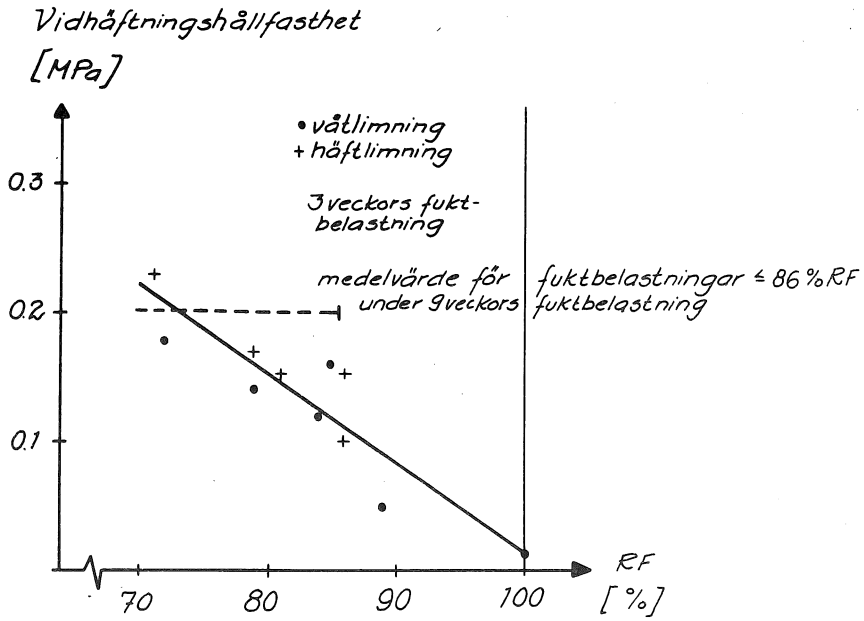


Fig. 4.8 Vidhäftningshållfasthet som funktion av fuktbelastning under 3 veckor, Petersson (1974). Varje punkt representerar fyra provkroppar. Medelvärde för 9 veckors fuktbelastning markerad.

Adhesion strength as a function of moisture load during 3 weeks, Petersson (1974). Each point represents four specimens. Mean value for 9 weeks moisture load marked.

4.2.3 Biologiskt angrepp

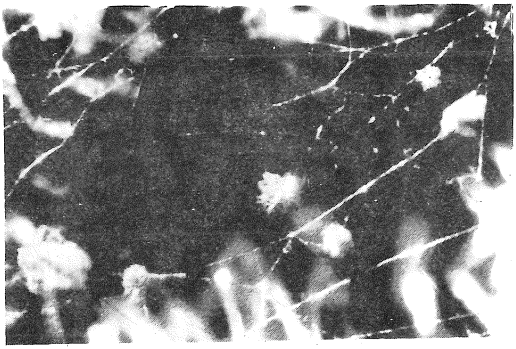
Organiska material kan angripas på olika sätt. Blånads- och rötsvampar samt vissa insekter kan angripa träbaserade material med en nedbrytning som följd. Trä och andra material med organiska beståndsdelar kan ge näring åt mögelsvampar med luktproblem som följd.

Träförstörande svampar och insekter kräver normalt mycket höga fukttillstånd för att kunna utvecklas. En speciellt fruktad skadegörare är hussvampen, som sedan den väl fått fotfäste, kan tillväxa i relativt torrt virke. Undre gränsen ligger vid ca 80 % RF. Den optimala temperaturen för svampväxt är +20-30°C, dvs normal rumstemperatur, men tillväxt kan ske ned till +5-10°C.

Att träbaserade material i en byggnad måste skyddas mot bl a rötangrepp genom att hålla virket torrt är väl känt. Under senare år har emellertid andra svamptyper, mögelsvampar, ställt till problem i form av dålig lukt både genom mögelbildning i trä och andra material med organiska beståndsdelar. Här hjälper inte ens tryckimpregnerat virke. Man har t o m träffat på fall där mögelsvampar kunnat växa i syntetiska heltäckningsmattor genom att de fått näring i smuts och dammpartiklar, Nilsson (1973-77).

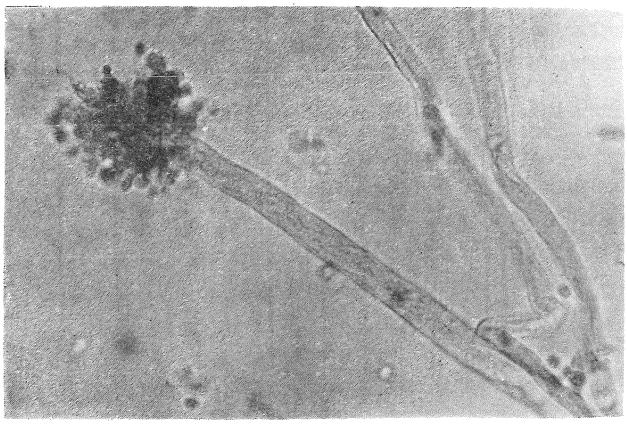
Den vanligaste typen av mögelsvamp, av typ Penicillum, kräver mycket höga fuktigheter för att kunna växa, medan mögelsvamp av Aspergillus-typ kan utvecklas vid fuktigheter ner mot 75 % RF. Vid inneklimat med hög fuktighet kan detta ofta överskridas vid låga yttemperaturer vid t ex köldbryggor och ytterväggshörn. Den nya energinormen, med stora krav på begränsad ventilation och lufttäthet hos byggnader, kommer troligtvis att medföra att dessa problem med dålig lukt kommer att öka i omfattning de närmaste åren.

I figur 4.9 och 4.10 avbildas mögelsvamp av Aspergillus-typ som tillväxt i syntetiska textilmattor, Nilsson (1973-77).



1mm

Fig. 4.9 Mögelsvamp av Aspergillustyp på syntetisk textilmatta.
Fungus, type Aspergillus, on a synthetic textile carpet.



0.1mm

Fig. 4.10 Aspergillussvamp i 250 x förstoring.
Aspergillus fungus, 250 x enlargement.

4.2.4 Kritiska fukttillstånd - sammanfattning

I nedanstående tabell ges en sammanställning av de kritiska fukttillstånden för material som är aktuella i golvkonstruktioner. Som riktvärde för limmade plastbeläggningar gäller omkring 90% RF och för syllar och övergolvkonstruktioner av träbaserade material bör ej 75-80% RF överskridas.

FÖRSLAG TILL KRITISKA FUKTTILLSTÅND (i samband med golv)			
Material	Skadetyp	Skadeorsak	RF_{KRIT} (%)
Plastbaserade material	Svällning, blåsbildning	fuktrörelser	95-100
	krympning	mjukgörarvandring+ nedbrytning av lim	jfr golvlim
Golvlim	nedbrytning, vidhäftnings-förlust	förtvålning, ofullständig torkning	90-95
Träbaserade material	svällning	fuktrörelser	>75
	röta	svampangrepp	~ 80
Organiska material (inkl trä)	dålig lukt	mögelsvampangrepp	~ 75
De kritiska fukttillstånden beror i vissa fall på material-kvaliteter samt i andra på materialens funktion i konstruktionen.			

Ovan föreslagna värden utgör endast en rekommendation och bör omprövas efter det att material i marknaden har genomgått tester under längre tid.

5. MATERIALET BETONG UR FUKTSYNPUNKT

Fuktfixering och fukttransport i porösa material är, som framgår av kapitel 3, utomordentligt komplicerade företeelser. För materialet betong är det, om möjligt, än mer komplicerat, då betong inte är ett homogent material och då materialets sammansättning kan variera inom vida gränser. Dessutom ändras egenskaperna, hos en betong med en viss bestämd sammansättning, hela tiden med åldern allteftersom materialet härdar.

För att i någon mån bringa reda i detta, har ett stort arbete lagts ned på att bestämma vilka faktorer hos betong som är väsentligast ur fuktsynpunkt och hur stor inverkan olika faktorer har.

I framställningen behandlas olika egenskaper separat och uppgifter ur litteraturen kompletteras med egna resultat och beräkningar.

5.1 Sammansättning - struktur

Betong tillverkas genom att delmaterialen cement, vatten och ballast blandas. Ballastmaterialet består av grus och sten, ofta makadam, med vissa krav på hur det är graderat, dvs vilka kornstorlekar som ingår och mängderna av dessa. Ibland användes vissa tillsatsmedel varav det väsentligaste är luftporbildande medel. Betongens egenskaper i färskt och hårdnat tillstånd bestämmes till mycket stor del av i vilka proportioner de olika delmaterialen ingår.

Den storhet som är viktigast och som bestämmer del flesta egenskaperna är vattencementtalet, vct.

$$vct = \frac{W_o}{C} = \frac{\text{vattenhalt}}{\text{cementhalt}} \qquad (5.1)$$

Vanligen använda cementsorter har kompaktdensiteten ca 3.100 kg/m^3 och normal ballast har densiteten 2.650 kg/m^3. Mellan cementhalten C (kg/m^3), vattenhalten w_o (kg/m^3), ballasthalten B (kg/m^3) och lufthalten l_o (l/m^3) råder därför följande samband

$$\frac{C}{3100} + \frac{W_o}{1000} + \frac{B}{2650} + \frac{l_o}{1000} = 1 \ (m^3) \qquad (5.2)$$

Detta samband har åskådliggjorts i figur 5.1, som anger blandningsproportionerna inom det intressanta området för normal betong.

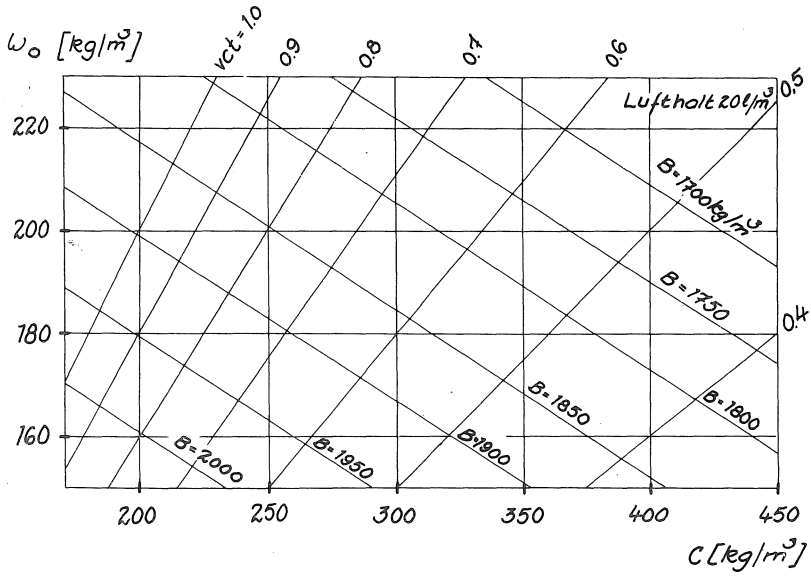


Fig. 5.1 Sammansättning av normal betong med lufthalt 2%.

Composition of normal concrete with 2% air-content.

Blandningen bestående av cement och vatten benämnes cementpasta, som alltså omgärdar ballastkornen i betong. Denna pasta består i färskt tillstånd av cementkorn, suspenderade i vatten. Vattencementtalet avgör hur tätt cementkornen ligger. Enligt Nilsson (1975) är medelavståndet mellan cementkorn, med genomsnittsradien 2,6 µm, 0,3 µm för vct 0,4 och 1 µm för vct 0,7, dvs ca 3 ggr större avstånd mellan cementkornen för det högre vattencementtalet. Detta påverkar i högsta grad egenskaperna hos både färsk och hårdnad betong, se nedan.

Då cement blandas med vatten reagerar de olika cementkomponenterna (cementklinker) kemiskt med vatten varvid cementet hydratiseras. Det vatten som binds blir kemiskt bundet. Mängden kemiskt bundet vatten definieras som det vatten som kvarstår efter torkning i 105°C. Av denna anledning kallas det icke-förångningsbart vatten, w_n (n=non-evaporable).

Hur långt hydratiseringen fortskridit anges med hydratationsgraden α, som är kvoten mellan hydratiserat cement och ursprunglig cementhalt. Den största mängd vatten som kan bindas kemiskt till cement motsvarar storleksordningen 1/4 av cementets vikt, Powers och Brownyard (1948)
Man kan alltså ungefärligt ange

$$\alpha \approx 4 \cdot \frac{w_n}{C} \qquad (5.3)$$

Då cementet hydratiseras växer kristaller ut från cementkornens yta i form av oregelbundna tunna fibrer eller blad, se fig 5.2. Kristallstrukturens porer, de s k gelporerna, blir härvid mycket små. Cementgelen, dvs systemet kristaller-vattenfyllda porer, kommer att växa in i det utrymme som ursprungligen upptogs av blandningsvattnet. I det kvarvarande området som inte nåtts av cementgelen bildas härvid väsentligt större porer, de s k kapillärporerna. Allteftersom mer och mer vatten binds kemiskt kommer gelporvolymen att öka och kapillärporvolymen att minska. Eftersom den kemiska reaktionen medför att hydratationsprodukterna har mindre volym än utgångsmaterialen,kommer kapillärporvolymen, som ursprungligen var helt fylld med blandningsvatten, att tömmas något om hydratationen sker utan vattentillförsel, detta trots att den totala porvolymen minskar.

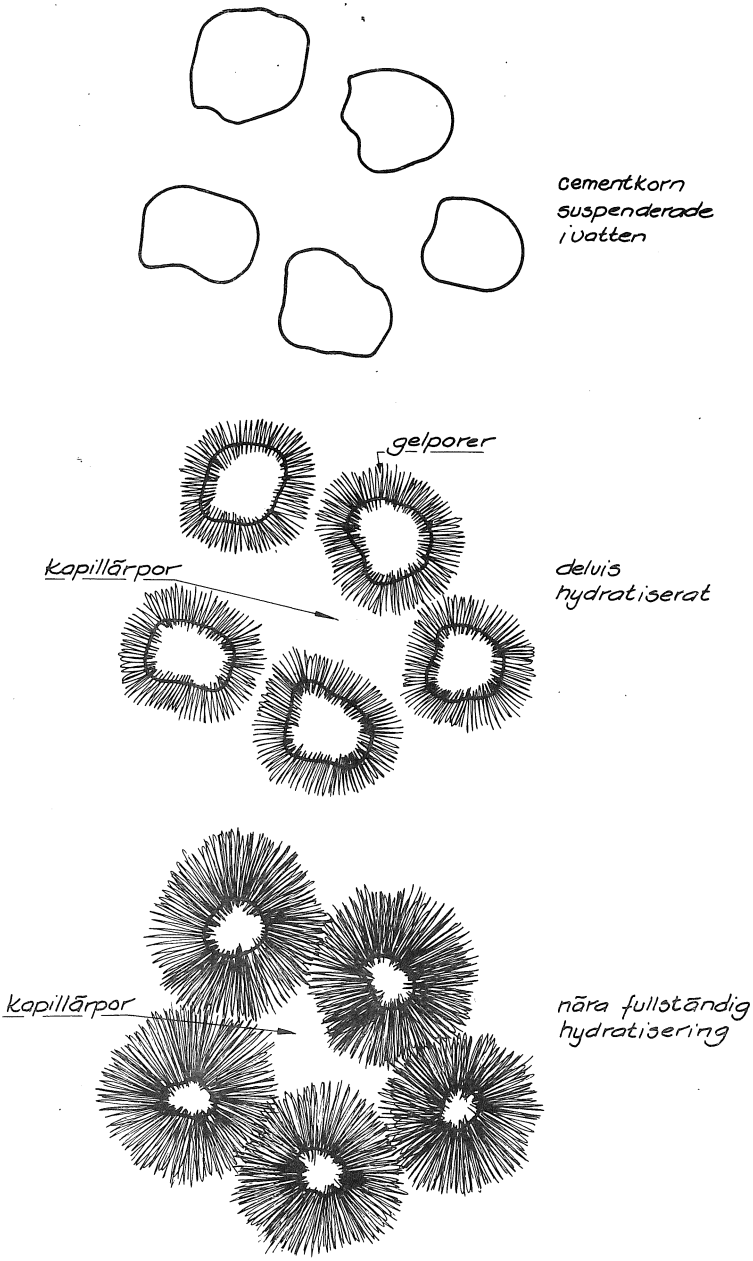


Fig. 5.2 Olika principiella stadier i cementets hydratisering.

Different phases in cement hydration.

I figur 5.3 åskådliggörs hur vattnet är fördelat i cementpasta och betong av olika vct enligt Powers & Brownyard (1948) och Powers (1949). I fig 5.4 visas hur hydratationens fortskridande påverkar vattnets fördelning.

Då hydratationen fortskrider, minskar alltså kapillärporvolymen vilket framgår av figur 5.4. Detta sker genom att den växande cementgelen minskar kapillärporernas storlek. Detta framgår klart av porstorleksfördelningen vid olika ålder i fig 5.5, Whiting & Kline (1977). Det kapillära porsystemet förändras härvid i riktning mot allt finare porer och så småningom finns inte längre ett sammanhängande kapillärt porsystem, jfr fig 5.2.

Sammanfattningsvis finns det två typer av porer i cementpasta:

Gelporer, huvudsaklig storlek 10-50 Å
Kapillärporer, 20-2000 Å

För betong tillkommer ytterligare typer av porer:

Bearbetningsporer, 0.01-10 mm, bestående av luft vid blandning och av vattenseparation uppkomna fickor under grövre ballastkorn.

Luftinblandningsporer, 0.001-1 mm, som ibland medvetet eftersträvas för att förändra betongegenskaperna.

Mikrosprickor, främst i fasgränser p g a olikheter i krympning hos ballast och cementpasta.

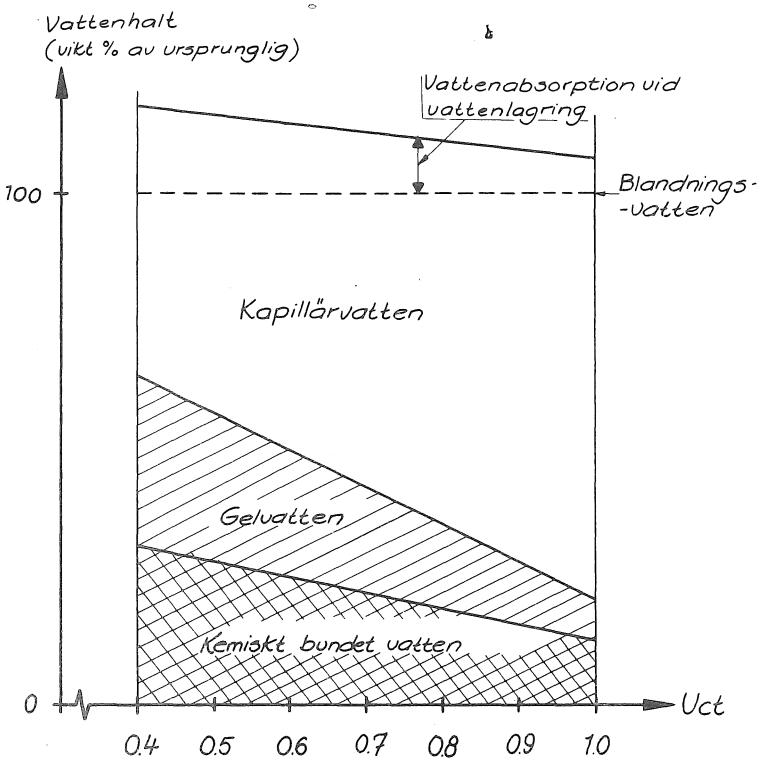


Fig. 5.3 Vattnets fördelning i cementpasta och betong av olika vct. Hydratationsgrad 50%.

Distribution of water in cement paste and concrete of different w_o/c. *Degree of hydration 50 %.*

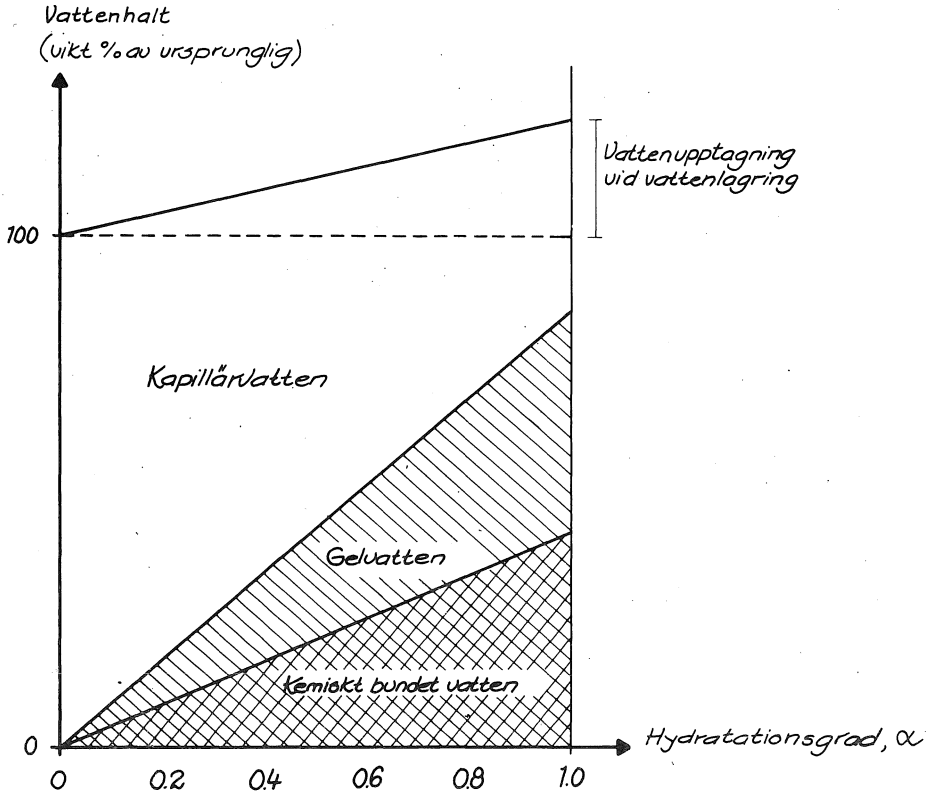


Fig. 5.4 Vattnets fördelning vid olika hydratationsgrader. Vattencementtal 0,6.

Distribution of water at different degrees of hydration. Water-cement ratio 0.6.

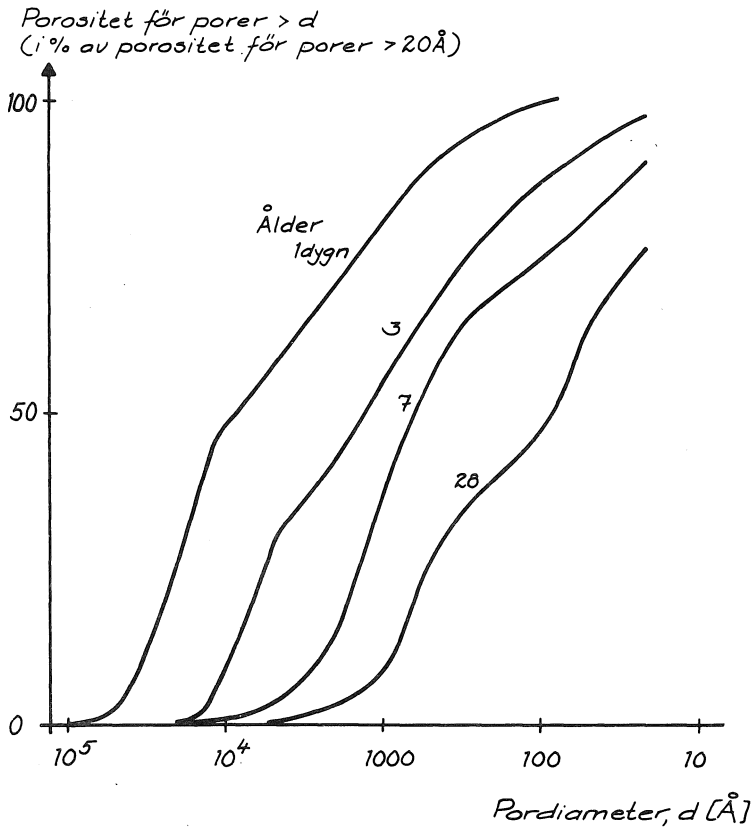


Fig. 5.5 Porstorleksfördelning för cementpasta med vct 0,60 och olika åldrar, Whiting & Kline (1977).

Pore size distribution for cement paste with $^{w}o/_{c}$ *0.6 and different ages, Whiting & Kline (1977).*

5.2 Hydratisering - begynnelsefukthalter

Vid behandling av fukttransport i betong är det av stor vikt att känna till hur snabbt hydratationen fortskrider under olika betingelser. Den hydratisering som sker t ex innan en uttorkning startar, reducerar det fysikaliskt bundna vattnet och minskar därmed den vattenmängd som skall torkas bort. Dessutom medför hydratisering under ett uttorkningsförlopp att den förångningsbara vattenmängden, som driver fukttransporten, minskar inte bara på grund av att fukt transporteras iväg, utan att det också sker en "inre torkning".

Det kemiskt bundna vattnet, w_n, är bundet till olika komponenter i cementet som hydratvatten och hydroxider. Vid bestämning av den bundna vattenmängden förfar man vanligen så att materialet utsättes för en så hög temperatur att dessa bindningar bryts och vatten avgår. Genom att härvid bestämma viktförlusten, erhålles den kemiskt bundna vattenmängden. Den temperatur som materialet skall utsättas för, bör naturligtvis väljas så att allt bundet vatten avgår och ingenting annat. Detta är emellertid ytterst besvärligt då bindningar i olika kemiska föreningar bryts vid olika temperaturer. Enligt Englert & Wittmann (1968) avgår huvudsakliga delen av hydratvattnet i temperaturområdet 125°C-400°C. Vid omkring 550°C sönderdelas kalciumhydroxid och i intervallet 700°C-800°C avgår koldioxid från kalciumkarbonat.

För att uppmätt viktförlust skall motsvara större delen av det kemiskt bundna vattnet, men inte innehålla koldioxid från karbonatiserad cementpasta och karbonathaltig ballast, har här temperaturen 600°C valts för bestämning av w_n. För bestämning av cementhalt har temperaturen 1000°C valts, då både vatten och koldioxid har lämnat materialet.

Med ovanstående antaganden erhålles cementvikten i ett ballasthaltigt prov på följande sätt:

a) Kvarvarande vikt vid upphettning till 1000°C antages vara cement och ballast

$$M_{1000} = C_{1000} + B_{1000}$$

b) Viktförlust hos ursprunglig cement och ballast definieras av

$$C_{1000} = (1-a_{1000})C_{20}$$

$$B_{1000} = (1-b_{1000})B_{20}$$

c) Ursprungligt cementinnehåll kan nu erhållas ur

$$C_{20} = \frac{M_{1000}}{1-a_{1000} + \frac{B}{C}(1-b_{1000})} \qquad (5.4)$$

där B/C är ballast-cement-förhållandet i ursprunglig blandning.

Vid bestämning av kemiskt bunden vattenmängd förfares på följande sätt:

a) Kemiskt bundet vatten definieras som det vatten som kvarstår efter torkning i 105°C

$$M_{105} = C_{105} + B_{105} + w_n$$

b) Viktförlust hos cement och ballast definieras av

$$C_{105} = (1-a_{105})C_{20}$$

$$B_{105} = (1-b_{105})B_{20}$$

$$C_{600} = (1-a_{600})C_{20}$$

$$B_{600} = (1-5_{600})B_{20}$$

c) Det kemiskt bundna vattnet antas avgå vid upphettning till 600°C varvid erhålles

$$M_{600} = C_{600}+B_{600}$$

och

$$w_n = M_{105}-M_{600}-C_{20}(a_{600}-a_{105}+ \frac{B}{C}(b_{600}-b_{105}) \qquad (5.5)$$

där C_{20} beräknats ur ekv 5.4.

För de här använda cement- och ballastmaterialen gäller värdena enligt nedanstående tabell:

Cement; Ballast	a_{105}; b_{105}	a_{600}; b_{600}	a_{1000}; b_{1000}
Limhamn Std	0.0028	0.0122	0.0136
Limhamn LH	0.0040	0.0095	0.0115
Skövde SH	0.0036	0.0100	0.0141
Slite Std	0.0031	0.0082	0.0106
Fylesand 314	0.0008	0.0018	0.0023
Cementnormsand nr 2	0.0019	0.0021	0.0021
Cementnormsand nr 3	0.0008	0.0019	0.0019
Hardeberga 2-4 mm	0.0020	0.0045	0.0058
Ballast 3:2:2:3	0.0014	0.0027	0.0032

För att utröna inverkan av använd temperaturnivå vid bestämning av kemiskt bundet vatten, har en försöksserie utförts där temperaturerna 600°C, 800°C och 1000°C använts. Resultatet framgår av figur 5.6. Av figuren kan man dra slutsatsen att viktförlusten vid upphettning till 800°C är i det närmaste den samma som vid 1000°C. Mellan dessa båda temperaturer sker alltså ingen viktförlust. Mellan 600°C och 800°C fås en liten viktförlust som är koldioxid och troligen någon liten mängd kemiskt bundet vatten. I litteraturen, bl a Danielsson (1966) (1974) och Pihlajavaara (1965), har olika temperaturer prövats men frågan om hur man bestämmer den verkliga mängden icke-förångningsbart vatten kvarstår. Här har, som tidigare nämnts, viktsförlusten vid upphettning till 600°C använts. Härvid har troligtvis inte allt kemiskt bundet vatten avgått, men i gengäld har en viss koldioxidmängd frigjorts, se Pihlajavaara (1965).

På ovan beskrivet sätt har hydratationsutvecklingen för fyra i Sverige vanliga cementsorter bestämts. Resultatet åskådliggörs i figur 5.7. Av dessa har Slite Std använts i försök som beskrives i det följande. Hydratationsutvecklingen för Slite Std enligt figuren är oväntat långsam. Senare mätvärden indikerar en betydligt snabbare hydratisering.

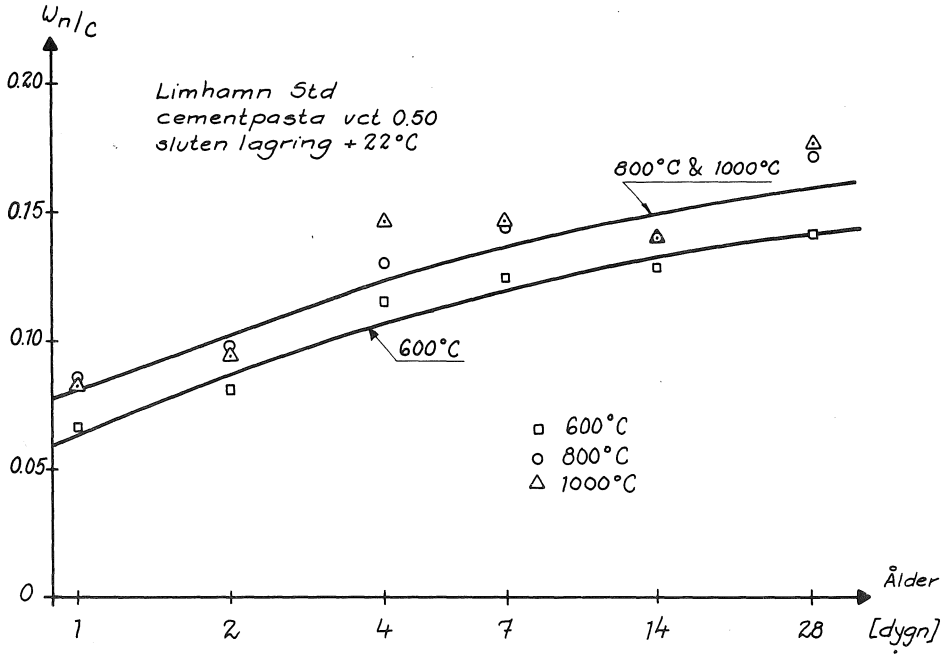


Fig. 5.6 Inverkan av upphettningstemperatur vid bestämning av kemiskt bundet vatten. Varje punkt representerar minst 2 prov.

Influence of heating temperature at determining the chemical bound water. Each point represents at least two specimens.

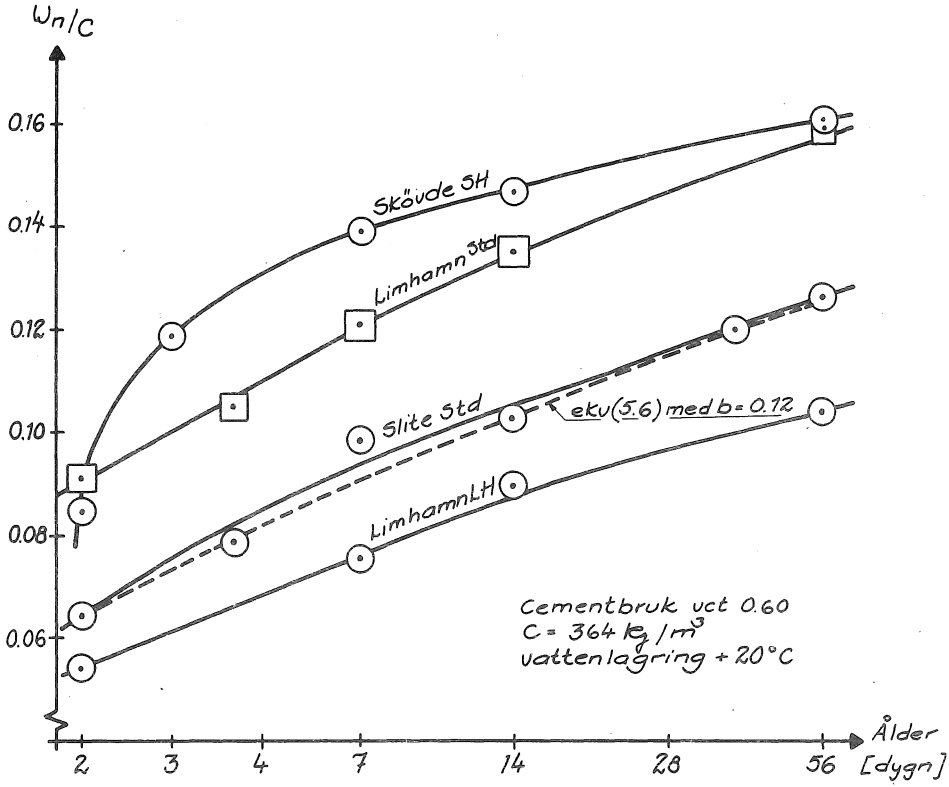


Fig. 5.7 Hydratationsutvecklingen för några svenska cementsorter. Varje punkt är medelvärdet av tre provkroppar.

Hydration for some swedish cement types. Each point is a mean value for three specimens.

Det visar sig att hydratationsutvecklingen för standardcementen kan med god överensstämmelse matematiskt beskrivas med uttryck av typen

$$w_n = \left(\frac{w_n}{C}\right)_{max} - \left(\left(\frac{w_n}{C}\right)_{max} - \left(\frac{w_n}{C}\right)_{t=2}\right)\left(\frac{t}{2}\right)^{-b} \qquad (5.6)$$

där tiden t anges i dygn. Hydratationshastigheten kan därför skrivas som

$$\frac{\partial w_n}{\partial t} = \text{konst} \cdot C \cdot t^{-(1+b)} \qquad (5.7)$$

I figur 5.7 är ekv (5.6) för Slite Std med b=0,1195 inritad. Överensstämmelsen är fullt tillräcklig för dessa ändamål.

Härdning av betong vid <u>annan temperatur</u> än +20°C kan approximativt uppskattas med hjälp av den av Bergström (1953) lanserade mognadsfaktorn

$$\sum_t (\Delta t)_\theta (\theta+10)$$

Detta innebär att vid härdning vid konstant temperatur θ°C kan hydratationsutvecklingen vid denna temperatur uppskattas ur utvecklingen vid +20°C med

$$\left(\frac{w_n}{C}\right)_{t_\theta} = \left(\frac{w_n}{C}\right)_{t_{20}^{ekv}}$$

där ekvivalenta härdningstiden vid +20°C ges av

$$t_{20}^{ekv} = t_\theta \frac{\theta+10}{30}$$

I figur 5.8 har värden på hydratationsutvecklingen vid olika temperaturer enligt Danielsson (1966) uppritats med den ekvivalenta härdningstiden som parameter. Som synes blir övensstämmelsen relativ god i temperaturintervallet -2°C - +40° för ekvivalenta härdningstider större än 7 dygn. Avvikelser är mindre än 5 %.

Ovanstående gäller vid härdning vid tillräcklig tillgång till vatten. I en uttorkad del av en konstruktion där <u>fuktigheten är låg</u>, sker inte hydratiseringen i samma takt. I figur 5.9 ges exempel på detta, Powers (1947), som emellertid visar hydratationsutvecklingen för ett ursprungligen torrt cement som lagrats i klimat av olika fuktighet. Av detta exempel framgår att hydratationen i det närmaste avstannar vid fuktigheter lägre än 80 % RF.

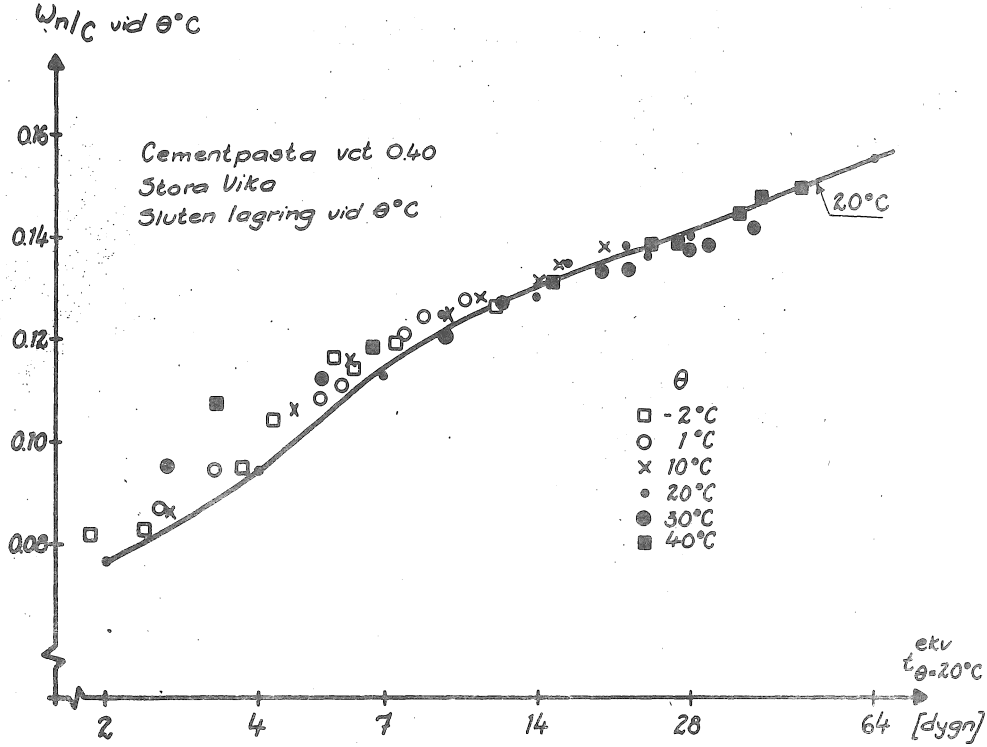


Fig. 5.8 Hydratationsutveckling vid olika temperaturer. "Ekvivalent ålder vid 20°C" som parameter. Värden enligt Danielsson (1966).

Hydration at different temperatures. "Equivalent age at 20°C" as a parameter. Values according to Danielsson (1966).

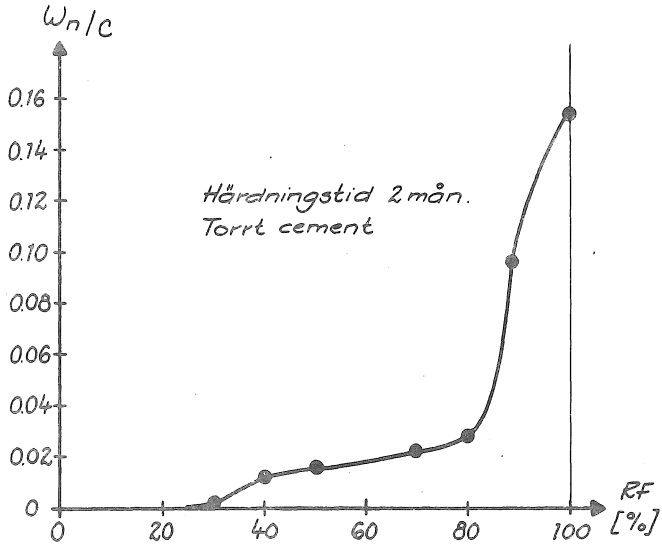


Fig. 5.9 Inverkan av fuktigheten på hydratationsutvecklingen för ett torrt cement, Powers(1947).

Influence of humidity on hydration of a dry cement, Powers (1947).

Vid en beräkning av uttorkningsförloppet för betong är det nödvändigt att känna hydratationsgraden då torkningen startar. Denna ger möjlighet att uppskatta begynnelsefukthalten.

Även vid utredning av skadefall är det av största vikt att kunna uppskatta vilken fukthalt betongen skulle haft om inte vatten tillförts. Det ger möjlighet att bedöma om betongen har fått tillskott av vatten, t ex i form av markfukt.

Om betongen härdat utan vattentillförsel ges fukthalten av

$$w_e = w_o - w_n$$

Vid skadeutredningar mätes oftast fuktkvoten, u.
Denna blir, om inget vatten tillförts

$$u = \frac{w_e}{C + B\,w_n} = \frac{vct - 0{,}25\alpha}{1 + \frac{B}{C} + 0{,}25\alpha}$$

Av ekvationen framgår att cementhalten har avgörande betydelse och denna måste alltså kännas för att en bedömning skall vara möjlig.
Ekvationen återges i fig 5.10 för normala betongkvaliteter.

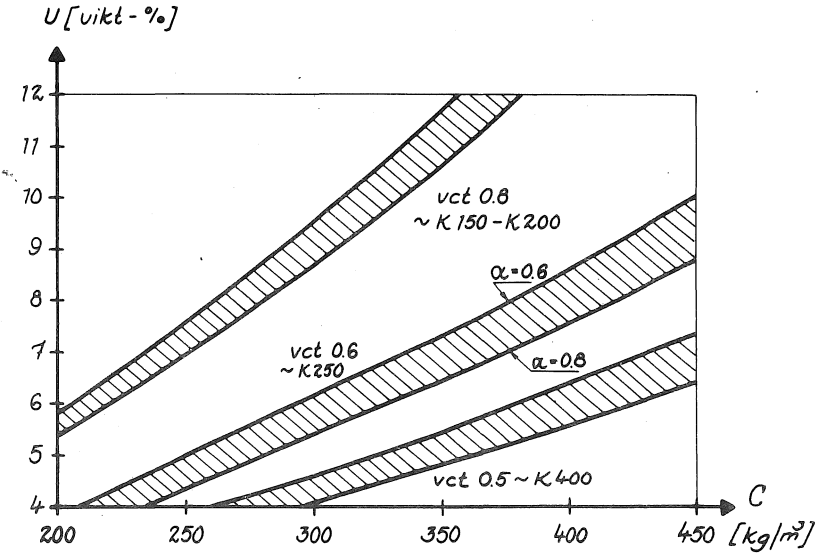


Fig. 5.10 Maximalt möjlig fuktkvot i betong som ej tillförts vatten.

Maximum moisture ratio in concrete with no water added.

5.3 Fuktfixering - jämviktsfukthalter

Att känna till hur det förångningsbara vattnet i betong är bundet under olika förhållanden, är väsentligt av flera skäl. Jämviktsfuktkurvan anger bl a fukthalten vid ytan av en konstruktion och därmed mot vilket fuktinnehåll betongen strävar. Jämviktsfuktkurvan är också nödvändig för bedömning av vilken fuktbelastning som uppkommer på ett tätt ytskikt som applicerats vid ett visst fuktinnehåll i betongen. Dessutom är jämviktsfuktkurvan till stor hjälp vid omräkning av fukttransportkoefficienter från ett sätt att beskriva fukttransporten till ett annat.

Fuktfixering i betong har studerats av bl a Powers & Brownyard(1948), Sereda, Feldman & Swenson(1966), Ahlgren(1972) och Pihlajavaara (1965) (1974). Då det gäller sorptionsisotermen vid absorption är överensstämmelsen mycket god, se Ahlgren (1972). Desorptionsisotermen är det emellertid mycket olika uppfattning om. Ett försök till jämförelse mellan olika författares resultat har gjorts i figur 5.11, där egna resultat, Nilsson (1976), för mycket lägre ålder även har lagts in. Då de visade kurvorna gäller vid olika hydratationsgrader, skall inte så stor vikt läggas vid absolutvärdena vid en jämförelse, utan vid kurvornas form och lutning.

Den stora skillnaden ligger i området 30-80% RF där Ahlgren och Sereda, Feldman & Swenson visar ungefär samma kurvform med en flack lutning över 40 % RF och ett plötsligt "hopp" ned till värdet vid 30 % RF. Pihlajavaara redovisar en mycket flack kurva där de andra har ett "hopp" och mycket större lutning i området 50-80 % RF. Detta överensstämmer väl med egna resultat.

Denna stora skillnad mellan olika jämviktsfuktkurvor är helt oacceptabel vid beräkning av ett uttorkningsförlopp för betong, då jämviktsfukthalten i normalt torkklimat kan variera upp till 60 % beroende på vilken kurva man använder. Det är svårt att förklara vad de stora skillnaderna beror på då uppgifter saknas om exakt hur de försök har utförts, som resultaten är baserade på. Man kan emellertid peka på några faktorer som är tänkbara.

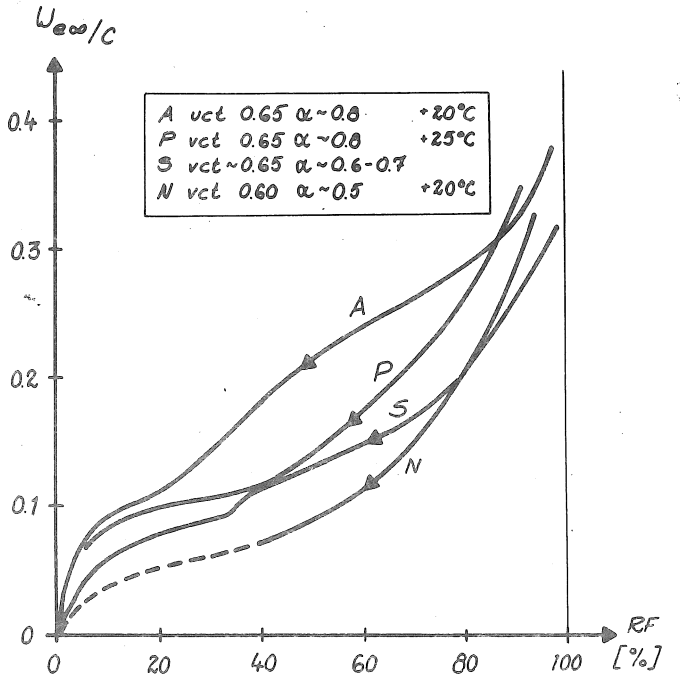


Fig. 5.11 Utseendet hos desorptionsisotermer enligt olika författare. Observera skillnad i hydratationsgrad.

Desorption isotherms according to different writers. Observe the differens in degree of hydration.

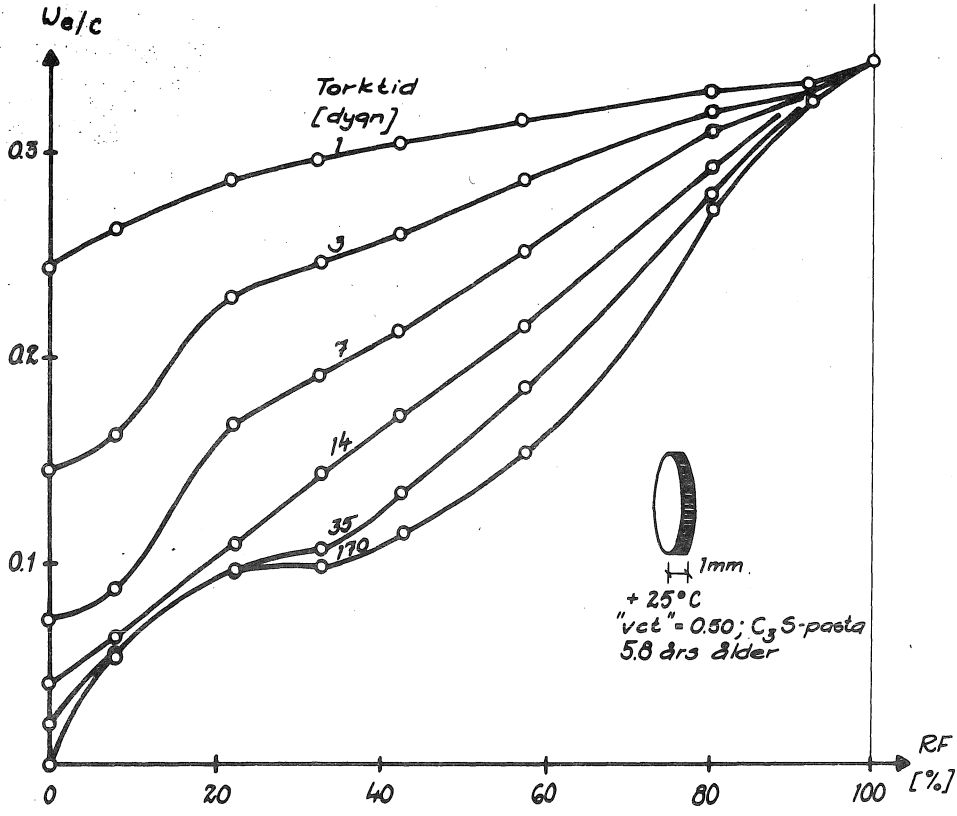


Fig. 5.12 Tidsförloppet vid bestämning av desorptionsisoterm för C_3S - pasta, Grudemo (1976).

Time course at determining the desorption isotherm for C_3S paste, Grudemo (1976).

Tiden för uppnående av jämvikt är mycket lång, speciellt i området 30-80 % RF. Detta framgår klart av resultat enligt Grudemo (1976) i figur 5.12, som visserligen gäller C_3S-pasta och inte Portlandcement som övriga resultat. För en 1 mm tjock provkropp har här jämvikt inte uppnåtts efter två veckors torkning utan mer än 10 ggr längre tid erfordras. Jämviktfuktkurvan enligt Grudemo är till sin form mycket lik Pihlajavaara´s resultat enligt ovan.

Det normal sättet att avgöra om jämvikt erhållits genom att successivt bestämma viktminskningen tills denna avstannar, kan också ge för höga jämviktsfukthalter om provkropparna under försökets gång riskerar att utsättas för koldioxid. Viktminskningen p g a fuktavgivning kan då kompenseras av en viktökning p g a karbonatisering och det blir mycket svårt, för att inte säga omöjligt att avgöra om jämvikt uppnåtts.

Den temperatur, vid vilken jämviktsfuktkurvan bestämmes, har också en viss betydelse. Enligt Pihlajavaara (1974), se figur 5.13, fås en högre jämviktsfukthalt vid lägre temperatur men samma relativa fuktighet. Detta skulle kunna förklara en del av skillnaden i resultat mellan Ahlgren och Pihlajavaara enligt ovan.

Cementtypen kan påverka porstorleksfördelningen och därmed jämviktsfuktkurvans utseende. I de resultat som redovisats ovan har helt olika cement använts. Vilka cement som använts och skillnaden mellan dessa är obekant. För cement som är mycket finmalen bör, vid samma vct, kapillärporerna bli avsevärt mindre än för ett grovt malet cement. Detta bör då visa sig i jämviktsfuktkurvan.

Då egna resultat på Slite Std-cement överensstämmer väl med Pihlajavaaras, har hans desorptionsisotermer i huvudsak använts för fortsättningen. Då de emellertid är något oklara vid fuktigheter över 90-95 % RF har de här kompletterats med resultat och beräkningsmetod enligt Ahlgren (1972). För hydratationsgrader på ungefär 0,8 fås då desorptionsisotermer för betong av olika kvalitet enligt figur 5.14.

Desorptionsisotermen vid låg ålder har bestämts för cementbruk med vct 0,60 vid egna försök. Vid höga relativa fuktigheter har jämviktsfukthalterna bestämts på finkrossat material (<0,5 mm) med precisionsfuktkammare enligt Ahlgren. Härvid har fukthalter

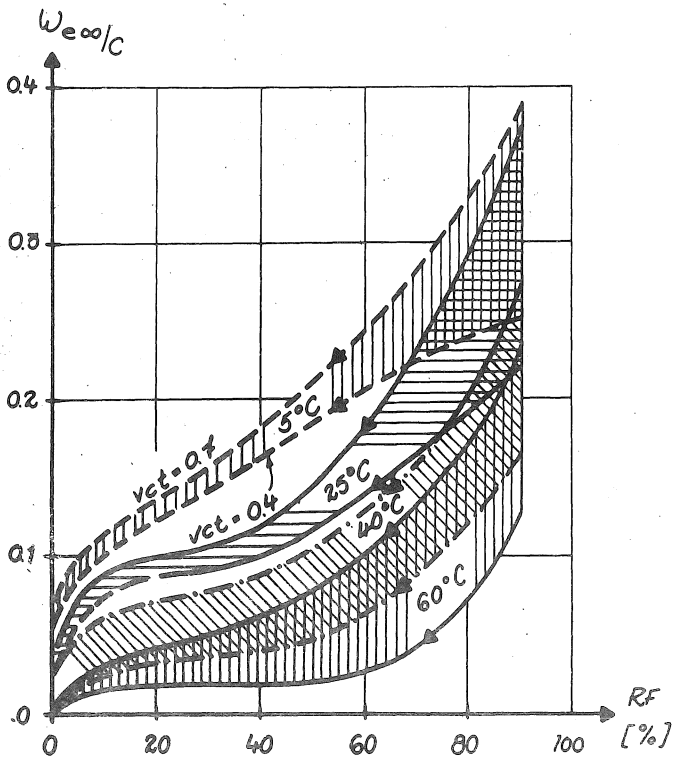


Fig. 5.13 Desorptionsisotermen vid olika temperaturer enligt preliminära resultat av Pihlajavaara (1974).

Desorption isotherm at different temperatures according to preliminary results by Pihlajavaara (1974).

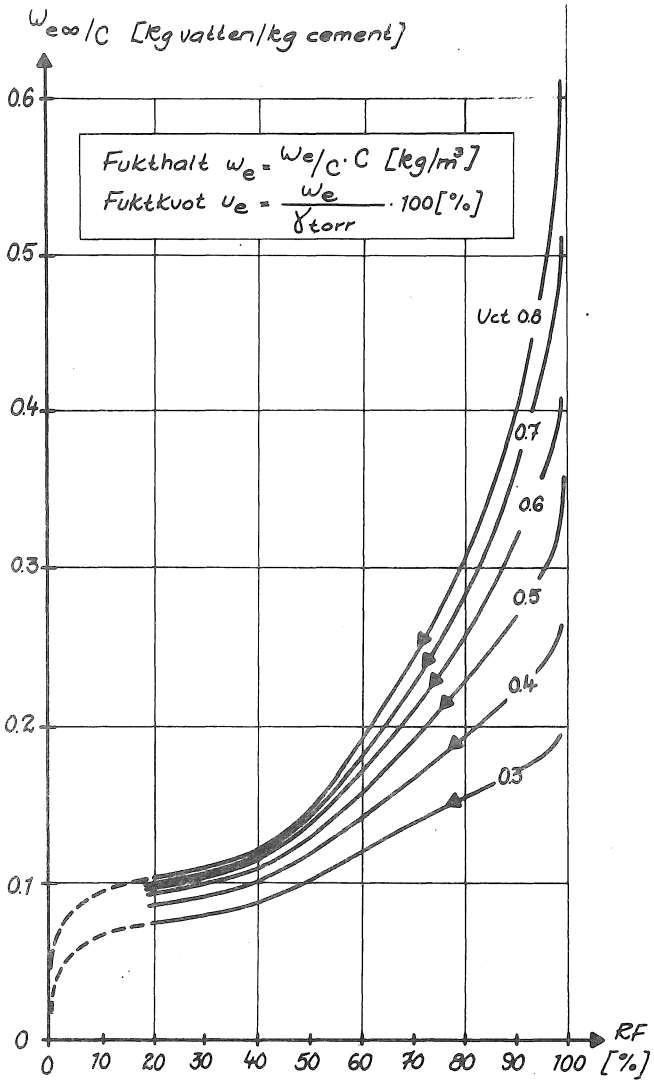


Fig. 5.14 Desorptionsisotermer för olika betongkvaliteter. Hydratationsgrad ~ 0,8. Baserad på resultat av Pihlajavaara (1974) och Ahlgren (1972).

Desorption isotherms for different concrete qualities. Degree of hydration 0.8 . Based on results by Pihlajavaara (1974) and Ahlgren (1972).

som ligger mycket nära trolig jämvikt erhållits efter något dygn. Vid lägre fuktigheter har jämviktsfukthalter bestämts på gjutna skivor, 2 cm tjocka, av cementbruk som torkats till jämvikt i klimatrum med olika RF. Härvid har så stor fuktavgång skett under loppet av någon vecka att hydratationen i det närmaste avstannat. Efter ca 1 1/2 år har fukthalt och hydratationsgrad bestämts. Provkropparna var, vid försökets avslutande, karbonatiserade till ett djup av ca 2 mm.

I figur 5.15 visas resultatet med desorptionsisotermen vid α=0.8 enligt figur 5.14 som jämförelse.

Absorptionsisotermen för olika ålder och betongkvalitet har bestämts av Ahlgren (1972). I fig 5.16 ges en sammanställning av hans resultat. Dessa visar god överensstämmelse med resultat av Powers & Brownyard och ansluter väl till desorptionsisotermerna i fig 5.14 och 5.15.

Vid bestämning och beräkning av fukttransportkoefficienter erfordras ofta uppgifter om fuktkapaciteten vid olika fuktigheter. Fuktkapaciteter uttrycker förändringen i fukthalt då relativa fuktigheten (ångtrycket) ändras, dvs lutningen av sorptionsisotermen, t ex

$$\text{fuktkapaciteten} = \frac{\partial w_{e\infty}}{\partial p}\,\phi$$

För betong med hydratationsgraden ~0,8 har fuktkapaciteten beräknats ur desorptionsisotermerna i fig 5.14. Resultatet visas i fig 5.17, här dock som inverterade värdet av fuktkapaciteten, vilket i det följande behövs för beräkning av diffusiviteten ur värden på ångpermeabiliteten.

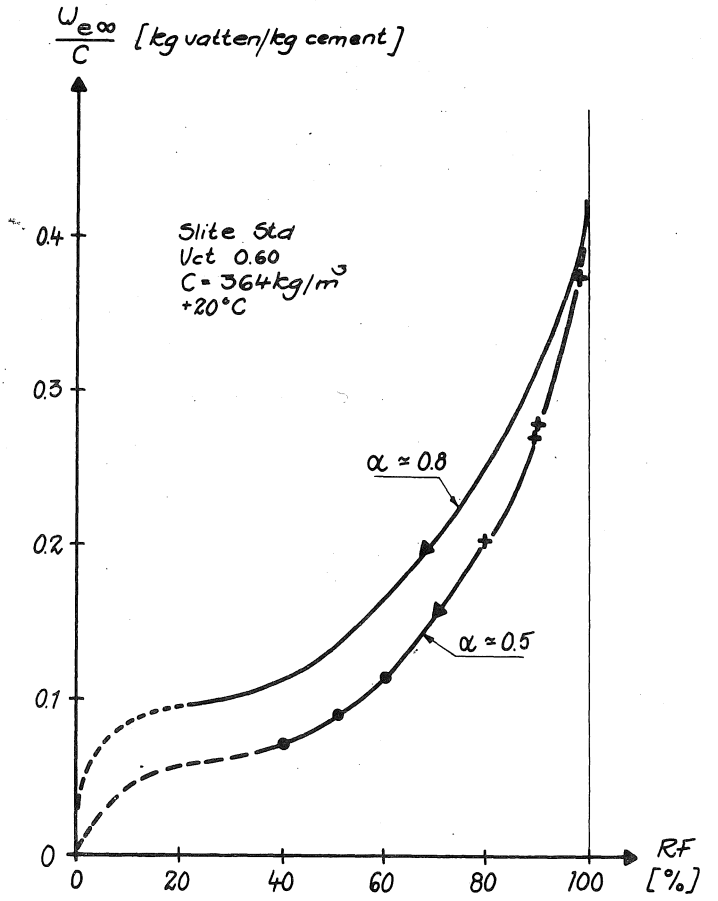


Fig. 5.15 Desorptionsisoterm vid hydratationsgrad 0.5 bestämd på cementbruk.

Desorption isotherm at degree of hydration 0.5 determined at cement mortar.

(● klimatrum; *climate room;* ✚ precisionsfuktkammare *precision climate chamber*)

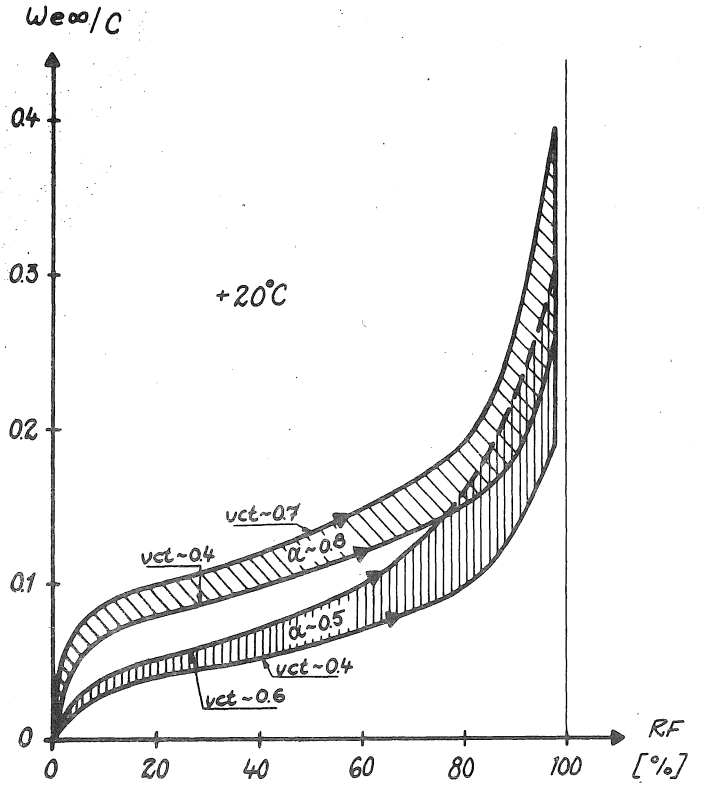


Fig. 5.16 Absorptionsisotermer för betong sammanställda från resultat av Ahlgren (1972).

Absorption isotherms for concrete put together from results by Ahlgren (1972).

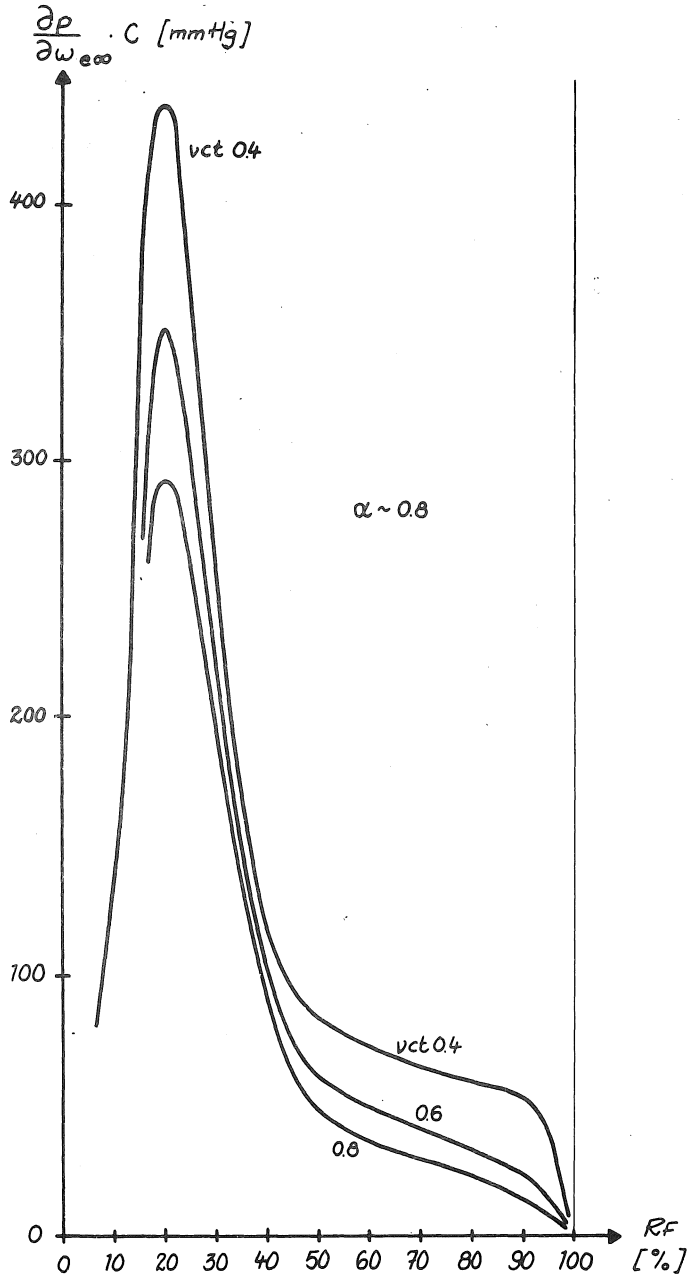


Fig. 5.17 Inversa fuktkapaciteten vid olika fuktigheter beräknad ur fig. 5.14

Inverse moisture capacity at different humidities calculated from fig. 5.14 .

5.4 Byggfukt - överskottsvatten

Många byggnadsmaterial innehåller stora mängder vatten då de byggts in i en konstruktion. Detta kan ha tillförts vid tillverkning av materialet, vid lagring på byggnadsplatsen eller under byggnadstiden. Sedan byggnaden färdigställts och tagits i bruk, strävar de olika byggnadsdelarna mot att komma i jämvikt med omgivande klimat, dvs det sker en uttorkning. Den mängd vatten som härvid kommer att torka bort benämnes byggfukt eller överskottsvatten.

För betong är mängden byggfukt ofta mycket stor redan vid tillverkningen då betong, vid blandning, består av vatten till ca 1/5 i volym räknat. En del av detta binds kemiskt till cementet, men en stor del av återstoden ger ett fuktinnehåll som vida överstiger jämviktsfukthalten och som därför bör torkas bort.

Mängden byggfukt i betong bestäms främst av betongkvaliteten, men även härdningsförhållandena och det framtida klimatet kring aktuell byggnadsdel är avgörande. Mängden byggfukt är t ex helt olika i en innervägg av betong och i ett betonggolv på mark då klimatbetingelserna avviker markant.

För en betong som membranhärdats, dvs härdat utan vattentillförsel, ges mängden byggfukt av

$$w_{byggfukt} = w_o - w_n - w_{e\infty}$$

där $w_{e\infty}$ är jämviktsfukthalten i aktuellt klimat.

Inverkan av betongkvalitet och klimat skall åskådliggöras med ett enkelt exempel. Vid blandning av betong bestäms vattenhalten i huvudsak av ballasten och är mindre beroende av betongkvaliteten. För exempelvis vattenhalten 180 l/m^3 blir sammansättningen för några vanliga kvaliteter ungefär den som anges i nedanstående tabell.

Betongkvalitet	Vattenhalt (kg/m^3)	Vct	Cementhalt (kg/m^3)
K150 II	180	0.86	209
K250 II	180	0.63	286
K400 I	180	0.51	353

Om hydratationsgraden antages till 0.8,kan den kemiskt bundna vattenmängden beräknas ur ekv (5.3) och jämviktsfukthalten i

olika klimat erhålles ur figur 5.14. Med ovanstående förutsättningar ges mängden byggfukt vid membranhärdning av nedanstående tabell.

Kvalitet	w_o	w_n	40 % RF $w_{e\infty}$	40 % RF byggfukt	90 % RF $w_{e\infty}$	90 % RF byggfukt
	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)
K150 II	180	42	25	113	92	46
K250 II	180	57	33	90	96	27
K400 I	180	71	39	70	99	10

Värdena i tabellen åskådliggöres i figur 5.18.

Det framgår klart att den högre betongkvaliteten, med ett större cementinnehåll, har avsevärt mindre mängd byggfukt. Särskilt då det kritiska fukttillståndet för golvlim, 90 % RF, skall underskridas är skillnaden speciellt stor. Jämfört med den högre betongkvaliteten K400, har K250 ca 3 gånger större mängd byggfukt och K150 ca 5 gånger så mycket. Det kommer att visa sig i det följande att dessa förhållanden är avgörande för erforderliga uttorkningstider.

Sker härdningen istället med konstant tillgång till vatten, kommer den högre betongkvaliteten att ta åt sig mest vatten. De streckade linjerna i fig. 5.18 visar att vid vattenlagring ökar mängden byggfukt för K 400 till nästan det tredubbla. K250 får ca 50% mer byggfukt och K 150 ca 20% mer. Det är alltså av största vikt att en högre betongkvalitet inte fukthärdas, utan en membranhärdning måste användas för att hålla mängden byggfukt nere.

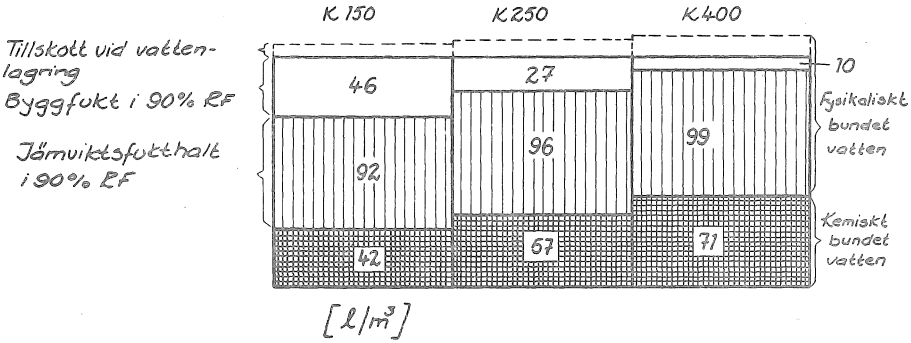


Fig. 5.18 Byggfukt i betong av olika kvalitéer. Exempel med w_0=180 l/m^3 och α=0.8, membranhärdade. Streckade linjer anger mängd byggfukt vid konstant vattenlagring.

Building moisture in concrete of different qualities. Example for w_o=180 l/m^3 and α=0.8, sealed cured. Line of short dashes gives the amount of building moisture at water curing.

5.5 Fukttransport - transportkoefficienter

På grund av de normalt stora mängderna byggfukt i betong och de oerhört långa tiderna som erfordras för att jämvikt med omgivningen skall erhållas, är det sällan tillräckligt att känna till enbart jämviktstillstånden för att bedöma en betongkonstruktions inverkan på omgivningen och omslutande byggnadsdelar. Tidsförloppet, dvs hur snabbt fukttillståndet förändras, är av väsentlig betydelse.
Detta innebär att man måste känna storleken av de transportkoefficienter som bestämmer fukttransporten och hur olika faktorer påverkar dessa. Det är inom detta område som den största bristen finns då det gäller fukt i betong. I litteraturen är ett antal beräkningsmodeller för fukttransport i betong redovisade, men mycket lite har hittills gjorts då det gäller de materialdata som erfordras för att beräkningsmetoderna skall bli praktiskt användbara. Inom detta projekt har emellertid en stor del av arbetet koncentrerats på att råda bot på denna brist.

Fukttransport i betong, som i andra porösa material, sker som huvudsakligen ångdiffusion i luftfyllda porer med ångtrycket eller ånghalten som drivande gradient och som kapillärsugning i vattenfyllda porer med porvattentrycket som drivkraft. Då det, p g a porstrukturen, så gott som alltid är en kombination av dessa båda, används vanligen endast en gradient för att beskriva fukttransport under isoterma förhållanden, då ångtransport kan uttryckas i samma termer som vätsketransport och tvärtom. Transportkoefficienterna kan nämligen enkelt omräknas från det ena beskrivningssättet till det andra, se tabell 3.2.
Då man f n inte kan mäta porvattentryck och inte har jämviktsfuktkurvor uttryckta i detta, beskrives kapillärtransport vanligen med fukthalten w_e som drivkraft. I en dimension fås då

$$F = - D \frac{\partial w_e}{\partial x} \quad (kg/m^2 \cdot s) \qquad (5.8)$$

där transportkoefficienten D (m^2/s) benämnes diffusivitet. Detta beskrivningssätt omfattar då också ångtransport. Detta sätt att uttrycka fukttransport har i huvudsak två begränsningar. Det kan för det första bara användas vid fukttransport som antingen beskriver uttorkning eller uppfuktning och inte en kombination. Är en del av konstruktionen utsatt för uppfuktning medan resten torkar, t ex vid applicering av ett tätt ytskikt, duger inte

fukthalten som gradient då fukt mycket välkan transporteras från lägre till högre fukthalt under ett hysteresisförlopp. För det andra kan det vid temperaturgradient i betongen bli så att ångtransport och kapillärsugning går i motsatta riktningar och någon form av uppdelning mellan dessa är nödvändig.

Det är emellertid endast i mycket speciella fall som man har några större temperaturskillnader inom en betongkonstruktion.

Diffusiviteten D enligt ekv (5.8) är inte en konstant utan beror av en mängd faktorer, främst fukttillstånd och betongkvalitet. I litteraturen finns det för några enstaka kvaliteter beskrivet hur diffusiviteten kan tänkas variera med fukthalten men exemplen är få och ofta motsägande. I figur 5.19 visas exempel på hur diffusiviteten varierar med fukttillståndet enligt olika författare. Dessa gäller emellertid för helt olika betongkvaliteter, ibland bara cementpasta och är bestämda på skilda sätt.

Pihlajavaara (1963) har uppskattat diffusiviteten ur uttorkningsförsök på cementbruk med vct 0.56 och "stenmax" 1.4. Resultatet visas i figur 5.19a för två olika torkklimat.

Pihlajavaara (1965) har genom att mäta fuktfördelningen vid olika tidpunkter beräknat diffusivitetens beroende av fukthalten, se fig 5.19b. Resultatet gäller för membranhärdat cementbruk varför maximal fukthalt är betydligt lägre än i figur 5.19a. Den nedåtgående kurvgrenen vid höga fukthalter i figur 5.19a har därför inte erhållits.

Bray (1969) har utfört diffusionsmätningar på cementpasta med låga vattencementtal och härdade vid mycket hög temperatur, varvid porstorleksfördelningen är annorlunda än för härdning vid normala temperaturer. Resultaten visas principiellt i fig 5.19c och gäller för betydligt lägre fukttillstånd än tidigare visade. De indikerar ett maximum för diffusiviteten vid låga fukthalter.

Bazant & Najjar (1972) har anpassat en beräkningsmodell med vissa parametrar till några få mätningar av relativa fuktighetens fördelning i betong under ett uttorkningsförlopp. Bäst anpassning erhölls för diffusivitetsvariation enligt figur 5.19d,

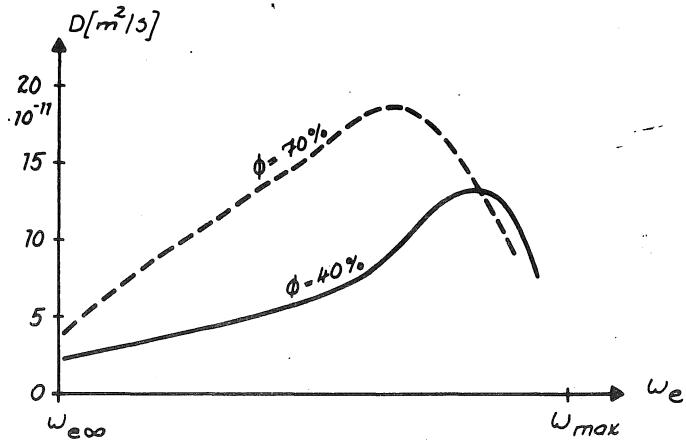


Fig. 5.19a Diffusivitet enligt Pihlajavaara (1963). Cementbruk vct 0.56, 28 dygns vattenlagring. Torkklimat 40 och 70 % RF.

Diffusivity acc. to Pihlajavaara (1963). Cement mortar w_o/C= 0.56, 28days water curing. Drying climate 40 & 70% RH.

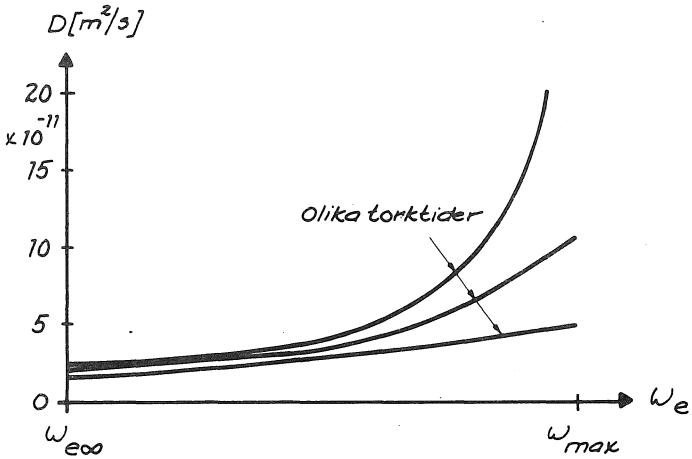


Fig. 5.19b Diffusivitet enligt Pihlajavaara (1965). Cementbruk 71/2 månads membranhärdning. Torkklimat 40 och 70% RF.

Diffusivity acc. to Pihlajavaara (1965). Cement mortar, 7 1/2 months of sealed curing. Drying climate 40 & 70% RH.

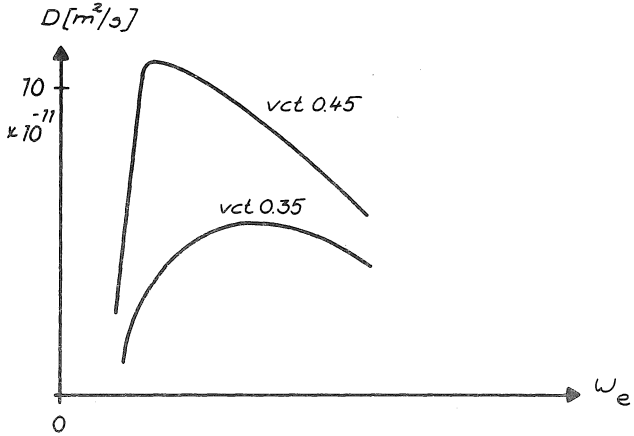


Fig. 5.19c Diffusivitetens principiella variation med fukthalten enligt Bray (1969). Cementpasta med låga vct. Högtemperaturhärdade.

Principal variation of the diffusivity by moisture content acc. to Bray (1969). Cement paste with low w_o/C. Cured at high temperature.

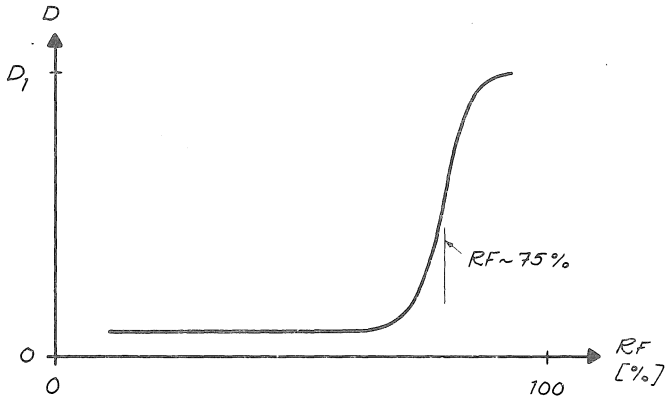


Fig. 5.19d Diffusivitetens beroende av relativa fuktigheten enligt Bazant & Najjar (1972).

Variation of diffusivity by relative humidity acc. to Bazant & Najjar (1972).

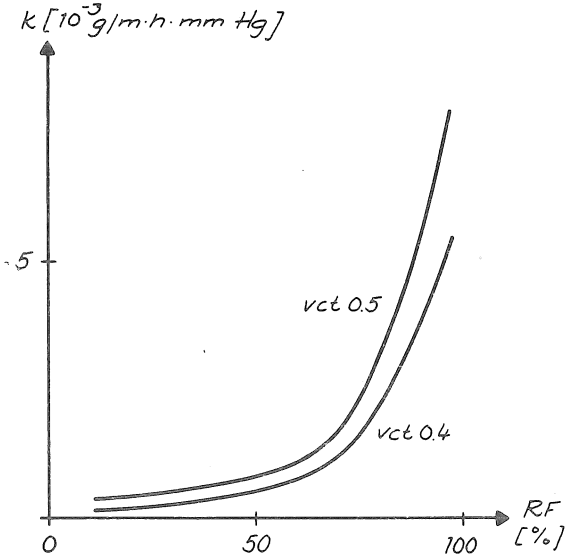


Fig. 5.19e Ångpermeabilitetens variation med relativa fuktigheten enligt Sørensen & Radjy (1976). Cementpasta, torkad och återuppfuktad.

Variation of water vapour permeability by relative humidity acc. to Sørensen & Radjy (1976). Cement paste, dried and rewetted.

där diffusiviteten ökar kraftigt vid fuktigheter omkring 75 % RF.

Sørensen & Radjy (1976) har med diffusionsmätningar bestämt ångpermeabiliteten för cementpasta. Exempel på resultaten visas i figur 5.19e. En jämförelse med ovan visade diffusiviteter är svår då jämviktsfuktkurvan är okänd.

Nielsen (1976) har gjort mätningar med gammastrålning på betong och erhållit diffusiviteter som har ett tidsberoende liknande det som Pihlajavaara visar.

Ovan visade exempel, som representerar huvuddelen av vad som finns i litteraturen, ger en grov uppfattning om hur diffusiviteten för betong beror av fukttillståndet. För en praktisk tillämpning erfordras emllertid mätningar på normalt använda betongkvaliteter och uppgifter om hur olika faktorer i betongsammansättningen inverkar. Ett stort arbete inom detta projekt har lagts ned på att erhålla en del av dessa kunskaper.

Att göra direkta mätningar av diffusivitetens beroende av alla väsentliga variabler hos betong är naturligtvis orimligt. För att med rimliga resurser vinna så mycket kunskap som möjligt, har två typer av mätningar utförts där de viktigaste variablerna studerats mera noggrannt med diffusionsmätningar medan övriga faktorers inverkan uppskattats på ett enklare sätt medelst ett stort antal uttorkningsförsök.

5.5.1 Diffusionsmätningar

Med hjälp av ett speciellt sätt att utföra diffusionsmätningar har fukttransportkoefficientens beroende av fukttillståndet bestämts för cementbruk med några olika vattencementtal. Härvid har den vanliga skålmetoden använts, men denna har utnyttjats på ett speciellt sätt som anges av bl a Bazant & Najjar (1972).

Fukttransport genom en skiva av ett material åstadkommes genom att en skål, med materialet som lock, innehållande en mättad saltlösning som ger ett visst ångtryck p_1 placeras i ett klimatrum med ångtrycket p_2, se fig 5.20. Fuktflödet genom skivan bestämmes genom vägning och först då flödet inte ändras med tiden, fås det stationära flödet. Genom en sådan mätning fås en uppfattning om medelfukttransportkoefficienten för fuktområdet mellan de båda klimaten på ömse sidor om skivan. Genom en serie mätningar kan emellertid mycket mer information erhållas.

Om fuktflödet genom en skiva enligt fig 5.21 beskrives med ekv (3.11)

$$F = - k \cdot \frac{\partial p}{\partial x}$$

fås om denna intergreras mellan x=0 och x=d

$$F \cdot d = \int_{x=0}^{x=d} - k(p) \frac{\partial p}{\partial x} \cdot dx$$

Deriveras detta med avseende på ångtrycket p_1 fås efter förenkling

$$d \cdot \left(\frac{\partial F}{\partial p_1}\right)_{p_1=p_{1i}} = (k)_{p_1=p_{1i}} \qquad (5.9)$$

Härledningen av ekv. (5.9) återges i appendix I.

Detta uttryck innebär att genom en serie mätningar med konstant klimat på ena sidan och successivt ökande ångtryck, p_{1i}, på den andra, kan ångpermeabilitetens fuktberoende mätas i diskreta punkter och inte bara medelvärdet i ett fuktighetsintervall.

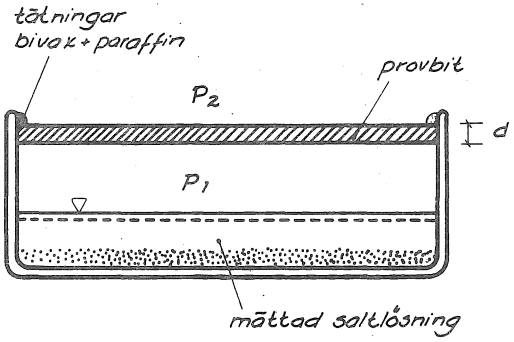


Fig. 5.20 Princip för diffusionsmätning med skålmetod.

Principle of diffusion measurement with bowl method.

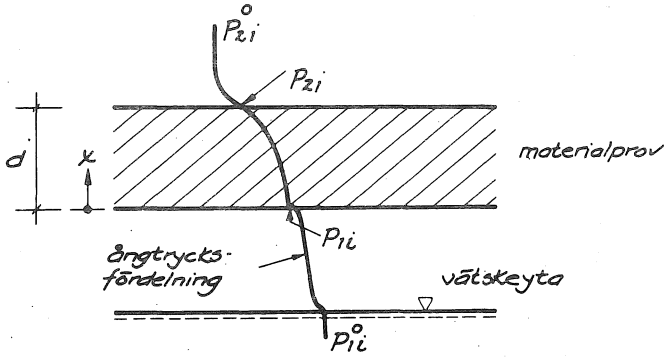


Fig. 5.21 Detalj av fig. 5.20 med principiell ångtrycksfördelning för mätning nr i.

Detail of fig 5.20 with principal distribution of vapour pressure for measurement No. i.

Som framgår av fig 5.21 blir ångtrycksskillnaden över materialprovet något mindre än vad de omgivande klimaten motsvarar, p g a övergångsmotstånd vid de olika ytorna samt ångmotstånd hos luftskiktet mellan vätskeyta och prov. Hänsyn till detta har tagits vid beräkningen av ångtrycken vid respektive materialyta.

I fig 5.22 och 5.23 visas ett exempel på mätresultat och utvärdering av transportkoefficienten för ett cementbruk med vct 0.60.

Diffusionsmätning på sätt som ovan beskrivits, har utförts på tre cementbruk enligt nedanstående sammansättning.

vct	C (kg/m^3)	Anm
0.4	600	ballast med
0.6	400	max "stenstorlek"
0.8	300	1 mm

Resultaten av dessa mätningar återges i figur 5.24. Eftersom kapillärporerna är mindre vid lågt vct, uppkommer en kontinuerlig vätskefas vid lägre RF. Fukttransporten mellan kapillärporerna måste emellertid gå genom trånga gelporer, varför ångpermeabiliteten fortfarande är relativt låg även vid lägre RF. För högre vct är kommunikationen mellan kapillärporerna bättre. Detta medför naturligtvis att ångpermeabiliteten är högre vid låga RF, då fukttransporten i huvudsak sker i ångfas. Vid högre RF blir kapillärtransporten dominerande och permeabiliteten ökar kraftigt sedan en kontinuerlig kapillärfas väl bildats.

Vid beskrivning av fukttransport med gradient i fukthalt enligt ekv (3.12) fås diffusivitetens fuktberoende genom att ångpermeabiliteterna enligt fig 5.24 divideras med fuktkapaciteten i varje punkt, se tabell 3.2. Genom att utnyttja fuktkapaciteterna i fig 5.17 fås då diffusivitetens fuktberoende, för de använda cementbruken, enligt fig 5.25. Det karakteristiska för dessa är ett maximum vid ca 20 % RF beroende på desorptionsisotermens utseende, låga diffusiviteter i ett mellanområde samt ett nytt maximum vid höga RF, mer markerat vid höga vct.

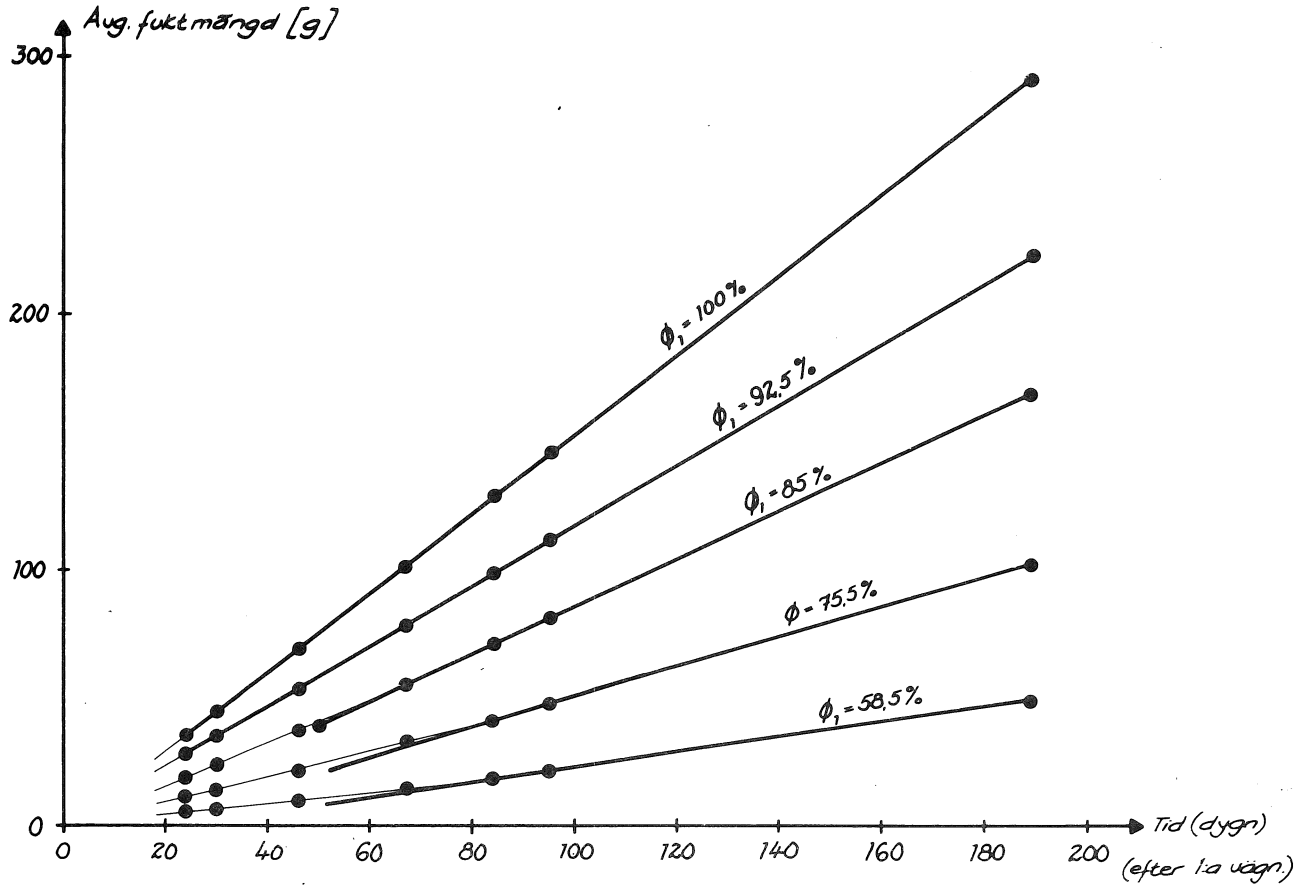


Fig. 5.22 Exempel på resultat av diffusionsmätningar.
Example of results from diffusion measurements.

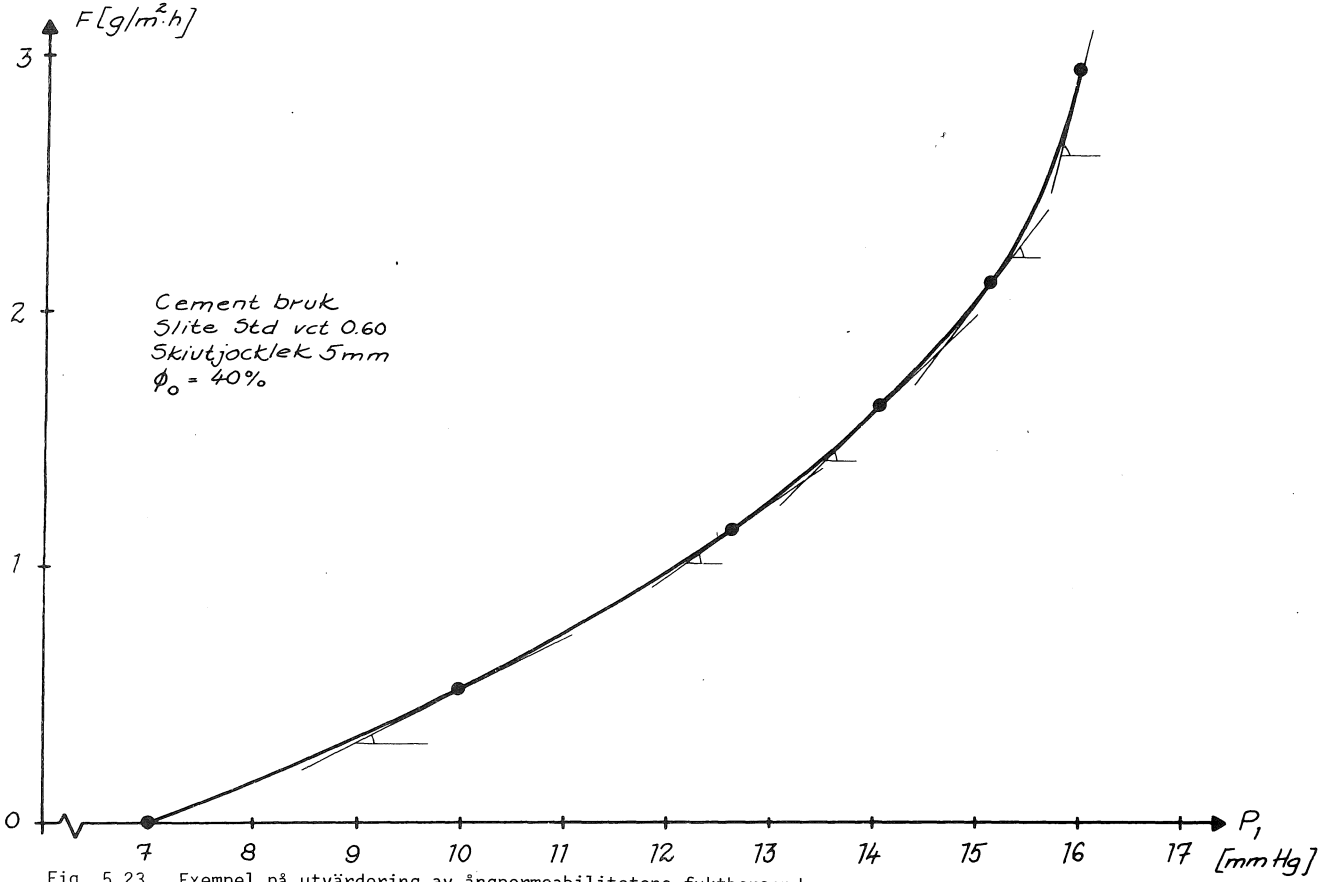


Fig. 5.23 Exempel på utvärdering av ångpermeabilitetens fuktberoende.

Example of determining the variation of vapour permeability by vapour pressure.

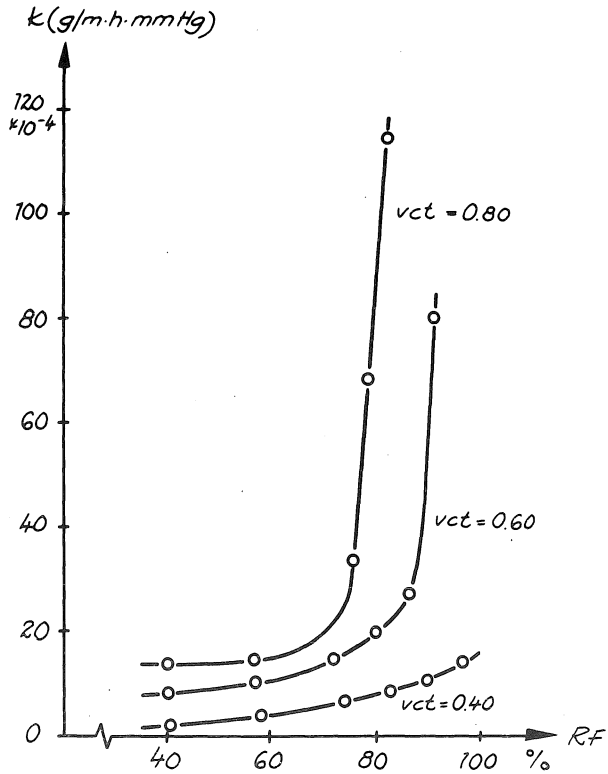


Fig. 5.24 Ångpermeabilitetens fuktberoende för cementbruk med varierande vattencementtal.
Variation of vapour permeability by humidity for cement mortar of different water-cement ratios.

Med den använda metoden har diffusiviteten för höga RF för vattencementtalen 0.6 och 0.8 inte kunnat bestämmas. För detta erfordras en helt annan mätteknik, som inte varit tillgänglig i detta projekt. Det finns idag mätmetoder, se t ex Nielsen (1976), som kan ge en uppfattning om diffusiviteten vid höga fuktigheter.

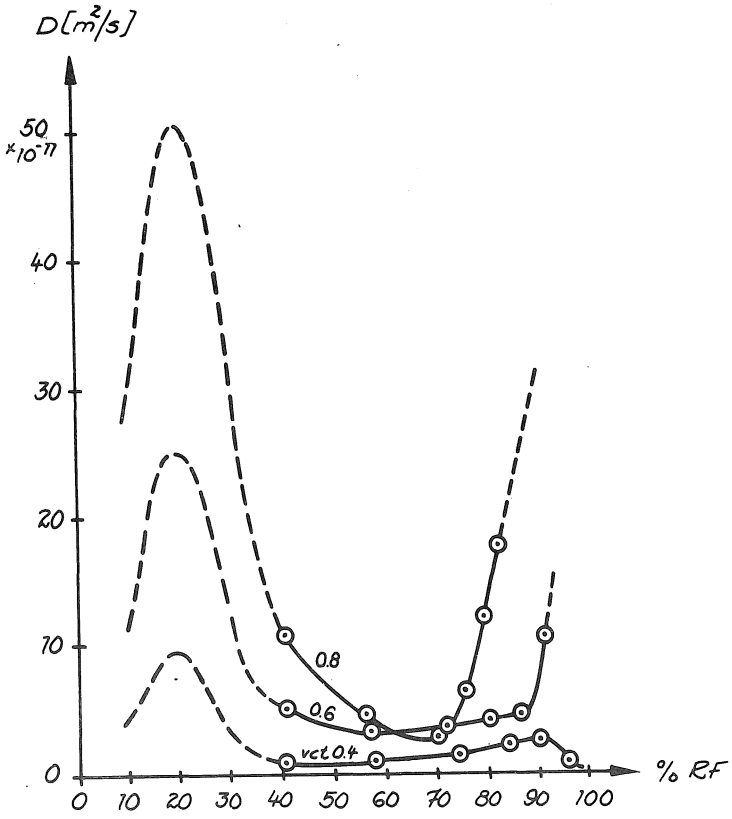


Fig. 5.25 Diffusivitetens fuktberoende för cementbruk med varierande vattencementtal.

Variation of diffusivity by humidity for cement mortar of different water-cement ratios.

5.5.2 Uttorkningsförsök

För att bestämma inverkan av olika faktorer i betongs sammansättning på diffusiviteten, har en stor serie uttorkningsförsök utförts.

Uttorkningsförloppet för en betong av en viss sammansättning, och därmed en viss diffusivitet, kan principiellt beskrivas som i figur 5.26 med Fouriertalet

$$F_o = \frac{D \cdot t}{L^2}$$

som parameter, se bl a Pihlajavaara (1963). Diffusivitetskoefficienten D står för diffusiviteten vid en viss fuktighet, t är tiden och L är en karakteristiskt dimension som vid ensidig uttorkning av en platta motsvarar plattjockleken.

Om betongsammansättningen ändras på ett sådant sätt att diffusivitetens fuktberoende är detsamma, relativt sett, men ligger på en annan absolutnivå, kan uttorkningsförloppet för denna betong även beskrivas med fig 5.26 om diffusivitetskoefficienten D ändras så att den motsvarar förändringen i absolutnivå hos diffusiviteten. Detta innebär att om koefficienten D_1 för en sammansättning är känd, kan motsvarande koefficient D_2 för en annan sammansättning bestämmas med hjälp av ett uttorkningsförsök genom att de båda uttorkningskurvorna anpassas till varandra, dvs så att Fouriertalen blir lika då samma uttorkningsgrad har erhållits. Koefficienten D_2 fås sedan ur

$$D_2 = D_1 \cdot \frac{t_1^x}{t_2^x}$$

där t_1^x och t_2^x är respektive uttorkningstid för att nå samma uttorkningsgrad x. Förfarandet åskådliggörs i fig. 5.27. Teoretiskt kan vilken uttorkningsgrad som helst användas, förslagsvis då hälften av överskottsvattnet torkat bort. Förfarandet vid betong och cementbruk kompliceras emellertid av att samtidigt som vikten minskar till följd av fuktavgång, fås en viktökning p g a karbonatisering. Av denna anledning har tiderna för att 1/10 (x=0.1) resp 1/4 av överskottsvattnet skall ha torkat bort använts vid bestämning av inverkan av olika sammansättningar. Vid dessa korta torktider har karbonatiseringen mindre inverkan medan vid längre tider, t ex halveringstiden, karbonatiseringen ger ett missvisande resultat för små provkroppar.

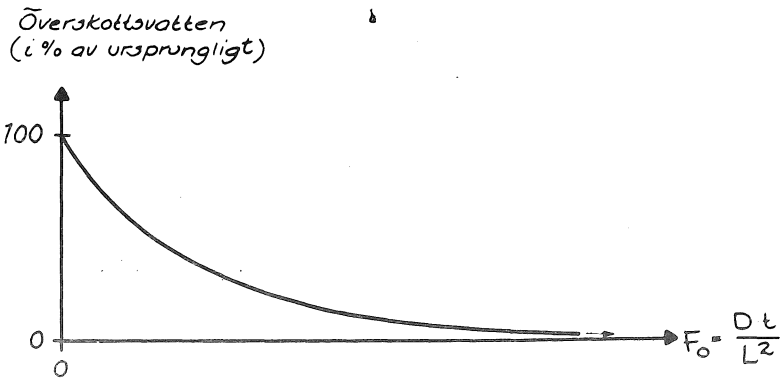


Fig. 5.26 Principiellt uttorkningsförlopp för betong av viss sammansättning.

Principal drying course for concrete of a certain composition.

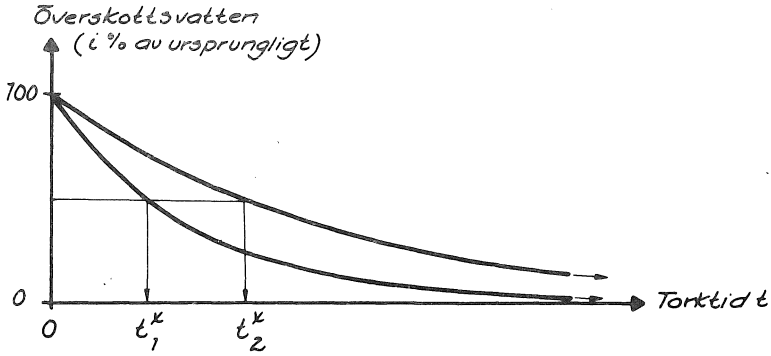


Fig. 5.27 Uttorkningsförlopp för två olika sammansättningar som funktion av torktid.

Drying course for two different compositions as a function of drying time.

En stor försöksserie med ca 300 provkroppar har utförts med ett "standardcementbruk" som utgångspunkt. Sammansättningen hos detta ges av nedanstående tabell och i fig 5.28 återges siktkurvan för ballasten.

Vattenhalt w_o	218 kg/m^3	vct 0.60
Cementhalt C	364 kg/m^3	
Lufthalt l_o	45-52 l/m^3	
Ballasthalt B	1600 kg/m^3	

Provkropparna har gjutits i en batteriform,se fig 5.29, av plexiglas, sparsamt oljad, och vibrerats på vibratorbord.
Avformningen skedde efter 1 dygn och provkropparna lagrades därefter 27 dygn vid +20°C i normalfallet.
Membranhärdning skedde i väl tillslutna, dubbla plastpåsar och för vattenlagring användes kalkvatten. Före torkstart utfördes en kantförsegling med bivax och paraffin samt en ring av gummislang som mekaniskt skydd. Torkförsöken ägde rum i klimatrum vid +20°C ($\pm$1-2^{o}C) och 40 % RF ($\pm$2 %). Viktändringen hos provkropparna bestämdes vid successivt ökande tidsintervall, som kortast $\sim$ 20 min vid torkstart och vägningarna pågick under mer än ett år.

Utgående från standardcementbruket varierades olika faktorer i sammansättningen och nedan redovisas resultaten av de viktigaste. Olika faktorers inverkan relateras hela tiden till standardcementbruket, vars diffusionskoefficient nedan betecknas D_o.
Då det nedan t ex gäller att D/D_o=2 innebär detta att för denna sammansättning sker uttorkningen dubbelt så snabbt och diffusivitetens absolutnivå är dubbelt så stor.

Vattencementtal. Inverkan av vct återges i fig 5.30. Vct har avgörande inverkan på hur snabbt fukttransporten sker. Inte någon faktor som här undersökts har tillnärmelsevis lika stor betydelse. I figuren observeras att något olika resultat erhålles beroende på vilken torktid som användes vid beräkningen. Detta måste tolkas så att karbonatiseringen har stor inverkan vid höga vct även vid så korta torktider som motsvarar att bara 1/4 av överskottsvattnet avgått. Dessutom är diffusivitetens fuktberoende olika för olika vct, vilket innebär att torkförloppen skiljer sig åt, varför anpassning rent teoretiskt bara kan fås i en punkt åt gången och då ge olika resultat.

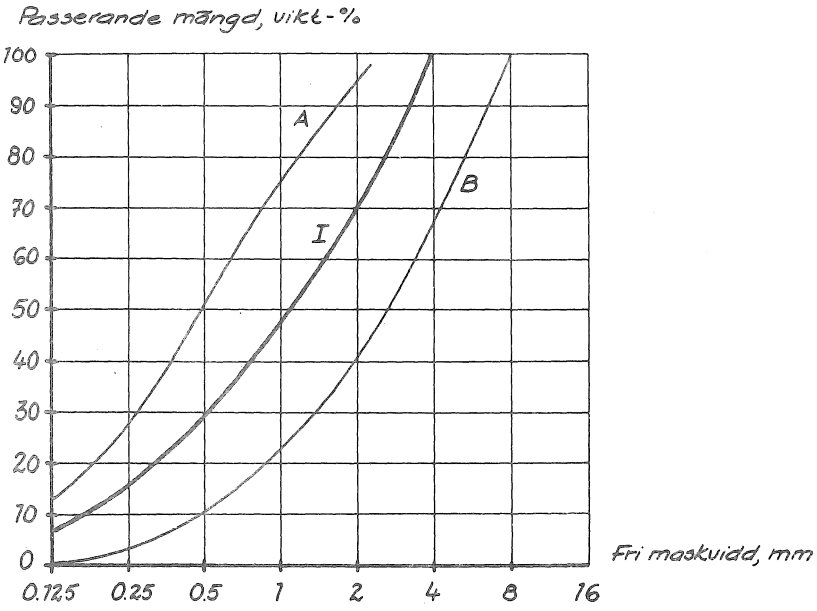


Fig. 5.28 Siktkurva för ballast till "standardcementbruk".

Gradation curve for aggregate to "standard cement mortar".

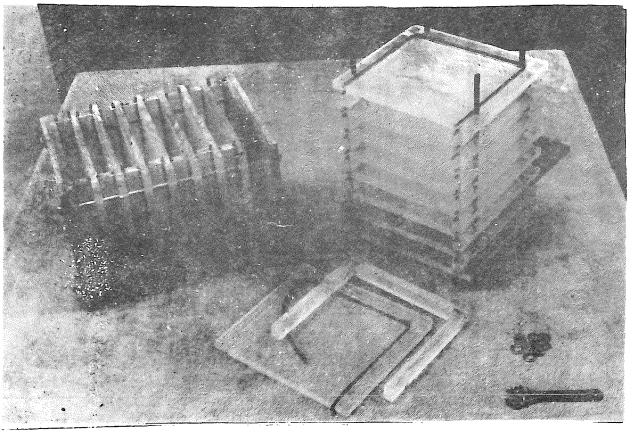


Fig. 5.29 Batteriform av plexiglas med o-ringstätning

Battery mould of PMMA with O-ring packing.

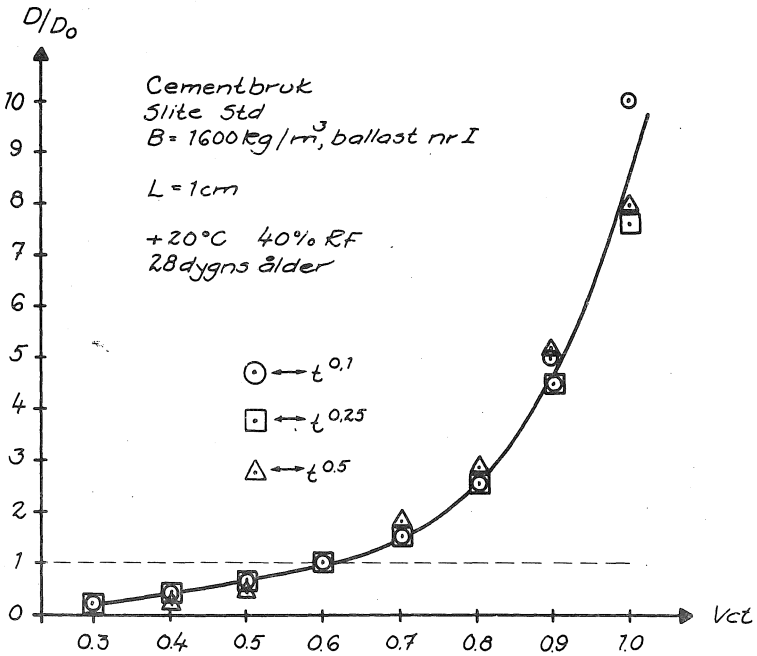


Fig. 5.30 Inverkan av vattencementtal på diffusiviteten (t^x = torktid för att andelen x av överskottsvattnet skall ha torkat bort). Varje punkt motsvarar medelvärdet av fyra provkroppar.

Influence of water-cement ratio on diffusivity (t^x=drying time for a part x of the excess of water to dry). Each point represents the mean value of four specimens.

Lufthalt. Lufthalten i cementbruk har visat sig ha mycket stort inflytande på hur snabbt uttorkningen sker, se fig 5.31.
I många fall har inverkan av andra faktorer i sammansättningen dolts i försöksresultaten av variationer i lufthalt och då andra faktorers inverkan visas i det följande, har en korrektion för lufthalt varit nödvändig.

En enkel kompositmodell kan förklara lufthaltens inverkan.
En matematisk modell för ångpermeabilitet k i cementpasta får följande utseende, Hillerborg (1974)

$$k^n = \beta k_1^n + (1-\beta)k_2^n = k_2^n(\beta(\frac{k_1}{k_2})^n + 1 - \beta)$$

där k = ångpermeabilitet för pasta
k_1, k_2 = dito för luft resp för pasta ekkl luft
β = lufthalten i pastan
n = koefficient, $-1 < n < 0$, i detta fall

Eftersom luftens ångpermeabilitet är avsevärt större än pastans, ca 100 ggr så stor, förenklas uttrycket ovan till approximativt

$$\frac{k}{k_2} = (\beta \cdot 100^n + 1 - \beta)^{1/n} = [1-\beta(1-100^n)]^{1/n}$$

Vid övergång till beskrivning av lufthaltens inverkan på diffusiviteten gäller enligt tabell 3.2

$$\frac{D}{D_2} = \frac{k}{k_2} \cdot \frac{\partial w_2}{\partial w} = \frac{k}{k_2} \cdot \frac{1}{1-\beta}$$

eftersom fukthalten w är mindre än fukthalten w_2 i pasta utan luft, vid samma fukttillstånd.

Diffusivitetens beroende av lufthalten blir därför

$$D = D_2 \frac{[1-\beta(1-100^n)]^{1/n}}{1-\beta} \qquad (5.10)$$

I fig 5.31 har denna modell inritats med n valt till -1/3
Överensstämmelsen är som synes relativt god och luftens inverkan i ett cementbruk kan därför tolkas som en ren volymeffekt där fukttransporten söker sig fram via luftblåsorna där motståndet är avsevärt mycket mindre än i övriga pastan.

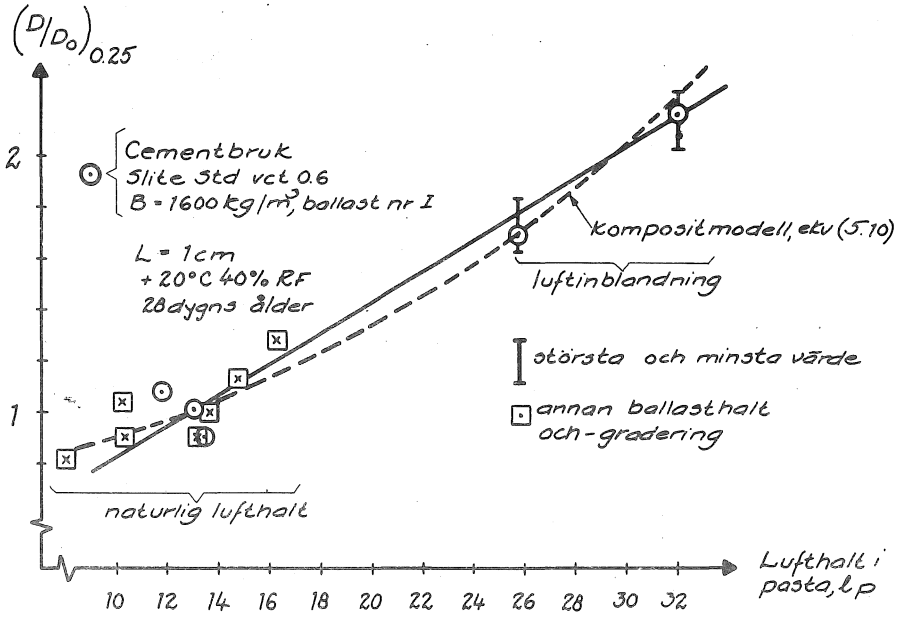


Fig. 5.31 Inverkan på diffusiviteten av cementpastans lufthalt. Varje punkt motsvarar medelvärdet av fyra provkroppar.

Influence of air-content of the paste on the diffusivity. Each point represents the mean value of four specimens.

Ballasthalt. En försöksserie har utförts där proportionerna mellan vatten+cement och ballast har varierats med konstant vatten-cementtal.

Resultatet åskådliggörs i fig 5.32 både före och efter korrektion för lufthaltsskillnader. En högre ballasthalt borde ge en volymeffekt på samma sätt som lufthalten, så att fukttransporten blir långsammare vid ökande ballasthalt. En kompositbetraktelse skulle ge en minskning av diffusiviteten med ca 5 % då ballasthalten ökar från 1400 till 1750 kg/m^3. Som framgår av resultatet, är en sådan kompositbetraktelse orimlig i detta fall. Troligtvis ger en ökande ballasthalt istället upphov till mikrosprickor och separationsfickor så att fukttransportförmågan istället ökar. I närheten av maximalt möjlig ballasthalt, bestämd av ballastens gradering, ökar diffusiviteten drastiskt då utfyllnaden av utrymmet mellan ballastkornen försvåras, med krympsprickor och separationsfickor som följd.

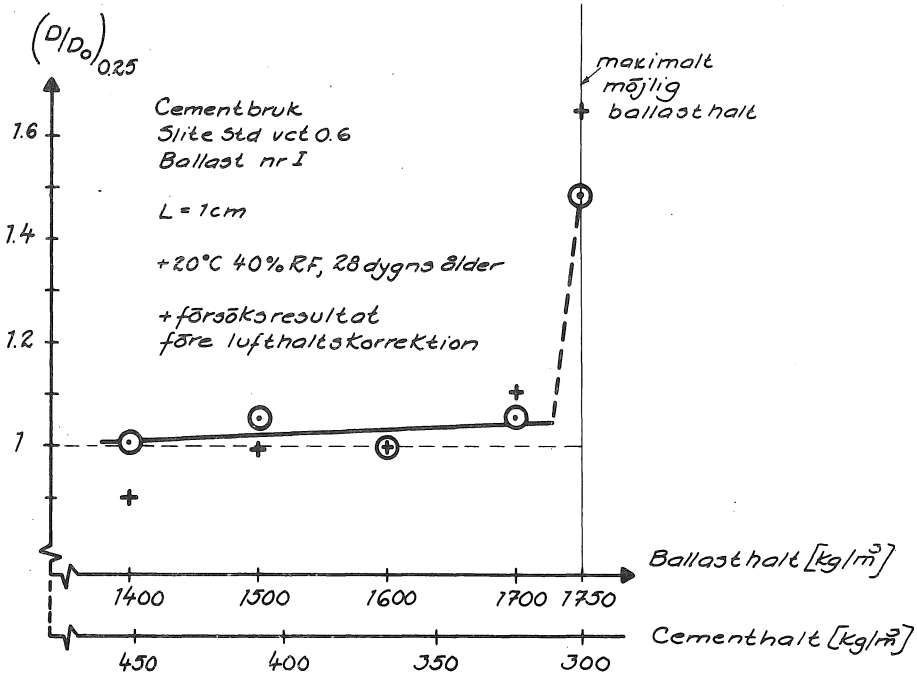


Fig. 5.32 Ballasthaltens inverkan på diffusiviteten. Varje punkt motsvarar medelvärdet av fyra provkroppar.

Influence of aggregate proportion on the diffusivity. Each point represents the mean value of four specimens.

Fillerhalt. En försöksserie utfördes där ballast nr I förändras under 0,5 mm,så att andelen som passerar sikt 0,75 mm varierades mellan 4 och 25 % jämfört med 10 % för ballast nr I. Resultatet åskådliggöres i fig 5.33 Inverkan är så liten att den ligger i närheten av felmarginalen, varför en analys är orealistisk.

Finhetsmodul. Vid försök med varierande finhetsmodul har ballast med siktkurva så nära gränskurva A resp B använts förutom ballast nr I, jfr fig 5.28. Dessutom har samma bruk som använts för diffusionsmätningarna ingått i försöksserien. Resultatet visas i fig 5.34. Diffusiviteten ökar med ökande andel grövre ballastkorn. Bruket som använts vid diffusionsmätningar har en diffusivitet som är ca 60 % av standardcementbruket som är utgångspunkt för jämförelser av alla andra faktorer.

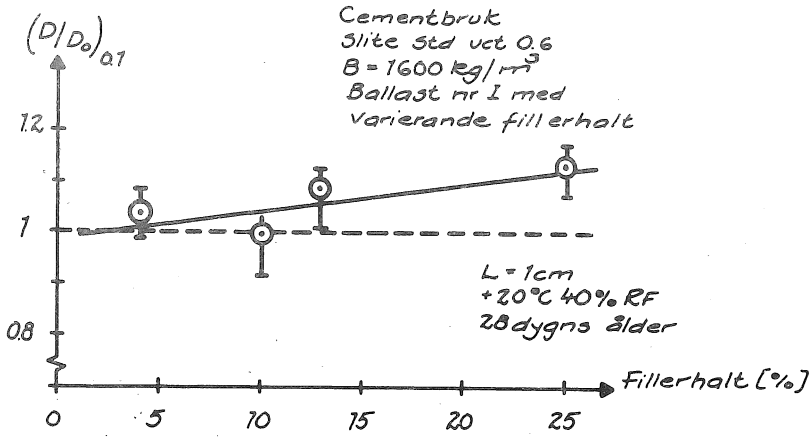


Fig. 5.33 Fillerhaltens inverkan på diffusiviteten för cementbruk. Varje punkt motsvarar medelvärdet av fyra provkroppar. Korrektion för lufthalt är utförd.

Influence of filler proportion on the diffusivity for cement mortar. Each point represents the mean value of four specimens. Correction for air-content is made.

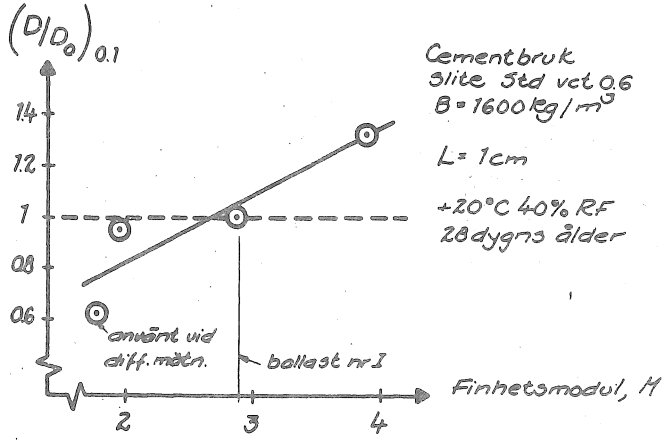


Fig. 5.34 Finhetsmodulens inverkan på diffusiviteten för cementbruk. Varje punkt motsvarar medelvärdet av fyra provkroppar.

Influence of modulus of fineness on the diffusivity for cement mortar. Mean values of four specimens.

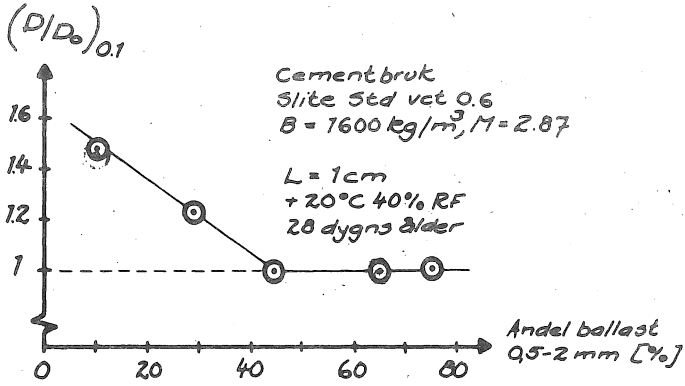


Fig. 5.35 Ballastgraderingens inverkan på diffusiviteten vid konstant finhetsmodul. Varje punkt motsvarar medelvärdet av fyra provkroppar.

Influence of aggregate grading on the diffusivity at constant modulus of fineness. Mean values of four specimens.

Ballastgradering. En försöksserie har utförts där ballastgraderingen varierades på fem olika sätt mellan gränskurva A och B, men så att finhetsmodulen var densamma. Resultatet åskådliggörs i fig 5.35 där andelen ballast mellan 0.5 och 2 mm användes som parameter. Ballast med ett partikelsprång i intervallet 0.5-2 mm har en markant högre diffusivitet. Mellan de andra är skillnaden obetydlig.

Stenhalt. För att utröna skillnaden i diffusivitet mellan cementbruk och betong har en försöksserie utförts där ballast nr I kompletterats med varierande andelar makadam 4-8 mm. Provkroppsstorleken ökades härvid till 2L=4 cm. Resultatet, som åskådliggörs i fig 5.36, visar en successivt kraftigt ökande diffusivitet med ökande stenhalt.

Trolig orsak till detta är den med ökande stenhalt större förekomsten av krympsprickor och separationsfickor under makadamkornen.

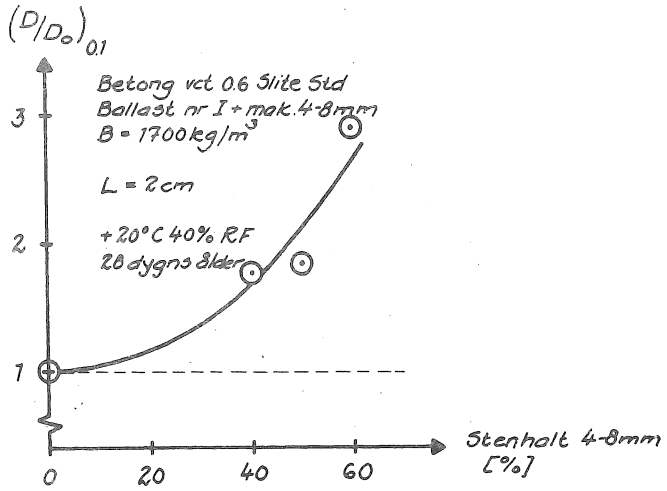


Fig. 5.36 Stenhaltens inverkan på diffusiviteten. Varje punkt motsvarar medelvärdet av två provkroppar. Värdena är korrigerade till samma pastalufthalt, l_p = 10 %.

Influence of stone proportion on the diffusivity. Mean values for two specimens. Values corrected to air-content of paste, l_p=10%.

Stenmax. En försöksserie utfördes med ballast nr I och stenhalt 50 % makadam med olika maximal stenstorlek upp till 32 mm. Provkroppsstorleken ökades till 2L=8 cm. Resultatet framgår fig 5.37, som visar en kraftigt ökande diffusivitet då stenmax ökar från 4 till 8 mm, medan ökningen vid större stenmax är avsevärt mindre.

Ålder. En serie med cementbruk med olika ålder vid torkstart har utförts för att utröna hydratationsgradens inverkan. Eftersom uttorkningen i början av förloppet går snabbt, kommer hydratationen efter kort tid att så gott som avstanna och hydratationsgraden hinner ändras mycket lite under ett torkförsök. Vid låg ålder kommer randvillkoren att vara annorlunda och den ovan använda utvärderingsmetodiken är därför tveksam. Man bör emellertid få en rimlig uppfattning om hur åldern inverkar på diffusiviteten. Resultatet visas i fig 5.38, där som parameter har använts åldern då 1/4 av överskottsvattnet avgått, vilken kan anses ligga nära "medelåldern" för cementbruket under torkningen.

Som väntat sjunker diffusiviteten oerhört efter hand som hydratationen fortskrider och cementpastan blir tätare och tätare. Resultatet är troligtvis en underskattning av diffusiviteten vid mycket låg ålder, då den fukttransport som äger rum under en uttorkning, här begränsas av avdunstningen från ytan.

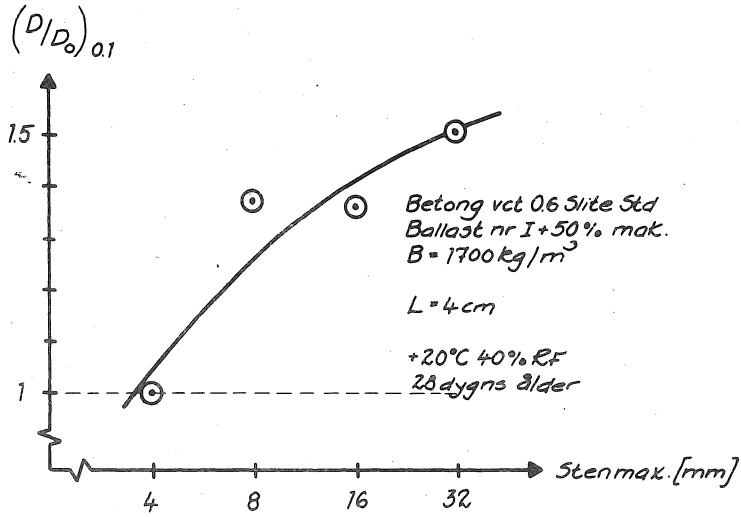


Fig. 5.37 Maximala stenstorlekens inverkan på diffusiviteten för betong. Varje punkt representerar en provkropp. Korrektion för lufthalt utförd.

Influence of maximum stone size on the diffusivity for concrete. Each point represents one specimen. Correction for air-content is made.

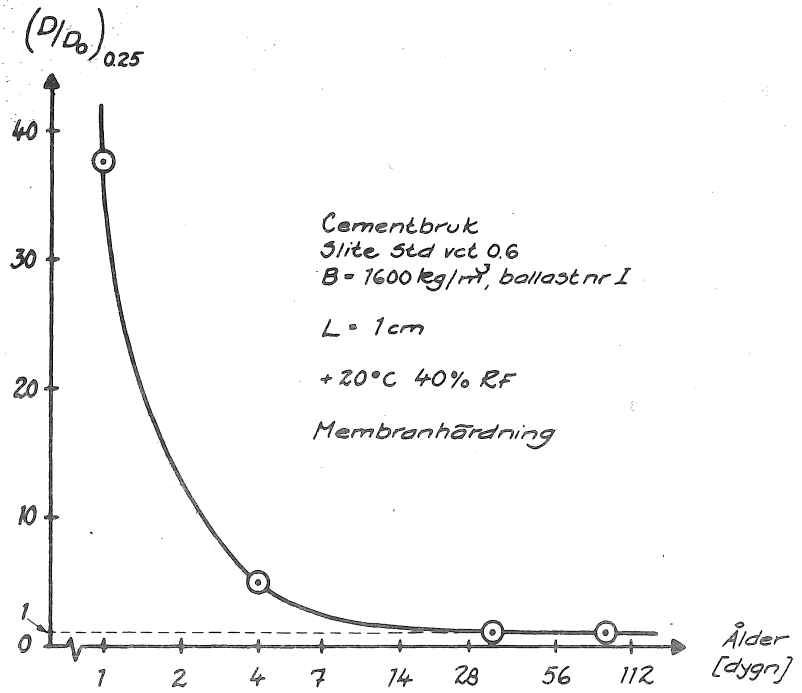


Fig. 5.38 Ålderns inverkan på diffusiviteten. Varje punkt motsvarar medelvärdet av fyra provkroppar.

Influence of age on the diffusivity. Mean values of four specimens.

6. YTSKIKT UR FUKTSYNPUNKT

Ytskikt som kombineras med fuktig betong innebär i allmänhet inga större risker för fuktskador. Det är emellertid i de fall som ytskikten är mycket ångtäta som problem uppstår. Speciellt då det gäller betonggolv finns det en stor marknad av plastbaserade material, som mattor och plattor, som har mycket liten ånggenomsläpplighet och därför erfordrar ett väl uttorkat underlag och/eller ett skydd mot fuktbelastning av t ex en fuktspärr.

I detta kapitel skall mätningar av ånggenomsläpplighet för några typer av ytskikt för betonggolv, plastmattor, textilmattor och fuktspärrar, redovisas. Dessutom belyses den eventuella nytta en fuktspärr har samt vilka krav som måste ställas på en fuktspärr vid olika ytskikt.

6.1 Fukttransportkoefficienter

Då ett ytskikt kombineras med betong, bestäms uppkommande fukttillstånd under ytskiktet i huvudsak av betongens fuktinnehåll samt ytskiktets ånggenomsläpplighet. Fukttransporten genom ett ytskikt ges t ex av ekv (3.11) eller (3.10)

$$F = \left(\frac{k}{d}\right)\cdot\Delta p \quad \text{eller} \quad F = \frac{\Delta c}{Z}$$

där k/d = ångpermeabiliteten ($kg/m^2\cdot Pa\cdot s$) el ($g/m^2\cdot h\cdot mm\ Hg$)

Z = ånggenomgångsmotstånd (s/m)

Δp = ångtrycksskillnad över skiktet (Pa) eller mm Hg)

Δc = ånghaltsskillnad (kg/m^3)

Ångpermeabiliteten har bestämts för en PVC-matta med samma metod som tidigare för cementbruk. Resultatet visas i fig 6.1. Som framgår av figuren påverkas ångpermeabiliteten av fukttillståndet. Detta innebär att mattan är betydligt tätare om underlaget är torrare än 80 % RF än om fuktigheten är ~100 % RF i underliggande material.

För ytskiktet är det av störst intresse att känna ångpermeabiliteten för det fall att man har normalt rumsklimat på ena sidan och en relativt fuktig betong på den andra. För ett stort antal plast- och textilmattor har detta uppmätts och resultaten redovisas i tabell 6.1 och 6.2. I figur 6.2 ses uppbyggnaden av de

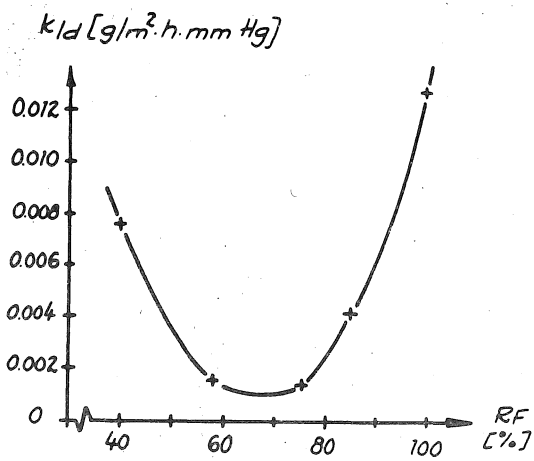


Fig. 6.1 Ångpermeabilitetens fuktberoende för PVC-matta med $\overline{k/d} = 0.004\ g/m^2 \cdot h \cdot mmHg$.

Vapour permeability as a function of humidity for PVC-carpet.

olika mattorna.

Jämföres dessa värden med genomsläppligheten för en betong med k=0,01 g/m·h·mm Hg) fås att

PVC-matta är lika tät som		~ 1-5 m betong
Tuftad textilmatta lika tät som		~ 1-2 cm betong
Nålfiltmatta	" " "	~ 1-2 mm betong

dvs en PVC-matta på betong kan betraktas som helt "tät" medan textilmattor har ett mycket litet inflytande på avdunstningen från en betongplatta.

TABELL 6.1 Ångpermeabilitet för PVC-mattor

Typ			Ångpermeabilitet k/d ($g/m^2 \cdot h \cdot mm\ Hg$)	($10^{-11}\ kg/m^2 \cdot Pa \cdot s$)	Ångmotstånd Z ($10^3\ s/m$)	Mätområde RF (%)
Enskiktsmatta med eller utan baksida						
Slitskikt		Baksida				
A.	1.0 mm 75 % PVC	2.3 mm 90 % PVC	0.006	1.3	600	40-100
B.	2 mm 75 % PVC	-	0.009	1.9	400	"
Tvåskiktsmatta						
Slitskikt		Bottenskikt				
C.	0.9 mm 98 % PVC	1.1 mm 67 % PVC	0.003-0.004	0.6-0.8	900-1200	"
D.	0.5 mm 95 % PVC	1.1 mm 68 % PVC	0.002	0.4	1800	"
Treskiktsmatta med transparent toppskikt						
Toppskikt		Skumskikt				
E.	0.33 mm 100 % PVC	1.4 mm 90 % PVC	0.010	2.1	350	"
F.	0.45 mm 100 % PVC	1.7 mm PVC	0.004	0.8	900	"
G.	0.35 mm 100 % PVC	1.0 mm 91 % PVC	0.009	1.9	400	"

TABELL 6.2 Ångpermeabilitet för textilmattor

Typ	Ångpermeabilitet k/d (g/m^2 h mm Hg)	Ångpermeabilitet k/d (10^{-11} kg/m^2 Pa s)	Ångmotstånd Z (10^3 s/m)	Mätområde RF (%)
Tuftad matta med latexbaksida				
H. 2 mm präglad "lågporös" latex ("våffel-")	0.6	130	6	40-85
I. 4 mm plan "högporös" latex	0.6	130	6	40-85
Nålfilt på perforerad polyetenfolie				
J. 2 mm "högporös" latexbaksida	5	1000	0.7	40-65
K. Utan baksida	7	1500	0.5	40-60

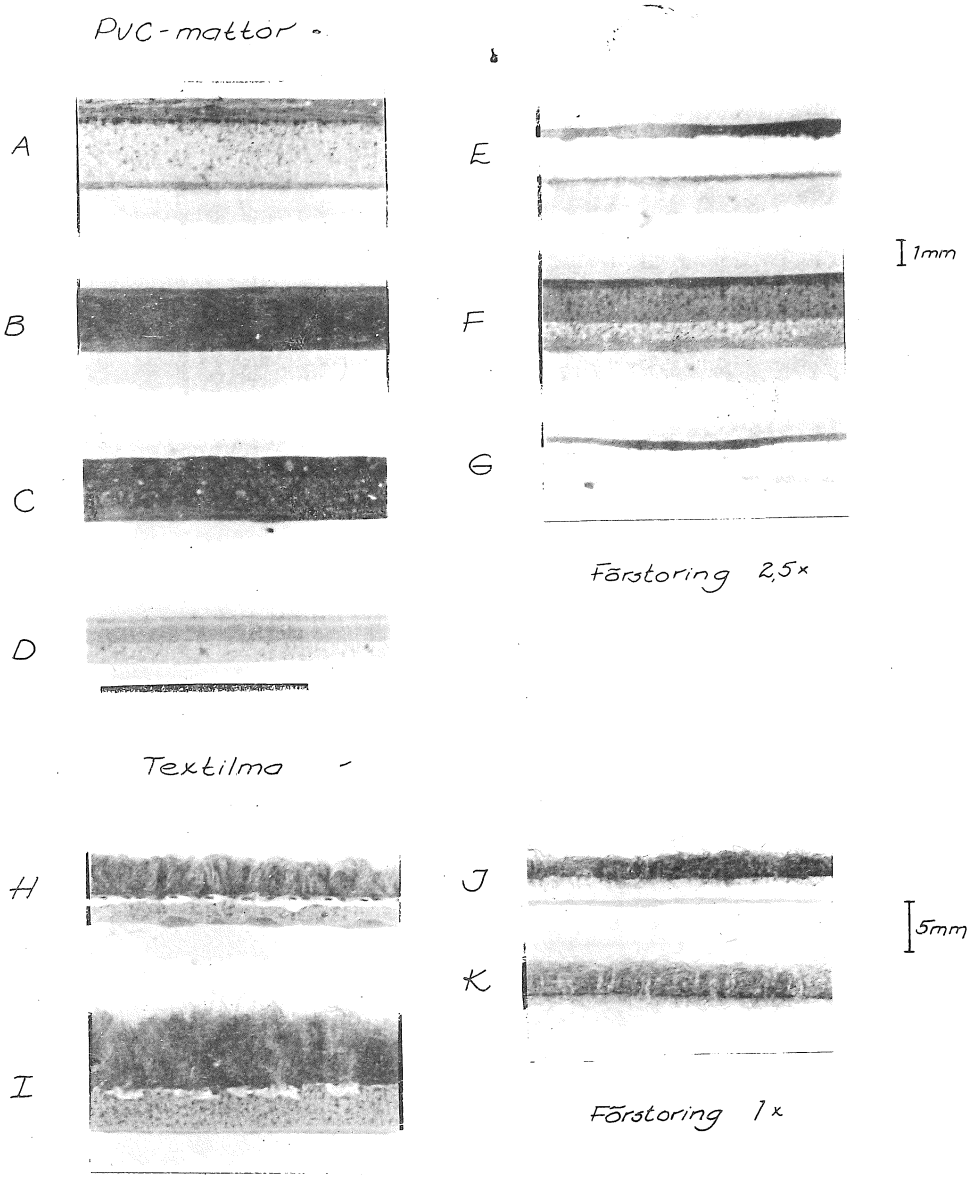


Fig. 6.2 Uppbyggnad av de provade mattorna. Beskrivning, se tabell 6.1 & 6.2.

Photos of the tested carpets. Description, see tables 6.1 & 6.2.

Mätningen har också utförts på en epoxibaserad fuktspärr där fuktspärren har applicerats på en skiva av cementbruk enligt fabrikantens anvisningar och mätningar har utförts som tidigare beskrivits. Resultatet åskådliggöres i fig 6.3. Det framgår av figuren att den aktuella fuktspärren är mycket tät vid fuktigheter under 90 % RF, där den har ungefär samma ångpermeabilitet som de tätaste plastmattorna. Vid höga fuktigheter, 90-100 %, där det kan vara motiverat att använda en fuktspärr, ökar genomsläppligheten drastiskt.

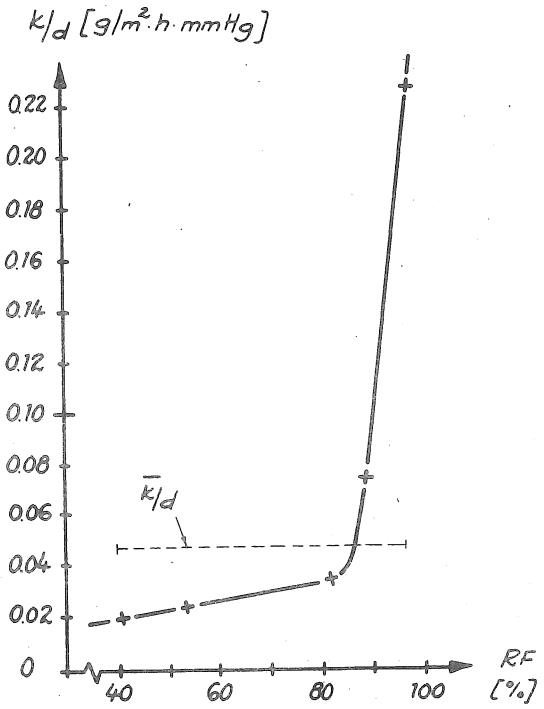


Fig. 6.3 Ångpermeabilitetens fuktberoende för en epoxibaserad fuktspärr applicerad men en strykning enligt fabrikantens anvisningar. k/d = 0.04/m^2· h·mmHg.

Variation of vapour permeability by humidity for epoxy based moisture barrier applied according to the manufacturer's directions.

6.2 Nyttan av fuktspärr

Mycket ofta användes fuktspärr på betonggolv som skall ha en tät plastmatta som ytskikt för att hindra byggfukt att nå limskiktet. Detta anvisas bl a av Hus AMA. I många fall tror man att en fuktspärr t o m kan stoppa markfukt. För att en fuktspärr överhuhuvtaget skall göra skäl för namnet, måste dess ångpermeabilitet vara av samma storleksordning som ytskiktets.

För att bedöma vilken inverkan en fuktspärr har kan ekv (3.16) eller fig 3.8 användas. Med hjälp av dessa kan t ex fuktbelastningen på golvlimmet beräknas.

I fig 6.4 har en sådan beräkning utförts, där fuktbelastningen på golvlimmet anges som funktion av fukttillståndet i betongens ytskikt och fuktspärrens ångpermeabilitet för en PVC-matta med $k/d = 0.002\ g/m^2\ h \cdot mm\ Hg$.

Av figur 6.4 framgår att en fuktspärr måste ha en ånggenomsläpplighet som är maximalt 5 ggr större än ytskiktets genomsläpplighet för att fuktbelastningen på limmet skall underskrida 90 % RF om betongen är mycket fuktig, ~100 % RF.

Eftersom genomsläppligheten för de flesta PVC-mattor är 0.002-0.01 $g/m^2 \cdot h \cdot mm\ Hg$, får genomsläppligheten för fuktspärren, som skall användas tillsammans med dessa, inte ha en genomsläpplighet som överstiger 0.01-0.05 $g/m^2 \cdot h \cdot mm\ Hg$ i fuktighetsintervallet 90-100 % RF. För de flesta fuktspärrar i marknaden anges, enligt provningsintyg från Statens Provningsanstalt, en genomsnittlig ångpermeabilitet som är mindre än 0.01 $g/m^2 \cdot h \cdot mm\ Hg$, men detta är inte tillräckligt. Ångpermeabiliteten måste mätas vid höga fuktigheter, i området 90-100 % RF. Dessutom måste appliceringsföreskrifterna följas i praktiken, vilket det slarvas med, så att den av fabrikanten angivna ångpermeabiliteten även gäller vid praktiskt bruk.

Då det föreskrives att en fuktspärr skall användas, bör man ange vilka egenskaper, främst ångpermeabilitet, som krävs av fuktspärren då den är applicerad. Det finns möjligheter att i efterhand kontrollera om föreskrifterna är uppfyllda, se föreslagen metod enligt Fagerlund & Tuutti (1975).

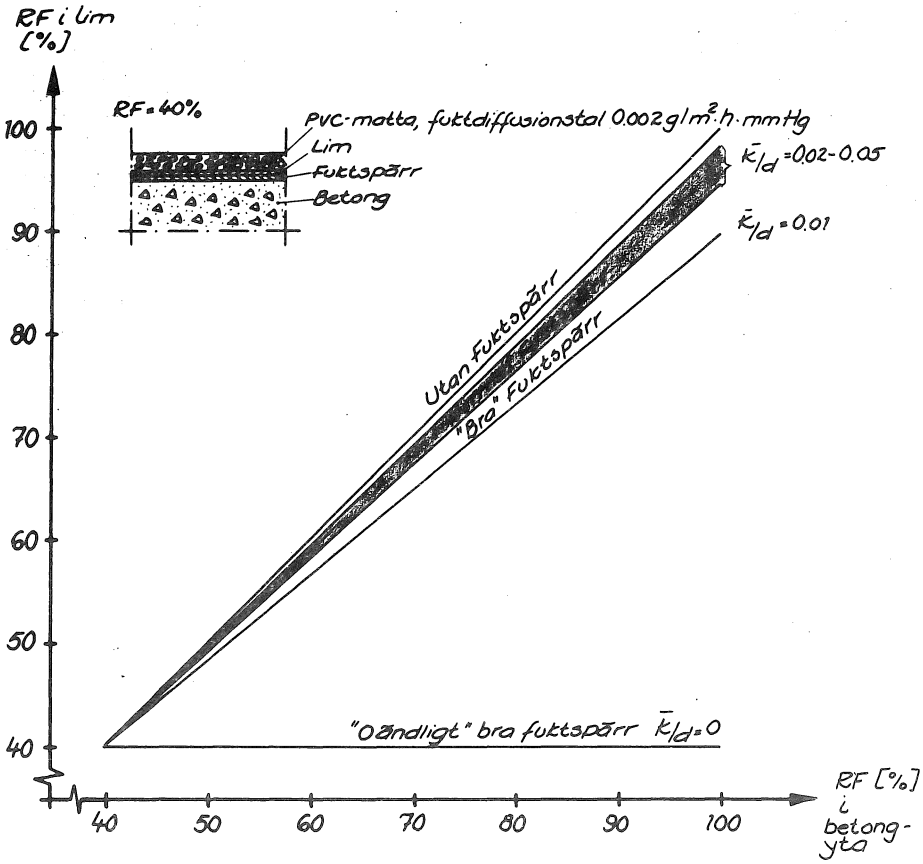


Fig. 6.4 Inverkan av fuktspärrens ånggenomsläpplighet på fuktbelastningen på golvlimmet.

Influence of the vapour permeability of the moisture barrier on the moisture load at the glue.

7. UTTORKNING AV BETONG

Att kunna göra en bedömning av uttorkningsförloppet för betong av en viss sammansättning under olika betingelser är av mycket stort praktiskt intresse för att undvika fuktskador.

Eftersom uttorkningen fortskrider mycket långsamt, finns byggfukt kvar i en betongkonstruktion under mycket lång tid, storleksordningen flera år. Man måste därför tillse att tillräckligt stor del av byggfukten får tillfälle att torka bort innan fuktkänsliga material kombineras med betong och att kvarvarande byggfukt kan få finnas i konstruktionen under en följd av år utan att medföra risk för skador.

Problemet, som man därför står inför, är att kunna ange vilka uttorkningstider som erfordras under olika förutsättningar för att byggfukten skall torka bort i tillräcklig omfattning. Härvid krävs en ingående kännedom om de fuktegenskaper, som beskrivits i de föregående kapitlen, hos betong och anslutande material.

Nedan göres först en kvalitativ beskrivning av betongs uttorkning som sedan leder fram till en beräkningsmodell, vilken kvantifieras med hjälp av de materialdata som redovisats i de föregående kapitlen.

7.1 Kvalitativ beskrivning av uttorkningsförloppet

Efter gjutning innehåller betong stora mängder blandningsvatten, varav en del binds kemiskt till cementet. Vid denna hydratisering fås en kontraktion, volymminskning, på grund av att hydratationsprodukterna har mindre volym än utgångsmaterialen. Detta får till följd att vattnet i de största porerna successivt ersättes med luft som sugs in från ytan.

Man brukar antaga att hydratisering medför att mängden förångningsbart vatten minskar, men på ett sådant sätt att det är jämnt fördelat i konstruktionen. Huruvida detta antagande är riktigt saknar man för närvarande kunskap om, men rimligtvis bör mängder insugen luft vara större närmre ytan, varav följer att fukthalten där är något mindre. Tillståndet, dvs porvattentrycket bör emellertid vara lika i hela konstruktionen då ett porvattenundertryck i betongens inre snabbt medför att vatten sugs in dit så att trycket utjämnas.

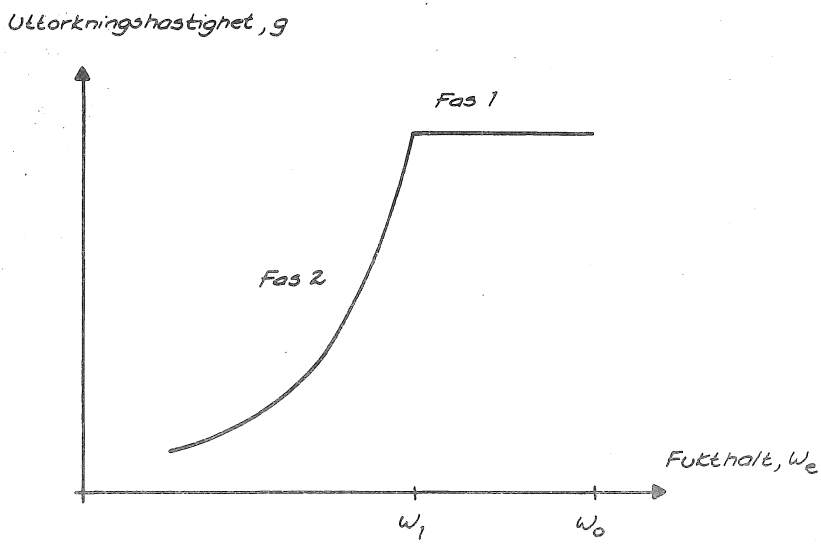


Fig. 7.1 Uttorkningshastigheten enligt Krischer (1963).
Drying rate acc. to Krischer (1963).

Uttorkningen startar när klimatet kring betongen är sådant att en avdunstning kan ske, dvs då relativa fuktigheten är mindre än 100 %. Uttorkningen sker som en kombination av fukttransport inne i materialet fram till ytan och avdunstning vid ytan. Enligt Krischer (1963) varierar uttorkningshastigheten, för de flesta porösa material, med fuktinnehållet principiellt enligt figur 7.1.

I början av förloppet, fas 1, bestäms uttorkningen av avdunstningen vid ytan och uttorkningshastigheten är konstant. Detta pågår så länge som fukttransportförmågan är tillräckligt stor för att hålla ytan våt så att avdunstningen sker i oförminskad takt.

Då fukthalten sjunkit till w_1 enligt fig 7.1 blir fukttransportförmågan för liten och uttorkningshastigheten sjunker, fas 2. I fortsättningen är därför fukttransporten fram till ytan bestämmande för uttorkningshastigheten. Vid ytan eftersträvas jämvikt med omgivande klimat och fukthalten i ytan närmar sig jämviktsfukthalten.

Uttorkningen, fukttransporten, pågår så länge det finns en gradient materialet som driver fukttransporten. Efter mycket lång tid uppnås jämviktsfukthalten i materialet och någon fukttransport äger inte längre rum; uttorkningen är avslutad.

I praktiken avbrytes uttorkningen oftast betydligt tidigare, t ex genom att ett ytskikt appliceras, varigenom avdunstningen från ytan minskas radikalt. Detta innebär att fukthalten i ytan åter stiger på grund av att fukttransporten fortfarande sker i riktning mot ytan, vilket pågår till ett nytt jämviktsläge erhålles mellan den låga avdunstingen genom ytskiktet och fukttransporten dit. I praktiken innebär detta vid mycket täta beläggningar att fuktbelastningen på ytskiktet ges av den relativa fuktighet som motsvarar ungefär medelfukthalten.

Det ovan beskrivna principiella förloppet åskådliggörs i figur 7.2.

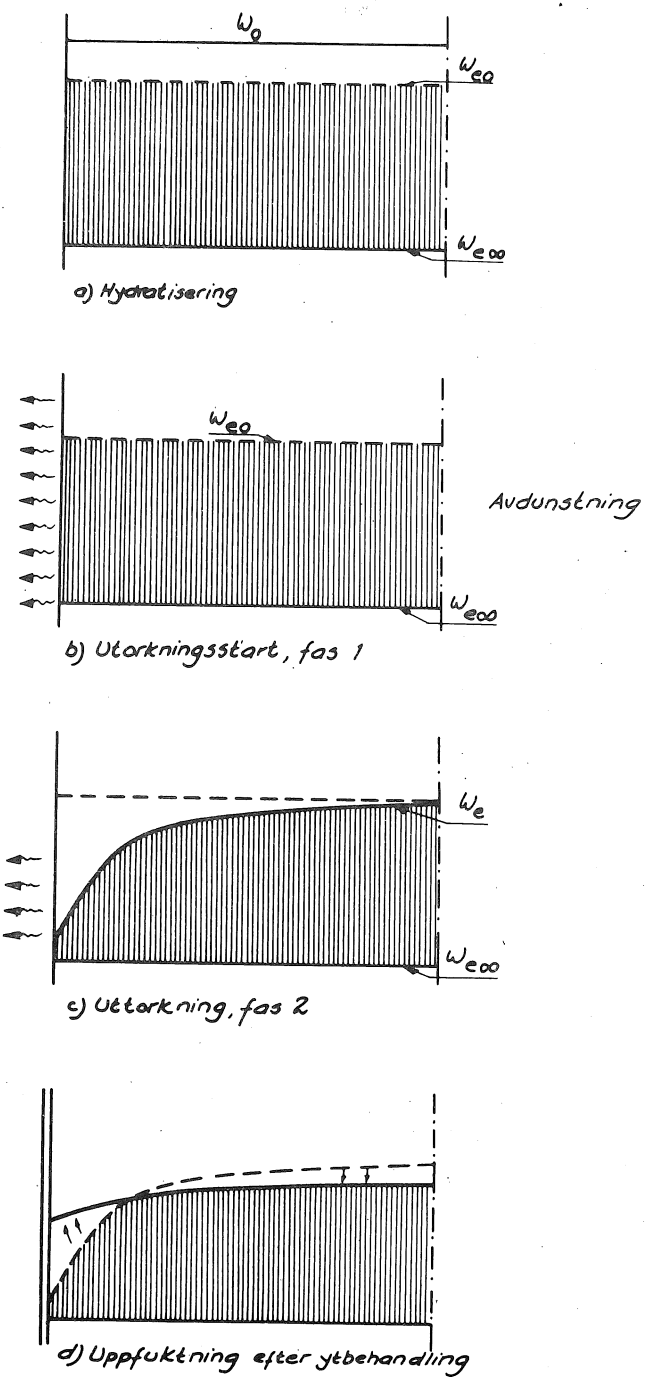


Fig. 7.2 Principiellt uttorknings- och uppfuktningsförlopp.
Principle drying and rewetting.

7.2 Randvillkor

Den materialdata som erfordras för att kvantifiera ovanstående beskrivning har redovisats i de föregående kapitlen.

Förutom dessa materialegenskaper erfordras randvillkor som beskriver hur avdunstningen sker vid ytan.

Under den första fasen då materialet är fuktigt på ytan kan man anse att materialets yta är ekvivalent med en fri vattenyta. Då erhålls

$$g = \beta \cdot (c_m - c) = \beta \cdot c_m (1-\phi) \qquad (kg/m^2 \cdot s)$$

där β = fuktövergångstalet för vattenånga, $\sim 0.3\text{-}3.10^{-2}$ (m/s)
c_m = mättnadsånghalt vid aktuellt temperatur, (kg/m^3)
c = ånghalt i omgivande luft, (kg/m^3)
ϕ = relativa fuktigheten i omgivande luft, (-)

Vid de tidigare beskrivna uttorkningsförsöken har klimatet varit $+20^oC$ och 40 % RF (ϕ), vilket med $\beta \approx 0.7 \cdot 10^{-2}$, enl Adamson et al (1970), ger

$$g \approx 0.7 \cdot 10^{-2} \cdot 17.3 \cdot 10^{-3} (1-0.40) \cdot 3600 \approx 0.26 \ kg/m^2 \cdot h$$

I figur 7.3 redovisas uttorkningshastigheten för de studerade cementbruken av olika vct och ålder för de första 20 minuterna av uttorkningsförloppet. Av figuren framgår att den första uttorkningsfasen, då avdunstningen vid ytan är bestämmande, inte existerar för betong med undantag för mycket färsk betong och höga vattencementtal. För praktiskt bruk kan man därför helt bortse från denna fas, såvida det inte står fritt vatten på ytan.

Då det gäller randvillkoren under den andra uttorkningsfasen, brukar man för betong anta att det är jämvikt med omgivande klimat vid ytan, se t ex Pihlajavaara (1963), (1965).

Man kan visa, Bouche (1975), att om detta antagande är riktigt,så gäller att uttorkningen följer sambandet

$$\Delta w = C_1 \sqrt{t} \qquad (7.1)$$

så länge som fukthalten är konstant längst in i materialet. Ovanstående samband blir efter logaritmering

$$\ln \Delta w = 1/2 \ln t + \ln C_1 \qquad (7.2)$$

vilket ger en rät linje med lutningen 1/2 i ett dubbellogaritmiskt diagram.

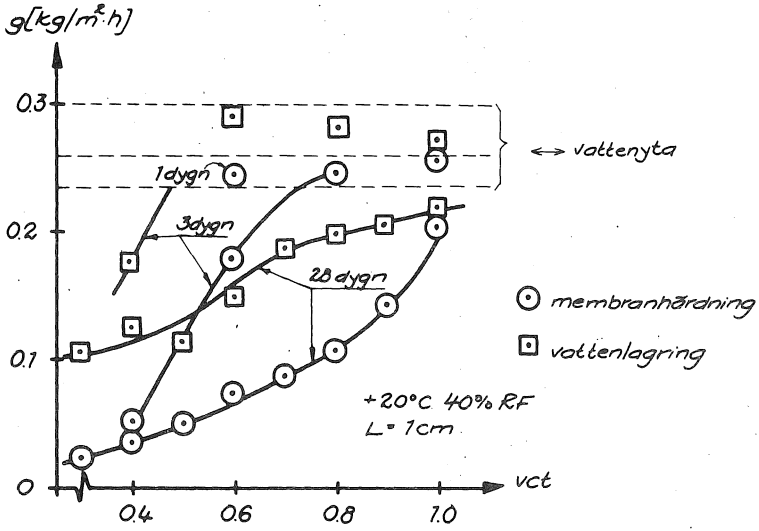


Fig. 7.3 Uttorkningshastigheten för cementbruk av olika vct och ålder under uttorkningens första 20 min. Varje punkt motsvarar medelvärdet av fyra provkroppar.

Drying rate of cement mortars of different water-cement ratios and ages during the first 20 minutes of drying. Each point represents the mean value of four specimens.

I figur 7.4 redovisas försöksresultat av uttorkningsförloppet under de första dygnen för cementbruk med olika vct, membranhärdade 28 dygn. Resultaten visar god överensstämmelse med ekv (7.2), dock under betydligt längre tid för vct 0.3 än för vct 1.0 av naturliga skäl; det krävs avsevärt längre tid för vct 0.3 innan fukthalten i provkroppens mitt minskar. Lutningen för de räta linjerna i figur 7.4 avviker något från 1/2, varierande från 0.46 för vct 0.3 till 0.50 för vct 0.9 & 1.0. En förklaring till detta kan vara den samtidiga karbonatisering som sker enligt ett förlopp liknande ekv (7.1) och som därför ger en något mindre viktminskning än vad som motsvaras av ekv (7.1).

För betong tar man normalt inte hänsyn till den temperaturskillnad som uppkommer vid ytan p g a avdunstningen. Fukttransporten fram till ytan och därmed avdunstningen är mycket långsam varför temperatursänkningen blir mycket liten och har därför knappast någon större inverkan på fuktförloppet. Uttorkning av betong behandlas därför som ett isotermt förlopp, dvs med konstanta temperaturförhållanden.

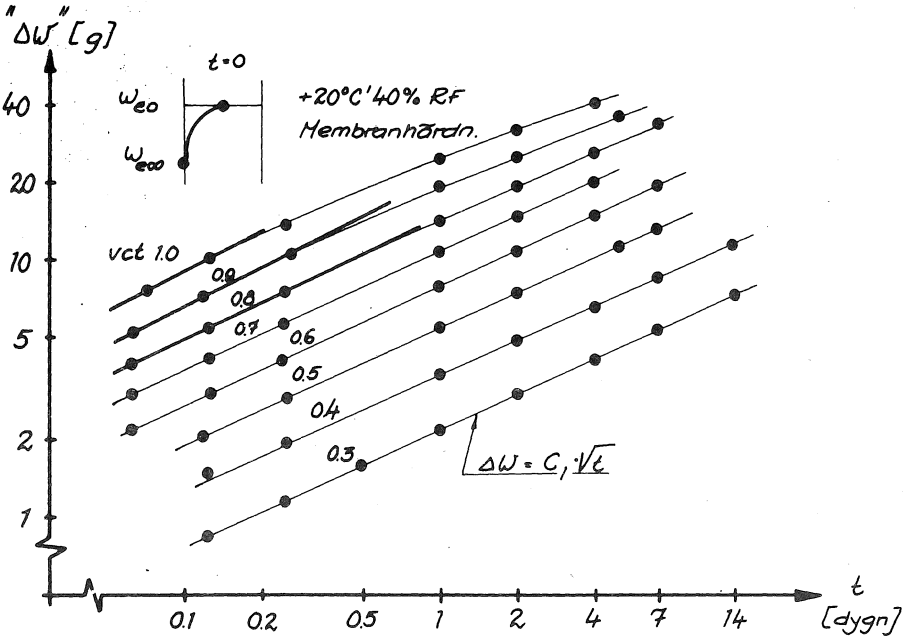


Fig. 7.4 Uttorkningens inledningsskede. Försöksdata jämförda med ekv. (7.2).

The start of drying. Experimental data compared to eq (7.2).

7.3 Beräkningsmodell

Uttorkning av betong är ett icke-stationärt förlopp som innebär att den s k "diffusions-ekvationen" skall lösas, vilken i en dimension har följande utseende

$$\frac{\partial w}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} F$$

Genom att beskriva fuktflödet F med en gradient i fukthalten w_e och ta hänsyn till hydratiseringen, fås

$$\frac{\partial w_e}{\partial t} + \frac{\partial w_e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} D \frac{\partial w_e}{\partial x} \qquad (7.3)$$

I detta ligger ett antagande om att en gradient i w_n vid gradienten 0 i w_e inte ger upphov till någon fukttransport, vilket inte är helt korrekt men troligen av mindre betydelse.

För att ekvationen (7.3) skall kunna lösas, dvs ange fukthalten som funktion av tiden, erfordras materialdata, randvillkor och begynnelsevillkor, vilka beskrivits tidigare.

Hydratationsutvecklingen, $\frac{\partial w_n}{\partial t}$, beskrivs med ekv (5.7) och fig. 5.9

Diffusiviteten, D, ges av fig 5.25 samt fig 5.30-5.38.

Randvillkoret ges av $w_e = w_{e\infty}$ vid ytan enligt avsnitt 7.2.

Begynnelsevillkoret ges av att $w_e = w_o - w_n$ vid tiden t=0 enligt avsnitt 5.2.

Ett datorprogram för lösandet av diffusionsekvationen med framåtdifferensmetod har utarbetats i samarbete med Johan Claesson, Matematisk Fysik vid LTH och publicerats i Carlsson & Claesson (1975). Detta datorprogram har modifierats och kompletterats för att vara speciellt lämpligt för icke-stationär fukttransport i betong av olika sammansättning, där möjlighet finns att ta hänsyn till bl a hydratisering och varierande ytskikt och underlag.

7.4 Uttorkningsförsök - jämförelse med modell

För att kontrollera beräkningsmodellen och bestämda materialdata har uttorkningsförsök i fullskala utförts, där jämförelse mellan uppmätta relativa fuktigheter och beräknade kunnat göras.

Möjligheten att kontrollera modellen mot enkla torkförsök på små provkroppar genom bestämning av viktförluster, har visat sig ge missvisande resultat, p g a samtidig hydratisering och karbonatisering, som påverkar viktsändringarna.

Figur 7.5 återger resultatet av en försöksserie där inverkan av dimensionen studerats. Försök har utförts på provkroppar med tjockleken varierande mellan 4-16 cm torkande åt båda håll.

Enligt diffusionsteorin har dimensionen en kvadratisk inverkan, vilket innebär att t/L^2 är oberoende av dimensionen, vilket skisserats i figuren. Detta stämmer emellertid inte alls överens med försöksresultat beroende på att både hydratisering och karbonatisering medför längre torktider för att en viss viktminskning skall ske, se fig 7.5.

I figuren har också värden beräknade med datormodellen återgivits, där alltså hänsyn tagits till hydratiseringens inverkan. Modellen har anpassats till försöksresultaten för provkroppar med 2L=16 cm.

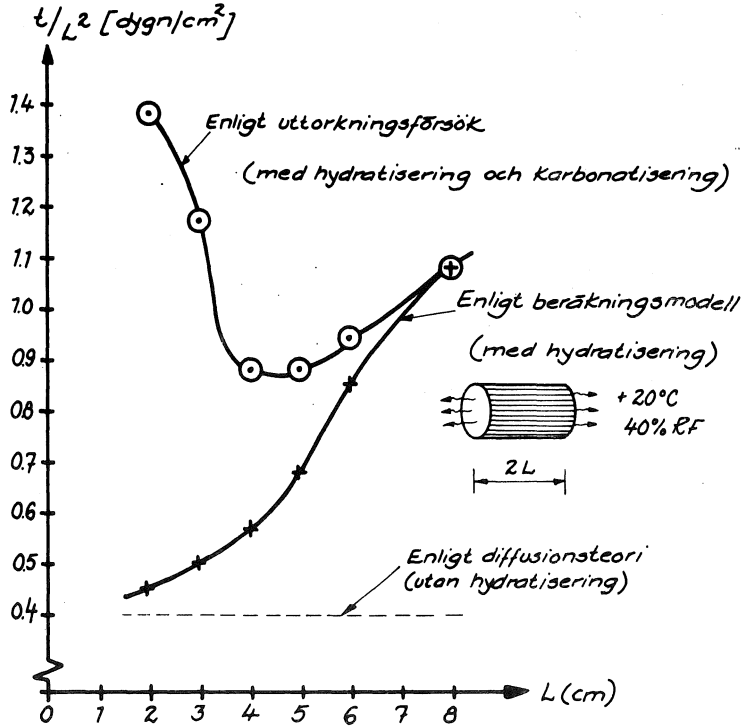


Fig. 7.5 Erforderlig torktid för en minskning av vikten med 1% av ursprunglig dels utan och dels med hydratisering, samt både hydratisering och karbonatisering. Betong, vct 0.55, 7 dygns membran härdning.

Required drying time to get a weight loss of 1% of original weight with and without hydration, and with both hydration and carbonation. Concrete, w_o/C=0.55, 7 days sealed curing.

7.4.1 Mätning av fuktfördelning

En mindre försöksserie har genomförts, där relativa fuktighetens fördelning genom 16 cm tjocka betongblock har uppmätts med insticksgivare, kalibrerade över mättade saltlösningar. Provkropparnas utseende framgår av fig 7.6.

Provkroppar tillverkades med tre vct; 0.4, 0.6 och 0.8 och membranhärdades 3 dygn före torkstart. En provkropp med vct 0.6 membranhärdades dessutom 28 dygn. Ballasten till betongen bestod till 50 % av ballast till "standardcementbruk" enligt fig 5.28 samt till 50 % av makadam 4-8 mm. Vattenhalten var 195 l/m^3

Fuktfördelningen bestämdes vid några tidpunkter genom att insticksgivare placerades i mäthålen under minst 4 timmar, varvid jämvikt i det närmaste erhölls. Mätprincipen framgår av figur 7.7.

I figurerna 7.8-7.11 återges resultatet av mätningarna. Av dessa framgår bl a att en kortare härdningstid före torkstart ger en snabbare uttorkning för vct. 0.6. Vct 0.4 ger en mycket snabb uttorkning i början av förloppet medan uttorkningen därefter går långsamt. Efter 260 dygns uttorkning är emellertid betongen med vct 0.4 något torrare än vct 0.6. Uttorkningen för vct 0.8 går mycket långsamt i inledningen men vid längre torktider är denna avsevärt torrare än betong med lägre vct, se fig 7.11.

För vct 0.6 har alla erforderliga materialdata bestämts, inklusive hydratationsutvecklingen, varför en jämförelse mellan uppmätt fuktfördelning och beräknad med datormodell är möjlig.

Vid datorberäkningen har diffusiviteten enligt fig 5.25 använts. God överensstämmelse erhölls härvid med $D = 16 \cdot 10^{-11}$ m^2/s för höga fuktigheter i närheten av 100 % RF och med $D/D_0 = 1.6$, dvs diffusiviteterna i figuren multiplicerade med en faktor 1.6. Diffusiviteterna i fig 5.25 gäller för ett cementbruk och den aktuella betongen har ballast med stenmax 8 mm, varför D/D_0 uppskattas ur fig 5.36 och 5.37 till ~1,4-1,8, vilket stämmer bra med den använda faktorn 1.6. Hydratationsutvecklingen har beskrivits enligt fig 5.7 för Slite Std och för omräkning av fukthalten till relativa fuktigheter har fig 5.15 använts.

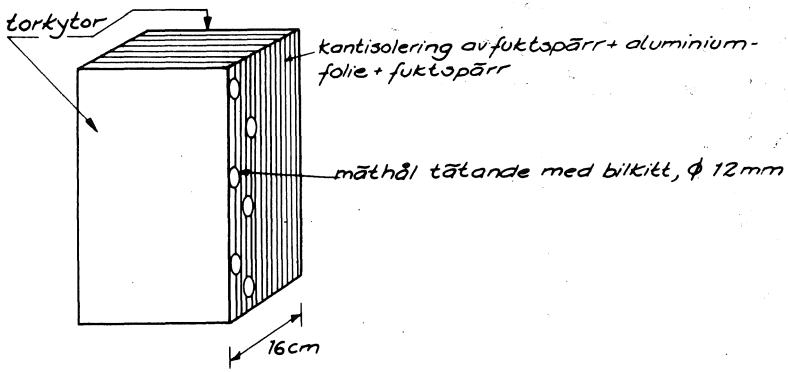


Fig. 7.6 Provkropp för mätning av RF-fördelning.
Specimen for measurement of distribution of RH.

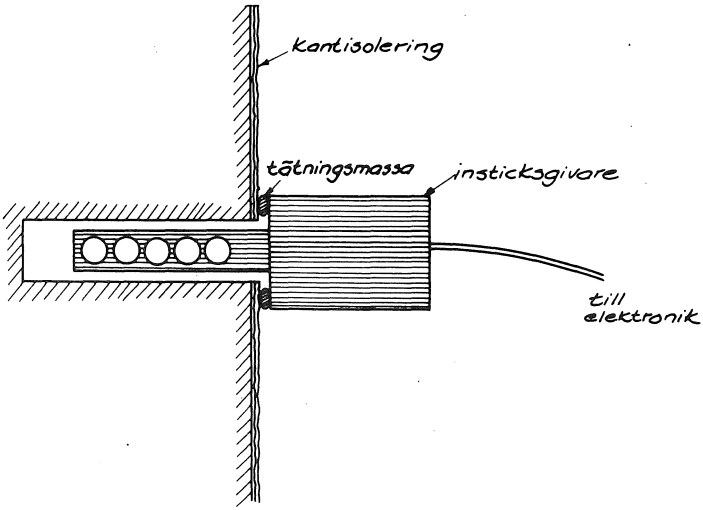


Fig. 7.7 Princip för mätning av RF-fördelning.
Principle of measurement of distribution of RH.

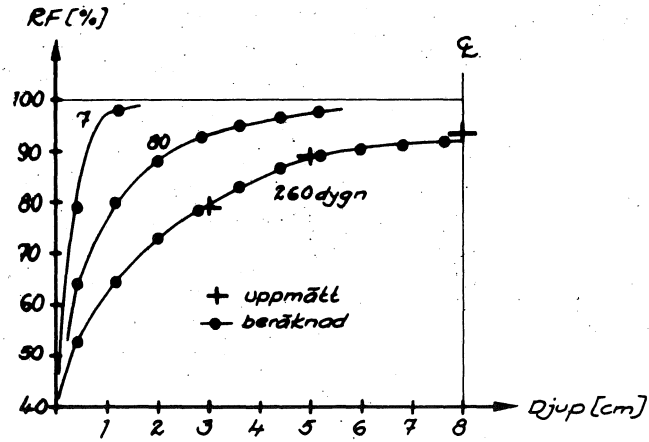


Fig. 7.8 Uppmätt och beräknad fuktfördelning för betong med vct 0.6 membranhärdad 28 dygn.
Measured and calculated moisture distribution for concrete $w_o/C=0.6$ sealed cured 28 days.

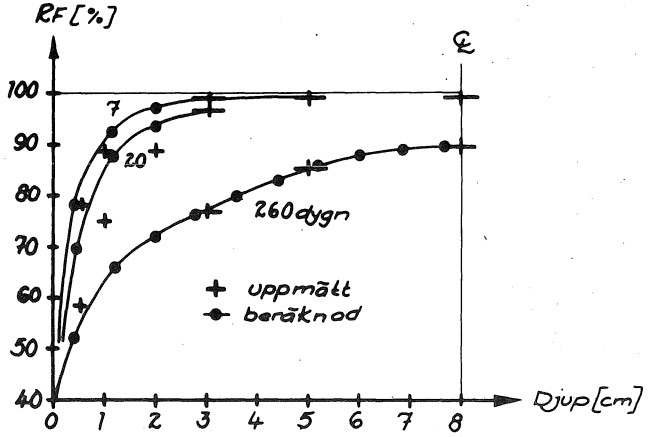


Fig. 7.9 Uppmätt och beräknad fuktfördelning för betong med vct 0.6 membranhärdad 3 dygn.
Measured and calculated moisture distribution for concrete $w_o/C=0.6$ sealed cured 3 days.

Datorberäkning har utförts för både 3 och 28 dygns membranhärdning, med samma materialdata. Skillnaden mellan dessa fås av begynnelsevillkoren som påverkar diffusiviteten, jfr fig 5.38 och hydratationsutvecklingen.

Resultatet av jämförelsen mellan beräknade och uppmätta fuktfördelningar redovisas i fig 7.8 och 7.9. Överensstämmelsen vid den längre torktiden är i det närmaste perfekt för båda försöken. Även vid 7 dygns torkning är överensstämmelsen god medan en viss avvikelse finns för 20 dygns torktid i yttre delen av betongen. Detta beror troligtvis till största delen på att den i de yttre hålen använda givaren inte varit helt tillförlitlig.

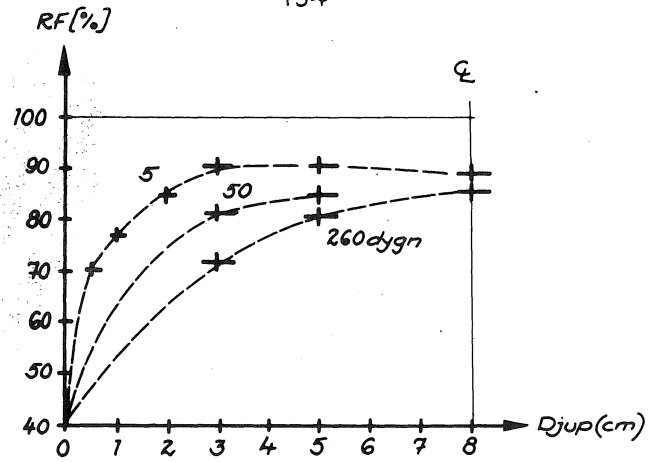


Fig. 7.10 Uppmätt fuktfördelning för betong med vct 0.4 membranhärdad 3 dygn.
Measured moisture distribution for concrete, $w_o/C=0.4$ sealed cured 3 days.

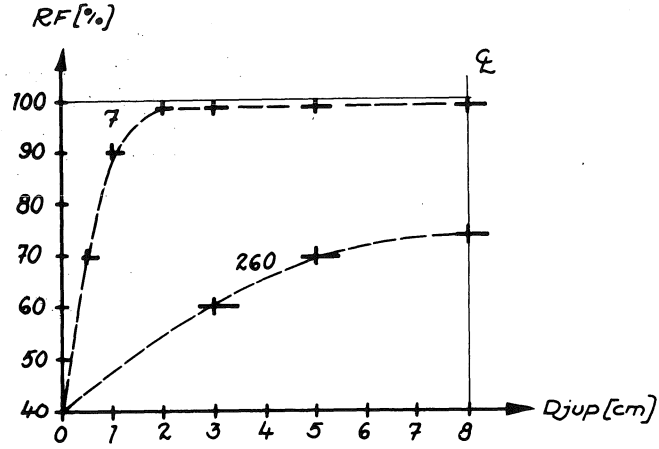


Fig. 7.11 Uppmätt fuktfördelning för betong med vct 0.8 membranhärdad 3 dygn.
Measured moisture distribution for concrete, $w_o/C=0.8$ sealed cured 3 days.

7.4.2 Mätning av fuktbelastning på ytskikt

Av störst praktiskt intresse är att kunna bestämma erforderliga torktider före läggning av täta ytskikt. En serie kontrollförsök med normala plattjocklekar har därför utförts för att efterlikna vad som sker i praktiken, varvid betongkvalitet, härdningsförhållanden och torktider varierats. Därefter har den fuktbelastning, RF, uppmätts som uppkommit på ytskiktet.

Utseendet hos använda provkroppar framgår av fig 7.12. Då avsedd torktid uppnåtts, förseglades provkropparna med ett plastlock för att simulera mattläggning. Efter 1-2 månader, då omfördelningen av fukten var i det närmaste avslutad, uppmättes den relativa fuktigheten i luftutrymmet mellan betongytan och plastlock, vilken motsvarar den fuktbelastning på lim och ytskikt som uppkommer i ett praktiskt fall.

Resultatet av försöksserien redovisas i fig 7.13, där respektive betongkvalitet och torktid graderats från minsta till största uppnådda torkning.

Betongkvaliteten K 150 torkar långsammast; efter 8 veckor är det en bra bit kvar till det "kritiska fukttillståndet" 90 % RF. Mer än dubbelt så lång tid krävs för K 150 jämfört med K 250, som i sin tur kräver nästan dubbelt så lång torktid som K 400. Med en ordentlig luftinblandning kan dessutom erforderlig torktid reduceras till ca hälften, till stor del troligen beroende på den härvid ökade cementhalten.

Observera den negativa effekten av vattenlagring. Speciellt vid högre betongkvaliteter, K 250-K 400, är det helt förkastligt att tillföra stora mängder vatten under härdningen, jfr avsnitt 5.4

För K 250 har en beräkning med datormodellen utförts för jämförelse med försök. Härvid har diffusiviteten enligt fig 5.25 ökats med en faktor motsvarande en större stenmax, 12 mm, och ett något högre vattencementtal, 0.65, vilket ger en förstoringsfaktor av ca 3.0. Vid höga fukthalter har diffusiviteten 60 x 10^{-11} m^2/s använts.

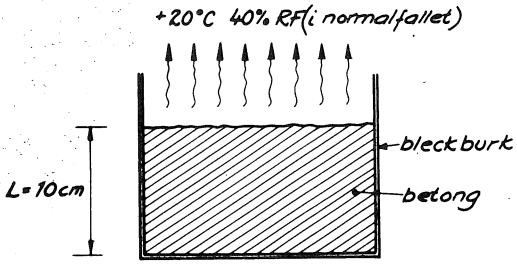


Fig. 7.12 a Kontrollförsökets provkropp under uttorkningen.

Specimen in control experiment during drying.

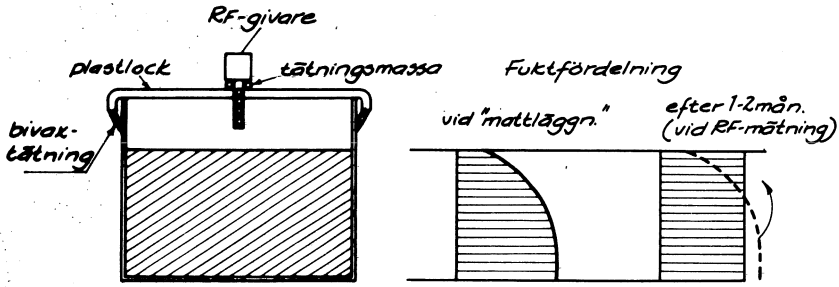


Fig. 7.12 b Mätning av fuktbelastning vid kontrollförsök.

Measurement of moisture load in control experiment.

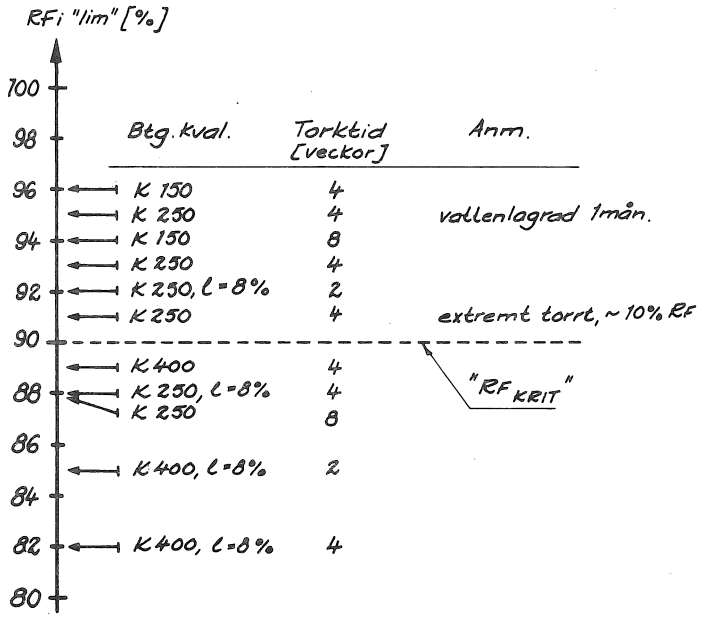


Fig. 7.13 Fuktbelastning på ytskikt enligt kontrollförsök.
Varierande betongsammansättning och torktid.
Membranhärdning 1 mån. Torkning i +20°C 40% RF.
Moisture load on surface layer acc. to control experiments.
Different concrete compositions and drying times.
Sealed curing 1 months. Drying in +20°C 40% RH.

Resultatet av denna beräkning för en 10 cm tjock betongplatta av K 250, membranhärdad 1 månad, vilken torkar åt ett håll, återges i figur 7.14. Fuktbelastningen, RF, på ytskiktet har härvid erhållits genom att avläsa RF ur desorptionsisotermen för respektive medelfukthalt, då denna bestämmer uppkommen fuktbelastning efter det att omfördelningen av fukten är avslutad.

I figuren är också erhållna mätvärden för detta fall enligt figur 7.13 markerade och överenstämmelsen mellan beräknade och uppmätta fuktbelastningar är relativt god.

För det beräknade uttorkningsförloppet i fig 7.14 visas fuktfördelningen genom plattan i fig 7.15, både fukthalt och relativ fuktighet.

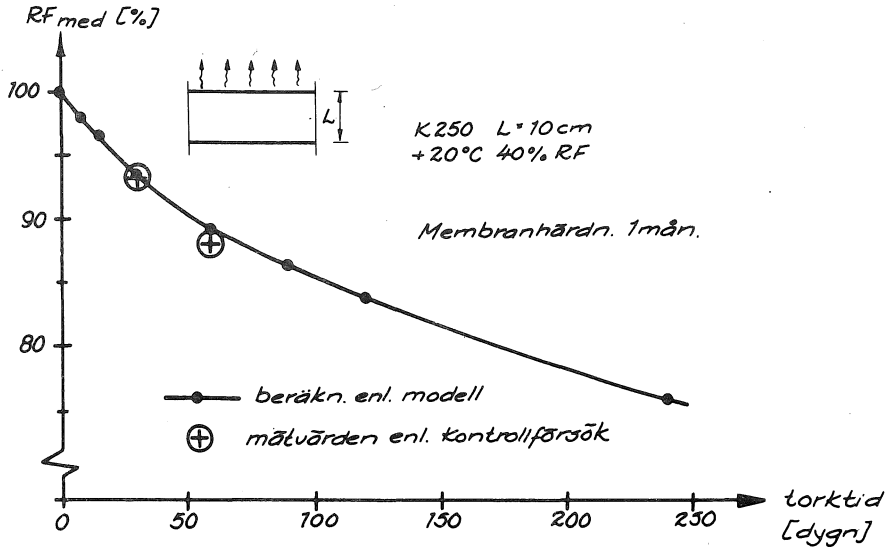


Fig. 7.14 Genomsnittligt fuktinnehåll för 10 cm:s betongplatta av K 250. Beräknade och uppmätta värden.

Mean moisture content of 10 cm thick concrete slab, quality K 250. Calculated and measured values.

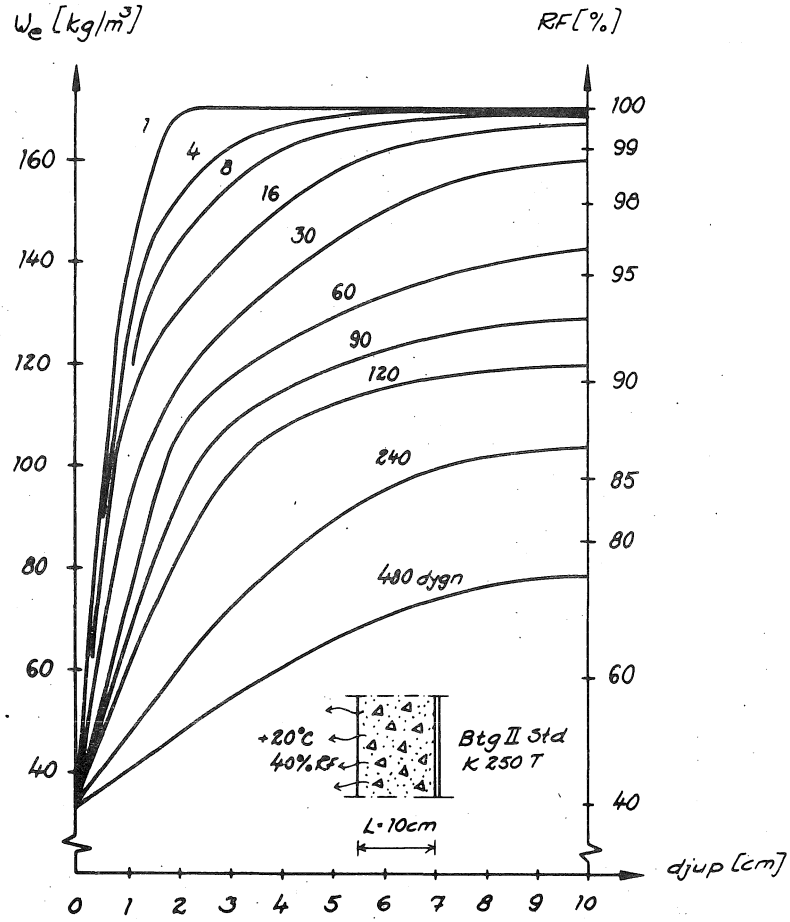


Fig. 7.15 Beräknad fuktfördelning i "normalbetong" vid olika tidpunkter. 1 månads ålder vid torkstart.
Calculated moisture distribution in "normal" concrete at different times. Age 1 month at the beginning of drying.

7.5 Inverkan av plattjocklek

Av föregående avsnitt framgår att uttorkningsförloppet för olika plattjocklear avviker från den vanliga diffusionsteorin, som inte tar hänsyn till hydratisering. Den ofta använda regeln att en fördubbling av plattjockleken ger fyra gånger så lång uttorkningstid gäller därför inte för härdande betong. Enligt denna regel gäller att torktiden dividerad med plattjockleken i kvadrat, t/L^2, är konstant, vilket alltså ej stämmer för betong.

Med hjälp av datormodellen har uttorkningsförloppet för en betong, K 250, beräknats för olika plattjocklekar. Resultatet för en månad gammal betong visas i fig 7.16. Om den enkla diffusionsteorin gällde, skulle kurvorna sammanfalla eftersom torktiderna har dividerats med kvadraten på respektive plattjocklek.

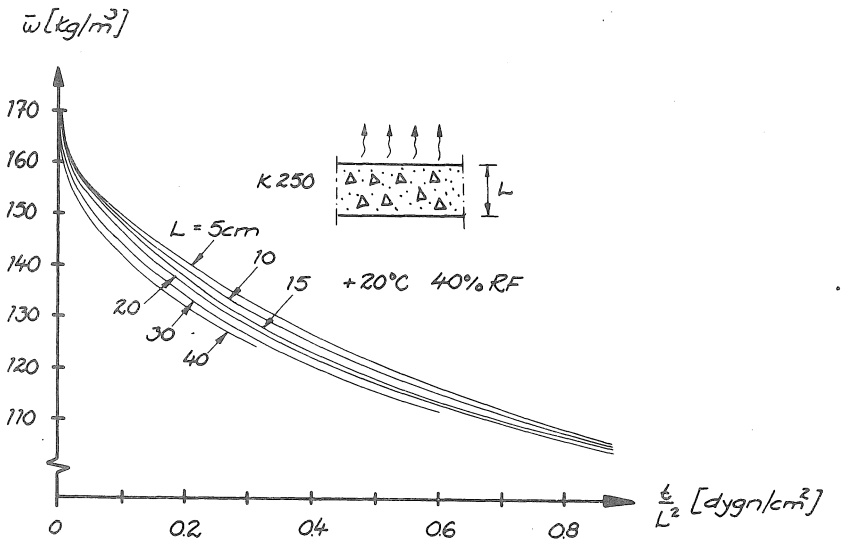


Fig. 7.16 Inverkan av plattjockleken på uttorkningsförloppet för betong K250, membranhärdad 1 mån.
Influence of slab thickness on drying of concrete K250, sealed cured 1 month.

En liknande beräkning har även utförts för en vecka gammal betong och i fig 7.17 redovisas resultatet för de båda beräkningarna i form av erforderlig torktid för att nå en medelfukthalt som motsvarar 90 % RF. Av figuren framgår att för en betong som är äldre än en månad vid torkstart, går uttorkningen relativt sett avsevärt snabbare vid stora plattjocklekar, detta på grund av att den inre torkningen, hydratiseringen, har fortskridit längre. För färskare betong överväger, vid plattjocklekar mindre än 15 cm, den snabbare fukttransportförmågan i torkningens inledningsskede och uttorkningen går mycket snabbt. Vid större plattjocklekar än 15 cm har däremot åldern vid torkstart liten betydelse, vilket framgår av figuren.

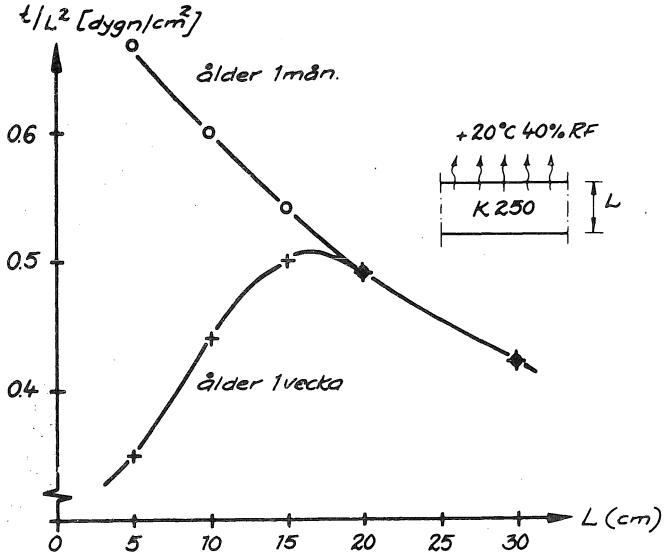


Fig. 7.17 Inverkan av plattjocklek på erforderlig torktid för att nå 90% RF. Olika ålder vid torkstart.
Influence of slab thickness on necessary drying time to get 90% RH. Different ages at drying start.

Då det ovan anges plattjocklek L, avses tjockleken hos en platta som torkar åt endast ett håll. Vid tvåsidig torkning t ex vägg eller mellanbjälklag motsvaras L, ofta benämnd "karakteristisk dimension", av halva plattjockleken. Vid andra tvärsnitt än rektangulära kan en överslagsberäkning göras genom att som L välja

$$L = \frac{V}{A}$$

där V = volymen hos den torkande konstruktionsdelen
A = avdunstningsytan

I fig 7.18 ges exempel på den karakteristiska dimensionen L för några typer av tvärsnitt.

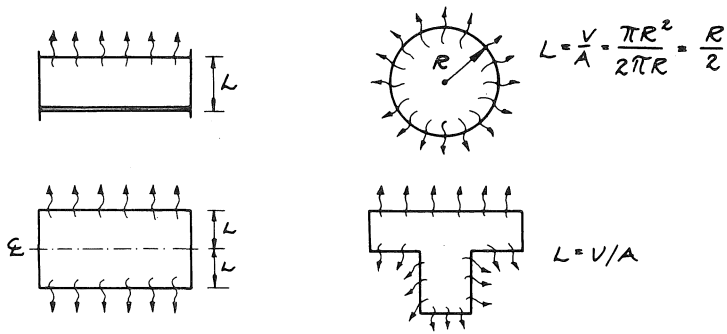


Fig. 7.18 Den "karakteristiska dimensionen", L, för några typer av konstruktioner.
The caracteristic dimension, L, for some construction types.

7.6 Inverkan av klimat

De i de föregående avsnitten visade uttorkningsförloppen gäller samtliga i ett torkklimat av +20°C och 40 % RF. Torkning i ett klimat med annan temperatur och relativ fuktighet påverkar naturligtvis uttorkningsförloppet. Temperaturen påverkar diffusiviteten och därmed direkt torktiden. Relativa fuktigheten påverkar jämviktsfukthalten vid ytan och förändrar därmed gradienten i ytskiktet med en förändrad fukttransport fram till ytan som följd.

Med datormodellen har beräkningar utförts för en normalbetong, Btg II Std K 250 T, med 10 cm:s plattjocklek torkande vid +20°C och varierande relativa fuktigheter. Resultatet av dessa beräkningar återges i fig 7.19 för RF mellan 20 och 90 %. Av denna framgår bl a att torktider för att nå en medelfukthalt som motsvarar 90 % RF, ca 115 kg/m^3, är ungefär 60 dygn vid torkklimat 20-50 % RF, medan vid 80 % RF krävs närmare 90 dygn, en ökning med ~50 %.

Den i figuren visade desorptionsisotermen gäller för betong med ålder större än en månad, där övre delen av det streckade området gäller för åldern större än ca tre månader, dvs i normalfallet vid uttorkning av byggfukt vid rimliga plattjocklekar.

I fig 7.20 visas ett exempel på hur figuren 7.19 skall användas för att utläsa erforderlig torktid för att en viss given fuktbelastning inte skall överskridas. Förutsättningarna i exemplet är

maximal fuktbelastning		90 % RF
torkklimat	+20°C	60 % RF
betongkvalitet och plattjocklek enligt fig 7.19		

Först uppsökes en punkt på desorptionsisotermen som motsvarar maximal fuktbelastning. I exemplet fås för 90 % RF $\bar{w}_e$ = 115 kg/m^3. Från denna punkt drages en horisontell linje åt vänster. Skärningen mellan denna linje och en vertikal linje från torkklimatet 60 % RF ger en punkt mellan två kurvor med torktiderna 60 resp 90 dygn. Mellan dessa båda kurvor interpoleras till slut aktuell torktid fram längs den vertikala linjen. Erforderlig torktid blir ca 70 dygn.

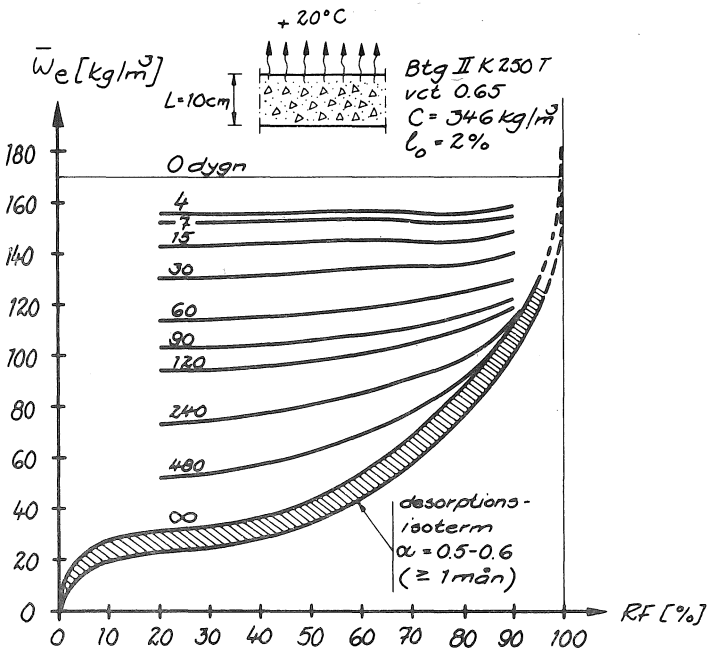


Fig. 7.19 Uttorkningsförloppet för en normalbetong vid varierande relativa fuktigheter i omgivande luft enligt utförda beräkningar.

The drying of a normal concrete at different humidities in surrounding air according to calculations.

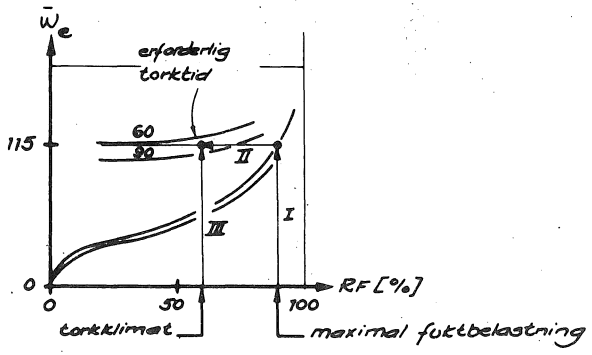


Fig. 7.20 Exempel på användning av fig. 7.19.
Förutsättningar ges i texten.
Example of the use of fig. 7.19.
The conditions are given in the text.

Då uttorkningen sker vid en annan temperatur än +20°C förändras några storheter. En temperaturförändring medför oftast att den relativa fuktigheten ändras då mättnadsångtrycket blir ett annat. Detta beräknas enligt ekv 3.3. Den ändrade relativa fuktigheten medför av denna anledning en annan jämviktsfukthalt vid ytan. Då temperaturen förändras påverkas också diffusiviteten. Denna inverkan har redovisats av bl a Yuan, Hilsdorf & Kesler (1968) och Bazant & Najjar (1972). En jämförelse mellan deras resultat visas i fig 7.21.

Förutom jämviktsfukthalt och diffusivitet, förändras också hydratationsutvecklingen vid en temperaturändring; en högre temperatur ger en snabbare hydratisering enligt ovan.

För överslagsberäkningar kan emellertid figur 7.19 användas även vid något avvikande temperatur, men den ändrade hydratationsutvecklingen försummas då, vilket emellertid ger en torktid på säkra sidan vid en höjning av temperaturen.

Om exempelvis i en lokal med +20°C 60 % RF, temperaturen höjs till 30°C fås en ny relativ fuktighet

$$RF = \frac{1403}{4242} = 33\ \%$$

Diffusivitetsökningen fås ur fig 7.21 till

$$D_{30}/D_{20} \cong 1.5$$

dvs torkningen går 50 % snabbare. Ur fig 7.19 fås, för RF=33 % och förutsättningar i övrigt enligt exemplet ovan, erforderlig torktid vid +20°C till ca 60 dygn. Erforderlig torktid vid +30°C blir därför omkring 60/1.5 ≈ 40 dygn.

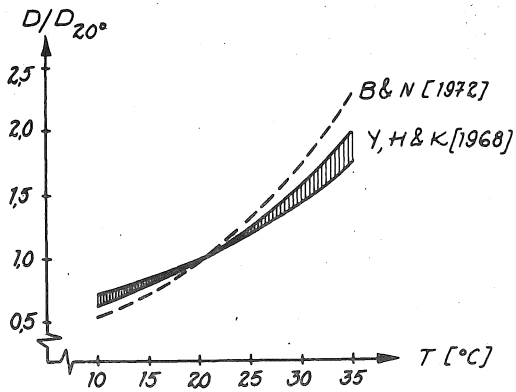


Fig. 7.21 Inverkan av temperaturen på diffusiviteten för betong enligt olika författare.
Influence of temperature on the diffusivity for concrete according to different writers.

7.7 Inverkan av underliggande värmeisolering

De uttorkningsfall som behandlats tidigare har motsvarat en betongplatta som torkar åt endast ett håll, dvs där uttorkning nedåt är förhindrad. I praktiken är detta fallet då plattan gjutits på ett tätskikt, t ex plastfolie.

Vid platta på mark ligger oftast betongplattan på ett värmeisolerande material, som ger en temperaturskillnad och därmed en ångtrycksskillnad mellan plattans underkant och den fuktiga marken. Detta får till följd att en sådan platta även kan torka nedåt genom värmeisoleringen, i hur hög grad beroende på dennas genomsläpplighet.

Uttorkningsförloppet för en 10 cm:s betongplatta på mark med underliggande värmeisolering av olika ånggenomsläpplighet har beräknats med datormodellen. I figur 7.22 återges resultatet av en sådan beräkning med undre randvillkoret motsvarande jämvikt med 90 % RF, vilket är jämförbart med en temperaturskillnad över värmeisoleringen på ca $2^{o}C$.

För normalt använda värmeisoleringsmaterial under platta på mark gäller ungefärligen enligt Hedén (1977)

	$\frac{k}{d}$ (kg/m^2 • Pa•s)
Cellplast, 5 cm	$0.6\text{-}1.6 \cdot 10^{-10}$
Lättklinker, 15 cm	$1\text{-}2 \cdot 10^{-9}$
mineralull, 5 cm	$1.4\text{-}2.4 \cdot 10^{-9}$

Ur figur 7.22 och liknande beräkningar kan inverkan av torkning nedåt genom värmeisoleringen bedömas. Erforderlig torktid för att nå ett genomsnittligt fuktinnehåll som motsvarar 90 % RF återges i fig 7.23 för varierande värmeisoleringar och temperaturförhållanden.

Cellplastisolering har så liten genomsläpplighet att torkningen nedåt är mycket blygsam. Erforderlig torktid reduceras med ca 5-10 %. Mineralullsisolering reducerar torktiden med ca 30-40% och lättklinker med ca 20-30 %. Siffrorna är mycket ungefärliga och beror bl a på isoleringstjocklek och temperaturförhållanden.

Det som ovan sagts om inverkan av värmeisolering på erforderlig torktid gäller om en medelfukthalt som motsvarar 90 % RF skall vara uppnådd vid mattläggningstillfället. P g a torkningen nedåt

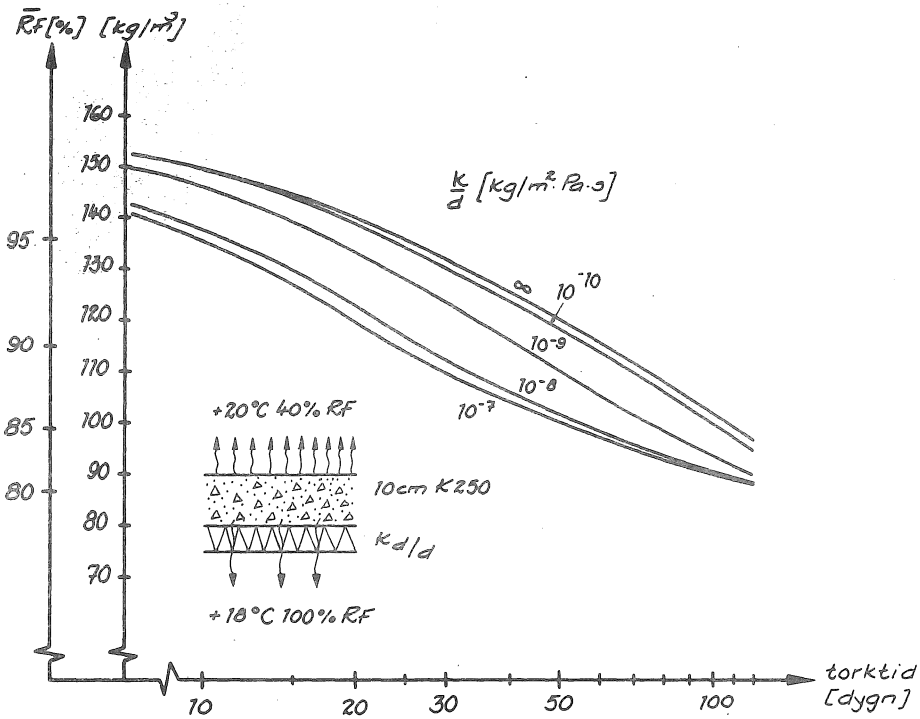


Fig. 7.22 Uttorkningsförloppet för betongplatta på mark med underliggande värmeisolering av olika ånggenomsläpplighet.

Drying of a concrete slab on the ground, with an underlying heat insulation of different vapour permeabilities.

kommer emellertid medelfukthalten att sjunka ytterligare något innan omfördelningen av fukten har skett och maximal fuktbelastning uppkommer på tätskiktet, vilket innebär att det finns en viss säkerhetsmarginal även vid mycket täta ytskikt, typ plastmatta.

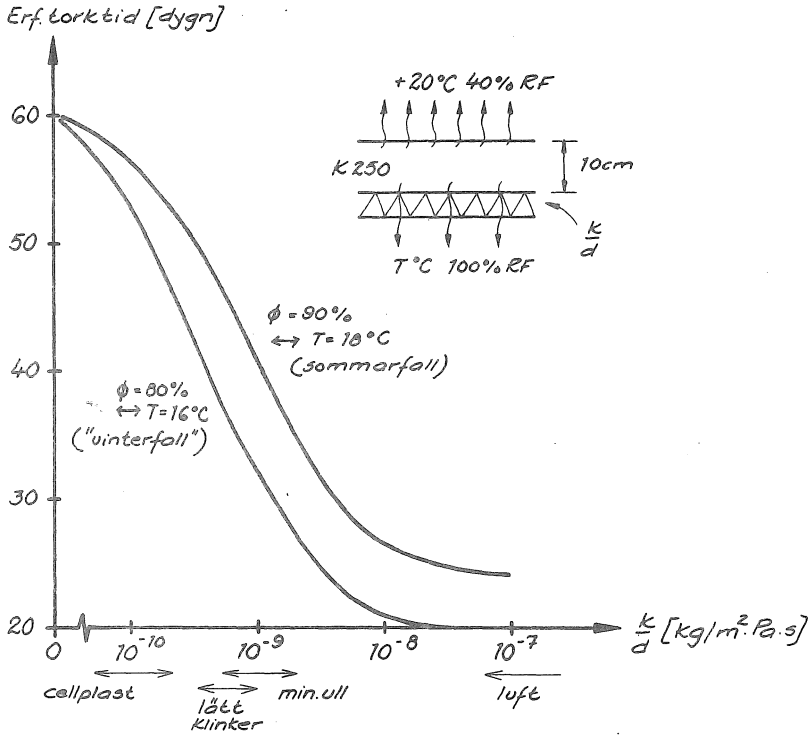


Fig. 7.23 Inverkan av underliggande värmeisolering på erforderlig torktid för att nå en medelfukthalt som motsvarar 90% RF före mattläggning.

Influence of underlying heat insulation on required drying time to get a mean moisture content corresponding to 90% RH before application.

7.8 Uttorkning av betong - sammanfattning

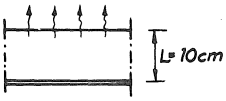
I det föregående är uttorkning för betong av olika sammansättning beskriven och olika inverkande faktorer har belysts. En sammanfattning av detta ges nedan i tabellform för överslagsberäkningar. Denna sammanfattning gör inte anspråk på att vara fullständig eller exakt, men kan vara fullt tillräcklig för praktiskt bruk.

Tabellen är uppbyggd så att erforderlig torktid för att maximal fuktbelastning på ett tätt ytskikt skall bli $\leq$ 90 % RF anges för en normalbetong K 250 för en 10 cm tjock platta som torkar på ett håll i +20°C och 40 % RF. Därefter anges inverkan av olika faktorer med en multiplikator som alltså denna torktid skall multipliceras med.

Naturligtvis blir noggrannheten sämre ju fler multiplikatorer som används, speciellt om variablerna är ytterligheter.

ERFORDERLIG TORKTID FÖR BYGGFUKT I BETONG

(vid läggning av täta, fuktkänsliga ytskikt; RF_{KRIT} = 90%)

"NORMALFALL"	 Btg II K250 T 1mån. gammal, membranhärdad ERFORDERLIG TORKTID **60 dygn**	Ex. platta på mark gjuten på plastfolie

Vid avvikelse från "normalfallet" multipliceras erforderlig torktid med nedan angiuna "multipliktorer" [x]

VARIABEL	MULTIPLIKATOR	ANM.
BETONGKVALITET	K150 [~2x]; K250 [1x]; K250 luft [~0,5x]; K400 [0.5-0.6x]; K400 luft [0.3x] OBS! Får ej utsättas för vattenbegjutning, regn- & smältvatten	"luft" = kraftig luftinblandning
ÅLDER	1 veckas ålder vid torkstart: plattjocklek ≤15cm [~0.7x]; plattjocklek >15cm [1x]	
TORKKLIMAT	RF 20-50 % [1x]; 60% [1.2x]; 80% [1.5x] T 10°C [1.3-1.4x]; 20°C [1x]; 30°C [0.6-0.7x]	
PLATTJOCKLEK	L= [cm] 6 [0.4x]; 8 [0.7x]; 10 [1x]; 12 [1.4x]; 14 [1.8x]; 16 [2.3x]; 20 [3.3x]; 30 [6.3x] (gäller vid K250, högre kvalitet ger lägre värden.)	Gäller vid ensidig uttorkning. Vid tvåsidig är L = halva plattjockleken
UNDERLIGGANDE VÄRMEISOLERING	5cm cellplast [0.9 - 1x]; 15cm lättklinker [0.7-0.8x]; 5cm min. ull [0.6-0.7x]	OBS! Ej plastfolie mellan betong och värmeisolering

8. MARKFUKT

Under senare år har det blivit allt vanligare att grundlägga småhus med betongplatta på mark. Härvid har det i många fall uppstått fuktproblem på grund av att man inte har skyddat golvkonstruktionen mot markfukt. Alltför ofta har detta berott på en övertro på det kapillärbrytande skiktets förmåga att stoppa markfukten samt att man ofta slarvat vid val av material till det kapillärbrytande skiktet. Det har varit svårt att få grus som är tillräckligt grovt för att vara kapillärbrytande.

Dessutom har man i många fall försummat att förhindra att markfukt i ångfas tillförts golvkonstruktionen. Betydelsen av en värmeisolering ur fuktsynpunkt har inte varit tillräckligt känd ute på fältet och Svensk Byggnorm 67 har inte nämnt detta med ett ord.

I den nya byggnormen, SBN 75, har man reparerat detta och anvisat möjligheten att med en värmeisolering under hela plattan hindra markfukten.

Adamson (1970) utredde effekten av en värmeisolering av lättklinker vid platta på mark. Efter detta blev det en vanlig konstruktion vid småhusgrundläggning att gjuta en betongplatta på en bädd av lättklinker som då skulle vara både värmeisolering och skydd mot markfukt. Detta har fungerat bra i de flesta fall, men en hel del skador av markfukt har ändå uppstått p g a att lättklinkermaterialen har haft skiftande kvalitet samt att de behandlats ovarsamt vid transport och läggning med krossning som följd. Noggrannare produktkontrollmetod är för närvarande under utarbetande i samarbete mellan fabrikant och Statens Provningsanstalt.

De fuktbelastningar man har att ta hänsyn till vid grundläggning med platta på mark (och andra konstruktioner över grundvattenytan) är dels ytvatten som skall tas hand om av matjordslager med fall från huset och dräneringen och dels uppstigande grundvatten som i många fall ger ett högt fukttillstånd under konstruktionen. På självdränerande jordar är detta inte något större problem, men i övriga fall bör man ha två förutsättningar vid dimensionering av en grundkonstruktion mot markfukt.

1) Ytvatten tränger ner från markytan.
2) Fuktigheten under konstruktionen är 100 % RF.

Ytvattnet skall tas om hand av vattenisolering och dränering på tillräckligt djup. Markfukten under konstruktion skall stoppas med ett kapillärbrytande skikt samt ett skydd mot ångtransport.

I de följande avsnittet redogöres för alternativa metoder att stoppa markfukt och några kortfattade regler uppställes som kan vara till god hjälp vid utformning eller värdering av en grundkonstruktion ur fuktsynpunkt. Exempel på resultat av fältmätningar ges också för vanliga konstruktioner.

8.1 Skydd mot markfukt

Vid grundläggning på icke självdränerande jordar erfordras, förutom effektiv dränering på tillräckligt djup samt ett kapillärbrytande skikt, ett ordentligt skydd mot markfukt i ångfas. Saknas detta kommer fuktbelastningen på ett tätt ytskikt att så småningom bli uppåt 100% RF med skador som följd.

Ett skydd mot markfukt i ångfas kan teoretiskt utformas på olika sätt. Det är tänkbart att använda en ångspärr under plattan av t ex plastfolie. Eftersom det av naturliga skäl kan vara svårt att bibehålla en ångspärr hel under gjutning är det en metod som är mycket osäker i praktiken. Försök att hindra markfukt med en fuktspärr på plattan har i många fall misslyckats därför att de fuktspärrar som finns i marknaden inte är tillräckligt täta vid användande av plastbeläggningar som ytskikt, jfr avsnitt 6.2.

Det tillförlitligaste sättet att stoppa markfukt är därför användande av en värmeisolering, eventuellt i kombination med ett kapillärbrytande skikt om värmeisoleringen i sig själv inte är kapillärbrytande. En värmeisolering medför att det uppstår en temperaturskillnad i de flesta fall på minst 2-3°C mellan golvkonstruktionen ovanför isoleringen och den fuktiga marken. Även om marken har högsta möjliga fuktinnehåll, 100% RF, blir det ångtryck som detta motsvarar avsevärt lägre än mättnadsångrycket vid den högre temperaturen som golvkonstruktionen håller.

8.1.1 Underliggande värmeisolering

Principutförandet och fuktfördelningen i denna konstruktionstyp framgår av fig 8.1. För att konstruktionen skall fungera tillfredsställande krävs att värmeisoleringen är kapillärbrytande eller kompletterad med kapillärbrytande skikt samt att den förmår skapa en temperaturskillnad på minst 2°C.

Av de, i denna golvtyp, vanligen använda värmeisoleringsmaterialen kan mineralull och cellplast betraktas som kapillärbrytande. Med lättklinker är det emellertid mera tveksamt. Statens Planverk påpekar i "Aktuellt 4/1976" att "... lättklinker i normala skiktjocklekar normalt inte kan anses vara kapillärbrytande, om inte detta särskilt har påvisats ...". För närvarande är en provningsmetod under framtagande, se Fagerlund (1977), och lättklinker bör inom den närmaste framtiden åter kunna användas utan risk vid golv på mark utan något speciellt kapillärbrytande skikt.

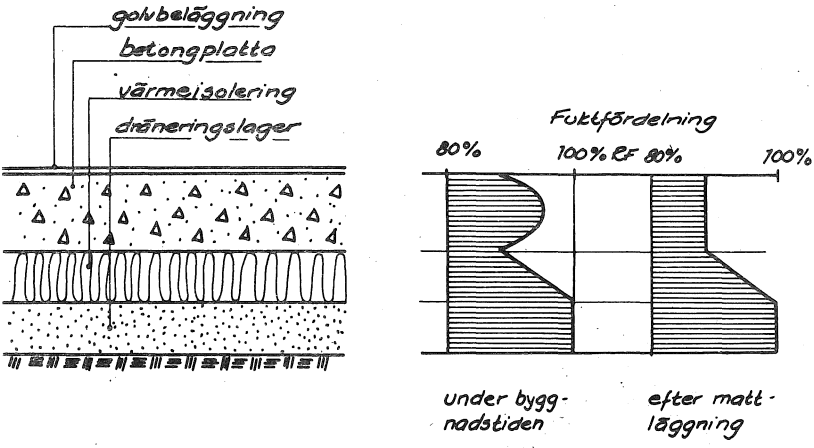


Fig. 8.1 Golvkonstruktion och fuktfördelning vid betongplatta med underliggande värmeisolering.
Floor construction and moisture distribution at a concrete slab with underlying heat insulation.

Funktionssättet visas enklast med ett exempel. Antag att temperaturen hos en betongplatta med underliggande värmeisolering är +20°C och att marken håller +17°C och 100% RF. Innan plattan har torkat i någon nämnvärd grad är dess fuktinnehåll nära 100% RF. Detta innebär att ångtrycket i plattan är ca 2338 N/m^2 (p_m(+20°C)) och ångtrycket i marken är lägre, 1937 N/m^2 (p_m(+17°C)). Det sker därför en ångtransport från betongplattan ned till den kallare marken; plattan torkar nedåt. Detta kommer att pågå ända tills plattan är så torr att den har samma ångtryck som marken, vilket inträffar vid

$$RF = \frac{1937}{2338} = 83\%$$

dvs sedan byggfukten i plattan en gång torkat bort, kommer fuktbelastningen på ett ytskikt aldrig att överskrida 83% RF så länge temperaturskillnaden är 3°C eller högre.

Bl a Adamson (1970) har gjort mätningar och beräkningar av vilka temperaturskillnader som uppkommer vid plattor som är värmeisolerade i hela sin utsträckning. Hans resultat visar bl a att temperaturskillnaden är större än 2°C under hela året, även sommarmånaderna, och därmed fås aldrig större fuktbelastning från marken än ca 90% RF.

Vid egna mätningar, i samband med skadefall, har inte heller mindre temperaturgradienter än 2°C uppmätts där en värmeisolering använts, Nilsson (1973-77).

Vid användande av en värmeisolering kan denna placeras på olika sätt. Det vanligaste är att ha en isolering under plattan direkt på dräneringslagret. Under de senaste åren, i samband med framförallt träövergolv, har det blivit allt vanligare att lägga isoleringen ovan på plattan, detta för att undvika problem med kalla golv. Det finns också varianter på dessa båda typer. Nedan göres en kortfattad beskrivning av funktionssätt och problem hos dessa båda huvudtyper.

För att erhålla en temperaturskillnad på minst $2^{o}C$ över värmeisoleringen erfordras en viss tjocklek hos denna. Minsta temperaturgradienten har man mitt under en stor platta. Vid grundvattenytan är temperaturen relativt konstant under året och bör ligga i närheten av årsmedeltemperaturen. Vid en innetemperatur av $+20^{o}C$ ges erforderligt värmemotstånd hos isoleringen av

$$m_{isol} = \frac{x}{\lambda_{mark}} \cdot \frac{\Delta T}{20-T_o-\Delta T}$$

där ΔT = temperaturskillnad över isoleringen

T_o = temperaturen i marken på djupet x; antages vara årsmedeltemperaturen på grundvattenytans djup

λ = värmeledningsförmågan hos marken

För att erhålla en temperaturskillnad av minst $2^{o}C$ erfordras, under minst gynnsamma förutsättningar t ex årsmedeltemperatur $+7^{o}C$, grundvattenyta på 5 m djup och lera med λ = 1.4 W/m·k

$$m_{isol} \geq \frac{5}{1.4} \cdot \frac{2}{20-7-2} = 0.65 \frac{m^2 \cdot k}{W}$$

vilket uppnås med minst 3-4 cm mineralull eller cellplast eller 10-15 cm lättklinker.

Det bör observeras att en underliggande värmeisolering måste ligga under <u>hela</u> plattan. Det är helt förkastligt att begränsa sig till enbart randisolering då plattans inre då blir helt oskyddad mot markfukt. I vissa fall kan det emellertid vara svårt att ha en obruten värmeisolering av grundläggningsskäl vid t ex pålning eller vid kantbalkar och dylikt. Ett pålhuvud som är direkt kringgjutet av plattan och som har direkt kontakt med grundvattnet kan fungera som en "veke" och tillföra vatten kapillärt till golvkonstruktionen. Pålhuvuden bör därför vattenisoleras med t ex en plastfolie före gjutning.

Vid isolering under kantbalkar och voter där större laster skall nedföras, kan isoleringsmaterial med större tillåten last väljas. Enbart ett makadamlager är inte tillräckligt utan någon form av värmeisolering bör inläggas.

I slutet av nästa avsnitt finns en jämförelse mellan för- och nackdelar med underliggande respektive överliggande isolering.

Observera att det som ovan sagts gäller vid normala temperaturförhållanden. Vid omvänd temperaturgradient, t ex vid värmegrunder eller värmekulvert under huset, måste konstruktionen kompletteras med en ångspärr.

8.1.2 Överliggande värmeisolering

Principutförandet och fuktfördelningen i denna konstruktionstyp framgår av fig 8.2. Konstruktionen användes så gott som alltid i kombination med någon typ av träövergolv och måste därför innehålla en ångspärr, plastfolie, för att fuktbelastningen på de träbaserade materialen inte skall överstiga 80% RF. Detta innebär att värmeisoleringen normalt inte har någon större funktion att fylla som skydd mot markfukt, utan detta fås av ångspärren. Det är därför av största vikt att denna kan bibehållas hel under byggnadstiden och att hela ytan är täckt. Även syllar till bärande mellanväggar måste avskiljas från den fuktiga plattan med en ångspärr såvida lasterna inte är så små att de kan placeras ovanpå isoleringen.

Plastfolien placeras av praktiska skäl oftast på den kalla sidan av värmeisoleringen. Detta kan medföra risk för kondens av inneluften på plastfolien där man har stora temperaturgradienter, dvs i plattans ytterområden, i de utrymmen där golvbeläggningen inte är tät. Detta eventuella kondensat bör emellertid kunna torka bort under den varma delen av året och därför inte ge upphov till skador om man tillser att kondensatet inte kommer i kontakt med träbaserade material, främst reglar. Denna eventuella kondensrisk bör emellertid vara eliminerad i framtiden i och med att det sätts krav på en ordentlig kantisolering som reducerar temperaturskillnaderna.

Sammanfattningsvis göres en jämförelse mellan för- och nackdelar med alternativa placeringar av värmeisoleringen ur fuktsynpunkt i nedanstående sammanställning.

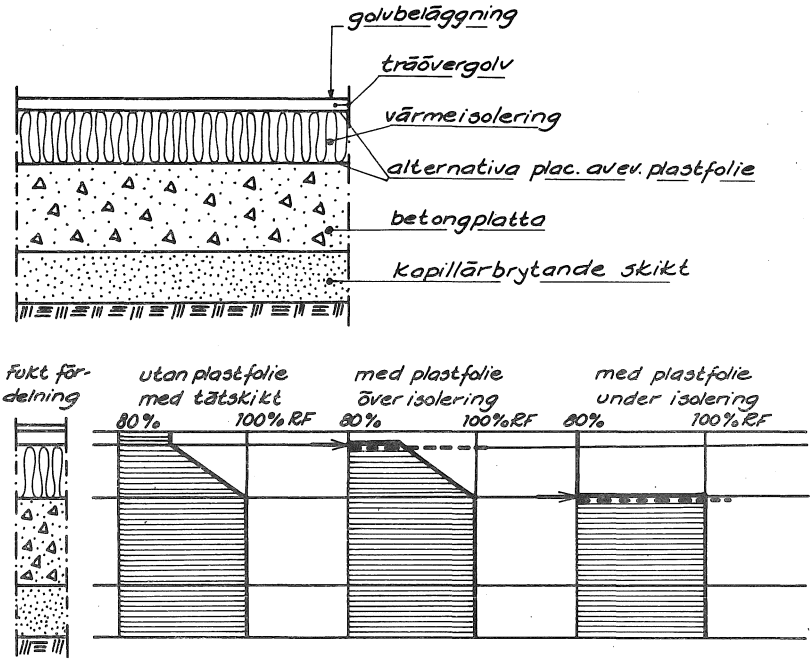


Fig. 8.2 Golvkonstruktion och fuktfördelning vid betongplatta med överliggande värmeisolering.
Floor construction and moisture distribution at a concrete slab with an overlying heat insulation.

Betongplattan. Vid underliggande värmeisolering har man en relativt torr betongplatta på vilken en tät beläggning direkt kan appliceras. Vid överliggande isolering är plattan helt fuktig och markfukten i ångfas måste stoppas av ovanförliggande konstruktion.

Byggfukt. En betongplatta med underliggande värmeisolering måste ges möjlighet att torka, vilket inte är nödvändigt då isoleringen placeras ovanpå, kompletterad med en plastfolie, då plattan i detta fall är och "skall" förbli fuktig. Byggfukten kan emellertid, vid underliggande värmeisolering, torka nedåt även sedan ett tätt ytskikt applicerats och den erforderliga torktiden kan reduceras avsevärt.

Träövergolv & syllar. Båda konstruktionstyperna bör kompletteras med en ångspärr, plastfolie, om ett träövergolv användes. Framför allt får inte reglar och syllar ligga i direkt kontakt med betongplattan och i synnerhet inte vara ingjutna. Inte ens tryckimpregnering hjälper härvid. Fuktbelastningen på syllar och träövergolv är avsevärt mindre vid underliggande värmeisolering om plastfolien saknas eller är skadad.

Omvänd temperaturgradient kräver alltid en ångspärr. Vid överliggande värmeisolering bör denna finnas ändå, men då isoleringen ligger under plattan måste en komplettering ske, med följd att något längre torktid för byggfukten krävs.

8.2 Enkla regler för skydd mot markfukt

För att göra en riktig utformning av en grundkonstruktion ur markfuktsynpunkt är det endast några få enkla fysikaliska regler som behöver beaktas. Dessa enkla regler, som beskrives nedan, är också till god hjälp då en färdig konstruktion skall värderas, med hänsyn till markfukt, med utgångspunkt från ritningar. En hel del skadefall har lösts genom att enbart studera ritningar och på utförda konstruktioner tillämpa dessa regler.

Vissa av reglerna nedan är ytterst elementära, men trots detta har skadefall inträffat på grund av att de inte följts.

I. Dränering = bräddavlopp

En dräneringsledning kan inte suga vatten från omgivande material utan vatten rinner till ledningen. Man måste därför, vid icke självdränerande jordar, förutsätta att det står fritt vatten under hela huset upp till en nivå som motsvarar vattengången i dräneringsledningen. Konstruktionsdelar som går ned till en nivå under denna, blir med nödvändighet utsatta för fritt vatten som kan sugas vidare kapillärt.

Åtgärd: Dräneringen måste ligga tillräckligt djupt!

II. Material med kapillärkontakt med vatten ⇒ 100% RF

De flesta porösa byggnadsmaterial är mer eller mindre kapillärt sugande. Om en konstruktionsdel, t ex kantbalk, grundmur eller påle, står i kontakt med fritt vatten och i sin tur har kontakt med andra, kommer fuktbelastningen även på angränsade material att i sinom tid bli 100% RF

Åtgärd: Ett kapillärbrytande materialskikt måste finnas mellan alla konstruktionsdelar och dräneringens högsta nivå!.

III. Material i ångkontakt utan temperaturskillnad ⇒ samma fuktbelastning på båda materialen

Två material som står i ångkontakt med varandra, även via ett kapillärbrytande skikt, får samma relativa fuktighet om de har samma temperatur. Finns ingen temperaturskillnad mellan en golvkonstruktion och den fuktiga marken, blir konstruktionen lika fuktig som om vatten kapillärt sugits upp; det tar bara avsevärt längre tid. En eventuell avdunstningsmöjlighet "på vägen" kan förhindra att så sker.

Åtgärd: Skapa en temperaturskillnad med en värmeisolering eller lägg in en ångspärr!

IV. Material i ångkontakt med temperaturskillnad ⇒ a) det varmare blir torrare, b) det kallare blir fuktigare

Vid en temperaturskillnad mellan två material i ångkontakt, kommer materialen att eftersträva samma ångtryck. En golvkonstruktion, som är varmare än den fuktiga marken, får lägre RF än 100%. Om en del av golvkonstruktionen är uppvärmd, får övriga delen, som är kallare, en högre RF; risken för kondens är överhängande vid större temperaturskillnader.

Åtgärd: Om det varma materialet skall hållas torrt: tillse att temperaturskillnaden bibehålls i hela konstruktionens utsträckning. Om det kalla materialet skall bibehållas torrt, lägg in en ångspärr eller torka ut det fuktiga, varma materialet ordentligt!

V. En fuktspärr bör vara minst lika tät som det material denna skall skydda

För att en fuktspärr skall göra skäl för namnet bör dess ånggenomsläpplighet vara mindre än genomsläppligheten hos ytskiktet.

Åtgärd: Använd en tillräckligt tät fuktspärr, en mera genomsläpplig beläggning eller en annan konstruktionslösning!

Ovanstående enkla fysikaliska regler finns sammanfattade i figur 8.3.

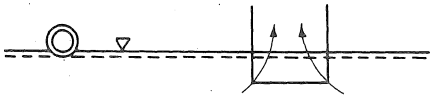
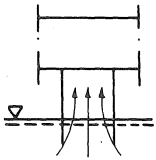
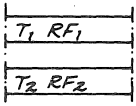
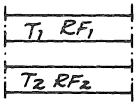
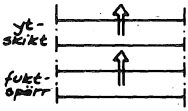
FYSIKALISKA REGLER FÖR SKYDD MOT MARKFUKT	
REGEL	EXEMPEL
I DRÄNERING - BRÅDDAULOPP	
II KAPILLÄR MATERIAL-KONTAKT ⟹ 100% RF	 100% RF
III MATERIAL I ÅNGKONTAKT MED $\Delta T = 0$ SAMMA RF	 $RF_1 = RF_2$, $T_1 = T_2$ dvs om $RF_2 = 100\%$, så $RF_1 = 100\%$
IV MATERIAL I ÅNGKONTAKT MED $\Delta T \neq 0$ ⟹ VARMA LÄGRE RF OCH KALLA STÖRRE	 $RF_1 < RF_2$ om $T_1 > T_2$ $RF_1 > RF_2$ om $T_1 < T_2$ Om RF_1 skall vara $\leq 90\%$ så gäller för RF_2: $\Delta T = T_2 - T_1$ — RF_2 $-2°C$ — $\leq 100\%$ (Ex. golv på mark) $0°C$ — $\leq 90\%$ (Ex. utan isolering) $+30°C$ — $\leq 20\%$ (Ex. uppvärmt golv)
V FUKTSPÄRR MINST LIKA TÄT SOM YTSKIKT	 $k_{spärr} \leq k_{ytskikt}$

Fig. 8.3 Sammanfattning av enkla fysikaliska regler för skydd mot markfukt. Utförligare beskrivning i texten.

Summary of simple physical rules for protection against soil moisture. More detailed description in the text.

8.3 Exempel på fältmätningar och skadefall

I detta avsnitt presenteras en sammanfattning av några av de mätningar och skadeutredningar som utförts vid avdelningen för byggnadsmateriallära under senare år. En utförligare redovisning finns att tillgå i interna avdelningsrapporter, Nilsson (1973-77).

I. Suterränghusgrundläggning

I ett område med sutteränghus i Stockholmstrakten skedde en fuktinträngning i bottenvåningen vilket åskådliggöres i fig 8.4. Nedre delen av ytterväggen och mellanväggen samt angränsande betonggolv var helt blöta, dvs fritt vatten hade tillförts.

Konstruktionens utseende vid anslutning mellan ytterväg resp mellanvägg och betonggolv framgår av fig 8.5. Plattan har en underliggande värmeisolering av mineralull men denna saknas under kantbalk och under mellanväggsgrundläggning vilket innebär att det inte finns något skydd mot markfukt i ångfas. Detta skulle kunna medföra att skador uppstod om en tät golvbeläggning applicerades. I detta fall uppstod emellertid problemen redan under byggnadstiden och det var inte vattenånga utan fritt vatten som orsakat dem.

Vid en granskning av ritningarna kunde problemet lösas. Av fig 8.5 framgår att dräneringen ligger högre än kantbalkens underkant. Ytvatten som trängde ned längs ytterväggen kunde därför ansamlas i dräneringslagret och bilda en fri vattenyta upp till en nivå som motsvarar vattengången i dräneringsledningen. Därvid fick kantbalken och mellanväggarnas grundläggning direkt kapillär kontakt med vattnet och en kapillär uppsugning medförde att vatten sögs upp i väggar och in en bit på betonggolvet.

Genom att gräva upp längs väggarna och sänka dräneringen, kunde man bli av med fuktinträngningen och att värmeisolering saknades under vissa delar av betongplattan betydde att en tät golvbeläggning inte kunde användas i bottenvåningen.

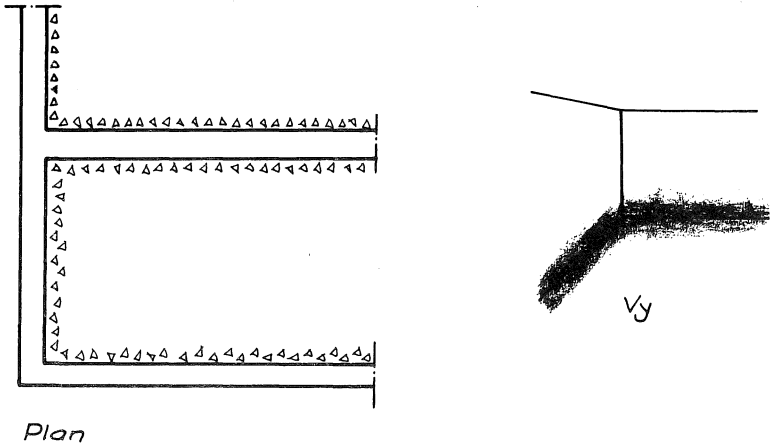


Fig. 8.4 Fuktinträngning i suterränghus.
Moisture penetration in a split level house.

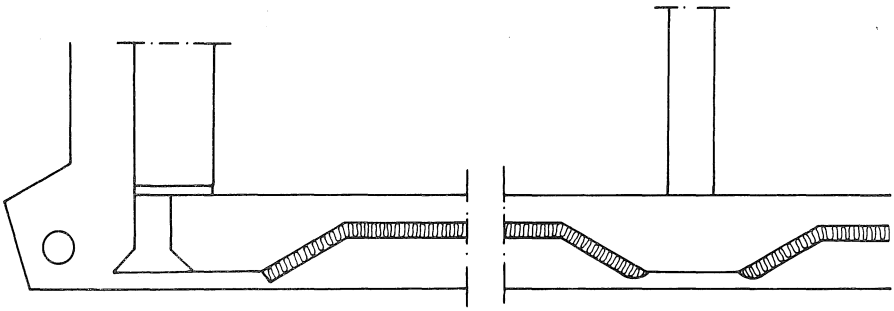


Fig. 8.5 Sektion genom grundläggning vid yttervägg och mellanvägg. Observera dräneringens läge.
Section through foundation at outer wall and inner wall. Observe the level of the draining.

II. Grundläggning med hjärtmur

I ett småhusområde i sydvästra Skåne är grundläggningen av den bärande mellanväggen utförd med en hjärtmur av betonghålblock strax över grundvattenytan enligt fig 8.6. I husen uppstod luktproblem som visade sig härröra från den ingjutna, tryckimpregnerade syllen under mellanväggen.

Genom hjärtmuren är en direkt kapillär uppsugning från grundvattnet möjlig, men mätningar visade att så inte var fallet, åtminstone inte än. Markfukt i ångfas kunde istället transporteras genom hjärtmuren då denna tjänstgjorde som en köldbrygga, varför någon större temperaturskillnad inte uppstod mellan syll och den fuktiga marken.

I detta fall kunde skadan åtgärdas genom att den angripna syllen avlägsnades och utrymmet fylldes med betong. Ovanpå lades en ny syll, fuktisolerad från betongen med en fuktspärr och en asfaltpapp.

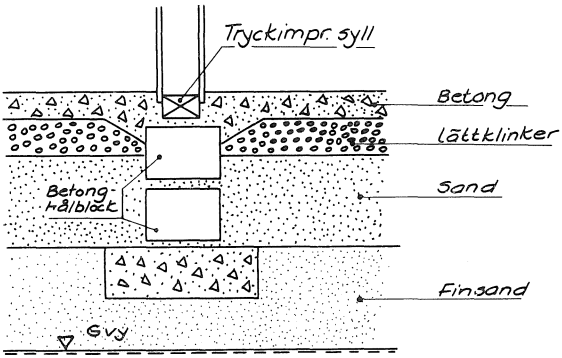


Fig. 8.6 Hjärtmur under bärande mellanvägg.
Foundation under bearing inner wall.

III. Platta med enbart randisolering

Detta skadefall visar med all önskvärd tydlighet betydelsen av att isolera hela plattan och inte bara nöja sig med en randisolering som är tillräcklig ur värmesynpunkt.

Vid en tillbyggnad utfördes grundkonstruktionen, på samma sätt som i den äldre byggnaden, med en randisolering av lättklinker, enligt fig 8.7. I övrigt var plattan oisolerad. I figur 8.7 bör observeras att i byggnadens mitt är plattan isolerad då detta är randisoleringen i den äldre byggnaden.

I samband med tillbyggnaden lades en tät beläggning i hela tillbyggnaden samt i en del av den äldre byggnaden, så att det finns en kontinuerlig plastmatta över den tidigare randisoleringen i byggnadens mitt, se fig 8.8. Härvid användes en fuktspärr.

Efter några månader började plastmattan släppa från underlaget och vid skadeinventeringen var skadorna lokaliserade till de områden som framgår av fig 8.9. Vid en jämförelse med fig 8.7 upptäcker men att skador har uppkommit enbart där plattan är oisolerad. Över den äldre randisoleringen är plastmattan helt intakt.

På några punkter gjordes en provtagning genom golvkonstruktionen och i fig 8.10 visas resultatet. På de inre oisolerade delarna fanns naturligtvis ingen temperaturskillnad och därmed inget skydd mot markfukt i ångfas. Fuktbelastningen på ytskiktet var här 95-100% RF.

Där plattan är isolerad, fanns en temperaturgradient av ca 2°C och därmed hade fuktbelastningen minskat till under 90% RF. Inom randisolerat område fanns en enda skada, intill ytterväggen, och denna kunde med hjälp av ritningarna härledas till en för högt liggande dränering och frånvaro av värmeisolering vid kantbalk.

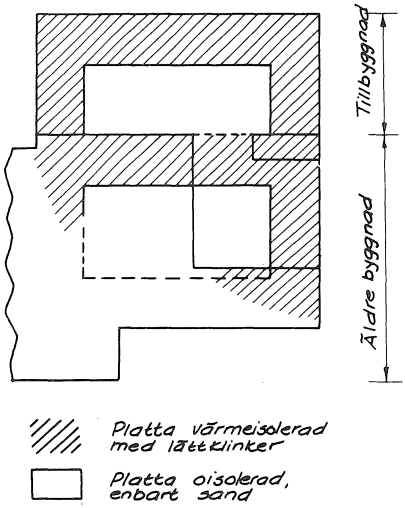


Fig. 8.7 Betongplattans värmeisolering
Heat insulation of the concrete slab.

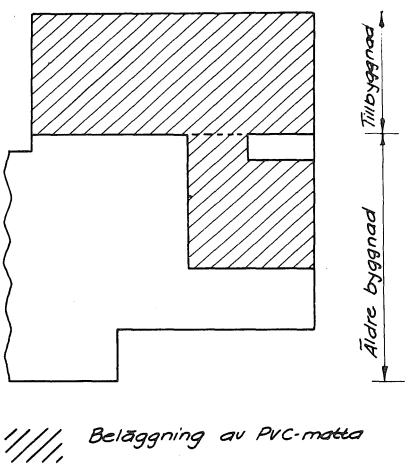


Fig. 8.8 Golvbeläggning i samband med tillbyggnad.
Floor covering in connection with the extension.

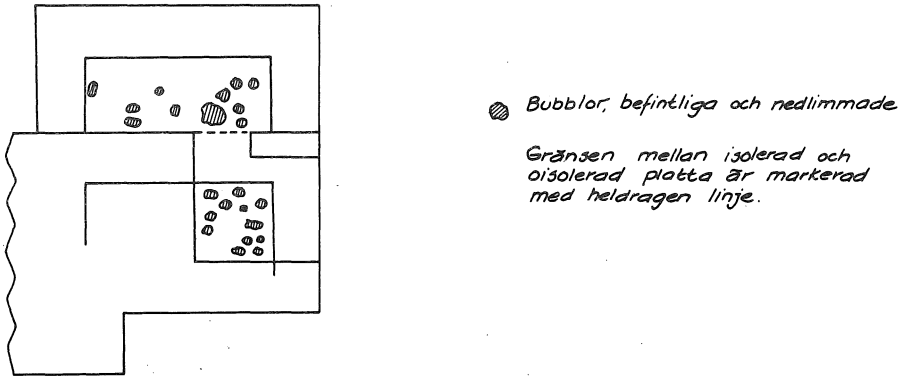


Fig. 8.9 Ungefärlig skadebild.
Approximate damages.

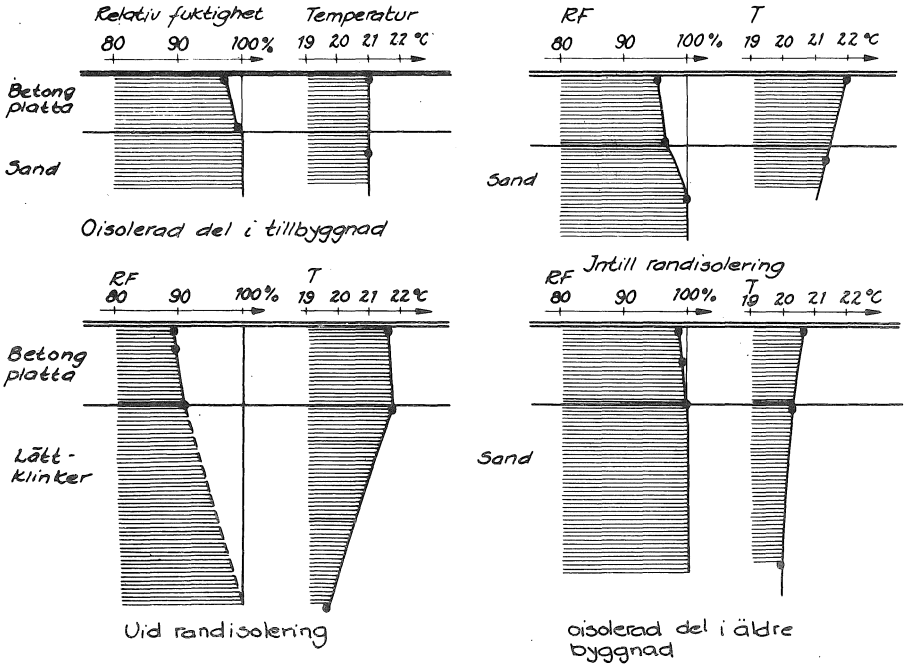


Fig. 8.10 Fukt- och temperaturfördelning i olika punkter.
Distribution of moisture and temperature in different points.

IV. Platta med underliggande värmeisolering av lättklinker

I ett småhusområde i nordvästra Skåne besvärades man av luktproblem, som genom en skadeutredning kunde härledas till en för stor fuktproduktion från grundkonstruktionen i de rum där man har en genomsläpplig golvbeläggning. Provtagning och mätning utfördes i tre olika hus varvid resultatet enligt fig 8.11 erhölls.

I ett av husen fungerade lättklinkerisoleringen fullt tillfredsställande och betongplattan hade haft möjlighet att torka. I de båda andra husen var lättklinkern av sämre kvalitet, men samma fabrikat, och fungerade inte som ett kapillärbrytande skikt. Markfukt tillfördes betongplattan kapillärt via lättklinkerisoleringen med ökad fuktproduktion i husen som följd.

Den ökade fuktproduktionen gav som resultat ett mycket fuktigt inneklimat och vid köldbryggor och kalla delar, t ex i ytterväggshörn, var fuktbetingelserna sådana att mögelsvamp kunde växa, med luktproblem som följd.

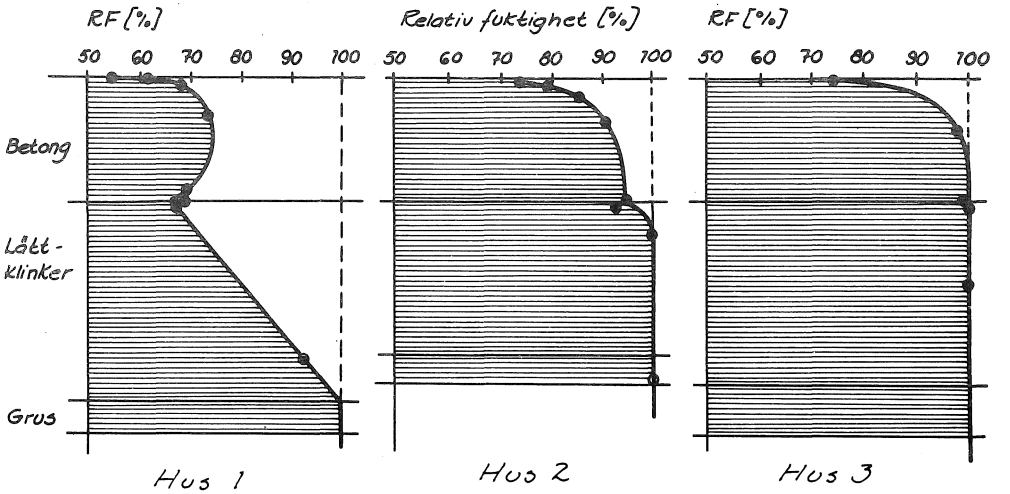


Fig. 8.11 Fuktfördelning i olika hus med underliggande värmeisolering av lättklinker av olika kvalitet men samma fabrikat.
Moisture distribution in different houses with an underlying heat insulation of expanded clay of different qualities but the same manufacturer.

V. Platta med underliggande värmeisolering av mineralull.

I ett småhusområde med luktproblem vid Skånes västkust utfördes en kontrollmätning av fukttillståndet i grunden, för att avgöra om tillskott av markfukt kunde vara orsaken.

Konstruktionen bestod av en tunn betongplatta med underliggande värmeisolering av mineralull lagd på en konstruktionsbetong direkt på mark enligt fig 8.12. Resultatet av fuktmätningen framgår också av figuren.

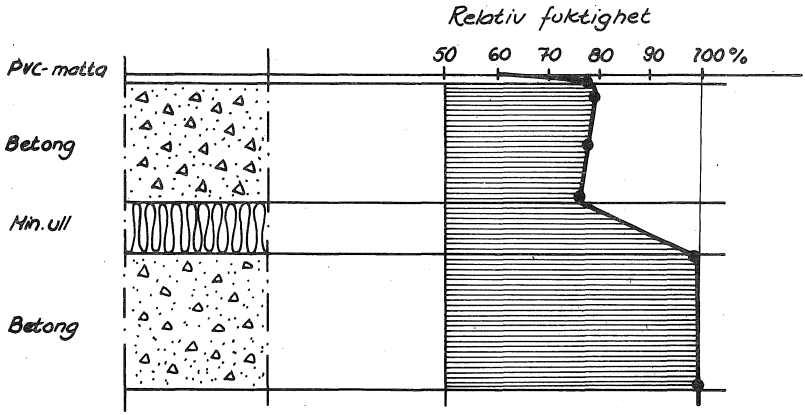


Fig. 8.12 Fuktfördelning vid underliggande värmeisolering av mineralull.
Moisture distribution at an underlying heat insulation of mineral wool.

Det visade sig att denna konstruktion fungerat alldeles utmärkt. Temperaturgradienten på några grader hade givit den övre tunna betongplattan möjlighet att torka ut nedåt även sedan den täta golvbeläggningen lagts på. Mineralullen hade förmått skapa en tillräcklig temperaturskillnad och stoppat markfukten, trots att den på några ställen trampats ned så att avståndet mellan betongplattorna i en punkt inte var mer än någon centimeter.

Den aktuella golvkonstruktionen var helt tillfredsställande och kunde avfärdas som orsak till problemen, som istället kunde härledas till anslutningen mellan yttervägg och golv.

VI. Uppvärmd platta med övergolv av spånskiva och cellplast.

I ett småhusområde i norra Småland består grundkonstruktionen av en uppvärmd makadambädd på vilken en betongplatta gjutits på en plastfolie. På plattan har ett övergolv av cellplast och spånskiva lagts varefter en tät plastmatta applicerats, se fig 8.13. Temperaturen i betongen var tidvis högre än 50°C, dvs en temperaturskillnad mellan betong och spånskiva på ca 30°C.

Skador på spånskiveövergolvet yttrade sig genom att dessa svällde kraftigt och buktade upp i skarvarna flera centimeter. Vid provtagning erhölls fuktkvoter i spånskivorna på upp till 90%, dvs det fanns nästan lika mycket vatten som trä i spånskivan. Detta innebar att vattenånga nedifrån kondenserat i spånskivan.

Efter provtagning och fuktmätning i betongplattan, kunde det fastställas att denna var fuktkällan, vilket är naturligt då plastfolien under plattan hindrade markfukt att tränga upp. Av avsnitt 8.2 framgår att, vid en temperaturskillnad på 30°C mellan en varm betongplatta och ett material i ångkontakt med denna, betongplattan måste vara uttorkad till ca 20% RF för att fuktbelastningen på den kallare spånskivan skall underskrida 90% RF. Då det är helt orimligt att försöka torka betong till så lågt fuktinnehåll, torktider på storleksordningen år krävs, måste den varma fuktiga betongplattan avskärmas från övergolvkonstruktionen med en ångspärr. Detta hade gjorts i en del av husen och i dessa fanns inga skador, men där plastfolien mellan cellplast och betong utelämnats var skadorna omfattande.

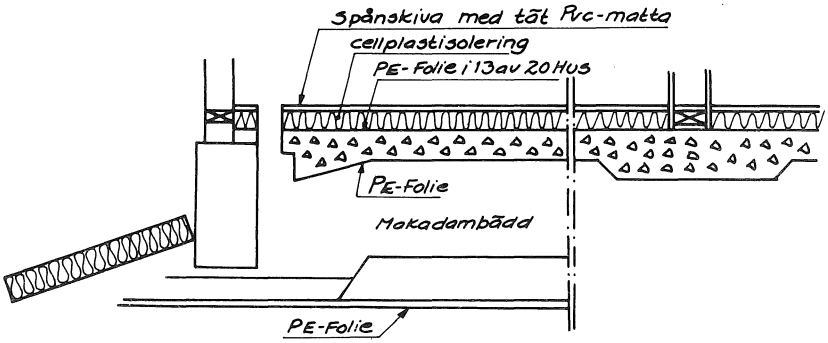


Fig. 8.13 Grundläggning med uppvärmd makadambädd och betongplatta.

Övergolv av spånskiva + cellplastisolering.

Foundation with a heated bedding of macadam and a concrete slab. Floor of fibreboard and insulation of expanded polystyrene.

Av de redovisade skadefallen och tidigare avsnitt, kan följande enkla råd anvisas vid utförande av golvkonstruktioner på mark:

Lägg dränering tillräckligt djupt!

Tillse att byggdelar ej kan suga kapillärt!

Skydda mot markfukt med värmeisolering; enbart randisolering är otillräckligt!

Lita inte på att en "fuktspärr" alltid gör skäl för namnet!

Var extra försiktig då fuktiga material har förhöjd temperatur!

REFERENSER

Adamson, B, 1970, Fuktproblem vid bjälklag i kontakt med jord. Byggmästaren, 3, p. 22.

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

Adamson, B, Ahlgren, L, Bergström, S G, Larsson, P-G & Mattsson, P-O, 1973, Fukt i golv och väggar. (Statens institut för byggnadsforskning). Stockholm. Rapport R11:1973.

Adamson, B & Larsson, P-G, 1970, Fuktförhållanden i bjälklag i kontakt med jord- Karlslund, Sollentuna. (Tekniska Högskolan i Lund. Institutionen för byggnadskonstruktionslära.) Lund. Arbetsrapport 1970:1.

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

Ahlgren, L, 1973, Fukt i betonggolv med tät beläggning. Byggmästaren 6, p. 17.

Ahlgren, L, 1968-1972, Skadeutredningar och utlåtanden. (Tekniska Högskolan i Lund. Avdelningen för byggnadsmateriallära.) Lund. Div. interna rapporter.

Ahlgren, L, Bergström, S G, Fagerlund, G & Nilsson L-O, 1976, Fukt i betong. (Cement- och betonginstitutet, kursverksamheten) Stockholm.

Andersen, N E, Nicolajsen, A, Nielsen, A, 1975, Fugtvandring og fugtophobning i opvarmede terraendaek med diffusionstaette belegninger bestemt ved laboratorieforsøg. (Statens byggeforskningsinstitut. Byggeteknik.) Hørsholm. Notat 51.

Arndt, H, 1974, New testing method to determine capillary water absorption and desorption in building and insulating materials. Baustoffindustrie, 17(B4), p. 4-8.

Auskem, A & Horn, W, 1973, Capillary porosity in hardened cement paste. J. of Test. & Eval. vol 1, No 1.

Bauer, W, 1965, Influence of holes on water-vapour permeability of vapour-checking surface layers. (RILEM/CIB-symp "Moisture Problems in Buildings".) Helsinki.

Bazant, Z P & Najjar, L J, 1972, Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete. Mat. & Constr. Vol 5, No 25, pp 3-20.

Beijer, O, 1976, Uttorkning av betongprovkroppar vid övertemperatur. (CBI) Stockholm. Forskning 5:76.

Bengtsson, H & Lundberg, B, 1975, Golvlim. (BPA-utvecklingskontoret.) Stockholm. Intern rapport.

Bergström, S G, 1953, Lagringstemperatur, lagringstid och betonghållfasthet. (CBI.) Stockholm. Medd. nr 27.

Bergström, S G & Ahlgren, L, 1969, Beräkning av absorptionsisotermer för betong. Nordisk betong, 2.

Bergström, S G & Wastesson, A, Studium av torkförlopp, fuktfördelning och ocrateringsdjup. (CBI.) Stockholm.

Bergström, S-G el al, 1974, Kompendium i Byggnadsmateriallära AK. (LTH, Avd. f. BML) Lund.

Beskow, G, 1930, Om jordarternas kapillaritet. (Svenska Väginstitutet.) Stockholm. Meddelande 25.

Bjurvald, M, 1975, Ny fuktspärr utan epoxi. (Casco AB.) Stockholm Bygget, nr 3-4, årg 9.

Björkman, E, 1946, Om lagringsröta i massavedgårdar och dess förebyggnad. (Statens Skogsforskn.institut.) Stockholm. Meddelande, band 35, nr 1.

Bomberg, M, 1974, Moisture flow through porous building materials. (LTH. Inst. f. byggn.tekn.) Lund. Report 52.

Bouche, M, 1975, Mouvement de l'eau dans les solsfins compacte's. (Inst. Techn. du Batiment et des Travaux Publics.) Annales, No 331, sept. 1975.

Bray, W H 1969, Diffusion of water in hardened Portland cement paste. (Dep. of Civ. Eng. Stanford University.) Stanford. Teckn. Rep. No. 112.

Bray, W H & Sellevold, E J, 1973, Water sorption properties of hardened cement paste cured or stored at elevated temperatures. Cem. & Concr. Res. vol 3, pp. 723-728.

Campbell-Allen, P, Kass, J L & Booker, J R, 1973, Size effects in drying and shrinkage of concrete. RILEM-bulletin, Mat. & Constr., vol 6 No 32, pp. 151-152.

Carlsson, K & Claesson, J, 1975, Datorprogram för beräkning av fuktförlopp, I. (LTH. Inst. f. Bkl.) Lund. Arbetsrapport 1975:2.

Claesson, J, 1972, Beräkning av temperatur- och fuktförlopp i porösa material. (LTH. Inst. f. Bkl.) Lund. Arbetsrapport 1972:7.

Claesson, J, 1973, Modell för beräkning av fukthalter vid sorptionshysteresis. (LTH. Inst. f. Bkl.) Lund. Arbetsrapport 1973:1.

Claesson, J & Gustafson, D, 1975, Fukt i porösa byggnadsmaterial. Lägesrapport nov. 1975. (LTH. Inst. f. Bkl.) Lund. Rapport Bkl 75:10.

Claesson, J, 1977, Theory of microcapillarity, I. Equilibrium and stability. (LTH, Dep. of Math. Phys.)

Copeland, L E & Bragg, R H, 1955, Self-desiccation in Portland-cement pastes. ASTM Bulletin, No 204, pp. 34-39.

Copeland, L E & Hayes, J C, 1953, Determination of non-evaporable water in hardened Portland-cement paste. ASTM Bulletin.

Copeland, L E & Hayes, J C, 1956, Porosity of hardened Portland-cement pastes. J. of the Am. Concr. Inst., No 6.

Corneliussen, I, 1974, Gulvkonstruktioner og fugt. Dansk byggeri, nr 9, 13 mars 1974, s. 6.

Czernin, W, Cementkemi för byggare. (Svenska Cementföreningen, Malmö och Bauverlag, Wiesbaden und Berlin.) Malmö.

Danielsson, U, 1966, Conduction calorimeter studies of the heat of hydration of a Portland cement. (CBI.) Stockholm. Handl. nr 38.

Danielsson, U, 1974, An apparatus for easy determination of the amount of bound water in cement pastes ..., Mat. & Constr. vol. 7, No 40, p. 231.

England, G L & Skipper, M E, 1973, On the prediction of moisture movement in heated concrete. 2nd Int. Conf. on Struct. Mech. in React. Tech. H 6/2 Berlin. 10-14 sept. 1973, vol 3, Reactor Vessels.

Englert, G & Wittman, F, 1968, Water in hardened cement paste. RILEM-Bulletin, Mat. & Constr. vol 1, No 6, pp. 535-546.

Fagerlund, G & Tuutti, K, 1975, Fuktskador i småhusgolv på mark. (CBI. Uppdragsfunktionen.) Stockholm. Rapport nr 7558.

Fagerlund, G, 1976, Approximativ metod för beräkning av uttorkningsförloppet för ytbelagda betongplattor på mark. (CBI.) Stockholm. Forskning 11:76.

Fagerlund, G, 1977, Teoretisk analys av en provningsmetod för kapillärsugningsförmågan hos lättklinkerbäddar. (CBI. Uppdragsfunktionen.) Stockholm. Rapport nr 7726.

Feldman, R F & Sereda, P J, 1963, Moisture content - its significance and interaction in a porous body. (1963 Int. symp on Humidity and Moisture.) Washington D.C. vol 4.

Feldman, R F & Sereda, P J, 1968, A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties. Mat. & Constr., vol 1, No 6.

Fredriksson, G, 1975, PM angående fuktskador i samband med täta beläggningar på betonggolv. (BPA, utvecklingskontoret) Stockholm. Intern rapport.

Glover, G M & Raask, E, 1972, Water diffusion and micro-structure of hydrated cement pastes. Mat. & Constr., vol 5, No 29, pp. 315-322.

Granholm, L-E & Johansson, J-E, 1974, Fuktproblem i samband med betongplattor. (CTH, Inst. f. byggn.tekn.) Göteborg. Examensarbete, byggnadsteknik 74:9.

Grudemo, A, 1976, Bestämning av desorptionsisotermer för cement-pasta. Personlig korrespondens.

Hancox, N L, 1967, A note on the form of the rate of drying curve for cement paste and its use in analysing the drying behaviour of this material. Mat. & Constr. No 36.

Hancox, N L, 1966, The diffusion of water in concrete. Unclassified A.E.E.W., R482, Winfrith.

Harmathy, T Z, 1967, Moisture sorption of building materials. (Nat. Res. Council of Can. Div. of Build. Res.) Ottawa. Techn. paper No 242.

Harris, D H C, Windsor, C G & Lawrence, C D, 1974, Free and bound water in cement pastes. Mag. of Concr. Res. Vol 26, No 87.

Hedén, B, 1977, Fukttillståndsförändringar i betongplatta på mark med underliggande värmeisolering. (LTH, avd. f. BML) Lund. Examensarbete, intern rapport.

Hillerborg, A, 1975, Kompendium i Byggnadsmateriallära FK I för V3. (LTH. Avd f. BML.) Lund.

Hilsdorf, H K, 1967, A method to estimate the water content of concrete shields. Nucl. Engin. and Design, No 6.

Hobbs, D W & Mears, A R, 1971, The influence of specimen geometry upon weight change and shrinkage of air-dried mortar specimens. Mag. of Concr. Res. Vol 23, No 75-76.

Hundt, J, 1975, Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles. (Verlag Wilhelm Ernst & Sohn kG) Berlin. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Heft 256.

Jaegermann, C H & Glucklich, J, 1969, Effect of high evaporation during and shortly after casting on the creep behaviour of hardened concrete. Mat. & Constr., No 7, p. 59.

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

Kamimura, K, Sereda, P J & Swenson, E G, 1965, Changes in weight and dimensions in the drying and carbonation of Portland cement mortars. Mag. of Concr. Res. Vol 17, No 50.

Kasi, S S S & Pihlajavaara, S E, 1969, An approximate solution of a quasilinear diffusion problem. (The State Inst. for Techn. Res.) Helsinki. Publ. 153.

Kasperkiewicz, J, 1972, Some aspects of water diffusion process in concrete. Mat. & Constr. Vol 5, No 28, pp. 209-214.

Keey, R B, 1972, Drying, priciples and practice. (Pergamon Press Ltd) Oxford. Int. Ser. of Monogr. in Chem. Engin. Vol 13.

Klopfer, H, 1974, Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen. (Bauverlag GMBH.) Wiesbaden und Berlin.

Kommentarer till SBN nr 1975:3

van der Kooi, J, 1971, Moisture transport in cellular concrete roofs. (Uitgevery Waltman.) Delft.

Krischer, O, 1963, Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. (Springer Verlag) Berlin.

Lindberg, B, 1973, Betongmålning. (Nordiska Inst. f. Färgforskn.) Köpenhamn. Rapport T4-73M

Lowe, I R G, Hughes, B P & Walker, J, 1971, The diffusion of water in concrete at 30°C. Cem & Concr. Res. Vol 1, pp. 547-557.

Lund-Hansen, P, 1967, Fugttransport i byggematerialer. (Polyteknisk forlag.) DTH, Lab. for varmeisol., medd. nr 15.

Lykow, A W, 1958, Transporterscheinungen in kapillar porösen Körpern. (Akademie-Verlag.) Berlin.

Martin, Rauen & Schiessl, 1975, Karbonatisierung von Beton aus verschiedenen Zementen. Betonwerk + Fertigteil-Technik, Heft 12.

Mc Donald, J E, 1975, Moisture migration in concrete. (US Waterways Exp. Station.) Vicksburg, Miss. (VSA). Techn. Rep. C-75-1.

Mears, A R & Hobbs, D W, 1972, The effect of mix properties upon the ultimate air-drying shrinkage of mortars. Mag. of Concr. Res. Vol 24, No 79.

Monfore, G E, 1963, A small Probe-Type Gage for measuring relative Humidity. J. PCA Res. Dev. Lab. May 1963.

Nielsen, Anders, 1977, Betons fugtmekanik (DIA, Bygningsafd. Materiallaere.) Köpenhamn.

Nielsen, Anker, 1974, Fugtfordelinger i gasbeton under varme- og fugttransport. (DTH, Lab.f.varmeisol.) Köpenhamn. Medd. nr 29.

Nielsen, A, 1976, Måling af fugtindhold i beton. (DTH, Lab. f. varmeisol.) Intern rapport.

Nilsson, L-O, 1974, Beräkning av uttorkningsförloppet för betong. (LTH, avd. f. BML.) Lund. Intern rapport.

Nilsson, L-O, 1974, Tillämpade fuktproblem i samband med material-kombinationer och ytskikt. (Statens råd för byggnadsforskning) Stockholm. Delrapport juni 1974.

Nilsson, L-O, 1975, Enkel pormodell för härdande cementpasta i samband med kalkutfällning på betongytor. (LTH, avd. f. BML.) Lund. Intern rapport.

Nilsson, L-O, 1975, Fuktproblem vid täta skikt på betong. Sammanfattning av seminarium, dec.-75. (LTH, avd. f. BML) Lund. Intern rapport.

Nilsson, L-O, 1976, Uttorkning av betong. Inverkan av sammansättningen. Nordisk Betong, 1.

Nilsson, L-O, 1976, Fuktproblem vid täta skikt på betong. Väg- och vattenbyggaren, 4.

Nilsson, L-O, 1976, Moisture fixation and moisture transfer in concrete. Sereda-seminar at CBI. (LTH, Avd. f. BML) Lund. Intern rapport.

Nilsson, L-O, 1977, Fukt i betonggolv. Cementa nr 3.

Nilsson, L-O, 1973-77, Utlåtanden och skadeutredningar. (LTH, avd. f. BML) Lund. Div. interna rapp.

Nischer, P, 1976, Austrocknen von jungem Beton, Teil 1-3. Betonwerk + Fertigteil-Technik. Heft 3, 4 & 5.

Petersson, G, 1974, Undersökning av funktionen hos golvlim i fuktig och alkalisk miljö. (LTH, avd. f. BML) Lund. Examensarbete, intern rapport.

Pihlajavaara, S E, 1963, Notes on the drying of concrete. (State Inst. for techn. research) Helsinki.

Pihlajavaara, S E, 1965, On the main features and methods of investigation of drying and related phenomena in concrete. (State inst. for techn. research) Helsinki. Ph. d. Thesis, Publ. No 100.

Pihlajavaara, SE, 1974, Lecture on practical estimation of moisture content of drying concrete structures. Concrete seminar. Helsinki.

Pihlajavaara, S E, 1976, An extract from the proceedings of the RILEM International symposium on carbonation of concrete.

Powers, T C, 1947, A discussion of cement hydration in relation to the curing of concrete. Highway Research Board.

Powers, T C & Brownyard, T L, 1948, Studies on the physical properties of hardened Portland Cement paste. PCA, Bulletin 22. Chicago.

Powers, T C, 1949, The non-evaporable water content of hardened Portland cement paste - Its significance for concrete research and its method of determination. ASTM Bulletin No 158. May, pp. 68-76.

Powers, T C, Copeland, L E & Mann, H M, 1959, Capillary continuity or discontinuity in cement pastes. J. of PCA Res. and Dev. Lab. Vol 1, No 2.

Prangnell, R D, 1971, The water vapour resistivity of building materials. A literature survey. Mat. & Constr. Vol 4, No 24.

Radjy, F, 1974, Moisture transport in micro porous substances. Part 1. The interaction of molecular streaming, surface diffusion and capillary suction. J. of Mat. Sci. 9(1974), pp. 744-752.

Rose, D A, 1963, Water movement in porous materials: Part 2 - The separation of the components of water movement. Brit. J. Appl. Phys. Vol 14, p. 491.

Sandberg, P I, 1973, Byggnadsdelars fuktbalans i naturligt klimat. (LTH, Inst f. byggn.tekn.) Lund. Rapport 43.

Sandin, K, 1973-77, Skadeutredningar. (LTH, avd f. BML) Lund Div int rapp.

Schwarz, B & Künzel, H, 1974, Der kritische Feuchtigkeitsgehalt von Baustoffen. Gesundheits-Ingenieur, 95 Jahrg. Heft 9.

Sereda, P J & Swenson, E G, 1967, Apparatus for preparing Portland cement paste of high water-cement ratio. Mat. Res. & Stand. April 1967.

Sereda, P J, Feldman, R F & Swenson, E G, 1966, Effect of sorbed water on some mechanical properties of hydrated Portland cement pastes and compacts. (Highw. Res. Board.) Washington. Symp. on Structure of Portland cement paste and concrete. Special report 90. Publ. 1389.

Sørensen, E V & Radjy, F, 1976, Permeability of hardened cement paste in relation to pore structure. (Aalborg Portland, Res. & Dev., Concr. Res. Lab.) Karlstrup. Intern rapport.

Thomsen, I, 1974, Farlig byggefejl. Dansk Byggeri nr 10, 20 mars, p. 20.

Thomsen, I, 1974, Forkert anvendelse af folier ødelaegger årligt mange gulve. Dansk Byggeri nr 20, 19 juni, p. 6.

Torgersen, S E, 1976, Frostsikning av gulv på grunnen. (Norges byggforskn. inst.)

Tveit, A, 1975, Uttörking av fukt i betongplater. (Norges byggforskn.inst.) Intern arbiedsrapport, proj. nr F1501-.

Whiting, D & Kline, D E, 1977, Pore size distribution in epoxy impregnated hardened cement pastes. Cem. & Concr. Res. Vol 7, pp. 53-60.

Wierig, H-J, 1965, Die Wasserdampfdurchlässigkeit von Zementmörtel und Beton. Zement-Kalk-Gips nr 9/1965, pp. 471-482.

Wittmann, F H, 1973, Interaction of hardened cement paste and water. J. of the Am. Cer. Soc. Vol 56, No 8, Aug 1973.

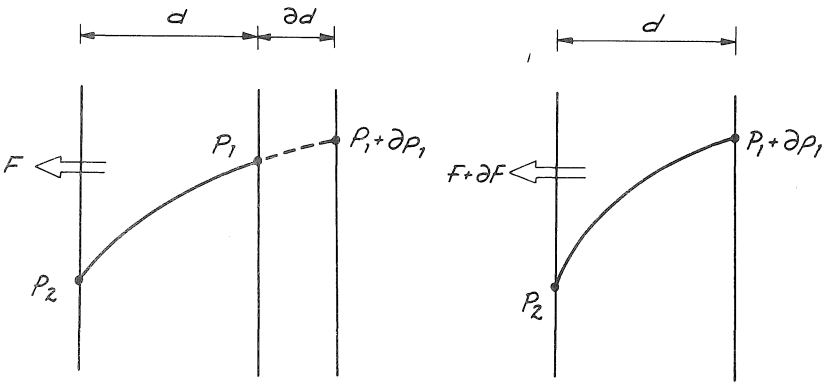
Vos, B H & Tammes, E, 1968, Flow of water in the liquid phase (Inst TNO for build. mat. & build. struct.) Rijswijk, Report No BI-68-38.

Yuan, R L, Hilsdorf, H K & Kesler, C E, 1968, Effect of temperature on the drying of concrete. (University of Illinois.) Urbana. TAM report No 316.

APPENDIX I

Härledning av ekv (5.9)

Ekvation (5.9) kan härledas genom att betrakta en skiva med tjockleken d, där ångtrycket på ena sidan är $p_1 + \partial p_1$ och konstant p_2 på den andra samt en skiva med ångtrycket $p_1 + \partial p_1$ på ena sidan, men med en sådan tjocklek $d + \partial d$ att ångtrycket blir p_1 på djupet d, se figur nedan



Flödet genom den tjockare skivan blir

$$F = k_{p_1+\partial p_1, p_2} \frac{p_1+\partial p-p_2}{d+\partial d} \qquad (1)$$

Genom den tunnare skivan fås flödet till

$$F + \partial F = k_{p_1+\partial p_1,\ p_2} \frac{p_1+\partial p-p_2}{d} \qquad (2)$$

(1) och (2) ger

$$F + \partial F = F \frac{d+\partial d}{d} = F + F \frac{\partial d}{d}$$

dvs

$$\partial F = F \frac{\partial d}{d} \qquad (3)$$

Flödet genom den tjockare skivan kan också fås av

$$F = k_{p_1+\partial p_1,\ p_1} \cdot \frac{\partial p_1}{\partial d}$$

Detta i (3) ger

Appendix forts

$$\partial F = k_{p_1+\partial p_1},\ p_1 \frac{\partial p_1}{d}$$

eller

$$d \cdot \frac{\partial F}{\partial p_1} = k_{p_1+\partial p_1},\ p_2 \qquad (4)$$

Då ∂p_1 (och ∂d) går mot 0 fås ekv (5.9)

$$d \cdot \frac{\partial F}{\partial p_1} = k_{p_1}$$

Sigma-Tryck
TLTH Lund