LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA
LUNDS UNIVERSITET

Avd Byggnadsmaterial

VATTENINSUGNING I BETONG

Laboratorieundersökningar, fältmätningar, beräkningar och modeller

Peter Johansson och Lars-Olof Nilsson

TVBM-3134 Lund 2006

ISRN: LUTVDG/TVBM--06/3134--SE (1-106)

ISSN: 0348-7911 TVBM

Lunds Tekniska Högskola
Byggnadsmaterial
Box 118

221 00 LUND

Tel: 046-2227415
Fax: 046-2224427
www.byggnadsmaterial.lth.se

Innehåll

1	**Bakgrund, inriktning, begränsningar**	**5**
1.1	Bakgrund	5
1.2	Rapportens uppläggning	6
1.3	Tillkännagivanden	6
2	**Vatteninsugning i prefabricerade betong-plattor**	**7**
2.1	Försökets genomförande	7
2.2	Provkroppar och material	7
2.3	Mätningar	8
2.4	Resultat	9
2.5	Kommentarer	12
3	**Vatteninsugning i nygjuten betong från regn**	**13**
3.1	Försökets genomförande	13
3.2	Provkroppar och material	13
3.3	Mätningar	14
3.4	Resultat	15
3.5	Kommentarer	20
4	**Vatteninsugning i nygjuten betong från avjämningsmassa**	**21**
4.1	Försökets genomförande	21
4.2	Mätningar	21
4.3	Resultat	22
4.4	Kommentarer	24
5	**Vatteninsugning i fem månader gammal betong från regn**	**25**
5.1	Försökets genomförande	25
5.2	Mätningar	25
5.3	Resultat	26

6	**Vatteninsugning i nio fältobjekt**	**31**
6.1	Försökens genomförande	31
6.2	Serie 1: Mellanbjälklag, vct 0.59	32
6.3	Serie 2: Vindsbjälklag, vct 0.37	33
6.4	Serie 3: Platta på mark, vct 0.80	35
6.5	Serie 4: Vindsbjälklag, vct 0.63	36
6.6	Serie 5: Vindsbjälklag, vct 0.58	36
6.7	Serie 6-9: Fyra mellanbjälklag, vct 0.38-0.60	37
6.8	Serie 10: Mellanbjälklag över källare, vct 0.57	40
6.9	Serie 11-12: Platta på mark, vct 0.36 & 0.37	41
6.10	Serie 13: Mellanbjälklag, vct 0.35 med silika	44
6.11	Serie 14-15: Platta på mark, vbt 0.37 & 0.36	44
6.12	Serie 16: Platta på mark, vct 0.62	45
7	**Slutsatser av mätningarna**	**49**
8	**Teoretiska modeller för vatteninsugning**	**51**
8.1	Klassisk kapillärsugningsmodell	51
8.2	Vatteninsugning som ”fukttransport”	53
8.3	Fuktbindning	55
8.4	Randvillkor på betongytan	56
9	**Materialegenskaper för aktuella betonger**	**57**
9.1	Hydratationsgrader	57
9.2	Sorptionskurvor	58
9.3	Fukttransportkoefficienter	62
10	**Beräkningar av vatteninsugning från regn i gammal betong**	**67**
10.1	Beräkningar, steg 1: Materialegenskaper enligt kap 9, konstanta hydratationsgrader	67
10.2	Beräkningar, steg 2: Materialegenskaper enligt kap 9, varierande hydratationsgrader	70
10.3	Beräkningar, steg 3: Större fukttransportkoefficienter än enligt kap 9, konstanta hydratationsgrader	72
10.4	Slutsatser av beräkning av vatteninsugning i fem månader gammal betong	75
11	**Beräkningar av vatteninsugning från avjämningsmassa i nygjuten betong**	**77**
11.1	Materialegenskaper för avjämningsmassa	77
11.2	Materialegenskaper för betong med vct 0.70	79

11.3	Beräkning med material 17 & avjämningsmassa typ 1	81
11.4	Beräkning med material 17 & avjämningsmassa typ 2	82
11.5	Beräkning med material 17, men scanningkurvor för betongen	82
11.6	Beräkning med material 17 & 10, avjämningsmassa typ 2, scanningkurvor för betongen. Större tjocklek	84
11.7	Beräkning med material 17 & avjämningsmassa typ 2, scanningkurvor för betongen. Sämre torkklimat	85
11.8	Slutsatser av beräkningarna för vatteninsugning från avjämningsmassa	86
12	**Beräkningar av vatteninsugning från regn i nygjuten betong**	**89**
12.1	Mätvärden, betong med vct 0.40, regn från 3 timmar	89
12.2	Materialegenskaper	90
12.3	Beräkning 1, α = 0.40 efter 1 dygn, regn 7 dygn	91
12.4	Beräkning 2, α = 0.40 efter 1 dygn, regn 1 dygn	92
12.5	Beräkning 3, α = 0.40 konstant, regn 1 dygn	94
12.6	Beräkning 4, α = 0.30 konstant, regn 7 dygn	94
12.7	Beräkning 5, α = 0.30 konstant, regn 1 dygn	95
12.8	Beräkning 6, α = 0.40 konstant, regn 7 dygn	96
12.9	Slutsatser av beräkningarna med mycket tidigt regn.	97
13	**Förslag till modell för vatteninsugning i betong**	**99**
13.1	Förutsättningar	99
13.2	Vatteninsugningsmodell i matematiska termer	100
14	**Förslag till fortsatt forskning**	**103**
15	**Referenser**	**105**

1 Bakgrund, inriktning, begränsningar

1.1 Bakgrund

1998 beviljade SBUF anslag för ett projekt om vatteninsugning i betong med syftet att ta fram sådan kunskap om vatteninsugning i betongytor att den kan beräknas på ett mer teoretiskt riktigt sätt än idag. På så sätt kan flera olika typer av vatteninsugning (regn, avjämningsmassor, limfukt) i betong hanteras i dagens och morgondagens uttorkningsprogram. Syftet är också att ta fram en mätmetod för bedömning av en betongytas fuktupptagningsförmåga.

Den ursprunglige projektledaren tekn dr Göran Hedenblad fick aldrig tillfälle att genomföra projektet. Han var tjänstledig under en följd av år för sin tjänst på Boverket och har sedan slutat sin anställning. Avdelningen hade då ingen annan som kunde behandla området teoretiskt. Tekn lic Niklas Johansson har istället genomfört en serie laboratorieexperiment; delvis publicerade i hans licentiatavhandling och i examensarbetsrapporter. Experimenten har i första hand utvärderats med avseende på inverkan på uttorkningsförloppet och erforderliga uttorkningstider. Dessa experiment har gett sådana resultat att projektets syften till stor del uppnåtts, med undantag av de teoretiska delarna.

Resultaten ger tydliga besked om hur regn och applicering av avjämningsmassa ger upphov till vatteninsugning och förlänger erforderliga uttorkningstider. Detta har kvantifierats under högst skilda förutsättningar, nära praktiska förhållanden. Experimenten har också gett upphov till en mätmetod som har visats fungera. Resultaten behöver nu slutligen användas för verifiering av en teoretisk modell.

Det experimentella arbetet har genomförts i ett antal försöksserier under 2002 och 2003. I dessa har olika typer av vatteninsugning simulerats, från regn respektive från avjämningsmassa. Insugen vattenmängd och fuktprofilerna före och efter insugningen har uppmätts. Dessa data har sedan använts för att pröva modeller för beräkning av vatteninsugning.

Projektet har även tillgång till data från ett antal fältstudier av effekten av vatteninsugning. I dessa har fuktförhållanden mätts både före och efter vattenbelastningen, som i vissa fall inte dokumenterats på ett tillfredsställande sätt. De fältstudier som innehåller bra data på vatteninsugning har valts ut för noggrannare analys.

1.2 Rapportens uppläggning

I de första kapitlen beskrivs de olika försöksserierna och de resultat dessa har gett. Här ingår både laboratorieundersökningar och fältstudier. Därefter beskrivs modeller för vatteninsugning och de materialegenskaper som erfordras för att kunna använda dem. Slutligen redovisas en serie beräkningar med jämförelser med mätdata.

1.3 Tillkännagivanden

Projektet har finansierats av SBUF genom JM AB och haft stöd från Byggrådet i Malmö. Det initierades ursprungligen av prof. Göran Fagerlund och planerades av tekn dr Göran Hedenblad. Tekn lic Niklas Johansson har lett flera av de ingående delstudierna och har tillsammans med Göran Fagerlund handlett de studenter som gjort en del av mätningarna. Laboratoriepersonalen vid Avd. Byggnadsmaterial vid LTH har medverkat i tillverkning av försöksuppställningar, genomförandet av fältmätningar och tillhandahållit mätteknik och kalibrering av mätutrustning.

I projektets avslutande under 2006 har tekn dr Peter Johansson genomfört samtliga beräkningar och har tillsammans med professor Lars-Olof Nilsson författat rapporten.

Ett stort tack riktas till finansiär och bidragsgivare samt alla de som medverkat konstruktivt till genomförandet av projektets olika delar.

2 Vatteninsugning i prefabricerade betong-plattor

2.1 Försökets genomförande

Försöksserien sammanfattas i Tabell 2.1.

TABELL 2.1 *Vatteninsugning i prefabricerade betongplattor (två olika betong-kvaliteter).*

Nr	Härdn./torkn. före regn	Regn
1	I form < 1 dygn	Regn ute, på lagergård 2 veckor, på byggarbetsplats 2 veckor, vid +5°C. Avjämning efter viss tid
2	I form < 1 dygn. Under tak på lager-gård 2 veckor, under tak på byggar-betsplats 2 veckor, vid +5°C	Referens utan regn. Avjämning efter viss tid
3	I form < 1 dygn	Regn ute, på lagergård 2 veckor, på byggarbetsplats 2 veckor, vid +20°C. Avjämning efter viss tid
4	I form < 1 dygn. Under tak på lager-gård 2 veckor, under tak på byggar-betsplats 2 veckor, vid +20°C	Referens utan regn. Avjämning efter viss tid
5	I form < 1 dygn.	Regn ute, på byggarbetsplats 2 veckor, vid +5°C. Avjämning efter viss tid
6	I form < 1 dygn.	Regn ute, på byggarbetsplats 2 veckor, vid +20°C. Avjämning efter viss tid
7	I form < 1 dygn.	Regn ute, på lagergård 2 veckor, mem-branhärdning 2 veckor, vid +20°C. Av-jämning efter viss tid
8	I form < 1 dygn. Under tak på lager-gård 2 veckor, vid +20°C	Regn ute, på lagergård 2 veckor, vid +20°C. Avjämning efter viss tid

Detaljer i försökets genomförande är publicerade i rapport TVBM-5052, Salievski (2003)[1] *Uttorkning av prefabricerade bjälklag* samt som kapitel 8 i rapport TVBM-3124[2], Johansson (2005) *Uttorkning av prefabricerade betongbjälklag.*

2.2 Provkroppar och material

Två serier med prefabricerade provkroppar genomfördes, dels med håldäcksplatta och dels med en massiv platta, serie HD/F respektive serie D/F. Åtta varianter av försöken

genomfördes i vardera försöksserie, se tabellen. Totalt användes 12+10 provkroppar, varav 6 reserver.

Betongsammansättningen hos de två betongerna var:

HD/F: SH-cement, vct 0.38, C=382 kg/m^3, jordfuktig konsistens.
D/F: Byggcement, vct 0.40, C=448 kg/m^3, självkompakterande.

Ur 185 mm tjocka HD/F-plattor sågades 300 mm långa provkroppar med två kanaler i varje provkropp. Bredden blev på så sätt 284 mm. Ur D/F-plattor med samma tjocklek, sågades provkroppar med måtten 250 x 250 mm. Kanalerna tätades tillfälligt med sedvanliga plastlock och provkropparna plastades in. Två dagar efter gjutning levererades provkropparna till LTH och förseglades då på kanterna med 0.2 mm PE-folie så att över- och underyta kunde ge dubbelsidig uttorkning. Ändarna av HD/F-provkropparna förseglades med plexiglasskivor som ”limmades” med silikonfogmassa. En HD/F-provkropp visas i Figur 2.2.1.

Figur 2.2.1 En HD/F-provkropp med mätpunkter för RF och “invallning” på överytan för simulering av regn och senare avjämning.

Provkropparna utsattes sedan för simulerade klimat enligt Tabell 2.1, med regn och uttorkning omväxlande under olika tidsperioder och vid olika temperaturnivåer. Samtliga provkroppar avjämnades så småningom, efter en viss uttorkningsperiod vid +20°C och 60 % RF, med ABS148.

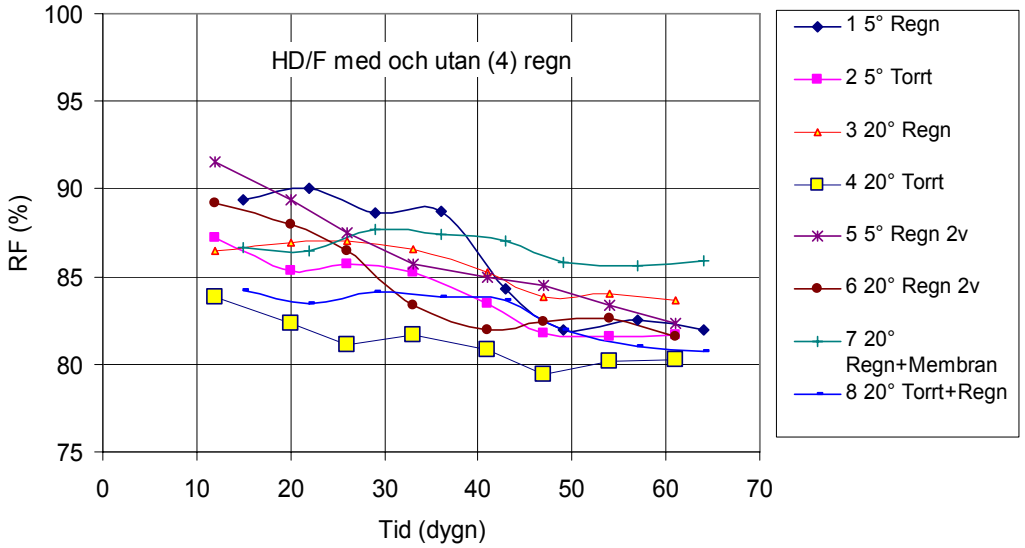
2.3 Mätningar

Uttorknings- och vatteninsugningsförloppen dokumenterades med RF-mätningar i borrhål och genom mätning på uttagna prover ur ytskikten. I håldäcksplattorna mättes dessutom RF centriskt i ett av hålen, se figuren ovan. För mätningarna användes Vaisalagivare av typ HMP 44. Mätdjupet var 20 % av plattjockleken, dvs. 37.5 mm.

Före och direkt efter avjämning togs fuktprov ut ur betongytan för mätning av RF. Uppmätt uppfuktning på grund av avjämningen var liten. Dessa resultat redovisas inte här.

2.4 Resultat

Samtliga mätresultat från ekvivalent mätdjup redovisas i figur 2.2.2 och 2.2.3 under hela mätperioden.

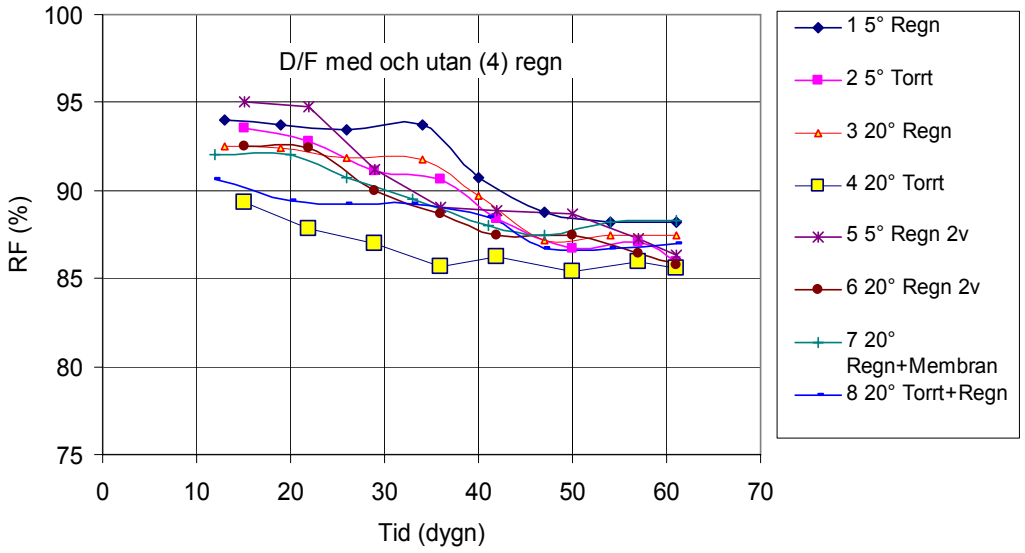


Figur 2.2.2 Samtliga mätresultat från kanalväggarna i HD/F-plattorna, med referensen (klimat 4, +20°C, ej regn) särskilt markerad (undre kurvan).

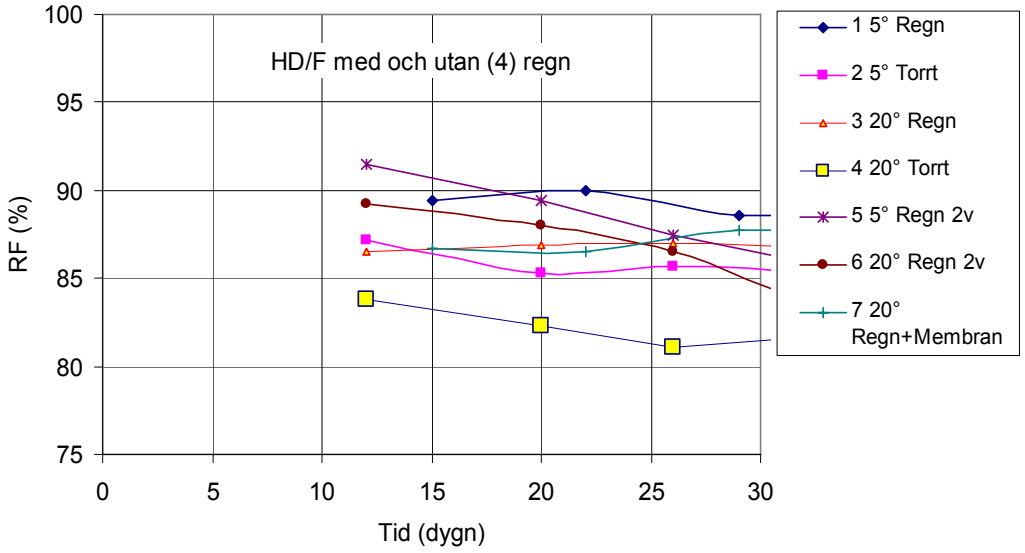
HD/F-plattorna har en tydligt snabbare uttorkning än D/F-plattorna. I båda fallen innebär regnbelastning en mycket stor ökning av torktiden för att nå under 85 % RF. HD/F-plattorna uppfuktas inte mer än till maximalt ca 90 % RF på mätdjupet på grund av 2-4 veckors konstant regnbelastning och ca två veckors uttorkning efter regnet når de åter under 85 % RF.

Inga av D/F-plattorna når under 85 % RF under mättidens 60 dygn. Regnet uppfuktar dem på mätdjupet upp till ca 95 % RF.

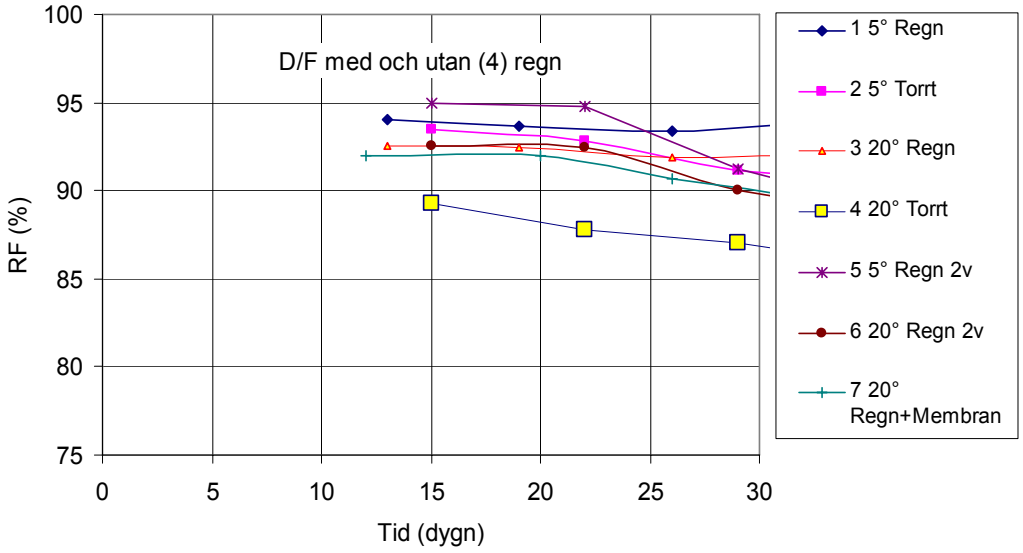
Störst uppfuktning erhölls i båda fallen vid regn och kall väderlek (klimat 1 och 5)



Figur 2.2.3 Samtliga mätresultat från de massiva D/F-plattorna, med referensen (klimat 4, +20°C, ej regn) särskilt markerad (undre kurvan).

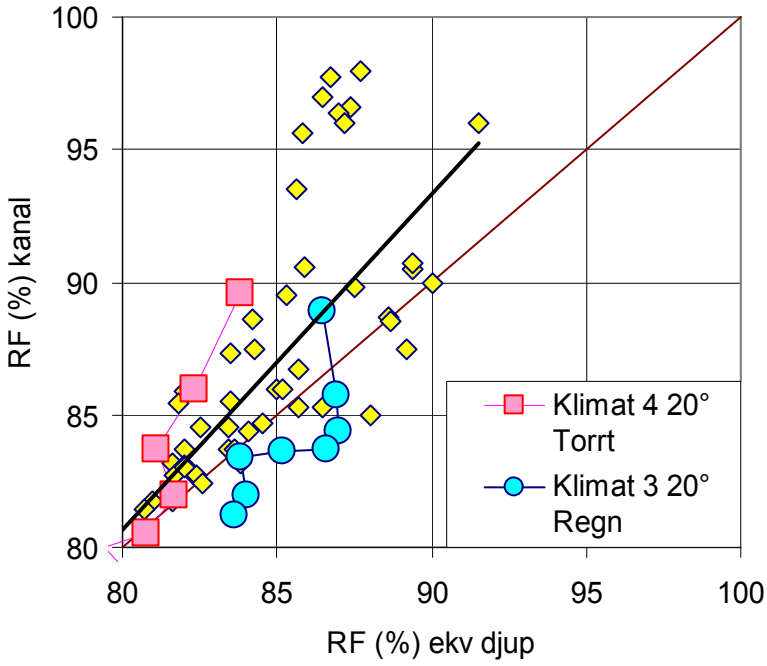


Figur 2.2.4 Samtliga mätresultat från kanalväggarna i HD/F-plattorna, med referensen (klimat 4, +20°C, ej regn) särskilt markerad (undre kurvan). Detalj under regnperiodens fyra veckor



Figur 2.2.5 Samtliga mätresultat från de massiva D/F-plattorna, med referensen (klimat 4, +20°C, ej regn) särskilt markerad (undre kurvan). Detalj under regnperiodens fyra veckor

En jämförelse mellan fuktnivån centriskt i kanalen och på ekvivalent mätdjup i kanalväggen mellan två kanaler i HD/F-plattorna visas i nedanstående figur.



Figur 2.2.6 Jämförelse mellan RF centriskt i kanalen och RF på ekvivalent djup i kanalväggen mellan två kanaler, dels för alla mätvärden (små punkter) och dels för fallet med och utan fyra veckors regn (Klimat 3 resp. Klimat 4).

Regnet ger en uppfuktning av kanalväggen på 37.5 mm djupt jämfört med kanalen. Under uttorkningsförloppet i klimat 4 är kanalväggen hela tiden torrare än kanalen, men under regnbelastningen (klimat 3, de tre översta punkterna) fortsätter kanalen att torka. Efter regnet utjämnas skillnaden något, men kanalväggen är hela tiden fuktigare på detta djup än vad kanalen är efter hand som uttorkningen fortsätter.

2.5 Kommentarer

I de provkroppar som utsattes för simulerat regn avstannade uttorkningen mycket tydligt under regnet. HD/F-plattorna nådde åter under 85 % RF genom ca två veckors uttorkning efter en lång regnperiod. D/F-plattorna nådde aldrig under 85 % RF under mätperiodens två månader och regn under 2-4 veckor förlängde tiden tills de åter var under 90 % RF med bara något mer än regnperiodens varaktighet.

Betong med så lågt vct som här, 0.38-0.40, verkar ”återhämta sig” snabbt efter en lång regnperiod, även om regnet börjar redan när betongen bara är några dagar gammal. Vatteninsugningen är följaktligen blygsam och når inte särskilt djupt i betong med så lågt vct.

För att bättre kunna mäta vatteninsugning i betong med vct 0.40 eller lägre fordras mätdjup mindre än de 38 mm som använts i denna undersökning.

3 Vatteninsugning i nygjuten betong från regn

3.1 Försökets genomförande

Försöksserien sammanfattas i Tabell 3.1.

TABELL 3.1 *Vatteninsugning i nygjuten betong från regn (av fem olika betongkvaliteter).*

Nr	Härdn./torkn. före regn	Regn
1	I form < 1 dygn.	Varaktighet 1 dygn.
2		Varaktighet 2 dygn.
3		Varaktighet 4 dygn.
4		Varaktighet 7 dygn.
5		Referens utan regn.

Detaljer i försöken är publicerade i rapport TVBM-5053, Abrahamsson & Tammo (2003)[3] *Inverkan av regn och avjämningsmassa på uttorkning av betong* samt som kapitel 5 i rapport TVBM-3124, Johansson (2005)[2] *Inverkan av simulerat regn på uttorkning av nygjuten betong*.

3.2 Provkroppar och material

Fem serier med fem olika betongkvaliteter, serie 0.35, 0.40, 0.45, 0.55 och 0.70 (=vct) genomfördes. Fem varianter i vardera försöksserien med fyra olika varaktigheter hos det simulerade regnet samt en referens utan regn. Totalt användes 25 provkroppar. Betongsammansättningen hos de fem betongerna är sammanställda i tabell 3.2.

TABELL 3.2 *Sammansättningar hos använda betonger*

vct	**0.35**	**0.40**	**0.45**	**0.55**	**0.70**
verkligt vct	0.359	0.408	0.458	0.551	0.707
cementhalt (kg/m^3)	500	435	400	340	260

Slite Byggcement, flyttillsatsmedel Cementa F 92 M

Betongen göts i polypropylenringar med diametern 310 mm, godstjockleken 20 mm och med en höjd av 120 mm. Plastringen var monterad på en formplywood med en polyetenfolie emellan. I ringen monterades mätrör för mätning av RF på två djup, 15 mm och 48 mm. En sådan ring, före gjutning, visas i figur 3.2.1.

Figur 3.2.1 En av de 25 ringarna, som form för betongprovkropparna, med två mätrör för RF-mätning på olika djup.

För simulering av regn göts en plåtring delvis in i betongen så att en del av ringen hamnade ovanför betongytan, se figur 3.2.2. För avjämning placerades en ny polypropylenring ovanpå formen och fungerade som form för avjämningsmassan.

Figur 3.2.2 Delvis ingjuten plåtring för simulering av regn.

Regn simulerades med start redan vid tre (!) timmars ålder hos betongen. Varaktigheten hos regnet var 1, 2, 4 och 7 dygn. Efter regnbelastningen lagrades provkropparna vid låg temperatur och hög fuktighet, +5°C och 80 % RF, under fyra veckor. Därefter fick de torka i +20°C och 60 % RF.

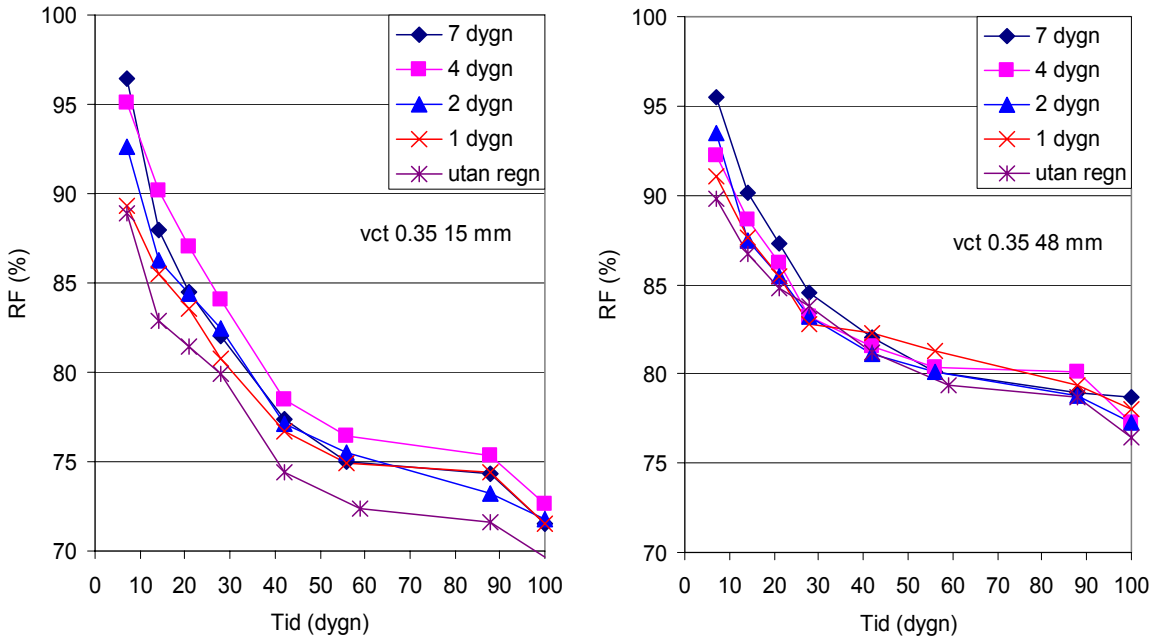
3.3 Mätningar

RF mättes på två djup under överytan, 15 och 48 mm. På dessa djup placerades horisontella mätrör. I rören på 15 mm djup satt givarna kvar under hela försöket, från första veckan. Mellan övriga mätrör flyttades givarna från mätning till mätning. Givarna

avlästes ca en gång per vecka i början av försöken och mera glest i tiden i slutet av uttorkningsförloppet.

3.4 Resultat

I nedanstående diagram visas samtliga mätresultat för respektive betong och respektive mätdjup. I varje diagram jämförs resultaten från de olika varaktigheterna hos regnen, med resultatet från provkroppen utan regn som referens.

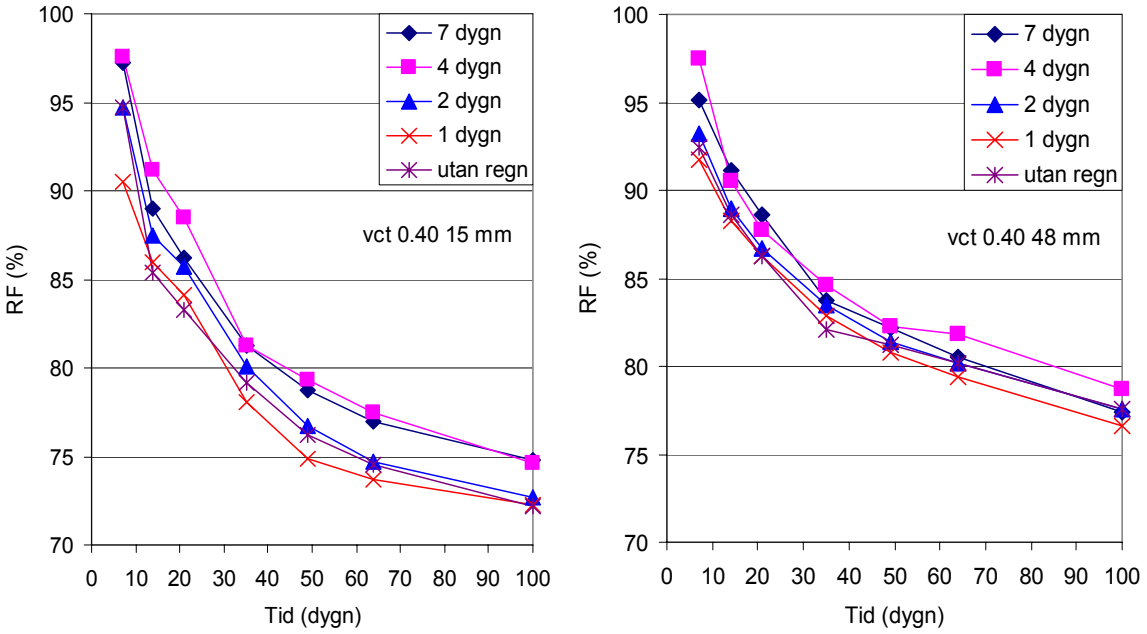


Figur 3.4.1 Uttorkningsförloppet för vct 0.35 efter regnbelastning från tiden tre timmar efter gjutning med varaktigheterna 1, 2, 4 och 7 dygn. Mätdjup 15 mm (till vänster) och 48 mm (till höger)

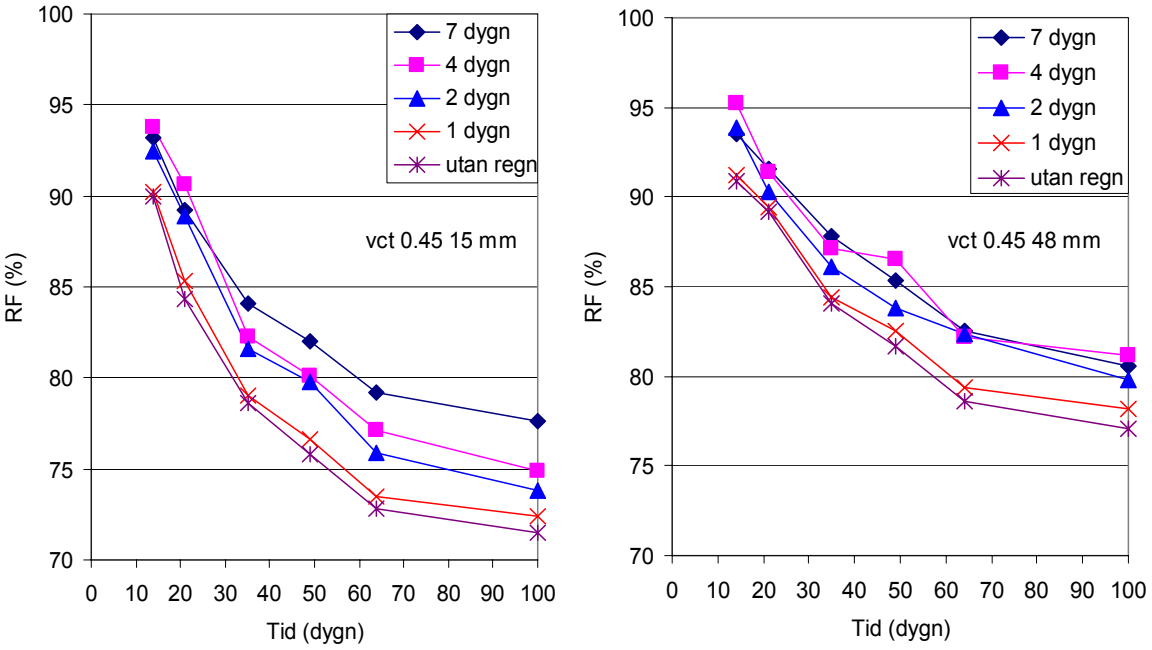
I betongen med vct 0.35 är inverkan av regnet relativt liten på 48 mm djup. RF stiger här maximalt 6 %, från ca 90 % RF. Detta motsvarar en mycket liten fukthaltsökning, som torkar ut relativt omgående när väl uttorkningen i +20°C inleds, efter ca 30 dagar. Effekten av regnet på erforderlig tid för att nå under 85 % RF var bara någon vecka.

På djupet 15 mm är effekten av regnet något större. RF stiger här till 8-9 % över referensens 88 % RF direkt efter regnet. En stor skillnad är att effekten kvarstår på detta djup även efter tre månader!

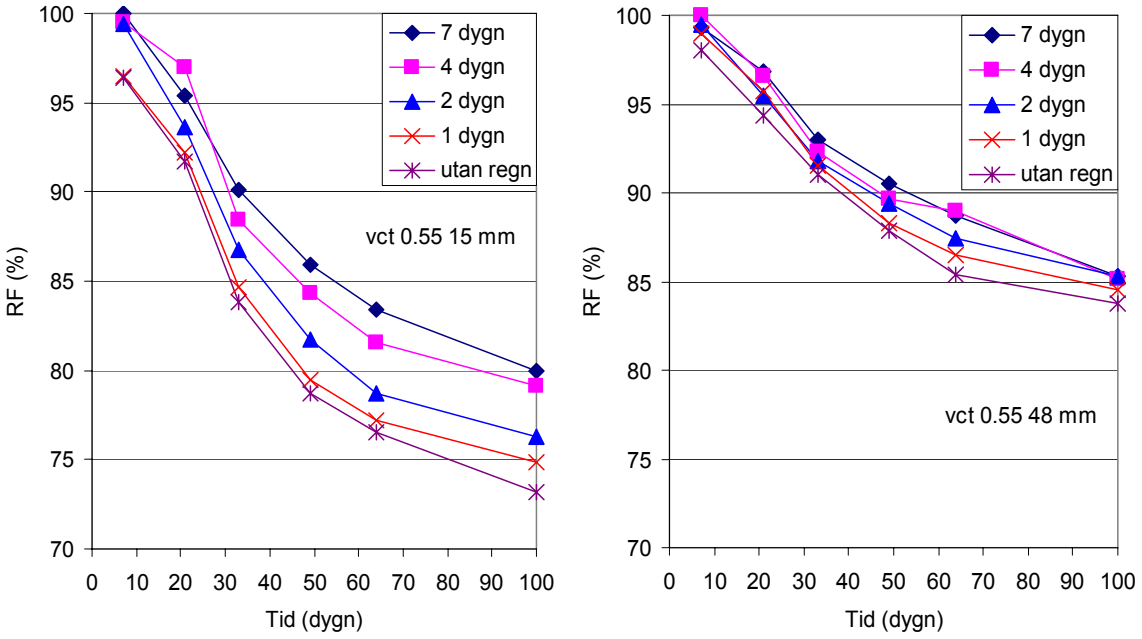
För vct högre än 0.45 ökar effekten av regn markant. RF stiger då till nära 100 %, även på 48 mm djup, direkt efter regnet, också för 2 och 4 dygns varaktighet. För vct 0.70 har uttorkningen inte hunnit så långt efter en vecka, men för alla regnvaraktigheter fylls porsystemet till 100 % RF. På 48 mm djup är det redan 100 % RF även utan regn så eventuell ytterligare vatteninsugning till detta djup kunde inte mätas.



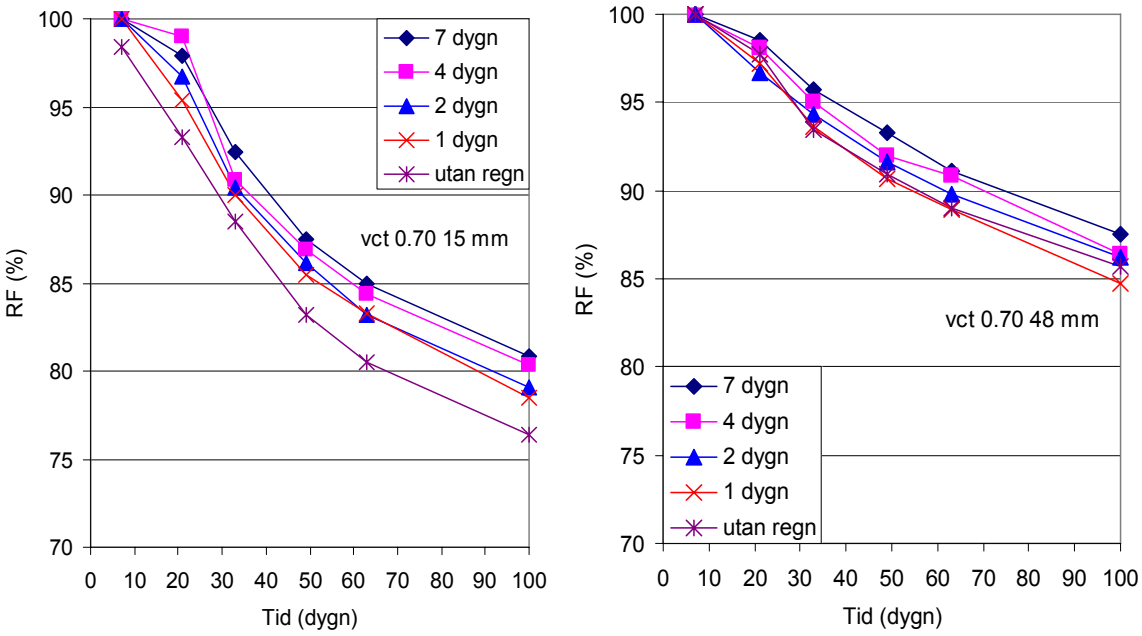
Figur 3.4.2 Uttorkningsförloppet för vct 0.40 efter regnbelastning från tiden tre timmar efter gjutning med varaktigheterna 1, 2, 4 och 7 dygn. Mätdjup 15 mm (till vänster) och 48 mm (till höger)



Figur 3.4.3 Uttorkningsförloppet för vct 0.45 efter regnbelastning från tiden tre timmar efter gjutning med varaktigheterna 1, 2, 4 och 7 dygn. Mätdjup 15 mm (till vänster) och 48 mm (till höger)

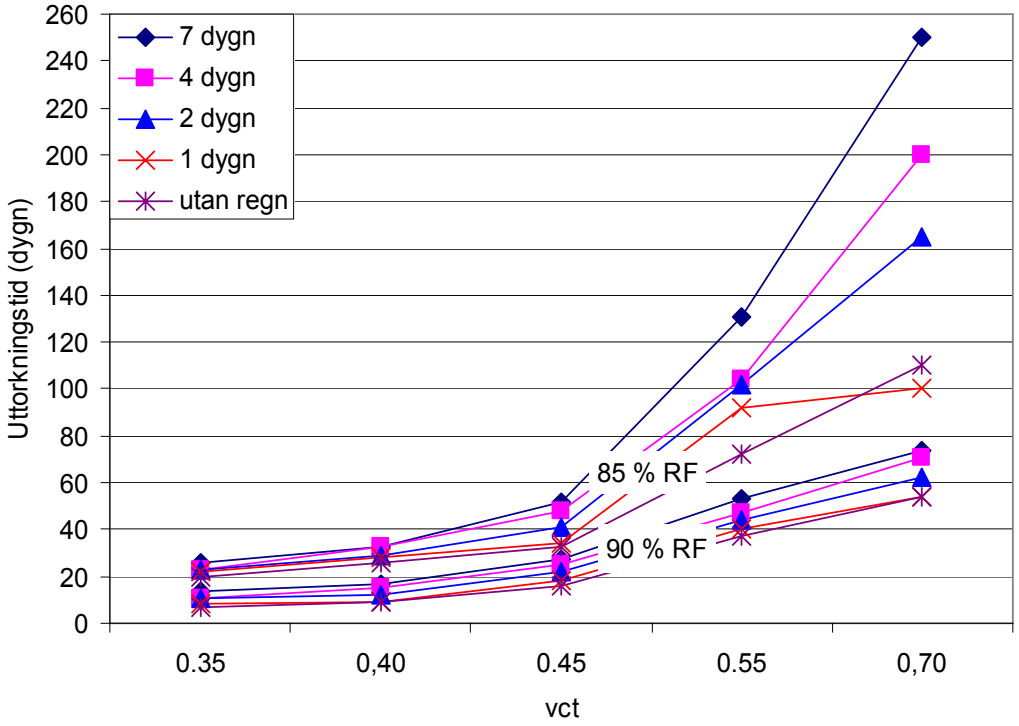


Figur 3.4.4 Uttorkningsförloppet för vct 0.55 efter regnbelastning från tiden tre timmar efter gjutning med varaktigheterna 1, 2, 4 och 7 dygn. Mätdjup 15 mm (till vänster) och 48 mm (till höger)



Figur 3.4.5 Uttorkningsförloppet för vct 0.70 efter regnbelastning från tiden tre timmar efter gjutning med varaktigheterna 1, 2, 4 och 7 dygn. Mätdjup 15 mm (till vänster) och 48 mm (till höger)

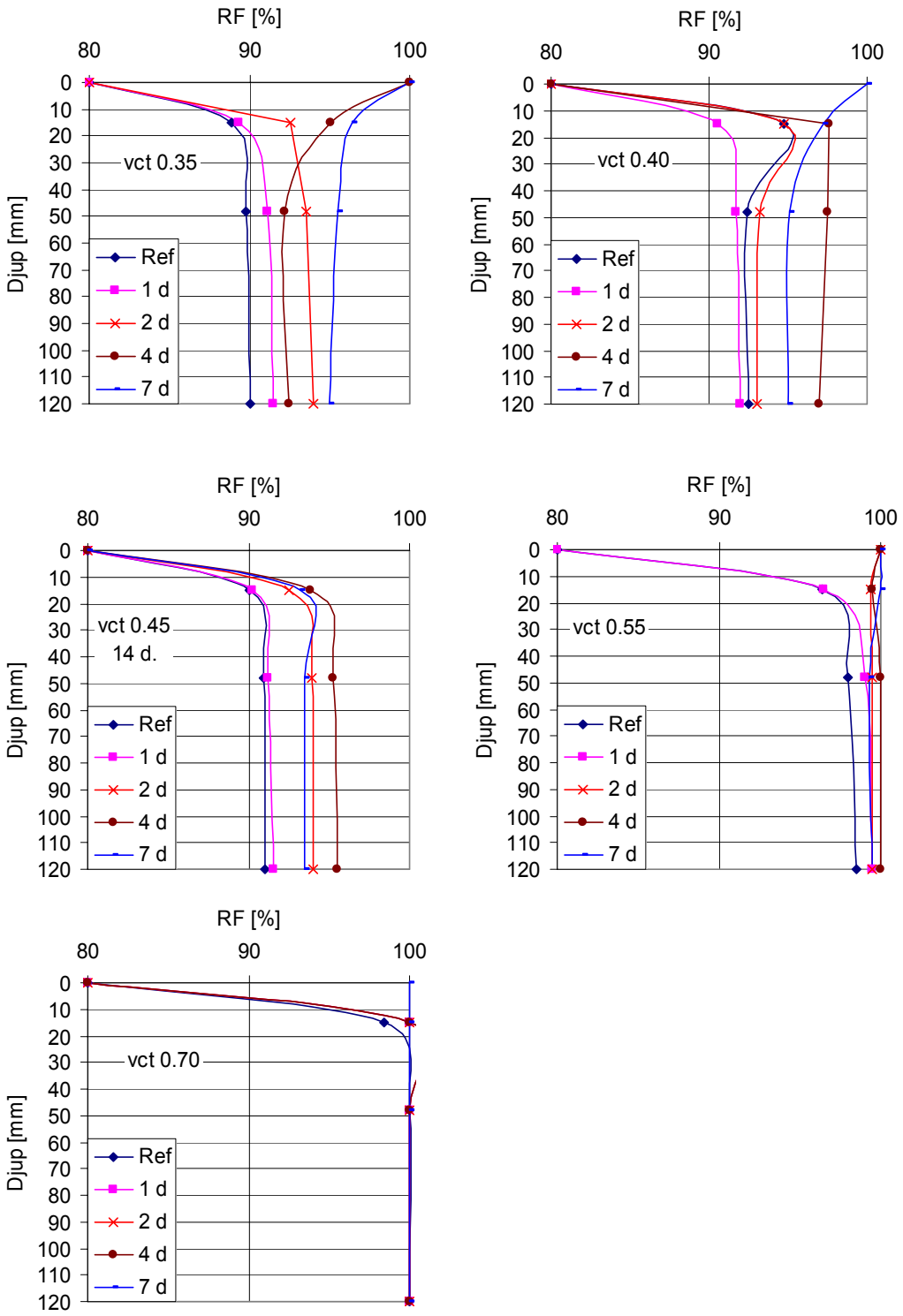
I nedanstående figur har erforderliga torktider sammanställts för de olika fallen. Effekten av regn är särskilt stor för höga vct och för torkning till 85 % RF.



Figur 3.4.6 Erforderliga torktider för att nå 90 respektive 85 % RF på ekvivalent djup, dels utan regnbelastning och dels med de olika varaktigheterna hos tidigt regn.

I nedanstående diagram har ett försök gjorts att åskådliggöra RF-profilerna direkt efter regnet, utifrån de första mätvärdena efter 7 dygn. RF-värdena på 15 och 48 mm djup är mätvärden. Övriga är uppskattade. Torkklimatet har då varit +5°C och 80 % RF under ett antal dagar. Den längre varaktigheten 7 dygn har inte torkat alls; därför har ytans RF satts till 100 %.

Fuktprofilerna efter olika varaktigheter kan här jämföras med fuktprofilen hos referensen, helt utan regn. Det framgår då att vatteninsugningen nått minst till ett djup av 48 mm även för betongerna med lägst vct. Porsystemet utvecklas ju mycket snabbt under dessa första 7 dygn och kontraktionen gör att det skapas ett visst porvattenundertryck på alla djup, större ju lägre vct är. Detta medför dels att det blir plats för vatten på alla djup och att det blir en drivkraft för att vatten skall sugas dit. Motståndet mot denna vatteninsugning blir dock större och större med tiden, efterhand som cementreaktionerna fortsätter och tätar till porsystemet.



Figur 3.4.7 Uppskattade fuktprofiler direkt efter regnet. RF-värdena på 15 och 48 mm djup är mätvärden. Övriga är uppskattade.

3.5 Kommentarer

Insugningen av vatten når djupt även i låg-vct-betong om det står regn på betongytan under de första dygnen. Insugningen ger inte 100 % RF i låg-vct-betong; RF stiger till högst 96-97 % RF på 48 mm djup i betongerna med vct 0.35-0.45.

Betongerna med vct 0.55-0.70 blir uppfuktade ända ner till djupet 120 mm; för vct 0.70 är RF 100 % även utan regn.

4 Vatteninsugning i nygjuten betong från avjämningsmassa

4.1 Försökets genomförande

Försöksserien sammanfattas i Tabell 4.1.

TABELL 4.1 *Vatteninsugning i nygjuten betong från avjämningsmassa (av fem olika betongkvaliteter).*

Nr	Härdn./torkn. före regn	Vatteninsugningskälla
1	I form < 1 dygn. Membranhärdning två veckor vid +5°C, därefter uttorkning i +5°C 80 % RF i två veckor och därefter i +20°C 60 % RF	Avjämning 1 månad efter gjutning.
2		Avjämning 2 månader efter gjutning.
3		Referens utan avjämning

Detaljer i försöken är publicerade i rapport TVBM-5053, Abrahamsson & Tammo (2003)[3] *Inverkan av regn och avjämningsmassa på uttorkning av betong* samt som kapitel 7 i rapport TVBM-3124, Johansson (2005)[2] *Inverkan av avjämningsmassa på uttorkning av betonggolv*.

Fem serier med fem olika betongkvaliteter, serie 0.35, 0.40, 0.45, 0.55 och 0.70 (=vct) genomfördes. Tre varianter i vardera försöksserie med avjämning efter olika lång tid och en referens. Totalt användes 15 provkroppar.

Samma betonger och samma typ av provkroppar användes som i studien som redovisades i kapitel 3. Före avjämning placerades en ny polypropylenring ovanpå formen. Denna fungerade som form för avjämningsmassan.

Provkropparna membranhärdades först i 14 dygn vid +5°C och torkades därefter till de nått en ålder av en månad respektive två månader. Därefter belades de med 10 mm avjämningsmassa ABS 148 och fick fortsätta att torka.

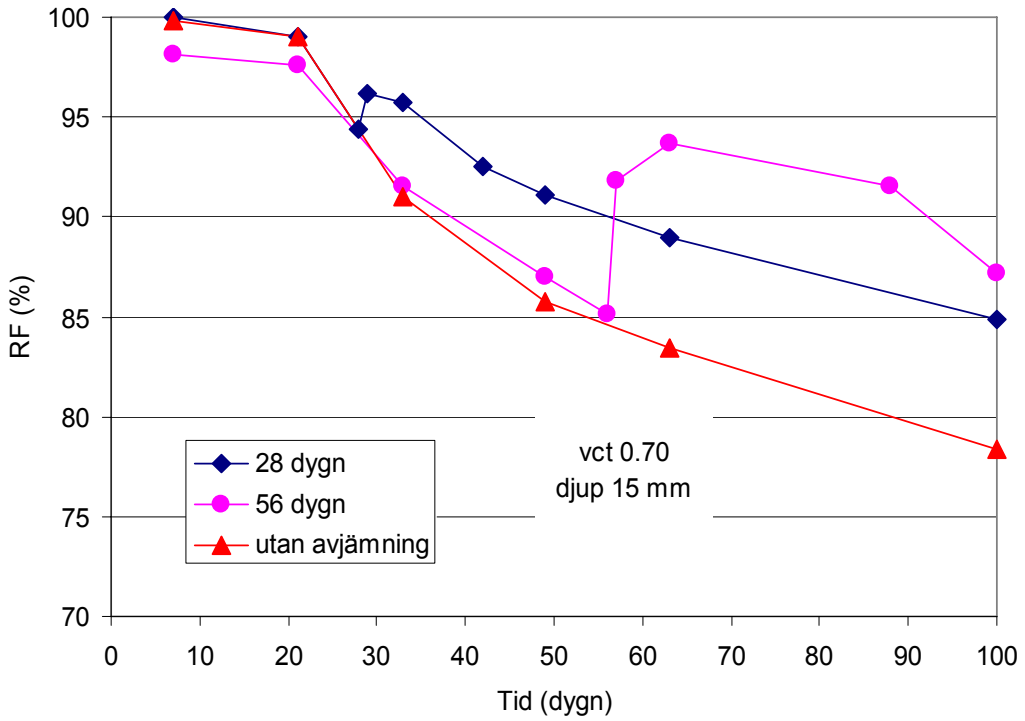
4.2 Mätningar

Samma mätmetodik som i kapitel 3 användes även här. RF mättes på två djup under betongöverytan, 15 och 48 mm. På dessa djup placerades horisontella mätrör. I rören på 15 mm djup satt givarna kvar under hela försöket, från första veckan. Mellan övri-

ga mätrör flyttades givarna från mätning till mätning. Givarna avlästes ca en gång per vecka i början av försöken och mera glest i tiden i slutet av uttorkningsförloppet.

4.3 Resultat

I nedanstående diagram visas effekten av vatteninsugning från avjämningsmassan på RF på djupet 15 mm för betong med vct 0.70. Fallen som visas är med avjämning efter en respektive två månader samt referensen utan avjämning.

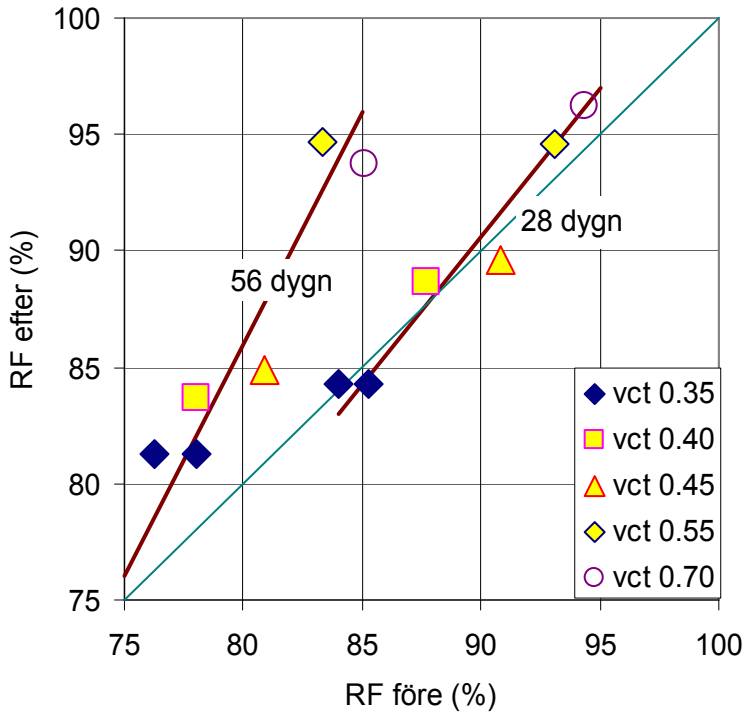


Figur 4.3.1 RF på djupet 15 mm under betongytan vid applicering av 10 mm avjämningsmassa vid 28 respektive 56 dygns ålder. Betong med vct 0.70.

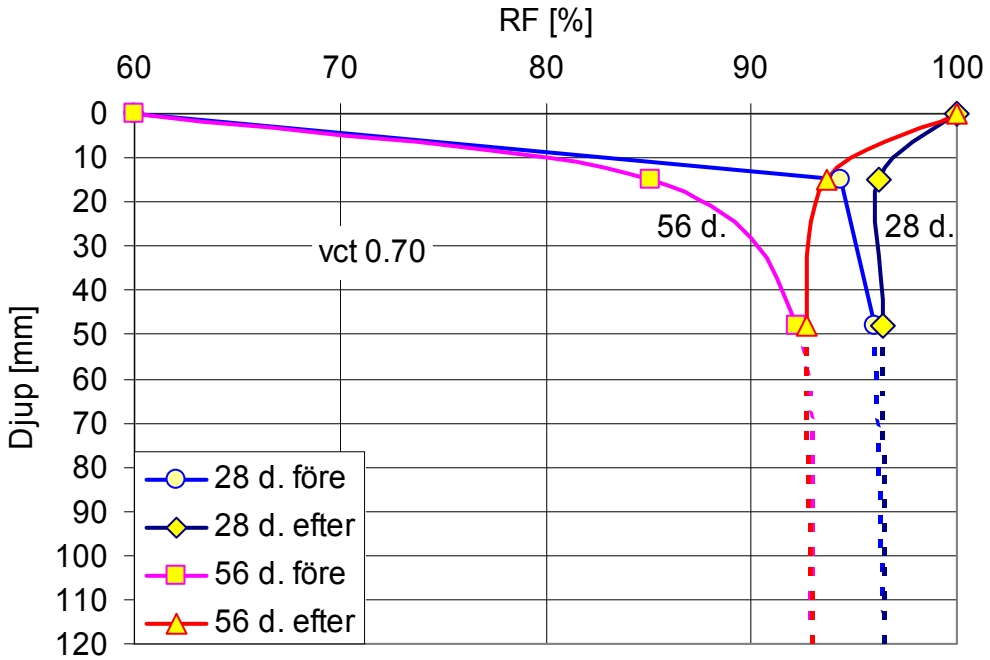
På djupet 48 mm är effekten knappt mätbar, ens för vct 0.70. Det beror sannolikt på att en avjämningsmassa innehåller en begränsad mängd tillgängligt vatten och att betongytan primas före avjämningen.

På 15 mm djup finns det en tydlig effekt för alla betongerna. I nedanstående figur har en sammanställning gjorts av RF före och efter avjämningen i de olika betongerna. Denna visar effekten av vatteninsugningen från avjämningsmassan.

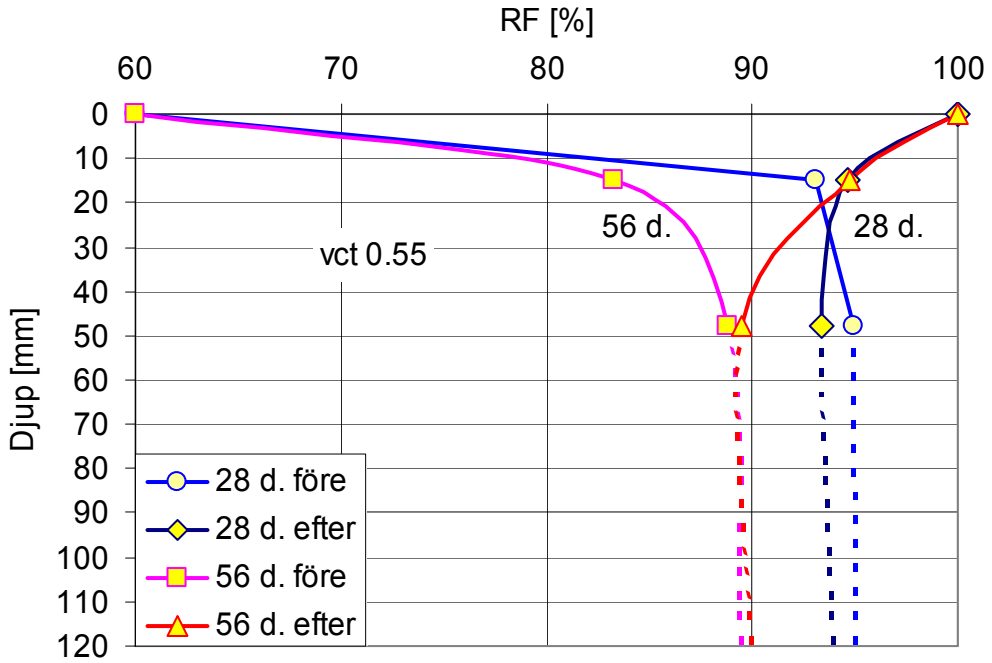
Avjämning efter en månad ger inte något större vattentillskott till betongen. Det är knappt mätbart på 15 mm djup, annat än för vct 0.55-0.70, som får en liten RF-ökning på några % -enheter. Avjämning efter två månader däremot höjer RF på 15 mm djup ca 5-10 % -enheter för alla betongerna.



Figur 4.3.2 RF före och efter avjämning på djupet 15 mm under betongytan vid applicering av 10 mm avjämningsmassa vid 28 respektive 56 dygns ålder.



Figur 4.3.3 RF-profiler före och efter avjämning vid applicering av 10 mm avjämningsmassa vid 28 respektive 56 dygns ålder. Betong med vct 0.70. Värdena på 15 och 48 mm djup är mätvärden; övriga är uppskattningar.



Figur 4.3.3 RF-profiler före och efter avjämning vid applicering av 10 mm avjämningsmassa vid 28 respektive 56 dygns ålder. Betong med vct 0.55. Värdena på 15 och 48 mm djup är mätvärden; övriga är uppskattningar.

Dessa skillnader beror naturligtvis på hur sorptionskurvan ser ut för respektive material, var man ligger på den då vatteninsugningen startar och hur tät betongen är mot vatteninsugning. Vid 28 dygns ålder har uttorkningen av betongen inte nått särskilt långt och RF är omkring 95 % eller högre för vct 0.55-0.70. Vid dessa RF är sorptionskurvan mycket brant och en ökning av fukthalten vid insugning av vatten syns inte som en markant RF-ökning. Vid 56 dygns ålder däremot har RF sjunkit till ca 85 % på 15 mm djup. Där är sorptionskurvan betydligt flackare och ökningen av fukthalten vid vatteninsugningen syns som en tydlig ökning av RF.

4.4 Kommentarer

Insugningen av vatten från en 10 mm avjämningsmassa verkar inte nå ner alls till ekvivalenta djupet 48 mm. En tydlig effekt syns på djupet 15 mm, framför allt om avjämningen sker efter att par månader. Vid en månads ålder är effekten blygsam, utom för betongerna med de högsta vattencementtalen.

Vatteninsugningen har dokumenterats enbart som en effekt på RF-profilen. Vid höga RF syns därför inte en fukthaltsökning på grund av vatteninsugningen särskilt väl.

5 Vatteninsugning i fem månader gammal betong från regn

5.1 Försökets genomförande

Försöksserien sammanfattas i Tabell 5.1.

TABELL 5.1 *Vatteninsugning i fem månader gammal betong från regn (av fem olika betongkvaliteter).*

<table>
<tr><th>Nr</th><th colspan="3">Härdn./torkn. före regn</th><th>Regn</th></tr>
<tr><td>1</td><td rowspan="4">I form < 1 dygn.</td><td>Vattenhärdning 1 dygn.</td><td rowspan="4">Uttorkning i +5°C 80 % RF i 4 veckor och därefter i +20°C 60 % RF till 5 månaders ålder</td><td>Varaktighet 3 dygn</td></tr>
<tr><td>2</td><td>Vattenhärdning 2 dygn.</td><td>Varaktighet 7 dygn</td></tr>
<tr><td>3</td><td>Vattenhärdning 4 dygn.</td><td>Varaktighet 14 dygn</td></tr>
<tr><td>4</td><td>Vattenhärdning 7 dygn.</td><td>Varaktighet 28 dygn</td></tr>
</table>

Publicerat som kapitel 6 i rapport TVBM-3124, Johansson (2005)[2] *Vatteninsugning i betong i samband med vattenskada.*

Fem serier med fem olika betongkvaliteter, serie 0.35, 0.40, 0.45, 0.55 och 0.70 (=vct) genomfördes. Fyra varianter i vardera försöksserie med olika varaktigheter hos regnet: 3, 7, 14 och 28 dygn. Totalt användes 20 provkroppar.

Samma betonger och samma provkroppar användes som i studien som redovisades i kapitel 3. Provkropparna hade först vattenhärdats under ett antal dygn den första veckan och därefter torkat först vid +5°C 80 % RF i 4 veckor och därefter i +20°C 60 % RF till 5 månaders ålder.

Provkropparna utsattes nu för simulerat regn genom att vatten påfördes betongytan inom den ingjutna plåtringen, se figur 3.2.2. Varaktigheten hos regnet var 3, 7, 14 respektive 28 dygn för var och en av de fem betongerna.

5.2 Mätningar

Samma mätmetodik som i kapitel 3 användes även här. RF mättes på två djup under betongöverytan, 15 och 48 mm. På dessa djup placerades horisontella mätrör. I rören på 15 mm djup satt givarna kvar under hela försöket, från första veckan. Mellan övri-

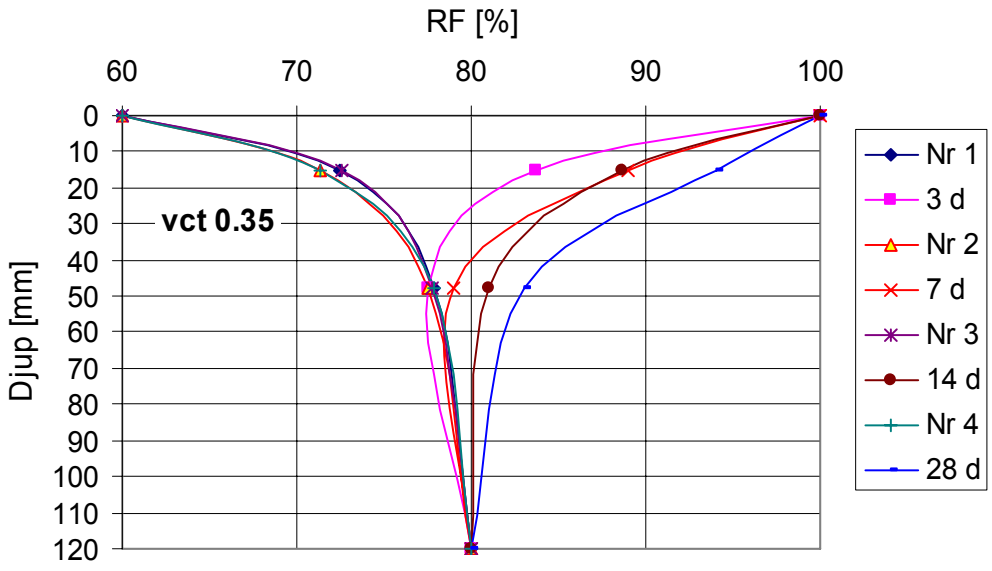
ga mätrör flyttades givarna från mätning till mätning. Givarna avlästes ca en gång per vecka i början av försöken och mera glest i tiden i slutet av uttorkningsförloppet.

Utöver RF-mätningarna bestämdes vatteninsugningen genom vägning av provkropparna ungefär vartannat dygn, efter att vattnet tillfälligt sugits bort och torkats av från betongytan. Insugen vattenmängd har beräknats per m^2 betongyta innanför plåtringen. Detta är en viss underskattning av sugarean eftersom betongen en bit under ytan, utanför ringen, också medverkar i vatteninsugningen. För exakta data kan en omräkning göras med en tredimensionell beräkning.

5.3 Resultat

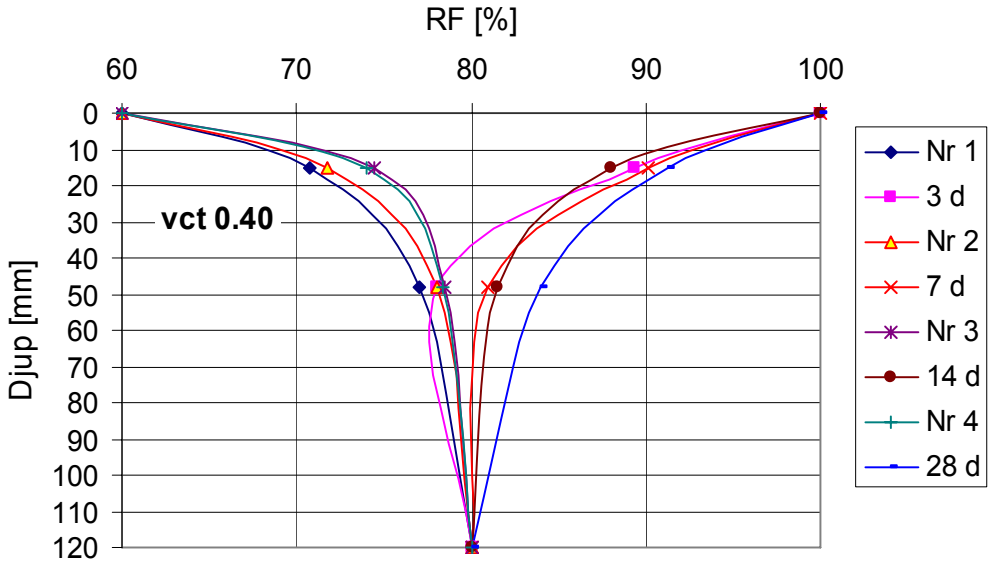
I nedanstående diagram visas effekten av vatteninsugning från det simulerade regnet i form av RF-profiler före och efter regnen med de olika varaktigheterna. Före regnet mättes RF-profilen på alla fyra provkropparna av varje betongkvalitet.

I figurerna är RF-värdena på 15 och 48 mm djup direkta mätvärden. Före regnet har ytan torkat i 60 % RF, som också markerats, liksom 100 % RF efter regnet. På djup större än 48 mm finns inga mätvärden. Här har en uppskattning gjorts av RF på 120 mm djup för att markera en möjlig RF-fördelning genom hela plattan. Dessa uppskattningar analyseras noggrannare senare i detta kapitel.

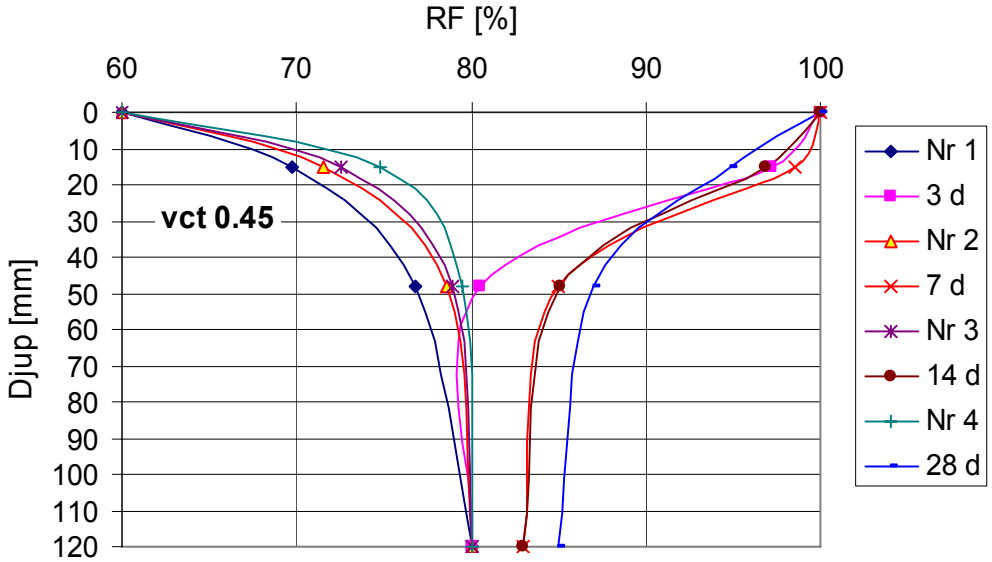


Figur 5.3.1 RF-profiler före och efter regn med olika varaktighet, i fem månader gammal betong med vct 0.35. RF på djupet 120 mm har uppskattats.

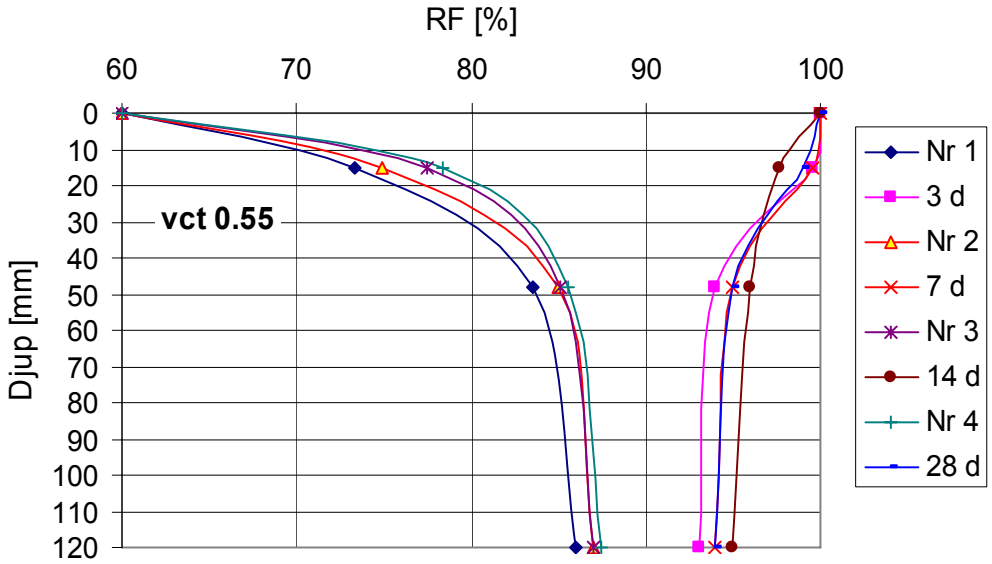
Först efter sju dygns regn märks vatteninsugningen på ekvivalenta djupet 48 mm i betongen med de låga vattencementtalen 0.35-0.45. Redan efter tre dygn har de båda betongerna med höga vct, 0.55-0.70, fått RF-ökningar från under 85 % RF till 95 % eller högre.



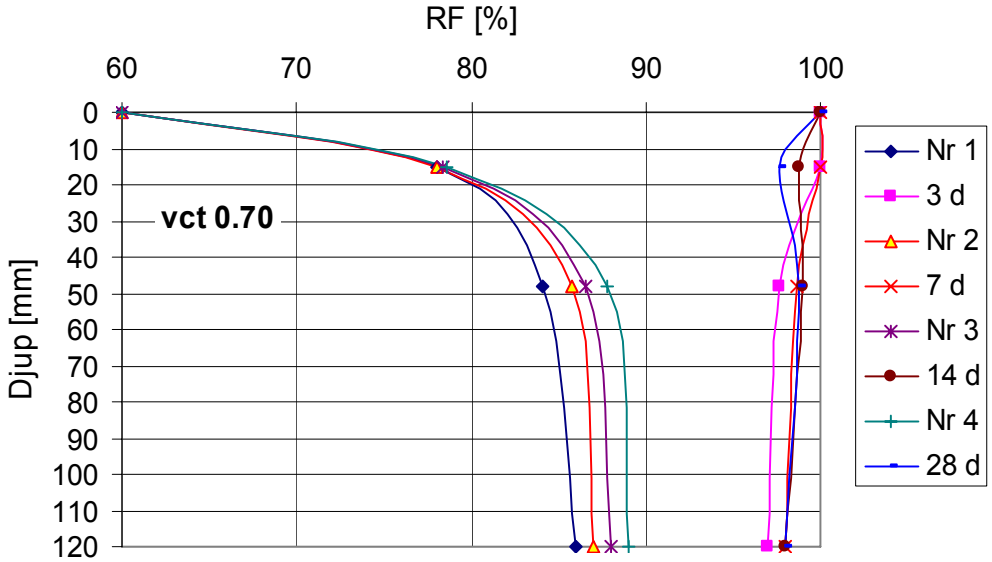
Figur 5.3.2 RF-profiler före och efter regn med olika varaktighet, i fem månader gammal betong med vct 0.40. RF på djupet 120 mm har uppskattats.



Figur 5.3.3 RF-profiler före och efter regn med olika varaktighet, i fem månader gammal betong med vct 0.45. RF på djupet 120 mm har uppskattats.



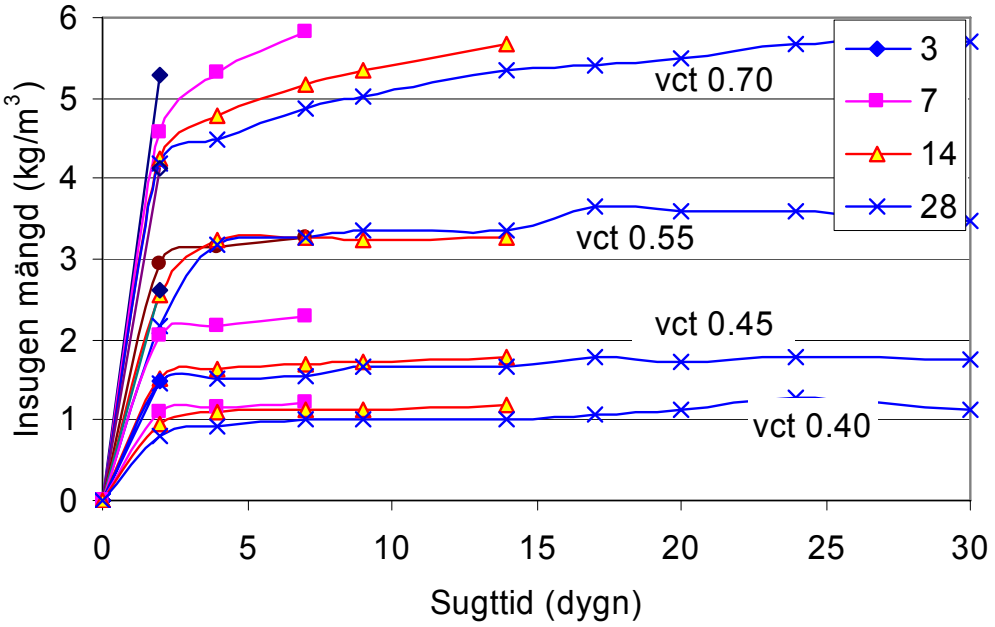
Figur 5.3.4 RF-profiler före och efter regn med olika varaktighet, i fem månader gammal betong med vct 0.55. RF på djupet 120 mm har uppskattats.



Figur 5.3.5 RF-profiler före och efter regn med olika varaktighet, i fem månader gammal betong med vct 0.70. RF på djupet 120 mm har uppskattats.

I betongen med vct 0.55, se figur 5.3.4, ökar RF knappast alls efter de tre första dygnens regn. Det förefaller märkligt att vatteninsugningen är så snabb för att sedan i det närmaste helt avstanna.

Resultatet av mätningarna av insugen vattenmängd under regnen sammanfattas i figuren nedan. Resultaten för vct 0.35 har inte inkluderats dels eftersom de överensstämmer väl med resultaten för vct 0.40 och dels därför att de delvis har oförklarliga variationer och därmed inte är trovärdiga.

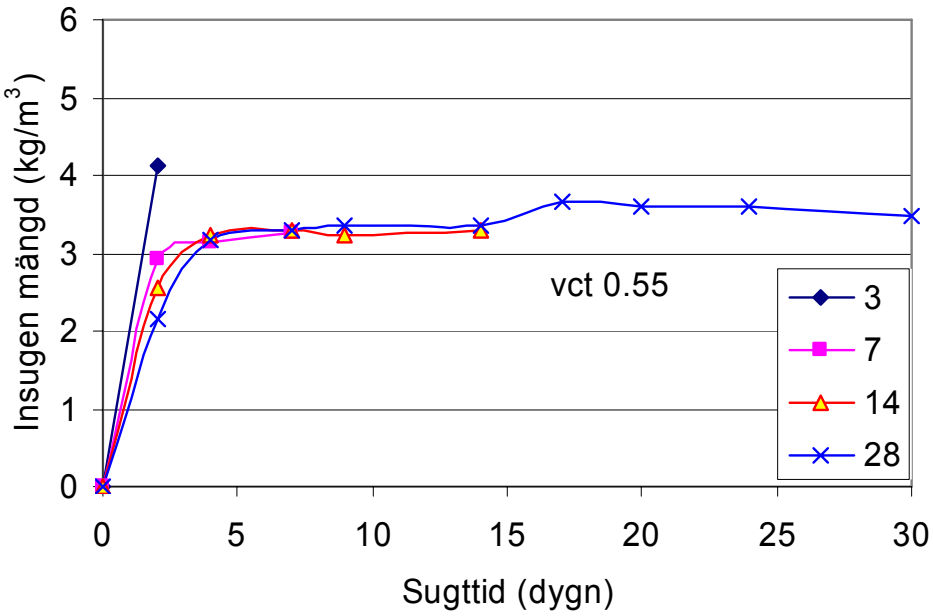


Figur 5.3.6 Insugen vattenmängd i de olika betongerna under regn med olika varaktighet.

Insugen vattenmängd beror i första hand på vattencementtalet och i andra hand på vilken provkropp som utnyttjats. Provkropparna som använts för de kortaste varaktigheterna har systematiskt fått större insugning under de första dygnen. Detta beror på att dessa provkroppar utsattes för kortast regn under den tidigare försöksserien då de utsattes för regn under den första veckan efter gjutning. Detta framgår av Tabell 5.1 och nedanstående figur. Betongen med vct 0.55 har fått nästan dubbelt så stor vatteninsugning efter tre dygns regn i den provkropp som ursprungligen utsattes för ett ettdygnsregn jämfört med den som utsattes för regn under sju dygn (den som nu utsatts för 28 dygns regn).

Regnbelastningen för fem månader sedan påverkar alltså vatteninsugningen kraftigt. I figurerna 5.3.2-5.3.5 syns också att de provkroppar som hade kort regnbelastning under den första veckan, nu efter fem månader har något lägre RF på alla djup före den andra regnbelastningen. För de högre vattencementtalen är skillnaden i RF stor. Skillnaden i fukthalt är naturligtvis ännu större, eftersom dessa betonger har en brantare sorptionskurva.

Efter tre dygns vatteninsugning är fortsatt vatteninsugning mycket långsam, utom i betongerna med vct 0.55-0.70. I övriga betonger sker nästan ingen vatteninsugning alls efter tre dygn. Detta stämmer inte riktigt med fuktprofilerna i figurerna 5.3.2-5.3.2 för vct 0.40-0.45.



Figur 5.3.7 Insugen vattenmängd i betongerna med vct 0.55 under regn med olika varaktighet.

6 Vatteninsugning i nio fältobjekt

6.1 Försökens genomförande

Försöksserierna sammanfattas i Tabell 6.1 och Tabell 6.2.

TABELL 6.1 *Vatteninsugning i åtta fältobjekt, kontorsbyggnader och bostadshus i Malmö och Lund.*

Nr	Konstruktion	Betong	vct	Regn mellan mätningar	Mätning dygn
1:1	Mellanbjälklag	235 mm på Plattbärlag	0.59	16 dygn	44-76
1:2	Vindsbjälklag	230 mm på Plattbärlag	0.37	9 dygn	21-35
2:3	Platta på mark	100 mm på våt min.ull	0.80	Tätt hus 10 dygn före	70-94
2:4	Vindsbjälklag	215 mm på Plattbärlag	0.63	Regnskydd långt före	67-91
2:5	Vindsbjälklag	195 mm på Plattbärlag	0.58	Regnskydd långt före	62-86
2:6	Mellanbjälklag	215 mm på Plattbärlag	0.60	Partiellt regnskydd	9-31
2:7			0.51		
2:8			0.41		
2:9			0.38		
3:10	Bjälklag över källare	300 mm på traditionell form	0.57	16 dygn, partiellt regnskydd	25-62
4:11	Platta på mark	120 mm på torr min.ull	0.36	11 resp. 14 dygn	4-33-67
4:12			0.37	14 dygn	6-40
5:13	Mellanbjälklag	120 mm på korrugerad plåt	0.35 Si	Inget; inomhus	1-4-8
6:14	Platta på mark	250 mm på makadam	0.39	14 resp. 15 dygn; partiellt regnskydd	2-40-83
6:15			0.37		

TABELL 6.2. *Vatteninsugning i flera rum i ett fältobjekt, ett konferenscenter i Skåne, med olika torkmetoder.*

Mätpunkt	Konstruktion	vct	Regn	Mätning, dygn
1:2 (ref.)	100 mm Platta på mark	0.62	Inget	130-155
1:9			Mycket regn efter gjutning	

I de femton serierna enligt Tabell 6.1 har olika typer av bjälklag, olika betonger och olika regnpåverkan studerats. Mätning har gjorts av RF-profiler vid några tillfällen; regn och stående vatten däremellan har dokumenterats. Detaljer i denna fältstudie är

publicerade i rapport TVBM-5029, Linné & Utgenannt (1995)[4] *Uttorkning av betong – en fältstudie.* Den tidigare utvärderingen gjordes främst med avseende på uttorkning och torktider. Nu har en ny utvärdering gjorts, men denna gång med avseende på vatteninsugning.

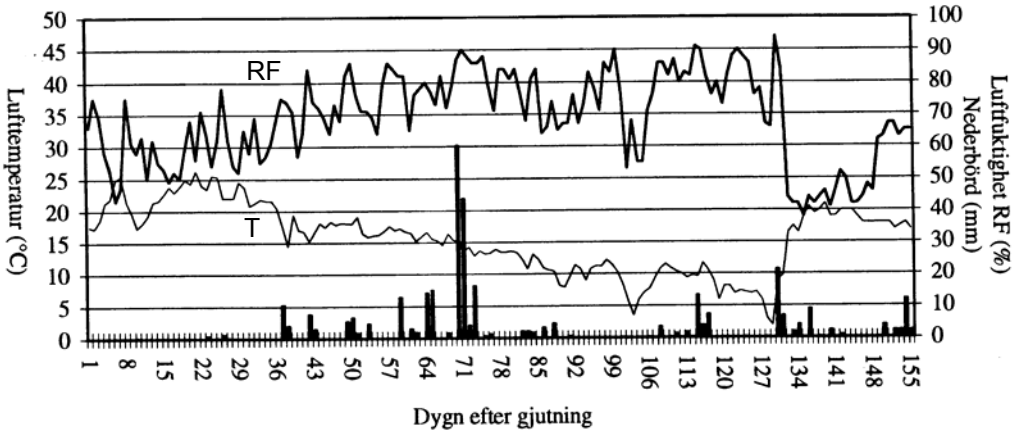
Studien i Tabell 6.2 innehöll olika bjälklagstyper, olika betonger och olika torkmetoder. Detaljer i denna fältstudie är publicerade i kapitel 9 i rapport TVBM-3124, Johansson (2005)[2] *Fältstudie av olika metoder att påskynda uttorkning av betong.* Regnpåverkan erhölls i huvudsak i ett rum. Mätning av RF gjordes på ett djup vid några tillfällen.

Nedan beskrivs dessa fältstudier kortfattat och de resultat redovisas som gett tydligast information om vatteninsugning från regn respektive avjämning. För en fylligare beskrivning och komplett resultatredovisning hänvisas till ursprungsrapporten[4].

6.2 Serie 1: Mellanbjälklag, vct 0.59

I ett fyravåningshus i Malmö studerades fuktförhållandena i ett av mellanbjälklagen. Betongen hade vct 0.59 och göts i början av juli i en tjocklek av 235 mm på ett plattbärlag som vattnades sporadiskt före gjutningen.

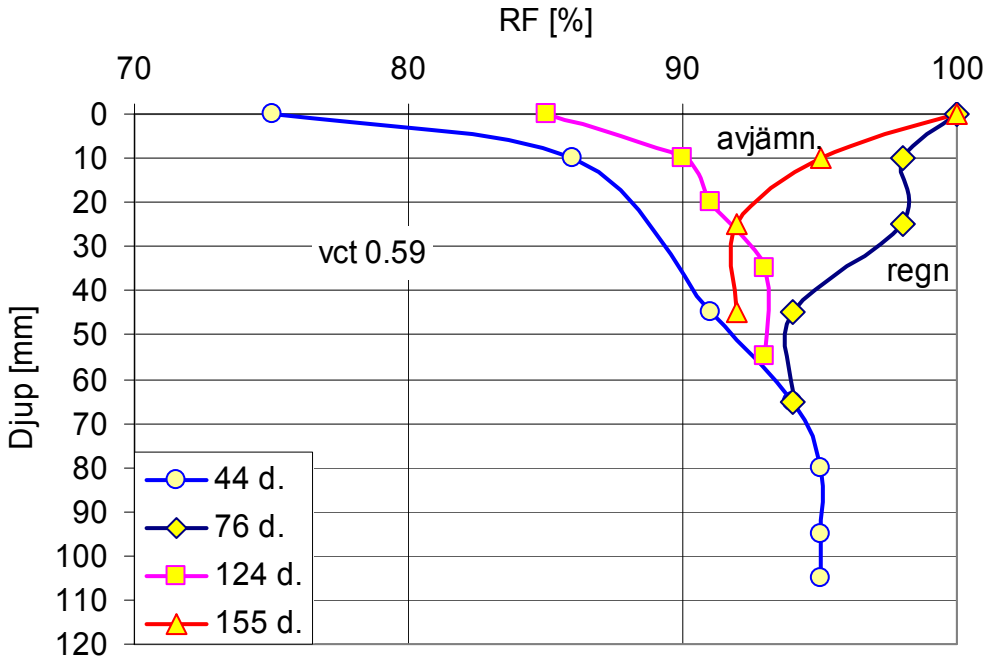
Klimatet efter gjutning visas i nedanstående figur. Bjälklaget fick ett ”partiellt regnskydd” från dygn nr 46 genom att bjälklaget ovanför formsattes och göts. Det fanns dock hål i detta för installationer som det rann ner regnvatten genom.



Figur 6.2.1 Uteklimatet för fältstudie 1[4]. Tiden räknas från gjutningen i början av juli.

Mellan de första mätpunkterna 44 respektive 76 dygn efter gjutning regnade det under 16 av dygnen. Under dygnen närmast det andra mättillfället kom det stora mängder regn, se figuren ovan. Därefter regnade det mycket lite och bjälklaget blev sedan regnskyddat genom att byggnaden blev tät i god tid före följande mättillfällen.

Fuktprofiler vid fyra mättillfällen, dels före och efter 16 dygns regn och dels före och efter avjämning av betongytan visas i nedanstående figur.



Figur 6.2.2 RF-profiler vid fyra mättillfällen, dels före och efter 16 dygns regn (44 & 76 d.) och dels före och efter avjämning av betongytan (124 & 155d.). Plattjocklek 235 mm på plattbärlag[4].

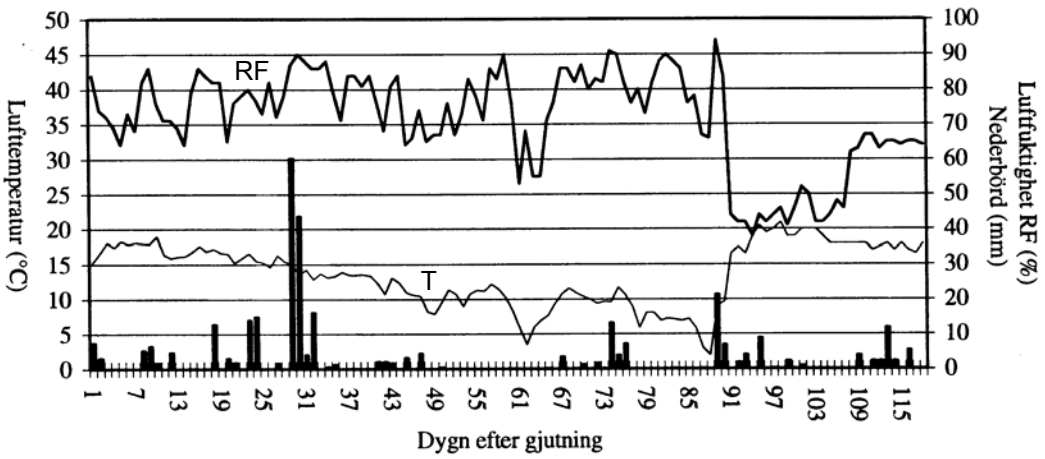
Det långvariga regnandet före det andra mättillfället höjde RF ända ner till ett djup av ca 60 mm; på ekvivalent djup dock bara från 91 till 94 %. En och en halv månad senare, vid det tredje mättillfället, är det fortfarande fuktigare än vid det första mättillfället.

Mellan det tredje och fjärde mättillfället avjämnades betongytan. I figuren ovan syns att vatteninsugningen från avjämningen bara nådde ner till ett djup av ca 25 mm. Detta stämmer väl med laboratorieundersökningen i kapitel 4.

6.3 Serie 2: Vindsbjälklag, vct 0.37

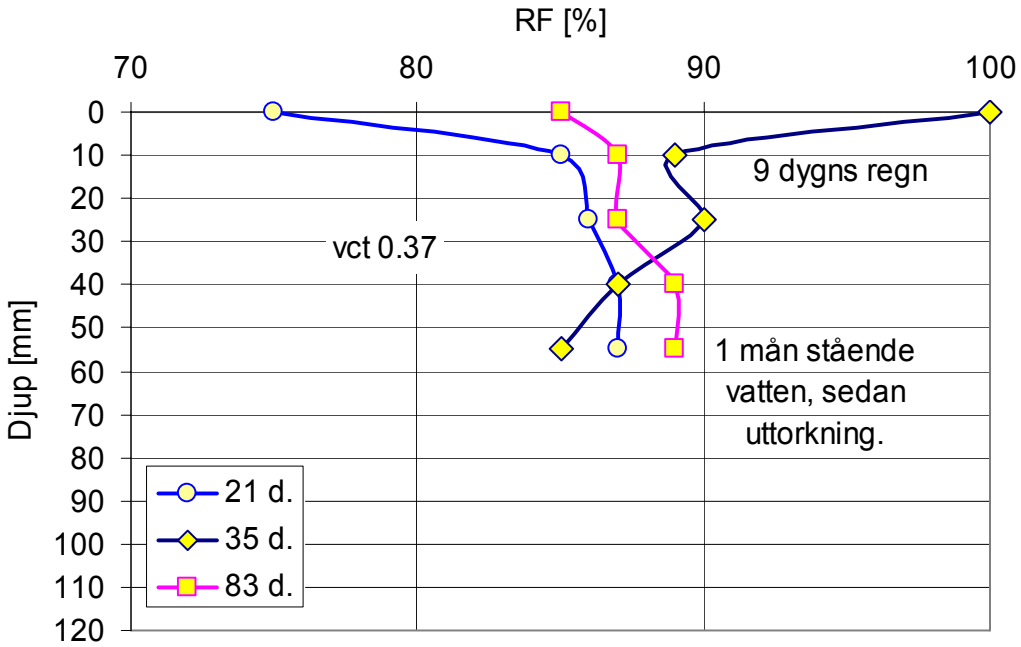
I samma fyravåningshus som i serie 1 studerades fuktförhållandena i vindsbjälklaget. Betongen hade vct 0.37 och göts i början av augusti i en tjocklek av 230 mm på ett plattbärlag.

Klimatet efter gjutning visas i nedanstående figur. Mellan de första mätpunkterna 21 respektive 35 dygn efter gjutning regnade det kraftigt under 9 av dygnen. Bjälklaget fick sedan ett regnskydd från dygn nr. 40 genom att taket ovanför färdigställdes. Det stod dock vatten på ytan cirka en månad därefter.



Figur 6.3.1 Uteklimatet för fältstudie 2[4]. Tiden räknas från gjutningen i början av augusti.

Fuktprofiler vid tre mättillfällen, dels före och efter 9 dygns regn och efter stående vatten på betongytan under ca en månad, följt av uttorkning, visas i nedanstående figur.



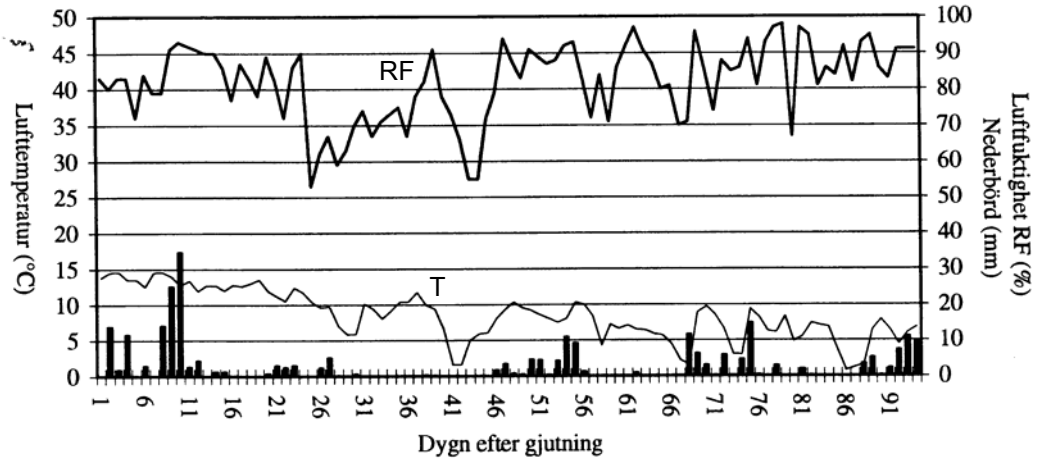
Figur 6.3.2 RF-profiler vid tre mättillfällen, dels före och efter 9 dygns regn (21 & 35 d.) och dels efter en månads stående vatten och därefter ca tre veckors uttorkning (83 d.). Plattjocklek 230 mm på plattbärlag[4]

Det kraftiga regnandet under 9 av de 14 dygnen mellan de två första mättillfällena gav en vatteninsugning som kunde mätas ner till ca 35 mm, trots att det var en betong med så lågt vct som 0.37. Även efter att taket monterats strax därefter har RF stigit i betongen på större djup vid det tredje mättillfället. Detta beror på att det stod vatten på betongytan ca en månad efter att taket monterats. Uttorkningen under tre veckor, med en RF ute på ca 85 %, strax före det sista mättillfället sänkte RF något i betongytan, men det är fortfarande fuktigare än vid det första mättillfället.

6.4 Serie 3: Platta på mark, vct 0.80

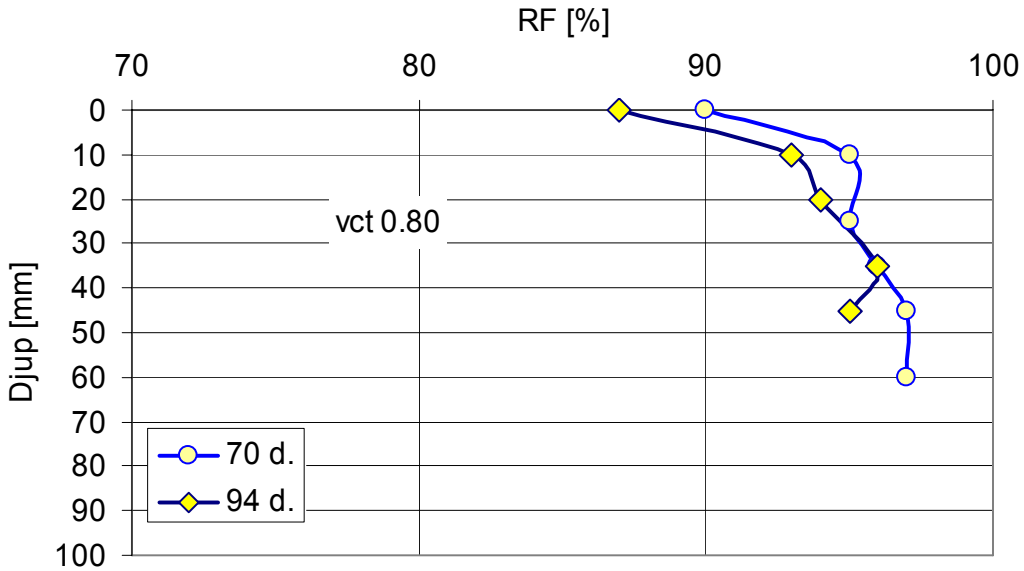
I ett enplanshus i Lund studerades fuktförhållandena i bottenplattan. Betongen hade vct 0.80 och göts i början av september med en tjocklek av 100 mm på mineralull som blivit våt av kraftigt regn dagarna före gjutning.

Klimatet efter gjutning visas i nedanstående figur.



Figur 6.4.1 Uteklimatet för fältstudie 3-5[4]. Tiden räknas från gjutningens början

Efter gjutning regnade det kraftigt under ca två veckor. Det stod därför vatten på plattan under ca sex veckor efter gjutning. Därefter monterades taket och betongen har sedan kunnat torka ett par veckor till det första mättillfället. Mellan de båda mättillfällena 70 respektive 94 dygn efter gjutning torkade plattan vidare något, se figuren nedan.



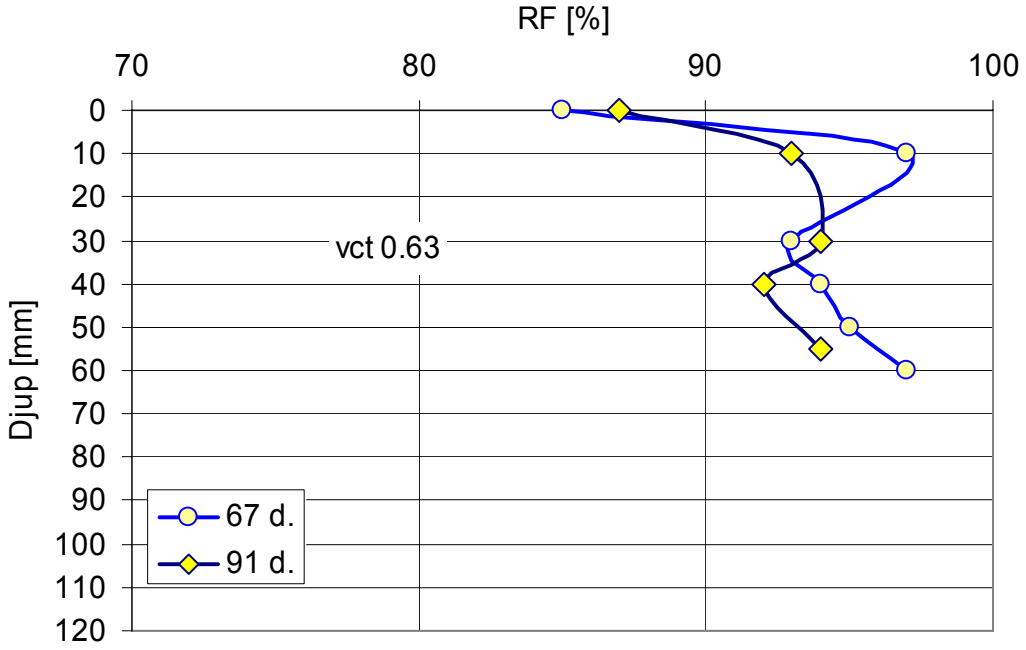
Figur 6.4.2 RF-profiler vid två mättillfällen, efter bara några veckors sammanlagd uttorkning efter stående vatten på plattan de första sex veckorna. Plattjocklek 100 mm på mineralull

6.5 Serie 4: Vindsbjälklag, vct 0.63

I samma bostadsområde som i serie 3 studerades fuktförhållandena i vindsbjälklaget på ett tvåplanshus. Betongen hade vct 0.63 och göts i början av september i en tjocklek av 215 mm på ett plattbärlag. Det stod vatten på plattbärlaget vid gjutning, efter regn natten före.

Klimatet efter gjutning visas i figur 6.4.1 ovan. Betongytan var fuktig under ca fyra veckor efter gjutning. Yttertaket monterades därefter, varefter bjälklaget kunnat börja torka.

Fuktprofiler vid två mättillfällen visas i nedanstående figur.



Figur 6.5.1 RF-profiler vid två mättillfällen, efter ingen uttorkning alls under fyra veckor och regnskydd därefter, dock utan styrd torkning Plattjocklek 215 mm på plattbärlag[4]

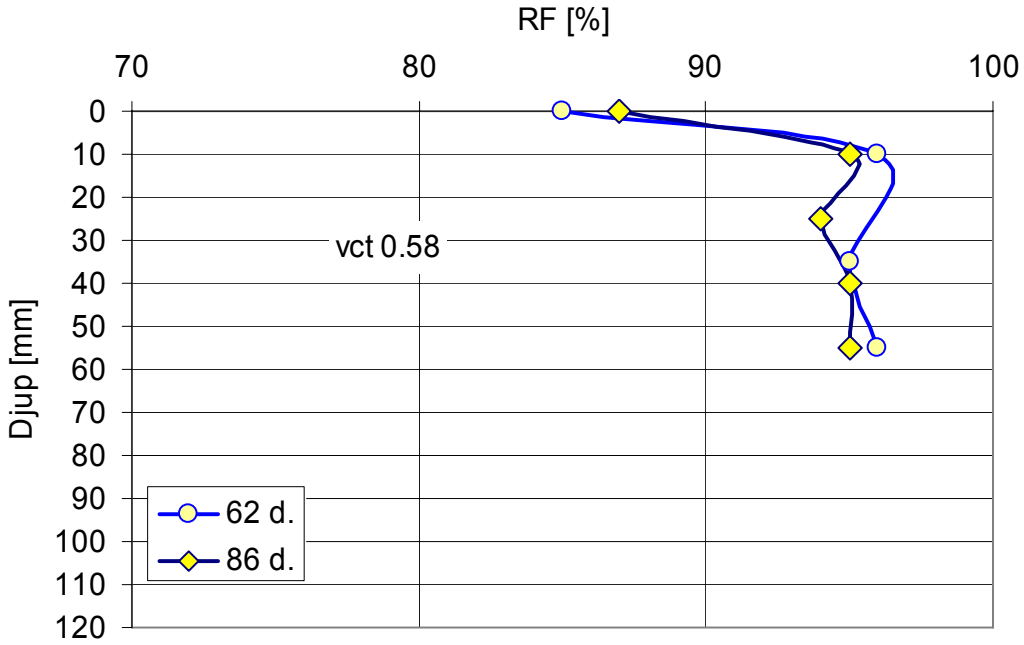
Tre månader efter gjutning är det fortfarande långt kvar av uttorkningen. Regnet under den första månaden har dels hindrat all uttorkning då och dels medfört att extra vatten sugits in i betongen innan den har kunnat börja torka något sedan taket monterats och bjälklaget skyddats mot regn.

6.6 Serie 5: Vindsbjälklag, vct 0.58

I ett hus i samma bostadsområde som i serie 3 studerades fuktförhållandena i vindsbjälklaget på ett annat tvåplanshus. Betongen hade vct 0.58 och göts i mitten av september i en tjocklek av 195 mm på ett plattbärlag. Plattbärlaget var torrt på ytan vid gjutning.

Klimatet efter gjutning visas i figur 6.4.1 ovan. Betongytan var också här fuktig under ca fyra veckor efter gjutning. Yttertaket monterades därefter, varefter bjälklaget kunnat börja torka.

Fuktprofiler vid två mättillfällen visas i nedanstående figur.



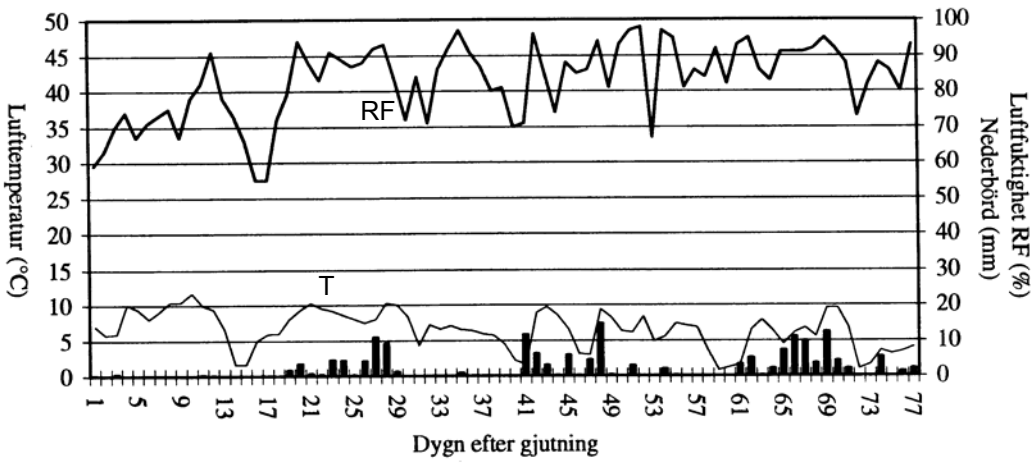
Figur 6.6.1 RF-profiler vid två mättillfällen, efter ingen uttorkning alls under fyra veckor och regnskydd därefter, dock utan styrd torkning. Plattjocklek 195 mm på plattbärlag[4]

Tre månader efter gjutning är det också här fortfarande långt kvar av uttorkningen. Regnet under den första månaden har dels hindrat all uttorkning då och dels medfört att extra vatten sugits in i betongen innan den har kunnat börja torka något sedan taket monterats och bjälklaget skyddats mot regn.

6.7 Serie 6-9: Fyra mellanbjälklag, vct 0.38-0.60

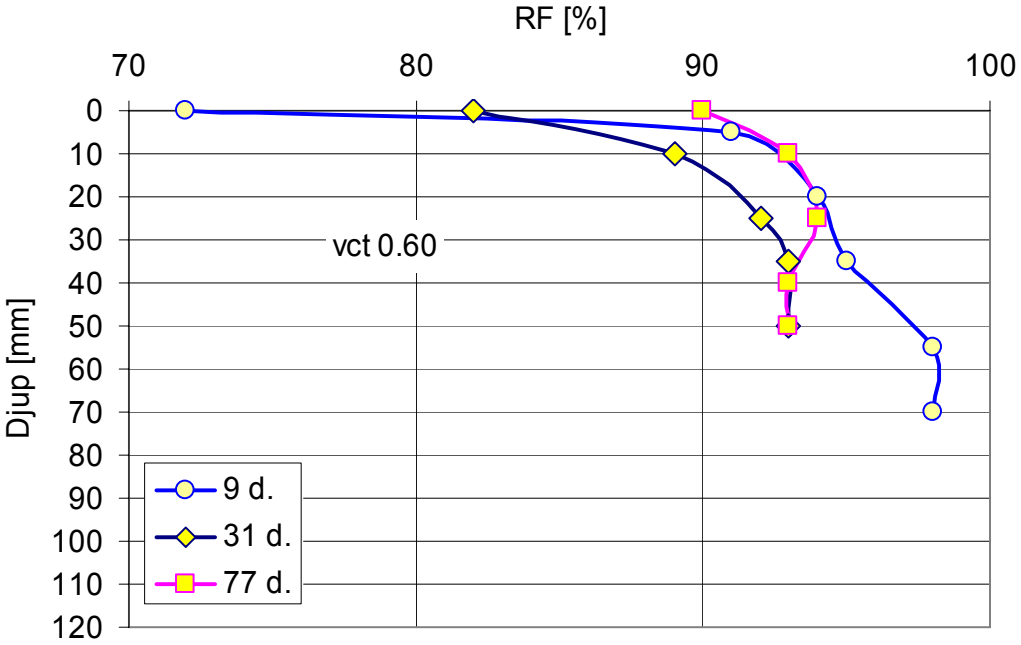
I ett hus i samma bostadsområde som i serie 3-5 studerades fuktförhållandena i mellanbjälklaget på ett annat tvåplanshus. Betongerna i fyra gjutetapper hade vct 0.60, 0.50, 0.41 respektive 0.37, och göts i mitten av oktober i en tjocklek av 215 mm på plattbärlag. Det var fritt vatten på plattbärlagen vid gjutning. Under gjutning i serie 6-8 regnade det så att det blev en vattenfilm på ytan av den nygjutna betongen. I serie 9 sprutades en membranisolering på betongytan, men betongen sprack kraftigt ändå.

Klimatet efter gjutning visas i figur 6.7.1 nedan. Sju dygn efter gjutning formsattes och göts bjälklaget ovanför, vilket tjänade som regnskydd därefter.



Figur 6.7.1 Uteklimatet för fältstudie 6-9[4]. Tiden räknas från gjutningen i början av oktober.

Efter gjutning var det uppehåll tills bjälklaget ovanför gjutits och ytterligare ett par veckor. Bjälklagen har därför inte utsatts för regn. De har fått en relativt god uttorkning den första tiden. Mellan det andra och tredje mättillfället har betongytan uppfuktats något, av den höga luftfuktigheten under vintern, se figurerna nedan.



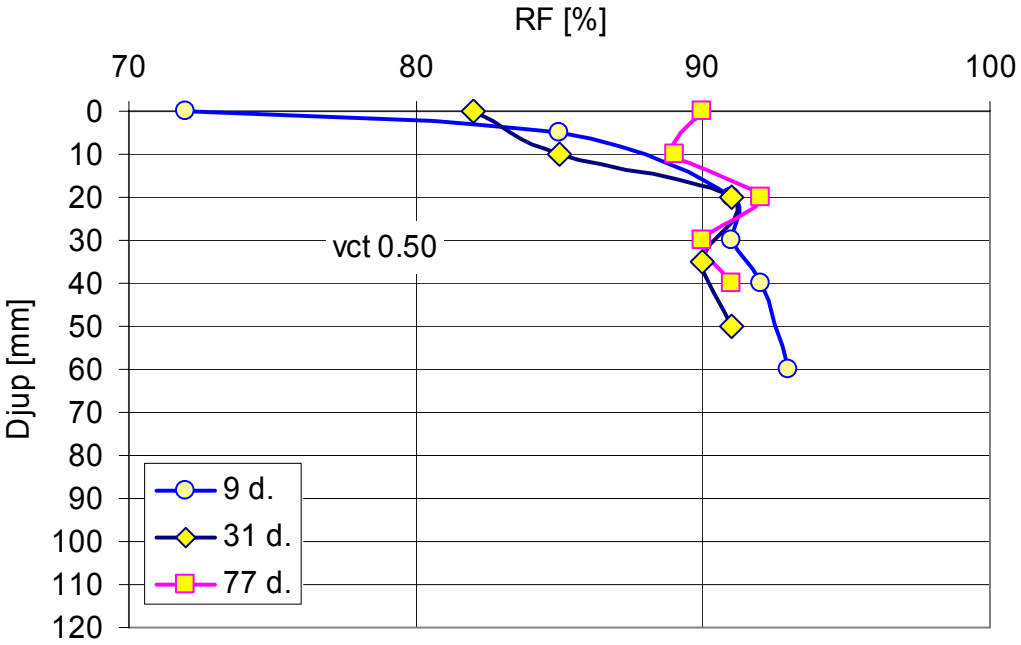
Figur 6.7.2 RF-profiler vid tre mättillfällen, utan nederbörd men med dåliga uttorkningsförhållanden. Betong med vct 0.60. Plattjocklek 215 mm på plattbärlag[4]

Betongen med vct 0.60 har fått en mätbar uttorkning ner till ett djup av 60 mm redan första veckan och denna uttorkning har fortsatt den första månaden.

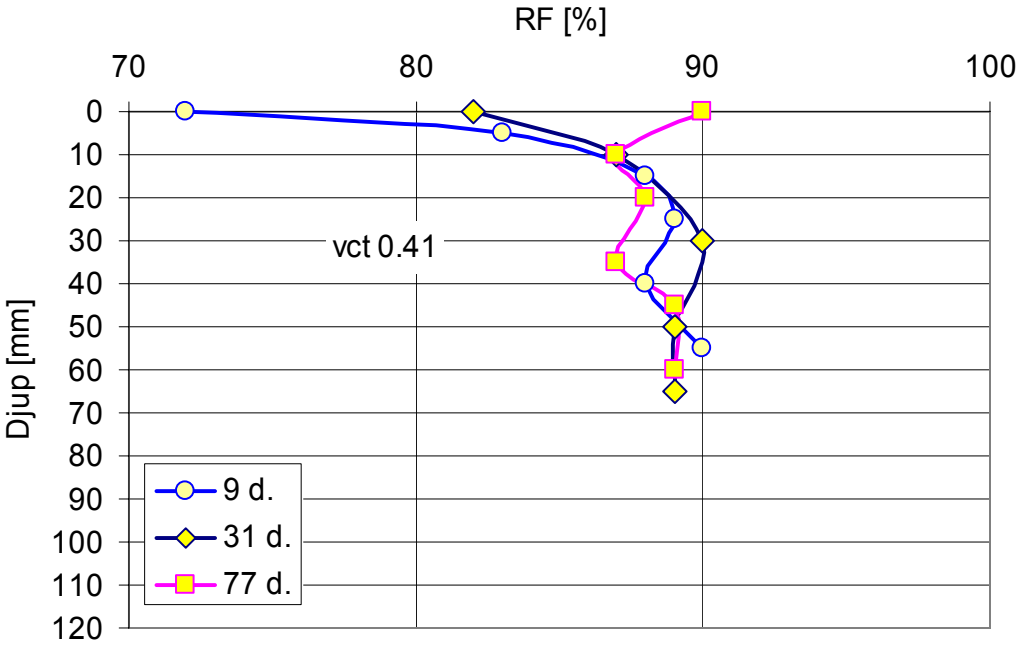
Betongen med vct 0.50, se nedan, har torkat något bättre än vct 0.60, som förväntat. Också här syns en viss uppfuktning i ytan vid det tredje mättillfället.

Betongen med vct 0.41 har fått en tydlig självuttorkning på djupet som nått under 90

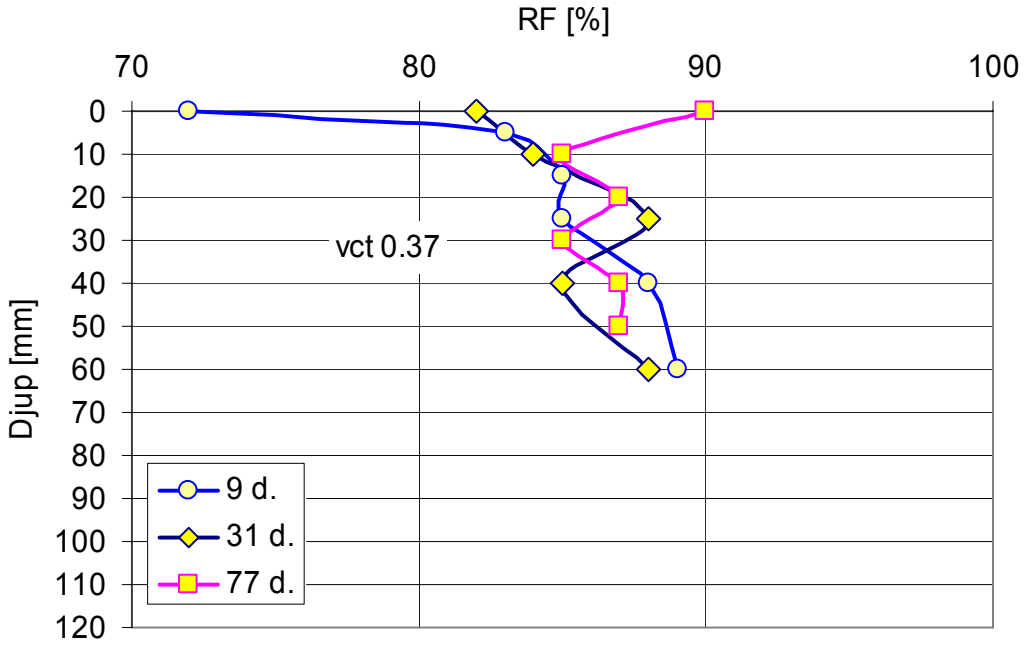
% RF. Med vct har självuttorkningen nått ca 87 % RF trots att temperaturen bara legat mellan 0 och +10°C.



Figur 6.7.3 RF-profiler vid tre mättillfällen, utan nederbörd men med dåliga uttorkningsförhållanden. Betong med vct 0.50. Plattjocklek 215 mm på plattbärlag[4]



Figur 6.7.4 RF-profiler vid tre mättillfällen, utan nederbörd men med dåliga uttorkningsförhållanden. Betong med vct 0.41. Plattjocklek 215 mm på plattbärlag[4]



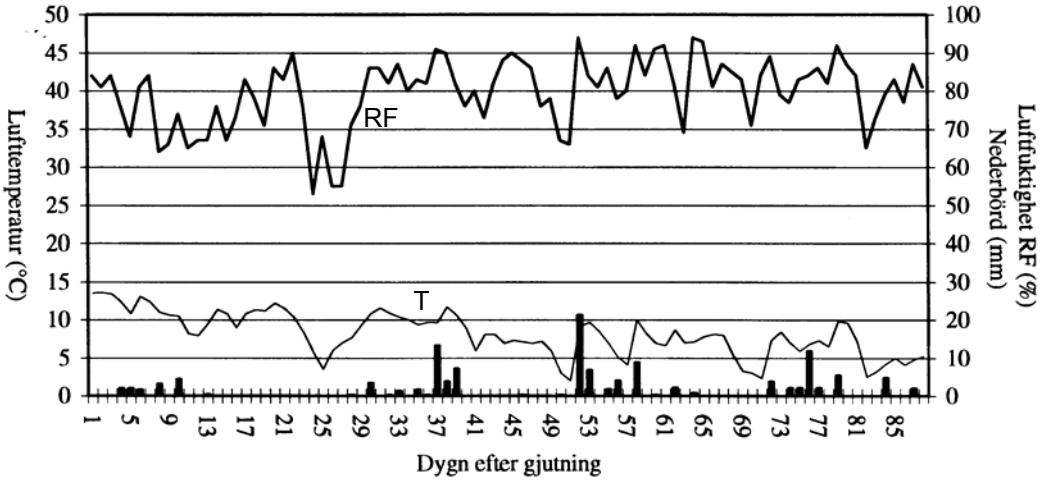
Figur 6.7.5 RF-profiler vid tre mättillfällen, utan nederbörd men med dåliga uttorkningsförhållanden. Betong med vct 0.37. Plattjocklek 215 mm på plattbärlag[4]

6.8 Serie 10: Mellanbjälklag över källare, vct 0.57

I ett kontorshus i Malmö studerades fuktförhållandena i bjälklaget över källaren. Betongen hade vct 0.57 och göts i slutet av september i en tjocklek av 300 mm på traditionell plyfaform.

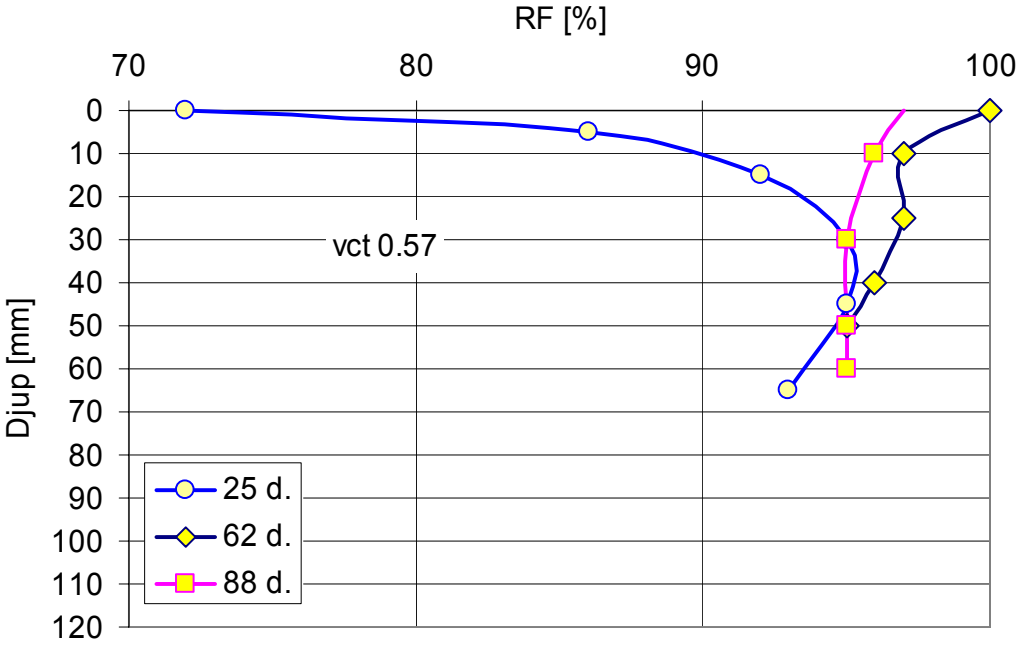
Klimatet efter gjutning visas i nedanstående figur. Den första månaden regnade det mycket lite. Den andra månaden regnade det periodvis mycket kraftigt. Bjälklaget fick visserligen ett ”partiellt regnskydd” från dygn nr 50 genom att bjälklaget ovanför formsattes och göts. Det var dock mycket blött på betongytan under hela resten av mätperioden genom att höstlöv blåste in på ytan och band en massa vatten till sig.

Mellan de första mätpunkterna 25 respektive 62 dygn efter gjutning regnade det under 11 av dygnen, fem av dygnen under veckan före det andra mättillfället.



Figur 6.8.1 Uteklimatet för fältstudie 10[4]. Tiden räknas från gjutningen i slutet av september.

Fuktprofiler vid de tre mättillfällena visas i nedanstående figur.



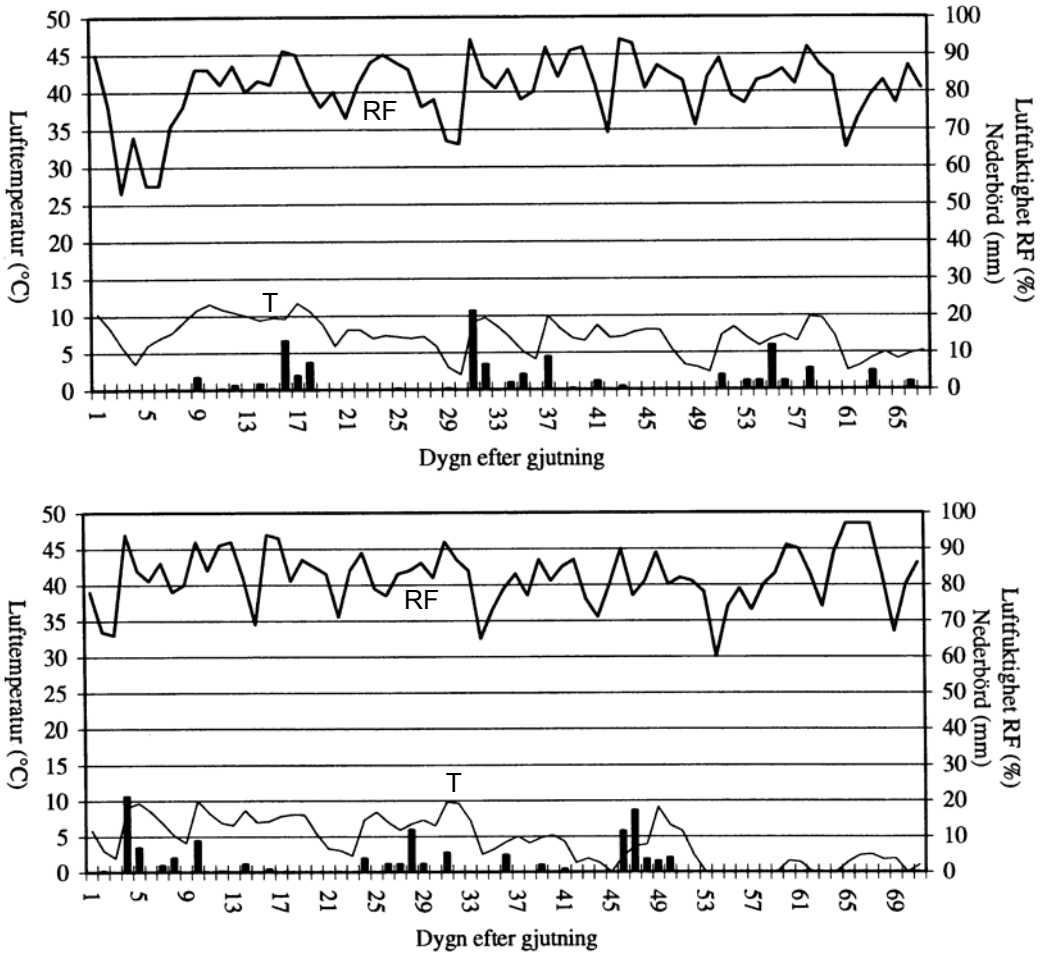
Figur 6.8.2 RF-profiler vid tre mättillfällen, dels före och efter 16 dygns regn (25 & 62 d.) och dels efter fortsatt vatten på ytan. Plattjocklek 300 mm på traditionell form[4]

Den första månaden har gett en tydlig uttorkning, men hela denna uttorkning går förlorad under de följande två månaderna med först stående vatten under en månad och sedan mycket blött på betongytan.

6.9 Serie 11-12: Platta på mark, vct 0.36 & 0.37

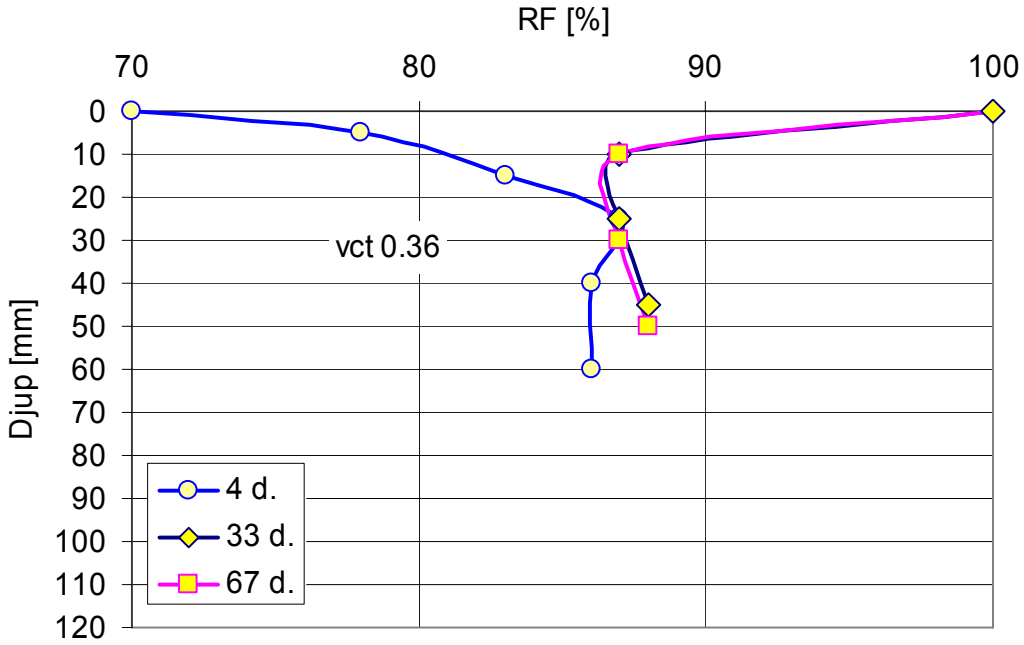
I enplanshus i Malmö studerades fuktförhållandena i två bottenplattor. Betongen hade vct 0.36 respektive 0.37 och göts i mitten av oktober respektive i mitten av november. I båda fallen göts plattorna med en tjocklek av 120 mm på torr mineralull.

Klimatet efter gjutning visas i nedanstående figurer för de två gjuttillfällena.



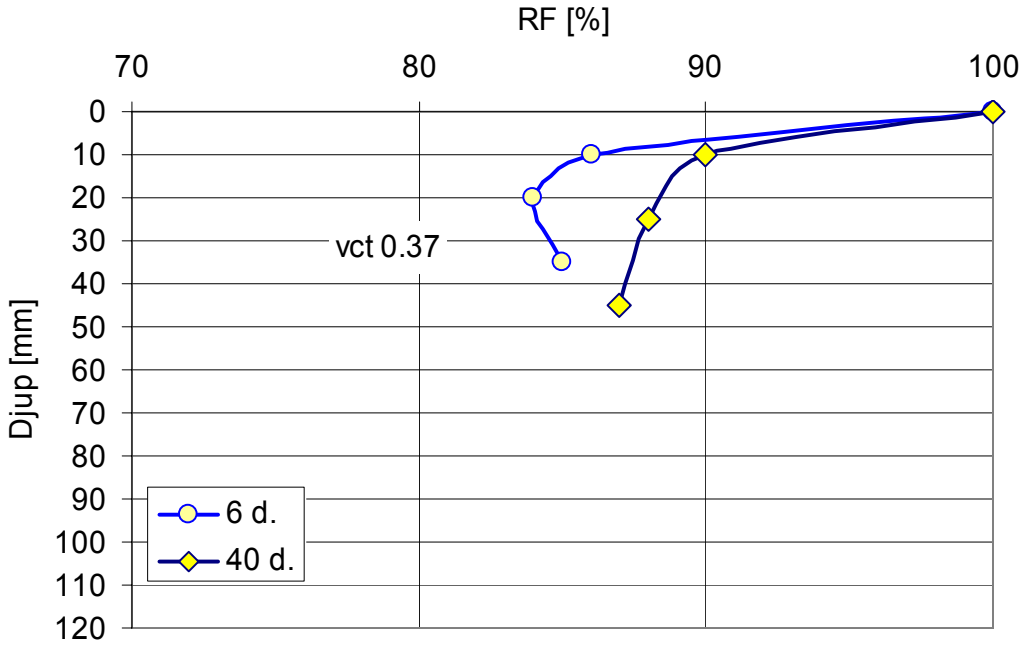
Figur 6.9.1 Uteklimatet för fältstudie 11-12[4]. Tiden räknas från gjutningen i mitten av oktober (övre) respektive mitten av november (undre).

Betongytorna i serie 11 var torra fram till första mättillfället. Därefter regnade det kraftigt, alldeles före andra mättillfället och det stod vatten på plattorna mellan övriga mättidpunkter. Uppmätta fuktprofiler visas i nedanstående figur.



Figur 6.9.2 RF-profiler vid tre mättillfällen, först efter kort tids uttorkning och sedan efter stående vatten på betongytan. Plattjocklek 120 mm på mineralull. Serie 11, betong med vct 0.36[4]

Betongytorna i serie 12 blev utsatta för regn redan före första mättillfället. Därefter regnade det kraftigt och det stod vatten på plattorna mellan övriga mättidpunkter. Uppmätta fuktprofiler visas i nedanstående figur.



Figur 6.9.2 RF-profiler vid två mättillfällen, först efter mindre regn före första mättillfället och sedan efter stående vatten på betongytan. Plattjocklek 120 mm på mineralull. Serie 12, betong med vct 0.37[4]

Dessa båda betonger har fått en kraftig självuttorkning till ca 85 % RF, men sedan

blivit uppfuktade av vatteninsugning från stående regnvatten. Uppfuktningen har nått ner till ett djup av ca 30-50 mm under en till två månaders vattensugning.

6.10 Serie 13: Mellanbjälklag, vct 0.35 med silika

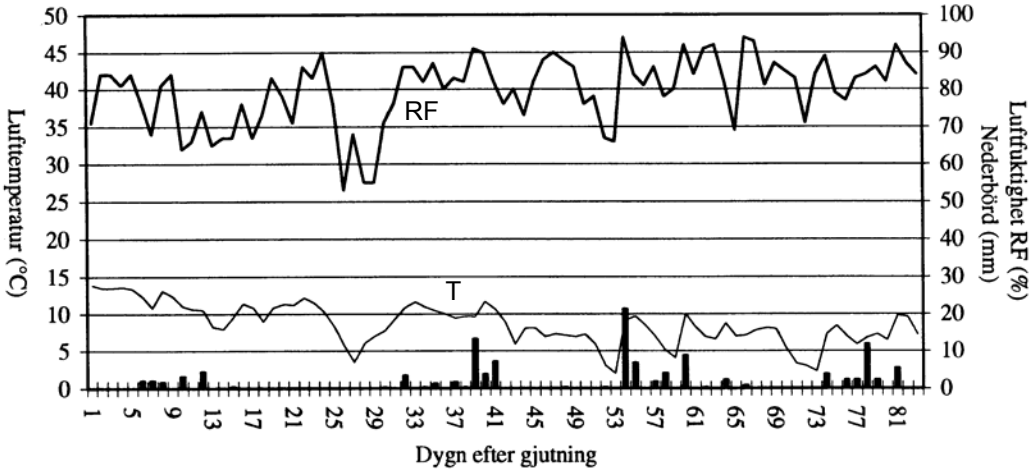
Vid renovering av en byggnad i Lund göts ett nytt 120 mm tjockt golv i ett fläktrum på kvarsittande form av korrugerad plåt. Betongen hade vct 0.35 och 6 % silikainblandning.

Golvet göts inomhus och kom aldrig att utsättas för nederbörd, varför det inte beskrivs närmre här.

6.11 Serie 14-15: Platta på mark, vbt 0.37 & 0.36

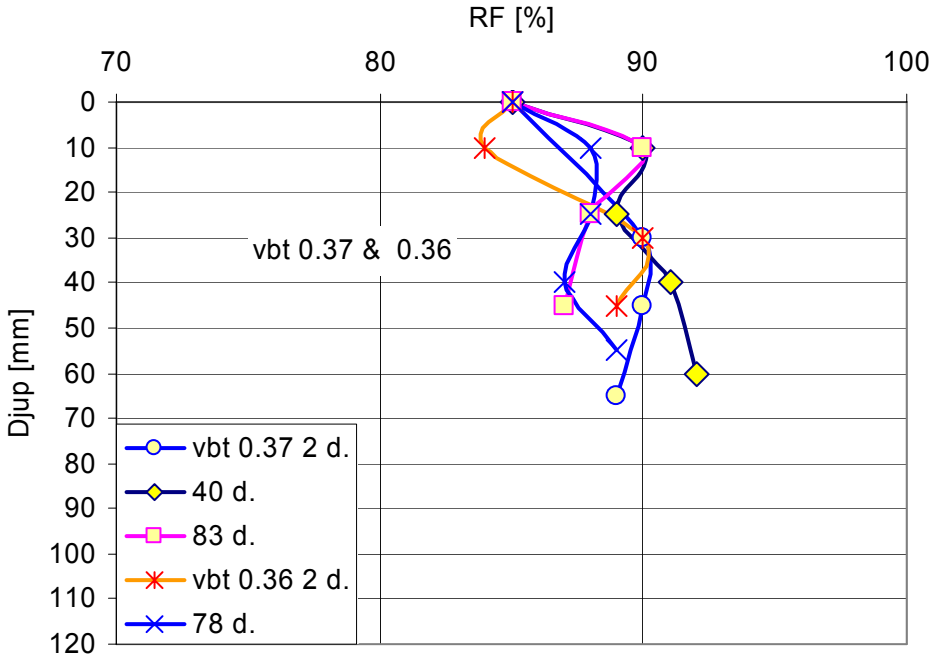
I en uppställningsplatta för betongbilar studerades fuktförhållandena i två gjutetapper. Betongen hade vbt 0.37 respektive 0.36, med ca 5 % silika, och göts i slutet av september. I båda etapperna göts plattorna med en tjocklek av 250 mm på makadam.

Klimatet efter gjutning visas i nedanstående figur. Betongytan var delvis skyddad mot nederbörd av ett plåttak. Betongerna har därför utsatts för relativt lite nederbörd, men lite regn strax före mättillfällena.



Figur 6.11.1 Uteklimatet för fältstudie 14-15[4]. Tiden räknas från gjutningen i slutet av september.

Uppmätta fuktprofiler visas i nedanstående figur.



Figur 6.11.2 RF-profiler vid tre respektive två mättillfällen, först efter kort tids uttorkning och sedan efter stående vatten på betongytan. Plattjocklek 120 mm på mineralull. Serie 11, betong med vct 0.36[4]

Betongerna har fått en snabb självuttorkning till omkring 90 % RF eller strax under. Något tydligt spår av uppfuktning på grund av regn eller uttorkning av ytan erhölls inte.

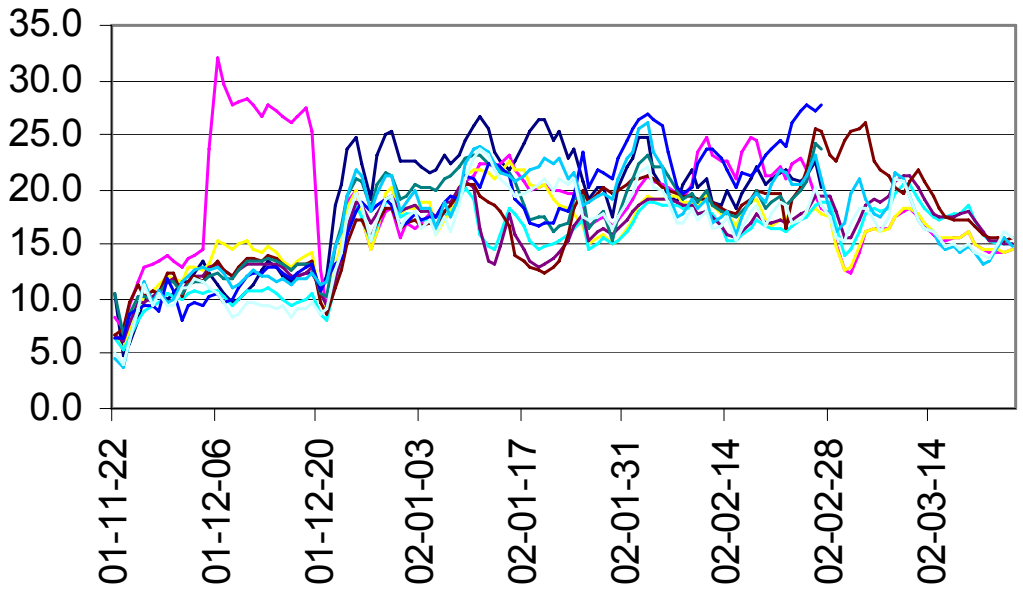
6.12 Serie 16: Platta på mark, vct 0.62

Studien[2] i serie 16 innehöll olika bjälklagstyper, olika betonger och olika torkmetoder i en hotelltillbyggnad till ett konferenscenter i Skåne. Regnpåverkan erhölls i huvudsak i ett rum, i rummet med mätpunkt 1:9. Detta rum fick mycket regn efter gjutning. Därför redovisas här bara denna mätpunkt och dess referens, mätpunkt 1:2.

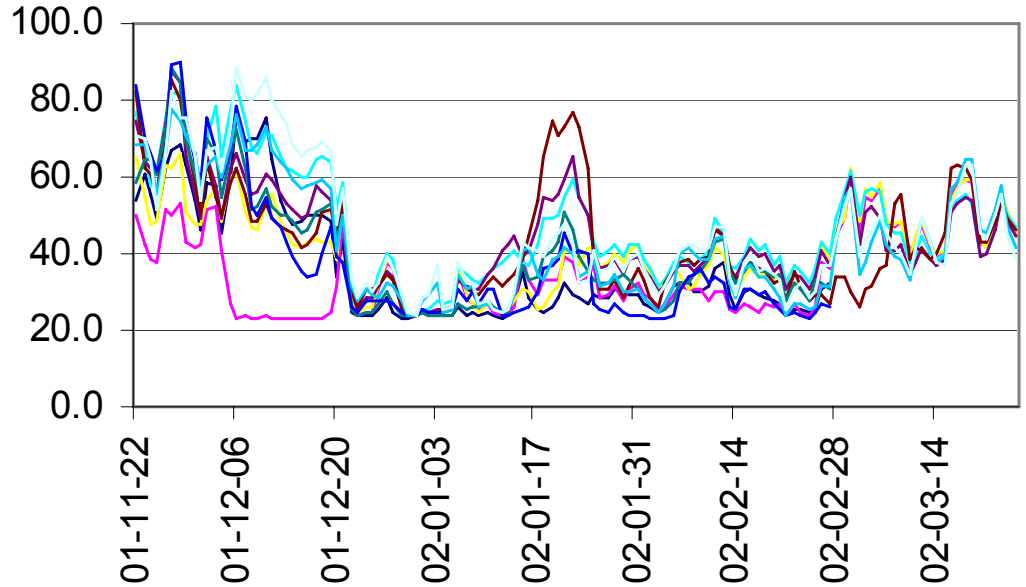
Bottenplattan göts i början av oktober. I de båda aktuella mätpunkterna användes betong K35 med vct 0.62 i en tjocklek av 100 mm på mineralullsisolering. Mellanbjälklaget ovanför göts två-tre veckor efteråt och var avsett som skydd mot nederbörd. Bjälklaget blev dock inte helt tätt förrän tre månader efter gjutning.

Ytterväggarna kläddes in provisoriskt med plast, men temperaturen på bottenplanet blev väldigt beroende av utetemperaturen. RF styrdes tidigt med hjälp av sorptionsavfuktare. Från omkring nyår hölls temperaturen kring +20°C och RF kring 30 %.

I nedanstående figurer visas temperaturen och relativa fuktigheten på bottenplanet under undersökningsperioden.

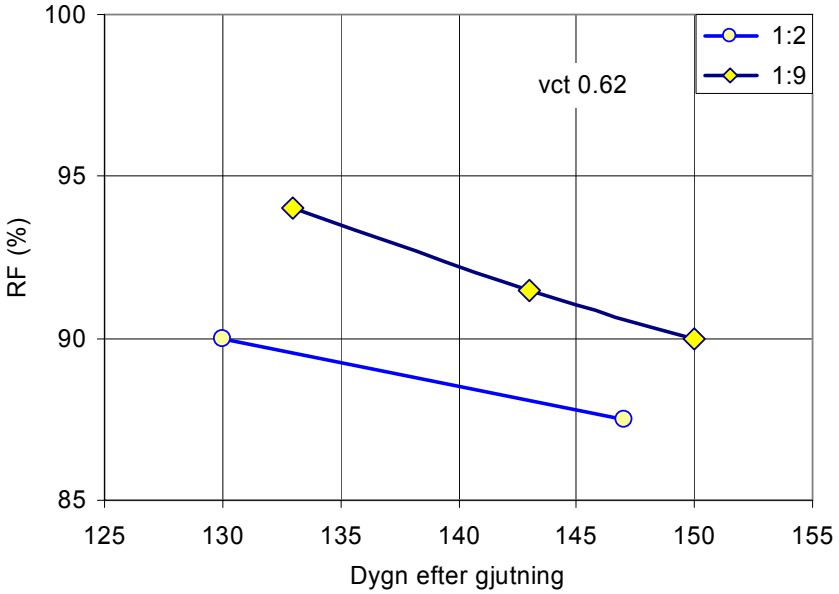


Figur 6.12.1 Temperaturen (°C) i olika mätpunkter på bottenplanet under hela undersökningsperioden, med början ca en och en halv månad efter gjutning[2].



Figur 6.12.2 Relativa fuktigheten (%) i olika mätpunkter på bottenplanet under hela undersökningsperioden, med början ca en och en halv månad efter gjutning[2].

Mätning av RF i betongplattan gjordes på ett djup, halva plattjockleken, vid några tillfällen. Mätningarna under de första månaderna skedde med HumiGuard-utrustning i borrade hål. Dessa mätningar är uppenbart felaktiga, av oförklarliga skäl, och användes inte. Istället gjordes ett antal avslutande mätningar med Vaisalautrustning på uttagna prover. Resultaten från de båda aktuella mätpunkterna visas i nedanstående figur.



Figur 6.12.3 RF i mätpunkterna 1:2 och 1:9 i bottenplattan vid några tillfällen. Punkt 1:2 har aldrig utsatts för regn, medan punkt 1:9 utsattes för mycket nederbörd strax efter gjutningen[2].

Skillnaden mellan de båda mätpunkterna i figur 6.12.3 är i huvudsak att punkt 1:9 utsattes för mycket regn under den första månaden efter gjutning. Denna vatteninsugning ger fortfarande en skillnad i RF på ca 5 % -enheter mer än två månader senare.

7 Slutsatser av mätningarna

Av laboratoriemätningarna och fältmätningarna kan följande slutsatser dras:

a) Det är mycket svårt att dokumentera effekten av regn på vatteninsugning i betong under fältmässiga förhållanden. I en del fall har man inte fått något regn alls. I andra har man fått regn under vissa perioder men det har stått vatten på betongytan under mycket längre perioder än de dagar det regnat. Vatteninsugning i betongplattor kan alltså inte enbart göras utifrån klimatdata och nederbördsuppgifter. Observationer under byggtiden av var det står vatten och under vilka perioder är helt avgörande för att kunna avgöra effekten på vatteninsugning i betongen.

b) Regnskydd i form av formsättning och gjutning av ovanförliggande bjälklag är inga tillförlitliga regnskydd. I flera fall har det läckt regnvatten genom mellanbjälklag, t ex genom installationskanaler. Regnskydd i form av ordentlig taktäckning har fungerat betydligt bättre, men ett sådant regnskydd innebär inte att betongytan blir torr. Det har stått vatten från tidigare regn på ytor under färdigt tak under långa perioder.

c) I de utförda studierna finns det som regel relativt noggranna uppgifter om under vilka perioder det stått vatten på betongytan; dock inte i alla. Där dessa uppgifter är relativt säkra framgår det tydligt vilken enorm effekt vattencementtalet har på vatteninsugningen i de utförda studierna. Vct på 0.40 och därunder ger en mycket begränsad vatteninsugning, mätt som RF-ökning på olika djup, även vid långvarig regnpåverkan. Inträngningsdjupet för sådan betong i fältstudierna var maximalt ca 30-50 mm under en till två månaders vattensugning. Därunder hade dessa betonger fullt utvecklad självuttorkning.

d) Inverkan av vattencementtalet i fältstudierna stämmer väl överens med resultaten av laboratoriemätningarna. För låga vct blir inträngningsdjupen små även om regnbelastningen kommer mycket tidigt. Regnbelastning under upp till sju dygn redan första veckan efter gjutning gav bara några centimeters vatteninsugning i låg-vct-betong. RF steg då inte heller till 100 % utan stannade på 90-95 % RF på dessa djup.

e) I betong med höga vattencementtal, här 0.55-0.70, sker vatteninsugningen till stora djup om regnbelastningen är långvarig eller kommer vid låg ålder hos betongen. Här har inträngning till djup på 120 mm uppmätts dels vid några dygns regn i tidig ålder och dels under längre regnvaraktighet i gammal betong.

f) Effekten på erforderliga uttorkningstider av regn under första veckan är stor, särskilt om torkning skall ske till 85 % RF. I extremfall förlängdes erforderlig torktid med 140 dygn (!) av regn under de första sju dygnen, på betong med vct 0.70. Betong med lågt vct är relativt okänslig för regn. Torktiden förlängs nästan bara med en tid som motsvarar regnets varaktighet.

g) Vatteninsugningen i gammal betong beror på fukthistorien många månader tidigare. Här har uppmätts dubbel så stor vatteninsugning i betong som utsattes för kortvarigt regn fem månader tidigare, jämfört med samma betong som utsattes för regn under en vecka. För att bedöma effekten av vatteninsugning måste man alltså både ta hänsyn till vilken tidig härdning betongen fått och vilken uppfuktning betongen fått tidigare.

h) Effekten av vatteninsugning uttryckt som RF-ökning på visst djup är självklart större ju mer uttorkad betongen är vid regnbelastningen. Samma fukthaltsökning betyder större RF-ökning på grund av att sorptionskurvans lutning är mindre.

i) Vatteninsugning i gammal betong som redan varit relativt uttorkad, ger naturligtvis mycket långa torktider eftersom betongen nu är betydligt tätare och inte längre har någon självuttorkning. Av mätningarna framgår att det krävs upp till tre månaders torktid, mer för vct 0.7, för att torka bort insuget vatten från några dagars regn. Betongerna med de lägsta vattencementtalen är dock så täta att de inte kommer över 85 % RF på ekvivalent djup av regn med begränsad varaktighet. Närmast ytan är de naturligtvis fuktigare, vilket kräver ordentlig uttorkning.

j) Vatteninsugning från en avjämningsmassa är betydligt blygsammare än från regn, åtminstone med de små tjocklekar på avjämningsmassan som studerats här. Både i fältstudien och i laboratorieundersökningen skedde vatteninsugningen efter en avjämning till djup mindre än ca 30 mm.

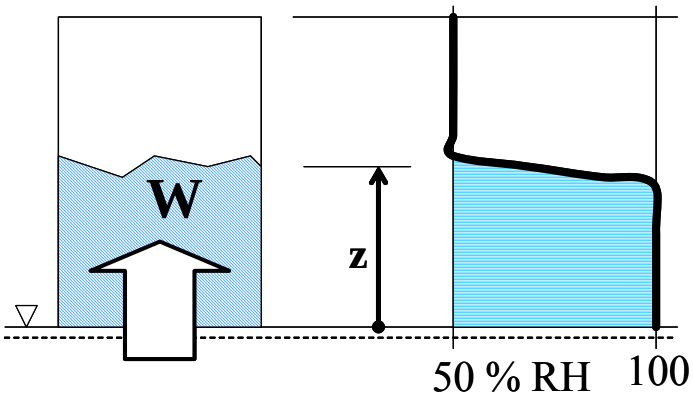
k) Dokumentation av vatteninsugning bör vid framtida undersökningar ske både i form av mätning av RF-profiler före och efter regn i kombination med mätning av insugen vattenmängd, helst i form av fukthaltsökning på olika djup. Samtidigt bör betongen före vattenbelastning noggrant dokumenteras i form av tidigare fukthistoria och hydratationsutveckling på olika djup.

8 Teoretiska modeller för vatteninsugning

8.1 Klassisk kapillärsugningsmodell

Den klassiska modellen[5] för vatteninsugning i porösa material är en beskrivning med en vattenfront som tränger in till ett visst inträngningsdjup z på en viss tid t och fyller materialet till en viss kapillär porositet P_k.

Insugningen beskrivs normalt med två enkla begrepp, motståndstalet *m* och kapillaritetstalet *k*, se figur 8.1.1, som om vattnet tränger in som en front.



$$W = k\sqrt{t} \qquad z = \sqrt{t}/\sqrt{m}$$

$$t = m \cdot z^2$$

k = ”kapillaritetstalet” m = motståndstalet

Figur 8.1.1 Definition av motståndstalet och kapillaritetstalet vid kapillärsugning.

8.1.1 Vattenfrontens inträngningshastighet. Motståndstalet

Det så kallade *motståndstalet m* [s/m^2] är ett mått på vattenfrontens inträngningshastighet.

$$t = m \cdot z^2 \tag{8.1.1}$$

Motståndstalet är en *materialegenskap* som bestäms främst av porsystemets genom-

snittliga finhet. För cylinderformade porer med radien r är motståndstalet proportionellt mot vattnets viskositet η, men omvänt proportionellt mot porradien och ytspänningen σ.

$$m = \frac{2 \cdot \eta}{\sigma \cdot r} \tag{8.1.2}$$

8.1.2 Insugen vattenmängd. Kapillaritetstalet

Upptagen vattenmängd W [kg/m^2] efter tiden t är, då inträngningsdjupet är z, efter insättning av uttrycket för motståndstal:

$$W_c = \rho_w \cdot P_k \cdot z = \frac{\rho_w \cdot P_k}{\sqrt{m}} \cdot \sqrt{t} = k\sqrt{t} \tag{8.1.3}$$

där ρ_w är vattnets densitet [1000 kg/m^3]

P_k är den del av porositeten som deltar i kapillärtransporten, den genomströmningsbara porositeten [m^3/m^3]

k är kapillaritetstalet [kg/m^2·√s] vilket uppenbarligen kan skrivas:

$$k = \frac{\rho_w P_k}{\sqrt{m}} \tag{8.1.4}$$

Kapillaritetstalet är alltså inte enbart en funktion av materialegenskaper utan också av det aktuella begynnelsefukttillståndet som indirekt uttrycks genom porositeten P_k. Denna kan skrivas:

$$P_k = P - P_{ig} - P_0 \tag{8.1.5}$$

där P är totalporositeten [m^3/m^3]

P_{ig} är den ej genomströmningsbara porositeten [m^3/m^3]

P_0 är den initiellt vattenfyllda porositeten [m^3/m^3]

Vattenabsorptionen är således proportionell mot kvadratroten ur tiden. Detta överensstämmer med den generella lösningen till en potentialekvation.

Vattenabsorptionshastigheten g [kg/m^2·s] fås genom derivering av ekvation 8.1.3:

$$g = \frac{k}{2 \cdot \sqrt{t}} \tag{8.1.6}$$

dvs. absorptionshastigheten avtar med ökande sugtid.

8.2 Vatteninsugning som ”fukttransport”

Det är alldeles uppenbart från de uppmätta fuktprofilerna både i laboratorieförsöken och i fältstudierna att vatteninsugningen i de aktuella betongerna inte sker som en vattenfront som tränger in, alldeles särskilt för betongerna med låga vct. Istället sker det en mer eller mindre långsam höjning av relativa fuktigheten RF med tiden på respektive djup. Detta borde kunna beskrivas som en fukttransportprocess där fuktändringen på olika djup blir en följd av att betongytan uppfuktas till nära vattenmättnad. Detta gjordes t ex av Arfvidsson & Hedenblad (1991)[6] och Fagerlund & Arfvidsson (1993)[7] på ett något förenklat sätt, utan hänsyn till hysteres och scanning.

Nedan beskrivs de delar som en sådan vatteninsugningsmodell måste inkludera.

8.2.1 Massbalans

För att kunna beräkna fuktändringar i allmänhet, inklusive vatteninsugning, måste man lösa massbalansekvationen för fukt. I en dimension kan den skrivas

$$\frac{\partial w_e(x,t)}{\partial t} = -\frac{\partial g(x)}{\partial x} - \frac{\partial w_n(x,t)}{\partial t} \tag{8.2.1}$$

Fukthalten w_e [kg/m^3] ändras med tiden om det finns en skillnad i fuktflöde in i g eller ut ur $g+dg$ ett tunt skikt av materialet. Skillnaden, med dimensionen kg/(m^{2}s), fördelas på skiktets tjocklek dx [m]. Minustecknet framför den första termen beror på att om flödet ökar med x-koordinaten är den termen positiv men då är flödet ut större än flödet in, dvs. fukthalten w_e minskar med tiden! Den andra termen i ekvation 8.2.1 beskriver hur Fukthalten w_e minskar med tiden på grund av kemisk bindning av vatten till cementet. Ekvationen 8.2.1 är alltid riktig; den innehåller inga antaganden! För att lösa den måste man kunna beskriva fuktflödet g och den kemiska bindningen av vatten. Då fordras ofta antaganden av olika slag, som då kan medföra olika grad av osäkerhet.

8.2.2 Fukttransport

Den totala fukttransporten beskrivs traditionellt som summan av ångtransport och vätsketransport. Ångtransporten beskrivs med ånghalten v som potential. Vätsketransporten bestäms av gradienten i porvattentrycket P_w. Det totala fuktflödet blir alltså:

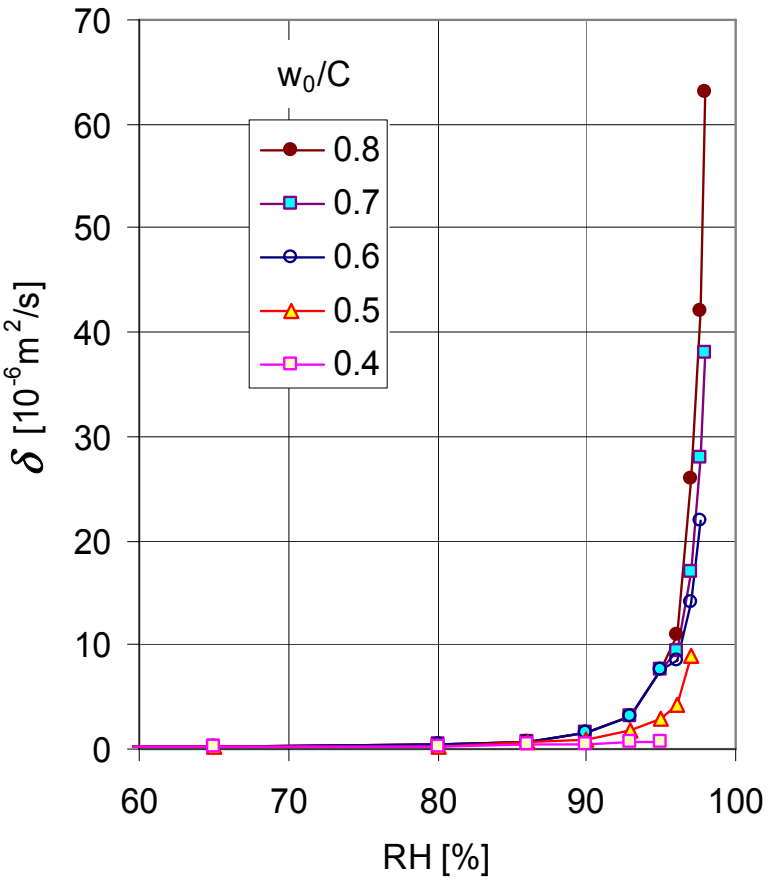
$$g = g_v + g_l = -\delta_v \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{k_P}{\eta}\frac{\partial P_w}{\partial x} \tag{8.2.2}$$

Såväl ångtransportkoefficienten δ_v som vätsketransportkoefficienten k_P är fuktberoende. Det totala fuktflödet kan alltså beskrivas som en summa av ett ångflöde och ett vätskeflöde. Problemet med användning av ekvation (8.2.2) är att man använder två olika drivande potentialer och att de båda flödena inte kan särskiljas vid en experimentell bestämning av fuktflödet. Ekvationen kan därför inte användas för praktiska beräkningar. Istället slår man samman de båda termerna till ett totalt fuktflöde under förutsättning av att temperaturen är densamma i alla delar av materialet.

$$g = -\delta_v \frac{\partial v}{\partial x} - \delta_l \frac{\partial v}{\partial x} = -(\delta_v + \delta_l)\frac{\partial v}{\partial x} = -\delta \frac{\partial v}{\partial x} \tag{8.2.3}$$

”Översättningen” av porvattentrycket P_w till ånghalt v görs nämligen med Kelvinekvationen. I denna ingår mättnadsånghalten $v_m(T)$ som är kraftigt temperaturberoende.

Fukttransportkoefficienten δ, beskriver det totala fuktflödet, dvs. även vätskeflödet, trots att transportpotentialen är ånghalten! Av detta skäl är naturligtvis transportkoefficienten δ, kraftigt fuktberoende. Den ökar med ökande fuktnivå för många, finporösa material, inklusive betong.



Figur 8.2.1 Fukttransportkoefficienten δ, för välhärdad betong med olika vct. Data från Hedenblad (1993)[8]

I en del beräkningar, t ex i Johansson (2005)[9] och i JAM[10] används relativa fuktigheten ϕ i materialets porer som fukttransportpotential, med transportkoefficienten D_ϕ. Dessa olika transportkoefficienter kan översättas till ”fundamentalpotentialen[11]” ψ, som t ex används i TorkaS[12].

$$g = -D_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \tag{8.2.4}$$

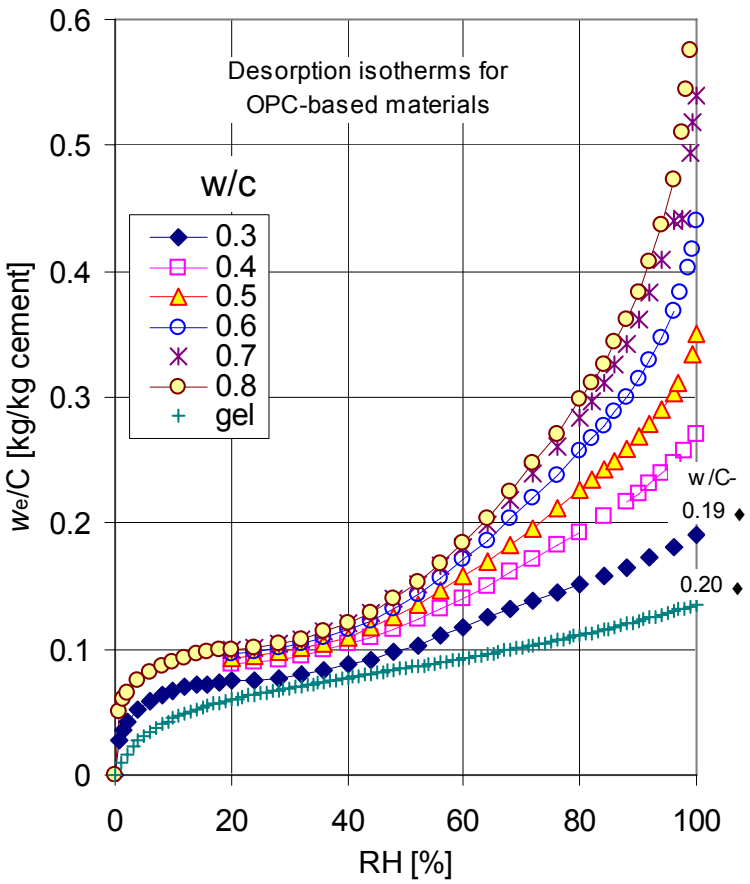
För betong måste fukttransportkoefficienten beskrivas med ett åldersberoende. Detta

görs bäst genom att ange fukttransportkoefficienten som funktion av hydratationsgraden α:

$$g = -\delta(\phi,\alpha)\frac{\partial v}{\partial x}, \quad 0 \le \alpha < 1 \tag{8.2.5}$$

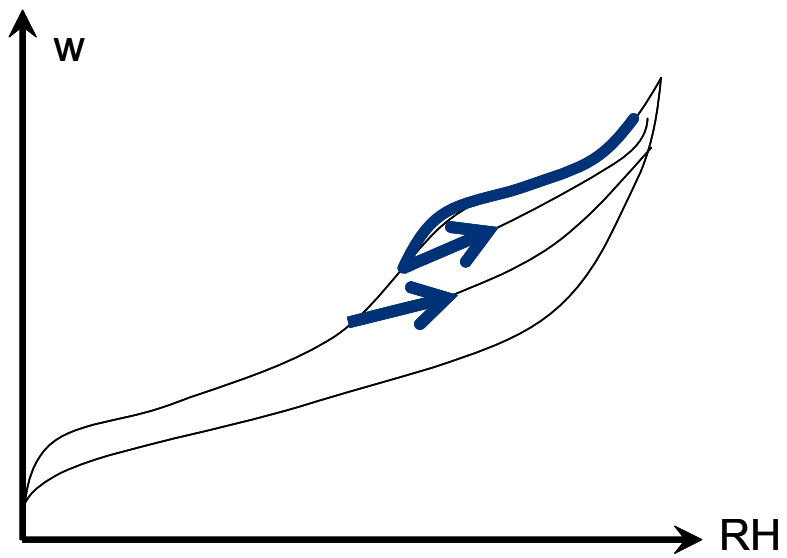
8.3 Fuktbindning

För fuktändringsberäkningar med ovanstående fukttransportekvationer måste man kunna ange hur ånghalten och relativa fuktigheten ändras då fukthalten ändras. Man måste också kunna beskriva jämvikten mellan fukten i materialytan och omgivande klimat. Detta samband ges av sorptionskurvan $w_e(\phi)$. Ett exempel ges i figur 8.3.1.



Figur 8.3.1 Desorptionsisotermer för välhärdad betong med olika vct. Data från Nilsson (1980)[13]

Vid omväxlande fuktändringar, t ex vid vatteninsugning efter uttorkning, följer sambandet mellan fukthalt w_e och relativ fuktighet ϕ övergångskurvor mellan desorptionskurvan och absorptionskurvan, se figur 8.3.2.



Figur 8.3.2 Principiella övergångskurvor, ”scanningkurvor”, från desorptionskurvan vid uttorkning följd av uppfuktning.

”Fuktkapaciteten” är en viktig materialegenskap vid fuktändringar. Den anger hur mycket fukthalten måste öka för att RF skall öka. Den kan mätas som lutningen hos sorptionskurvan. I figur 8.3.1 ses att denna lutning är mycket olika vid olika fuktnivåer; stor vid mycket höga och mycket låga RF och betydligt mindre vid rumsklimat.

Vid uppfuktning, t ex vatteninsugning, efter uttorkning blir fuktkapaciteten mycket mindre än vid uttorkningen. Detta ses i figur 8.3.2 som en mycket mindre lutning hos övergångskurvorna än hos desorptionskurvan. En mycket mindre fuktkapacitet innebär att RF ökar mycket även vid en liten fukthaltsökning t ex pga. vatteninsugning.

För ung och härdande betong måste sorptionskurvan, både desorptions- och scanningkurvorna, kunna anges som funktion av hydratationsgraden: $w_e(\phi, \alpha)$.

8.4 Randvillkor på betongytan

Före vatteninsugningens start är betongytan i stort sett i jämvikt med omgivande luft, dvs. $RF(x=0, t) = RF_{luft}$ om betongytan har samma temperatur som luften. Annars gäller att ånghalten på betongytan är samma som i luften, dvs. $v(x=0, t) = v_{luft}$. Under perioden som det står vatten på betongytan, antingen det är mycket eller lite vatten eller ”fuktiga löv” som i ett av fältobjekten, är RF = 100 % på betongytan. Detta är ekvivalent med att vattentrycket på betongytan är 0 MPa. Undertrycket hos porvattnet P_w på större djup kan då ge vatteninsugning av vatten som vätska, enligt andra termen i ekvation 8.2.2. Annars sker ”vatteninsugningen” som fukttransport pga. skillnader i relativ fuktighet och ånghalter på betongytan och inne i betongen.

9 Materialegenskaper för aktuella betonger

I detta kapitel beskrivs de materialegenskaper principiellt som sedan används i beräkningarna i följande kapitel. I följande kapitel prövas sedan dessa materialegenskaper genom att jämföra beräkningsresultaten med mätvärden. Om överensstämmelsen inte är tillräckligt god, prövas att ändra dessa materialegenskaper något. Dessa val och ändringar av materialegenskaper redovisas i samband med respektive beräkning.

Utgångsmaterialen är de fem betongerna som använts i de båda laboratorieundersökningarna, med vct i området 0.35 – 0.70 och som utsatts för regnbelastning dels efter 3 tim och dels efter fem månader.

TABELL 9.1 Betongsammansättning för materialen använda i beräkningarna

Material	vct	C (kg/m^3)
1	0.35	500
2, 18-21	0.40	435
3	0.45	400
4, 6-9, 14, 16	0.55	340
5, 10-13, 15, 17	0.70	260

De olika materialen, med samma vct, skiljer sig åt genom att hydratationsgraden antagits annorlunda eller att materialegenskaperna varierats på något sätt, se nedan.

9.1 Hydratationsgrader

Materialegenskaperna har i första hand valts utifrån betongsammansättning och hydratationsgrad. Hydratationsgrader för de olika betongerna har uppskattas från Norling-Mjörnell (1997)[14]. Figur 2.4e har använts för låg-vct betong (0.35, 0.40, 0.45), för hög-vct-betong användes Figur 2.4h (0.7). Hydratationsgraden för vct 0.55 uppskattas genom ett medelvärde av dessa båda figurer. Hydratationsgraderna redovisas i Tabell 9.2.

Det visade sig att betongerna vid fem månaders ålder hade helt olika egenskaper beroende på vilken regnbelastning de hade fått under den första veckan efter gjutning. För att ta hänsyn till detta gavs olika provkroppar olika hydratationsgrader, enligt Tabell 9.3.

TABELL 9.2 Hydratationsgrader α för en del av betongerna

Material	vct	α
1	0.35	0.55
2	0.40	0.55
3	0.45	0.55
4, 14, 16	0.55	0.70
5, 15, 17	0.70	0.75

TABELL 9.3 Hydratationsgrader för respektive provkropp för betongerna med vct 0.55 och 0.70

Material	Regn vecka 1 (dygn)	vct	α
6	1	0.55	0.55
7	2		0.60
8	4		0.65
9	7		0.70
10	1	0.70	0.60
11	2		0.65
12	4		0.70
13	7		0.75

9.2 Sorptionskurvor

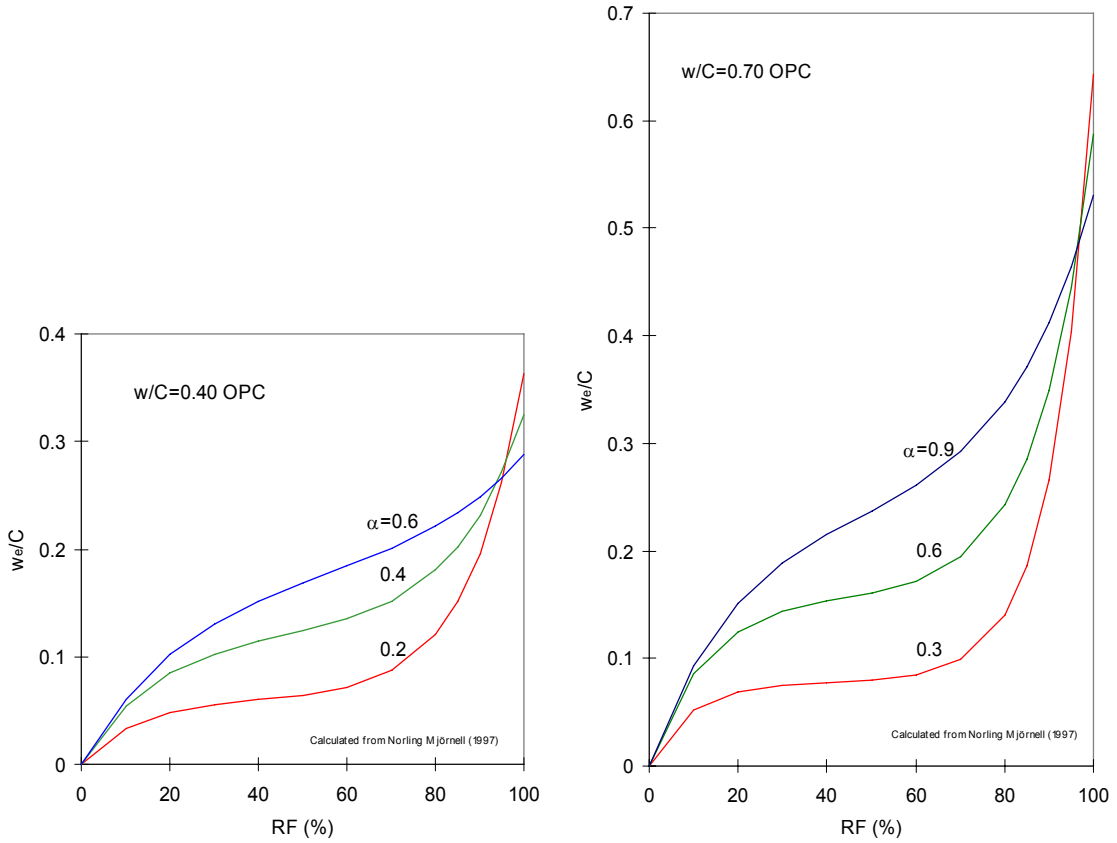
9.2.1 Desorptionsisotermer för olika betonger och hydratationsgrader

Desorptionsisotermerna för respektive betong, och provkropp, har beräknats utifrån vattencementtal, cementhalt och hydratationsgrad med ett uttryck enligt Norling-Mjörnell (1997).

$$w_e / C = k_{wg} \cdot \alpha \cdot \left(1 - \frac{1}{e^{\phi \cdot (b-10\alpha)}}\right) + \frac{vct - 0.1875 \cdot \alpha - k_{wg} \cdot \alpha \cdot \left(1 - \frac{1}{e^{b-10\alpha}}\right)}{e^{b-10\alpha} - 1} \cdot \left(e^{\phi \cdot (b-10\alpha)} - 1\right) \tag{9.2.1}$$

Parametrarna k_{wg} och b är något olika beroende på cementtyp och vct. För Standard Portlandcement anges k_{wg} till 0.30-0.26 och b till 10-15 för vct-intervallet 0.40-0.70. I detta intervall har värden för andra vct tagits fram genom interpolering.

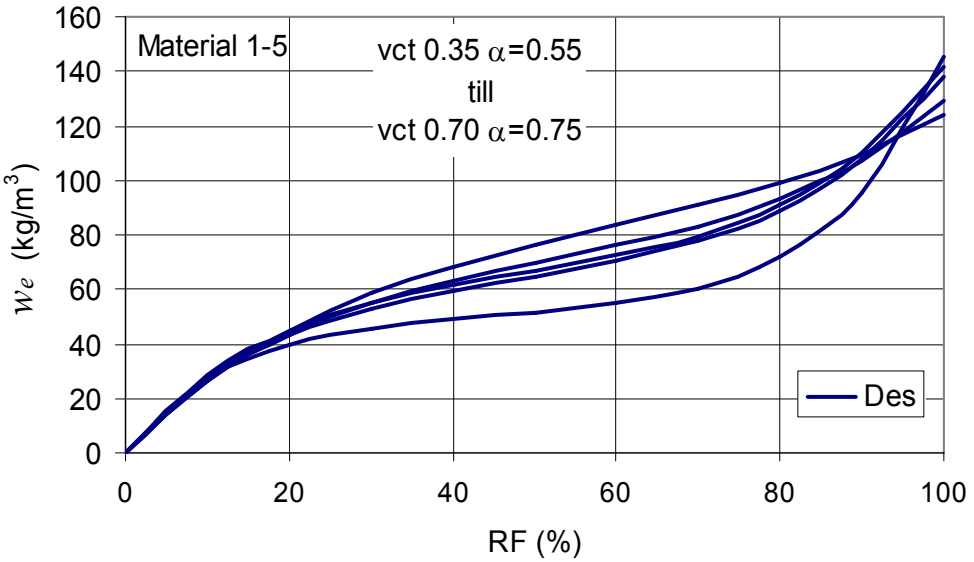
Två exempel ges i nedanstående figur för vct 0.40 respektive 0.70 och några olika hydratationsgrader.



Figur 9.2.1 Exempel på desorptionsisotermer, uttryckta i fukthalt i kg per kg cement, för två vattencementtal, 0.4 och 0.7. Beräknade enligt Norling-Mjörnell (1997).

Med de aktuella cementhalterna och hydratationsgraderna enligt Tabell 9.2 har desorptionskurvorna för de fem betongerna beräknats, se figur 9.2.2. De är här uttryckta som fukthalt i kg per m^3 betong, så som de används i beräkningarna.

För betongerna i Tabell 9.3, och andra hydratationsgrader, har nya desorptionskurvor beräknats på samma sätt.

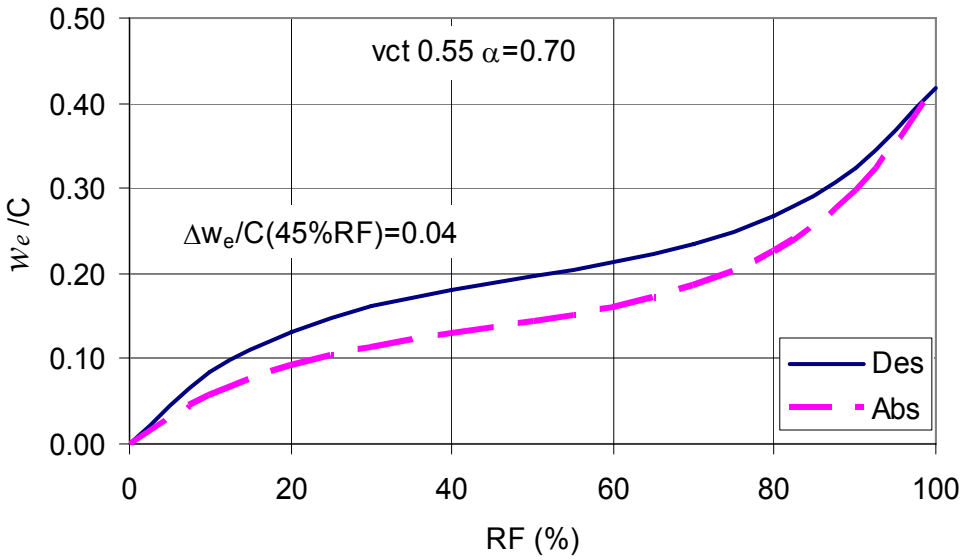


Figur 9.2.2 Desorptionsisotermer, uttryckta i fukthalt i kg per m^3 betong, för de fem betongerna i Tabell 9.1 och 9.2. Beräknade enligt Norling-Mjörnell (1997).

9.2.2 Absorptionsisotermer för olika betonger och hydratationsgrader

För absorptionsisotermer finns inte motsvarande beräkningsmodeller. Här har istället observationer av Nilsson (1980) utnyttjats. Skillnaden mellan desorptions- och absorptionsisotermen angavs till 0.04, uttryckta som kg per kg cement vid relativa fuktigheten 45 %. Vid 100 % RF sammanfaller de, eftersom hela kapillärporsystemet då är mättat i båda fallen.

Ett exempel på hysteres mellan desorptions- och absorptionsisotermerna med denna skillnad visas i nedanstående figur.



Figur 9.2.3 Desorptions- och absorptionsisotermer, uttryckta i fukthalt i kg per kg cement, för en av de fem betongerna i Tabell 9.1 och 9.2. Beräknade enligt Norling-Mjörnell (1997) med en differens mellan dem enligt Nilsson (1980).

9.2.3 Scanningkurvor för olika betonger

Övergångskurvor för betong är inte alls lika väl dokumenterade som desorptionsisotermerna. Här har valts att beskriva sorptionskurvan vid uppfuktningen av vatteninsugning som en scanningkurva med en konstant lutning hos hela scanningkurvan. Lutningen har uppskattats från nya mätningar av Åhs (2006)[15] för ett antal betonger. Dessa data kan beskrivas med en fuktkapacitet enligt ekvation 9.2.2.

$$\frac{\partial w_e / C}{\partial \phi} = 0.1 \quad dvs$$
$$\frac{\partial w_e}{\partial \phi} = 0.1 \cdot C \quad \left[kg / m^3\right] \tag{9.2.2}$$

där C är cementhalten. På så sätt blir fuktkapaciteten olika för olika betonger och direkt beroende av cementhalten.

9.3 Fukttransportkoefficienter

Fukttransportkoefficienter $\delta(\phi, \alpha)$ för olika betonger och olika ålder har föreslagits av Norling-Mjörnell & Hedenblad i Betonghandboken Högpresterande betong (1997)[16]. Förslaget baseras dels på mätningar på mycket välhärdad betong[8] och dels på mätningar i relativt ung ålder[14].

$$\delta(\phi,\alpha) = \delta(60\%) + \left(\delta(100\%) - \delta(60\%)\right) \cdot \left(\frac{\phi - 0.6}{1.0 - 0.6}\right)^k \tag{9.3.1}$$

där $\delta(60\%)$ är fukttransportkoefficienten vid 60 % RF
$\delta(100\%)$ är fukttransportkoefficienten vid 100 % RF
k är en konstant som styr fuktberoendet mellan 60 och 100 % RF.

De båda värdena vid 60 respektive 100 % RF ges av

$$\begin{aligned} \delta(60\%) &= a + b \cdot P_{kap} \\ \delta(100\%) &= c + d \cdot P_{kap}^2 \end{aligned} \tag{9.3.2}$$

där a, b, c och d är konstanter för en viss betong. Värden på dessa ges i Tabell 9.4.

TABELL 9.4 Konstanterna i ekvation 9.3.2

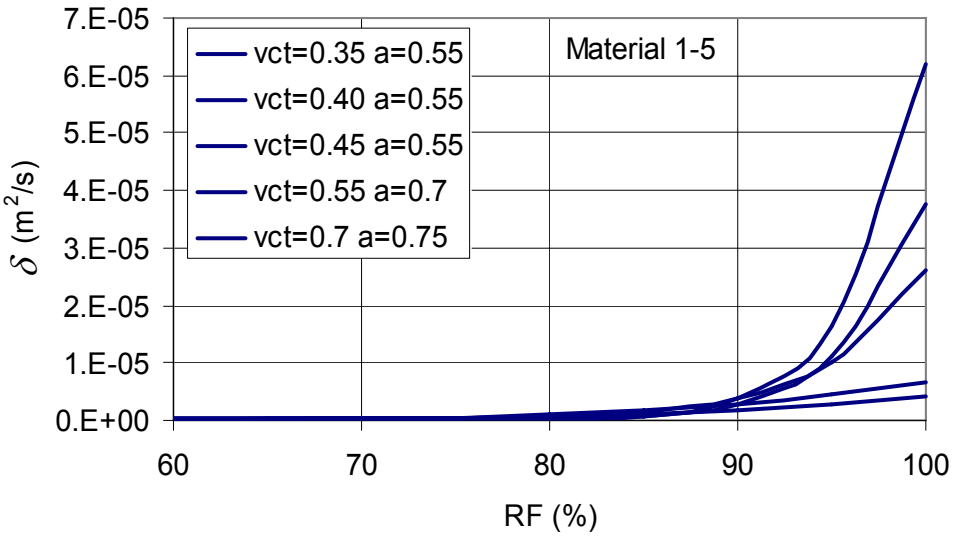
vct	*a*	*b*	*c*	*d*	*k*
0.6-0.8	$1.0 \cdot 10^{-7}$	$2.5 \cdot 10^{-7}$	$-5.0 \cdot 10^{-7}$	$4.2 \cdot 10^{-4}$	10
0.5					8
≤ 0.4		$2.0 \cdot 10^{-7}$	0	$1.0 \cdot 10^{-4}$	3

Med dessa konstanter som utgångspunkt har interpolation och extrapolation gjorts för vct 0.55, 0.45 och 0.35.

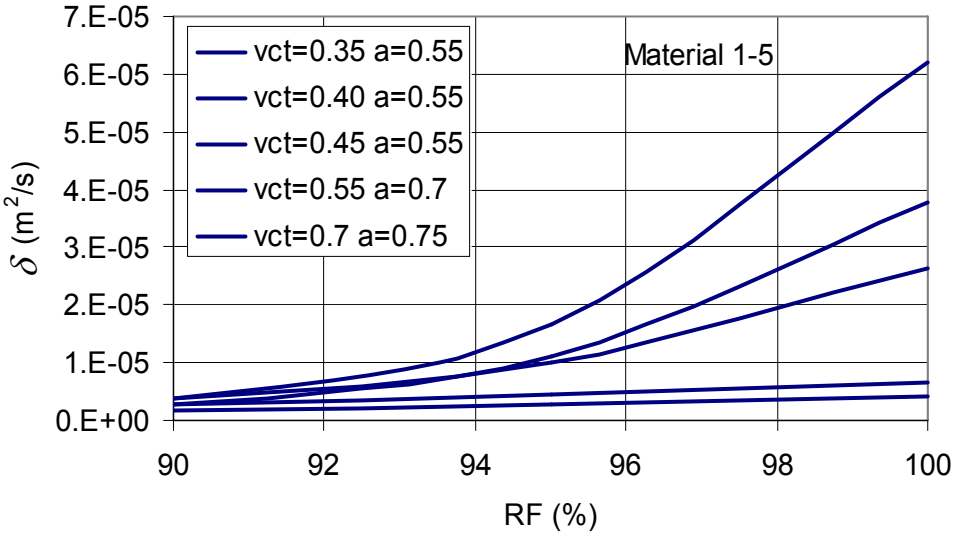
P_{kap} är cementpastans kapillärporositet, inte betongens kapillärporositet

$$P_{kap} = \frac{vct - 0.39 \cdot \alpha}{0.32 + vct} \tag{9.3.3}$$

Fukttransportkoefficienterna för de fem betongerna i Tabell 9.2 åskådliggörs i nedanstående figurer.

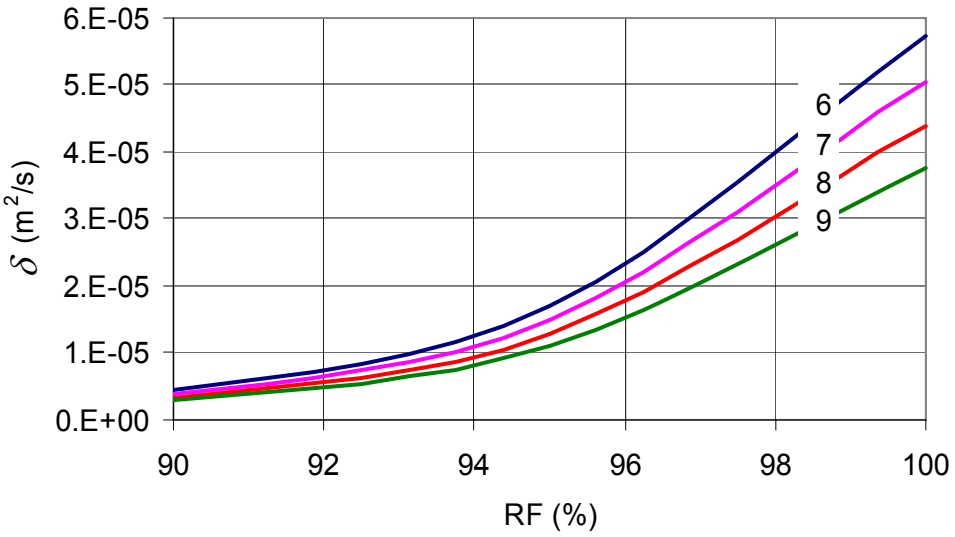


Figur 9.3.1 Fukttransportkoefficienterna för de fem betongerna 1-5 i Tabell 9.1 och 9.2. Beräknade enligt ekvation (9.3.1), Hedenblad & Norling-Mjörnell (1997).

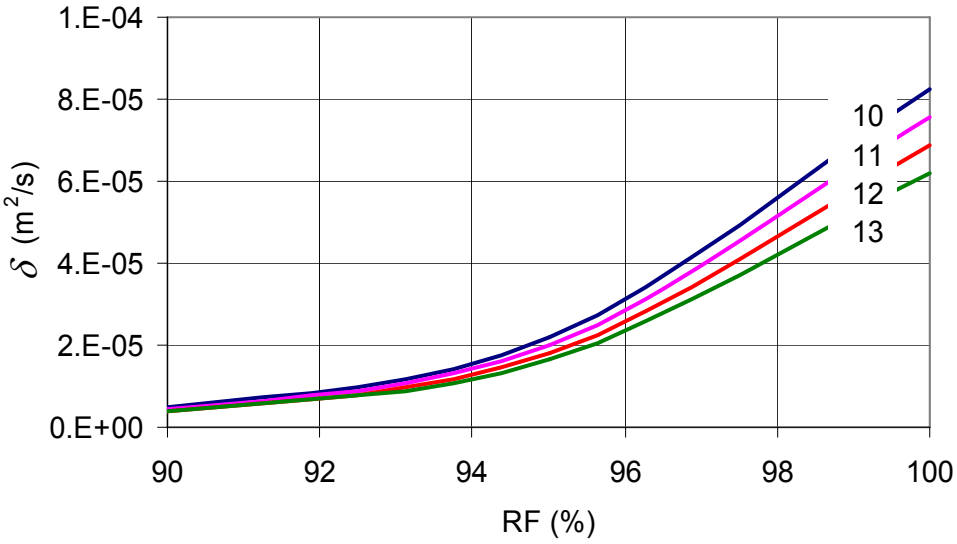


Figur 9.3.2 Fukttransportkoefficienterna för de fem betongerna 1-5 i Tabell 9.1 och 9.2. Förstoring av figur 9.3.1 i intervallet 90 -100 % RF

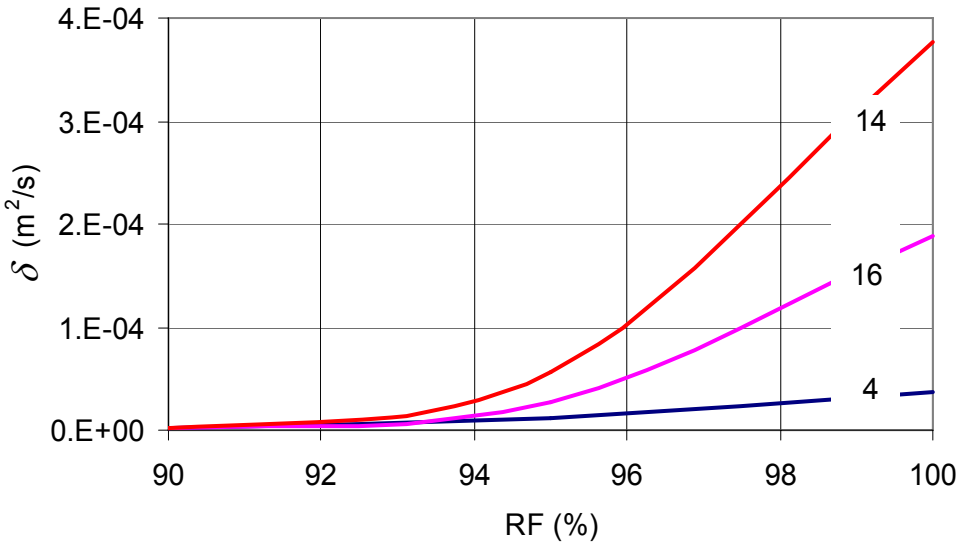
För betongerna i Tabell 9.3 har hydratationsgraden varierats mellan de individuella provkropparna pga. de utsatts för olika regnbelastning under första veckan efter gjutning. Detta ger då också, förutom olika sorptionskurvor, något olika fukttransportkoefficienter. Dessa jämförs i nedanstående figurer för de båda betongtyperna med vct 0.55 respektive 0.70.



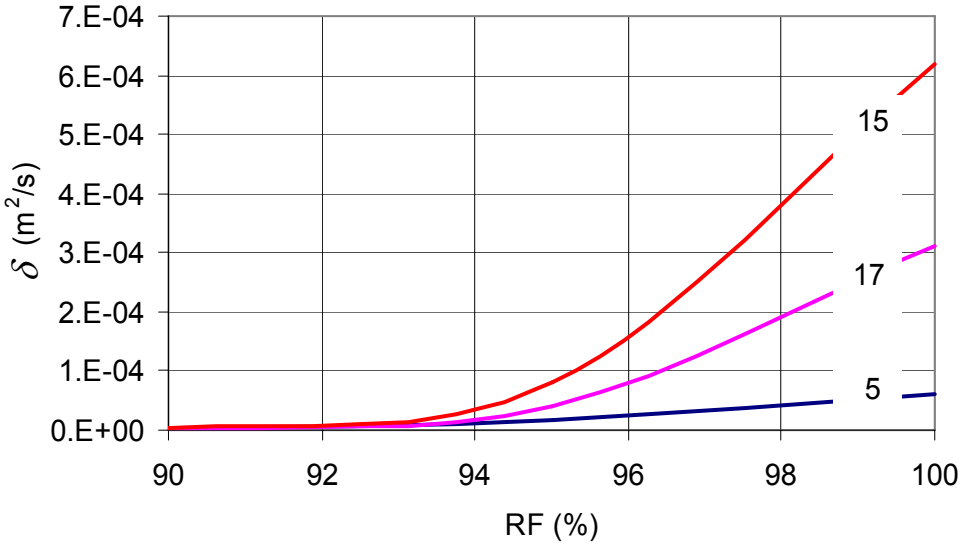
Figur 9.3.3 Fukttransportkoefficienterna för de fyra betongprovkropparna 6-9 i Tabell 9.3, med vct 0.55. Förstoring i intervallet 90 -100 % RF



Figur 9.3.4 Fukttransportkoefficienterna för de fyra betongprovkropparna 10-13 i Tabell 9.3, med vct 0.70. Förstoring i intervallet 90 -100 % RF



Figur 9.3.5 Fukttransportkoefficienterna för betongen med vct 0.55, med material 4 som utgångspunkt och koefficienterna ökade vid 95 och 100 % RF med faktorerna 2.5 & 5 (material 16) respektive 5 & 10 (material 14). Förstoring i intervallet 90 -100 % RF



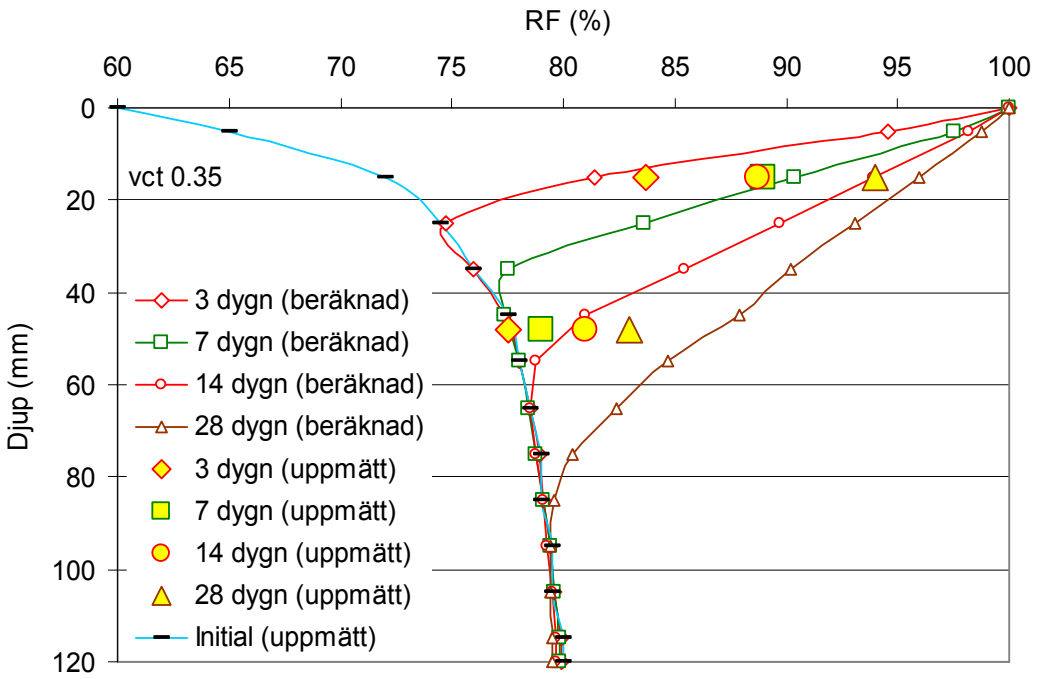
Figur 9.3.6 Fukttransportkoefficienterna för betongen med vct 0.70, med material 5 som utgångspunkt och koefficienterna ökade vid 95 och 100 % RF med faktorerna 2.5 & 5 (material 17) respektive 5 & 10 (material 15). Förstoring i intervallet 90 -100 % RF

10 Beräkningar av vatteninsugning från regn i gammal betong

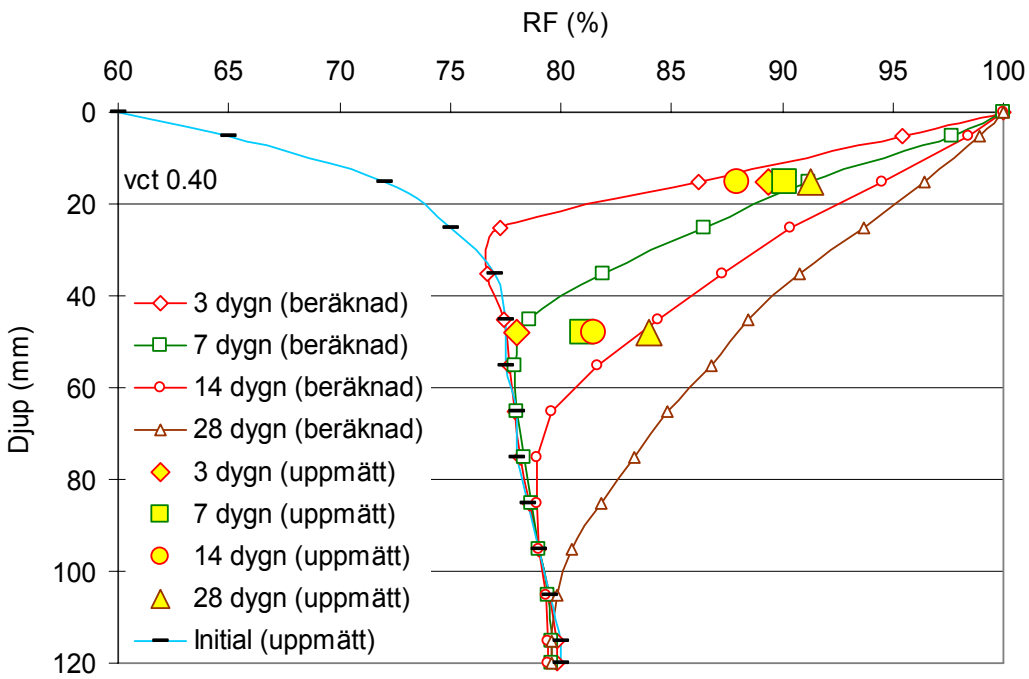
Nedan visas beräkningsresultaten från de olika beräkningsomgångarna.

10.1 Beräkningar, steg 1: Materialegenskaper enligt kap 9, konstanta hydratationsgrader

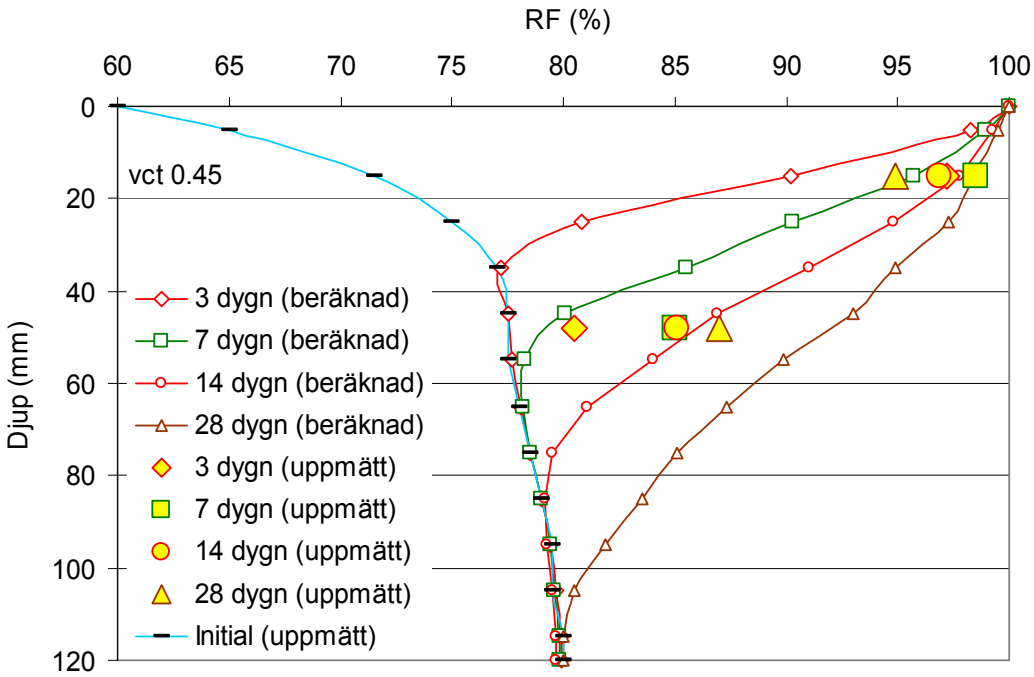
Med hydratationsgrader enligt Tabell 9.2 och sorptionskurvor och fukttransportkoefficienter enligt ekvationerna 9.2.1 och 9.3.1 för dessa hydratationsgrader erhölls beräknade fuktprofiler enligt nedanstående fem figurer, en för vardera betong 1-5.



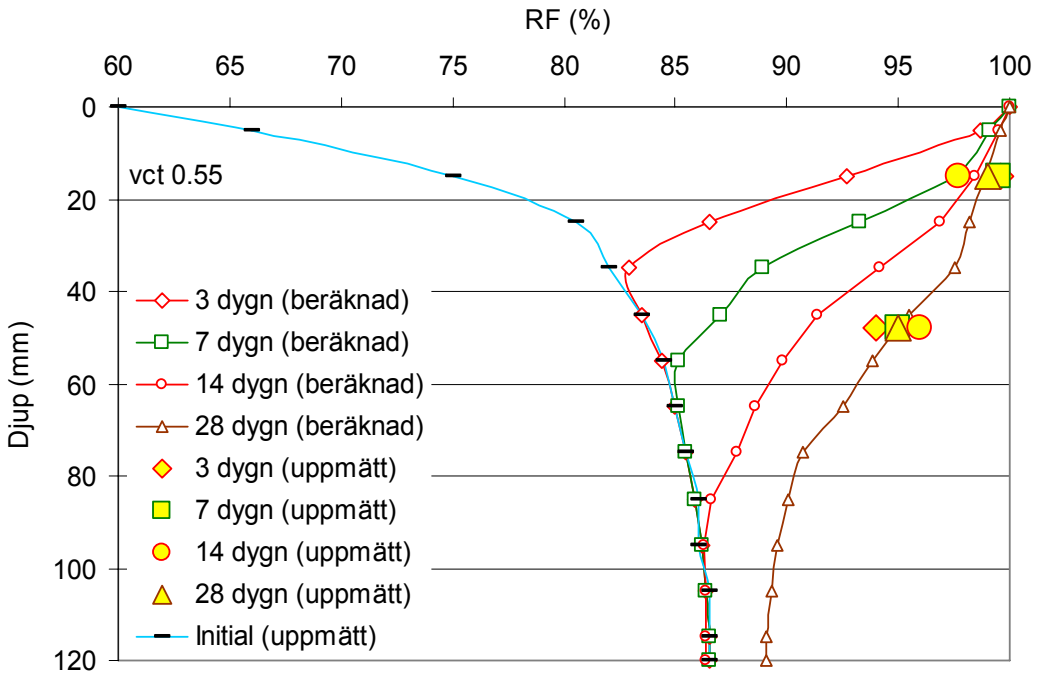
Figur 10.1.1 Beräknade respektive mätta RF-profiler efter olika varaktighet hos regn för betongen med vct 0.35, material 1, vid fem månaders ålder vid regnexponeringens start.



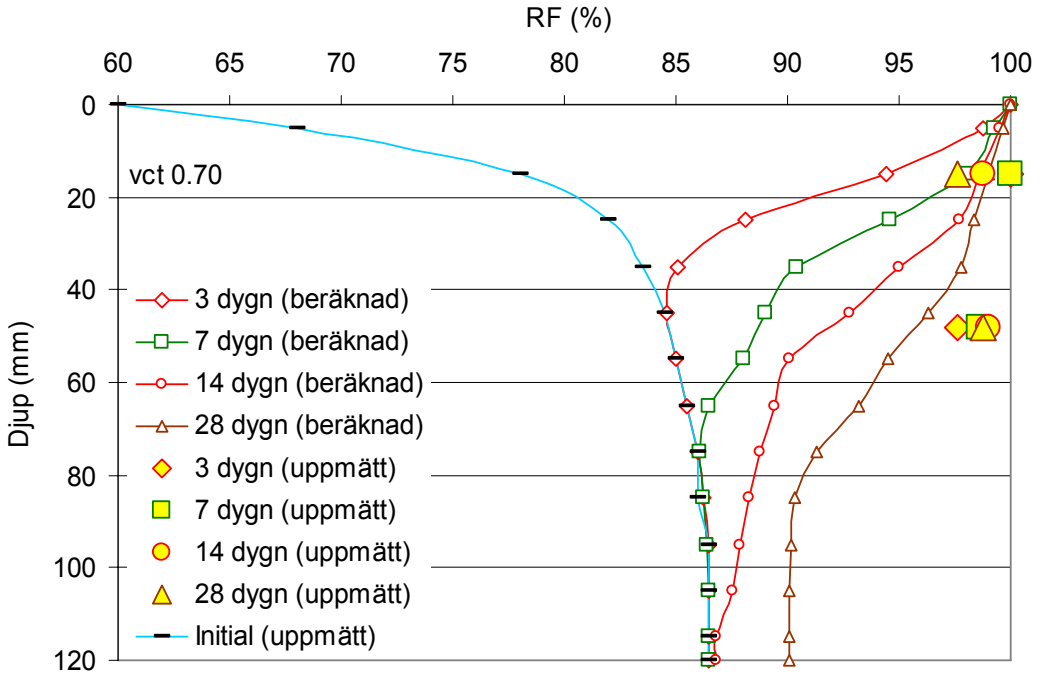
Figur 10.1.2 Beräknade respektive mätta RF-profiler efter olika varaktighet hos regn för betongen med vct 0.40, material 2, vid fem månaders ålder vid regnexponeringens start.



Figur 10.1.3 Beräknade respektive mätta RF-profiler efter olika varaktighet hos regn för betongen med vct 0.45, material 3, vid fem månaders ålder vid regnexponeringens start.



Figur 10.1.4 Beräknade respektive mätta RF-profiler efter olika varaktighet hos regn för betongen med vct 0.55, material 4, vid fem månaders ålder vid regnexponeringens start.



Figur 10.1.5 Beräknade respektive mätta RF-profiler efter olika varaktighet hos regn för betongen med vct 0.70, material 5, vid fem månaders ålder vid regnexponeringens start.

Dessa beräkningar av vatteninsugning stämmer alldeles utmärkt med mätta profiler för betongerna 1-3, med vct 0.35-0.45. Skillnaden mellan beräknade och mätta värden är högst 5 % RF, vilket måste anses vara mycket bra.

För vct 0.55 och 0.70 underskattas emellertid vatteninsugningen. Här har nya beräkningar gjorts med nya förutsättningar.

10.2 Beräkningar, steg 2: Materialegenskaper enligt kap 9, varierande hydratationsgrader

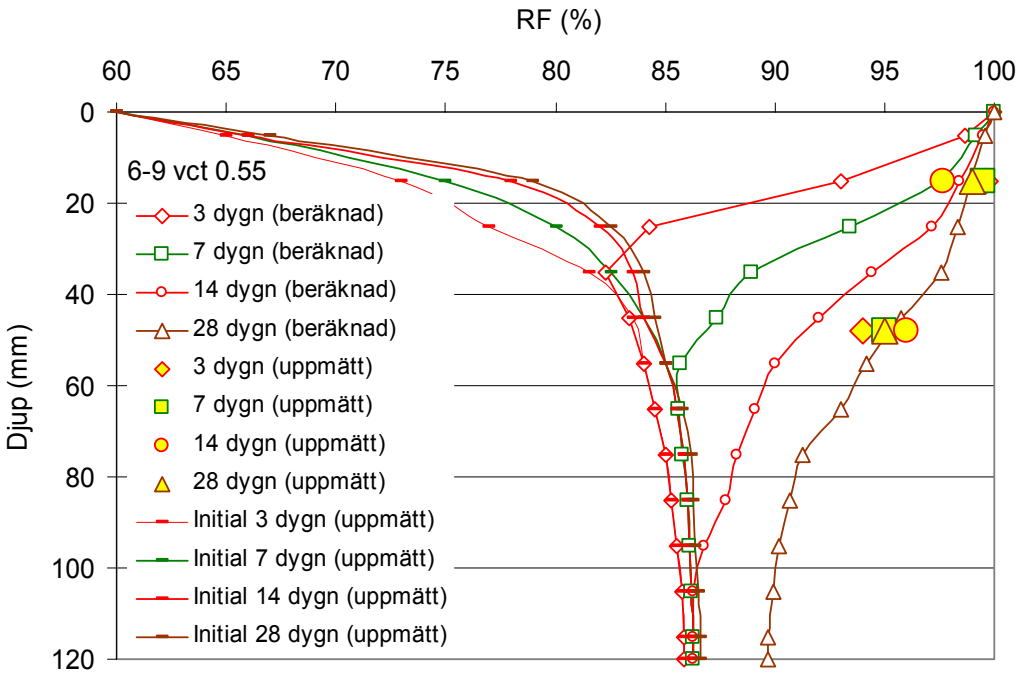
För de båda betongerna med höga vct, 0.55 och 0.70, stämde inte beräkningarna alls i steg 1. Avvikelserna var speciellt stora för de betonger som utsattes för regn med kort varaktighet. Eftersom dessa provkroppar också utsattes för regn av kort varaktighet vid regnbelastning under den första veckan, har de uppenbarligen andra egenskaper än de som regnbelastades under längre tid. Insugen vattenmängd var ju högst olika för samma varaktighet, se figur 5.3.7 vid tre dygns regn.

För att simulera inverkan av dessa tidiga regnbelastningar, som är det som skiljer provkropparna åt, har individuella hydratationsgrader valts för respektive provkropp. Detta framgår av Tabell 9.3. Materialen kallas 6-9 för betong med vct 0.55 och 10-13 för betong med vct 0.70. Materialegenskaperna med dessa individuella materialegenskaper har sedan beräknats med ekvationerna 9.2.1 och 9.3.1 på samma sätt som ovan. En jämförelse mellan fukttransportkoefficienterna för dessa olika betonger visades i figur 9.3.3 och 9.3.4.

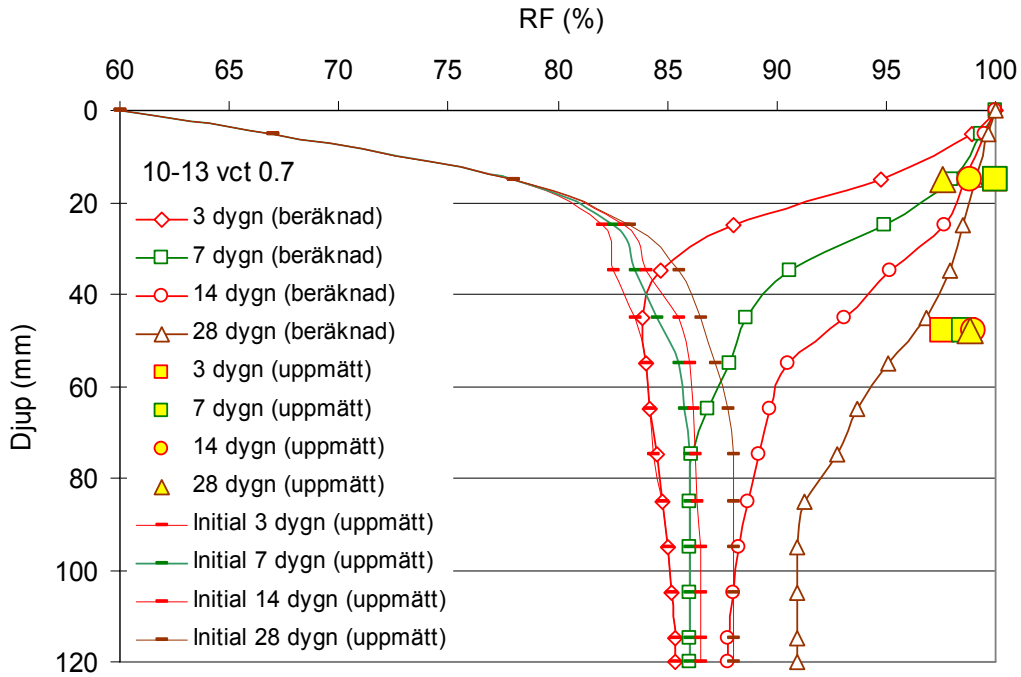
Dessutom har olika initiella RF-profiler använts, baserat på de uppmätta profilerna, som skiljer sig något åt. Betongerna med den korta regnvaraktigheten under första veckan har också lägre RF vid fem månaders ålder.

Beräkningsresultaten för dessa åtta olika betonger har sammanställts i figur 10.2.1 och 10.2.2.

Det framgår av jämförelsen mellan beräknade och uppmätta RF-profiler att denna nyansering av startfuktprofilerna och hydratationsgraderna inte alls kan förklara avvikelserna. Denna skillnad finns naturligtvis, men det fordras mycket större fukttransportkoefficienter för att få bättre överensstämmelse. Detta prövas i nästa avsnitt.



Figur 10.2.1 Beräknade respektive mätta RF-profiler efter olika varaktighet hos regn för betongerna med vct 0.55, material 6-9 med olika α och initiella RF-profiler, vid fem månaders ålder vid regnexponeringens start.



Figur 10.2.2 Beräknade respektive mätta RF-profiler efter olika varaktighet hos regn för betongerna med vct 0.70, material 10-13 med olika α och initiella RF-profiler, vid fem månaders ålder vid regnexponeringens start.

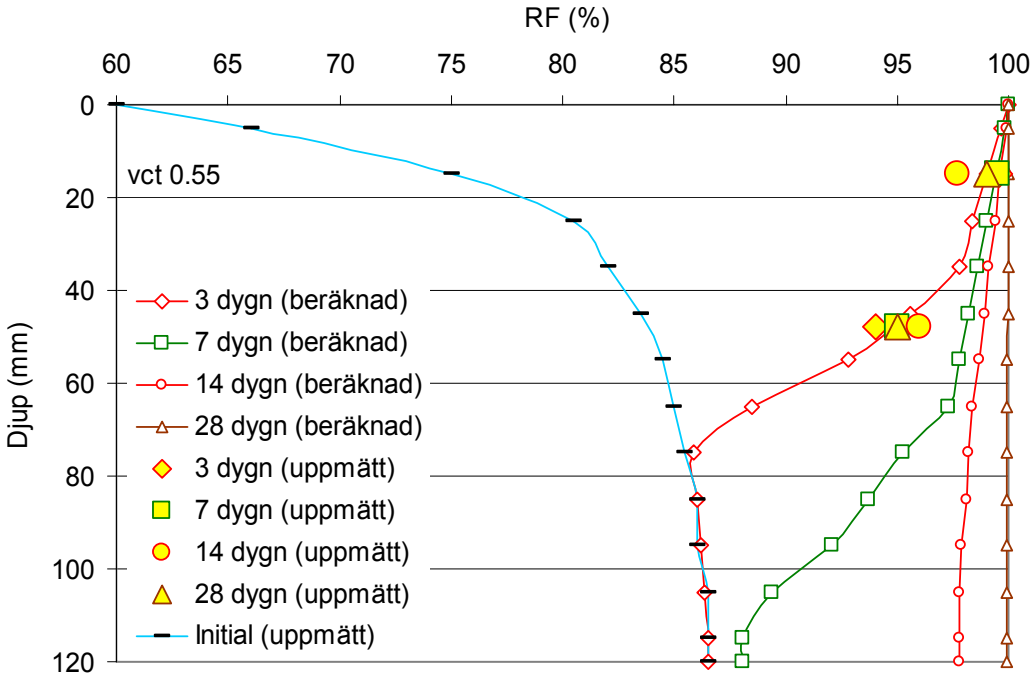
10.3 Beräkningar, steg 3: Större fukttransportkoefficienter än enligt kap 9, konstanta hydratationsgrader

För att få bättre överensstämmelse mellan beräknade och uppmätta fuktprofiler efter vatteninsugning i betongerna med de högsta vattencementtalen har fukttransportkoefficienterna ökats vid höga RF. Två nivåer har prövats, vilket redovisas i följande två avsnitt.

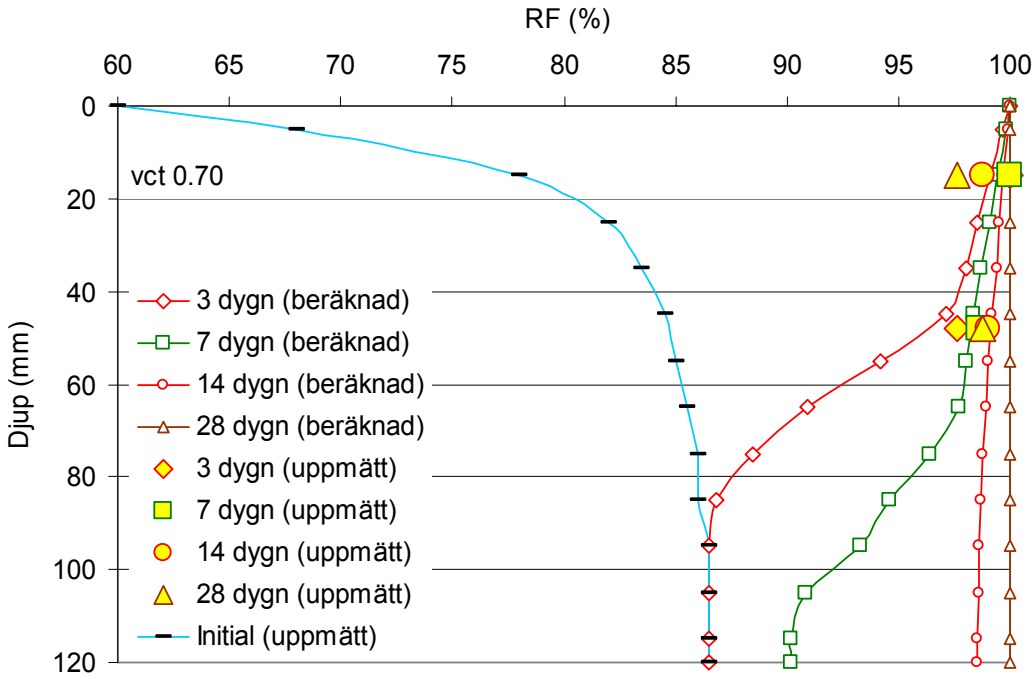
10.3.1 Fukttransportkoefficienterna ökade med en faktor 5-10 vid RF = 95-100 %

Fukttransportkoefficienterna enligt ekvation 9.3.1 ökades först med en faktor 10 vid 100 % RF och en faktor 5 vid 95 % RF. Materialen med dessa materialegenskaper kallas material 14 och 15 för vct 0.55 respektive 0.70. En jämförelse mellan fukttransportkoefficienterna i de båda fallen ges i figur 9.3.5 och 9.3.6, där material 4 och 5 har de materialegenskaper som användes i avsnitt 10.1.

Beräkningsresultaten redovisas i figur 10.3.1 och 10.3.2 för de båda vattencementtalen.



Figur 10.3.1 Beräknade respektive mätta RF-profiler efter olika varaktighet hos regn för betongen med vct 0.55, med samma α och initiella RF-profiler men 5-10 gånger större fukttransportkoefficienter vid höga RF (material 14), vid fem månaders ålder vid regnexponeringens start.



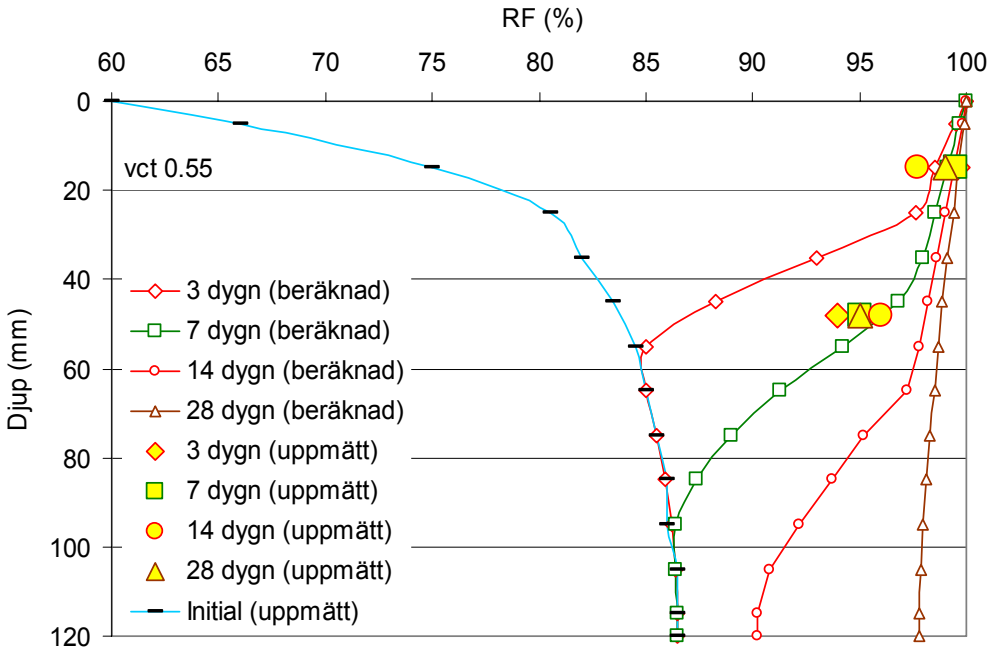
Figur 10.3.2 Beräknade respektive mätta RF-profiler efter olika varaktighet hos regn för betongen med vct 0.70, med samma α och initiella RF-profiler men 5-10 gånger större fukttransportkoefficienter vid höga RF (material 15), vid fem månaders ålder vid regnexponeringens start.

Som framgår av figurerna stämmer nu beräknade och uppmätta RF-profiler väl överens för vct 0.70. Avvikelserna är bara några få % RF, se figur 10.3.2. För vct 0.55 överskattas emellertid vatteninsugningen kraftigt. Så stor kan alltså inte fukttransportkoefficienten vara för denna betong. Något mindre värden prövas därför i nästa avsnitt

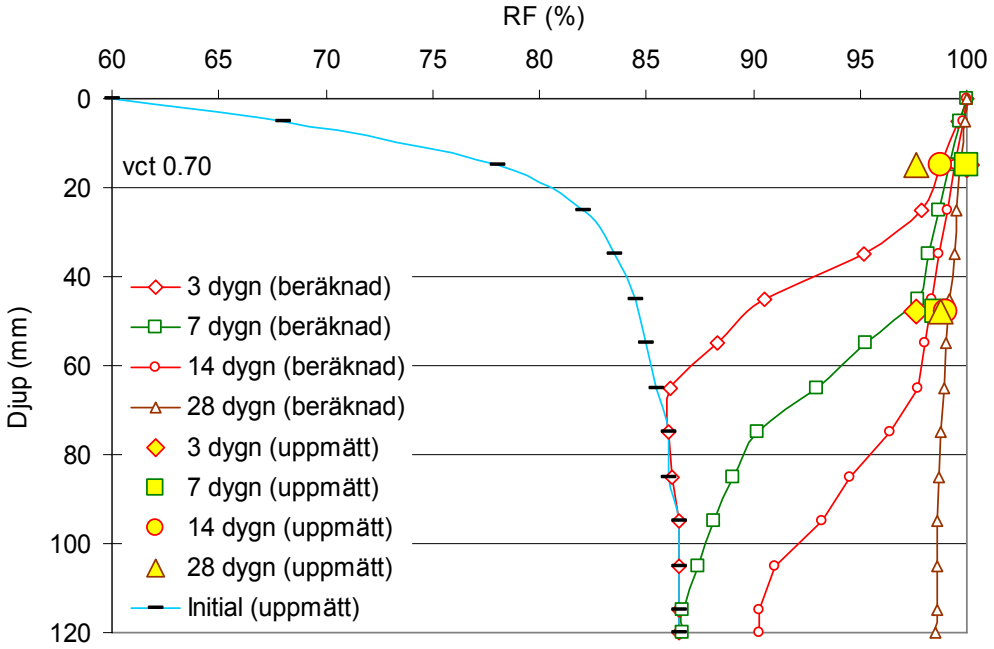
10.3.2 Fukttransportkoefficienterna ökade med en faktor 2.5-5 vid RF = 95-100 %

Fukttransportkoefficienterna enligt ekvation 9.3.1 ökades nu med bara en faktor 5 vid 100 % RF och en faktor 2.5 vid 95 % RF. Materialen med dessa materialegenskaper kallas material 16 och 17 för vct 0.55 respektive 0.70. En jämförelse mellan fukttransportkoefficienterna i de olika fallen ges i figur 9.3.5 och 9.3.6, där material 4 och 5 har de materialegenskaper som användes i avsnitt 10.1.

Beräkningsresultaten redovisas i figur 10.3.3 och 10.3.4 för de båda vattencementtalen. Överensstämmelsen är nu mycket bättre för vct 0.55.



Figur 10.3.3 Beräknade respektive mätta RF-profiler efter olika varaktighet hos regn för betongen med vct 0.55, med samma α och initiella RF-profiler men 2.5-5 gånger större fukttransportkoefficienter vid höga RF (material 16), vid fem månaders ålder vid regnexponeringens start.



Figur 10.3.4 Beräknade respektive mätta RF-profiler efter olika varaktighet hos regn för betongen med vct 0.70, med samma α och initiella RF-profiler men 2.5-5 gånger större fukttransportkoefficienter vid höga RF (material 17), vid fem månaders ålder vid regnexponeringens start.

10.4 Slutsatser av beräkning av vatteninsugning i fem månader gammal betong

Jämförelserna mellan beräknade och uppmätta RF-profiler efter vatteninsugning under 3-28 dygns regn i fem månader gammal betong som torkat hela tiden efter regnexponering första veckan, visade följande.

a. Vatteninsugning beskriven som ”fukttransport”, med sorptionskurvor och fukttransportkoefficienter beräknade från betongsammansättning och hydratationsgrad enligt kända samband, stämmer väldigt bra för betongerna med vct 0.35, 0.40 och 0.45.

b. Vatteninsugning beskriven som ”fukttransport” på detta sätt underskattas vatteninsugningen kraftigt för betongerna med vct 0.55 och 0.70. För dessa betonger krävs fukttransportkoefficienter som är mycket större vid höga RF, 2.5-5 gånger så stora vid RF = 95-100 % för vct 0.55 och 5-10 gånger så stora vid RF = 95-100 % för vct 0.70.

c. Med dessa korrigeringar av fukttransportkoefficienterna vid höga RF för vct över 0.5 duger den använda vatteninsugningsmodellen bra. En nyckelparameter är naturligtvis den gjorda nyanseringen av fuktbindningsegenskaperna så att sambandet mellan fukthalt och RF under vatteninsugningen beskrivs med en övergångskurva, en ”scanningkurva”.

d. Den relativt stora skillnaden i materialegenskaper som uppkom av att regnbelastningen under första veckan varierade mellan olika provkroppar kunde inte reproduceras fullt ut.

e. Det är dock alldeles tydligt att materialegenskaperna måste beskrivas med hänsyn tagen till betongens strukturutveckling på grund av härdningsbetingelserna under hela perioden före vatteninsugningen, ända från gjuttillfället. Detta innebär att hydratationsgraden måste kvantifieras för olika djup i betongen och att varje period med vatten på betongytan kommer att påverka framtida vatteninsugning från senare regn.

f. För att en vatteninsugningsmodell skall vara meningsfull och ge tillförlitliga prognoser måste ordentliga observationer göras för att dokumentera ”våttider” hos betongytan.

11 Beräkningar av vatteninsugning från avjämningsmassa i nygjuten betong

För att beräkna vatteninsugningen från en avjämningsmassa har ett annat datorprogram ”KFX03” använts, se Bilaga 1. Programmet utnyttjar samma typ av materialegenskaper som använts i kapitel 10, men skriver dem inte lika detaljerat.

För varje beräkning redovisas de nya förutsättningar som gäller, i form av materialegenskaper för betong respektive avjämningsmassa och eventuellt olika uttorkningsklimat eller tjocklek hos avjämningsmassan.

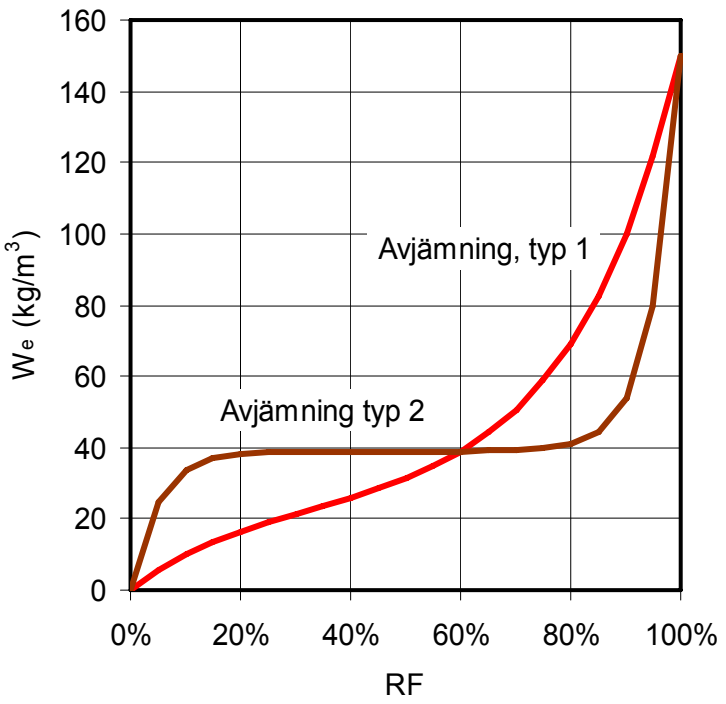
Beräkningar har gjorts för betongen med vct 0.70 som avjämnades efter 56 dygn med 10 mm avjämningsmassa, eftersom det var i huvudsak för detta fall som det blev någon större vatteninsugning efter avjämning.

11.1 Materialegenskaper, avjämningsmassa

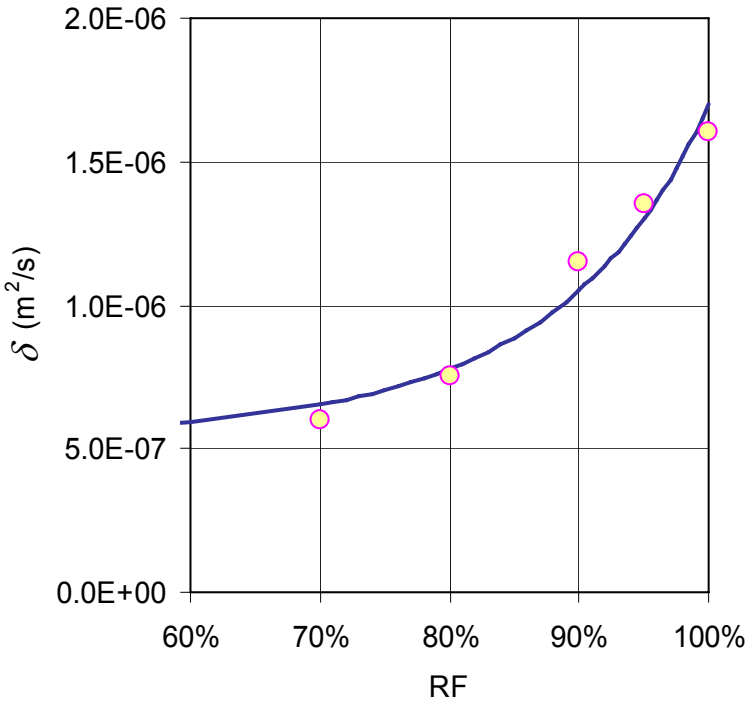
De första beräkningarna har gjorts med en ”avjämningsmassa, typ 1”, med sorptionskurva enligt figur 11.1.1, med en relativt ”uträtad” kurvform enligt Hedenblad (1996)[17] och absolutvärden enligt Anderberg (2004)[18]. Övriga beräkningar har gjorts för en ”avjämning typ 2”, med en sorptionskurva enligt figur 11.1.1 med en betydligt större fuktkapacitet vid höga RF, vilket stämmer bättre med data enligt Anderberg (2004).

För båda avjämningsmassorna har initiella fukthalten satts till 150 kg/m^3, dvs. 100 % RF.

Fukttransportegenskaperna för avjämningsmassorna har valts enligt Hedenblad (1997), se figur 11.1.2.



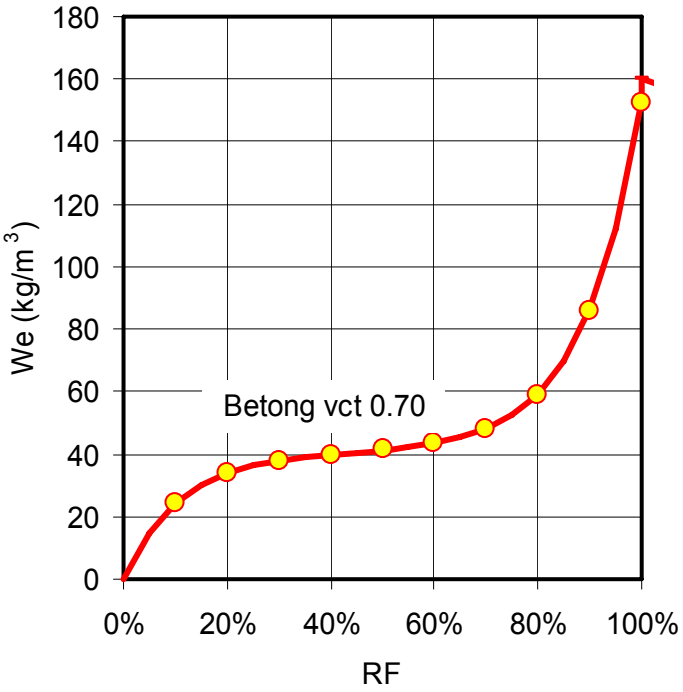
Figur 11.1.1 Desorptionsisotermer för de två typerna av avjämningsmassor som använts i beräkningarna.



Figur 11.1.2 Fukttransportkoefficienter för avjämningsmassor som använts i beräkningarna. Punkter enligt Hedenblad (1997)

11.2 Materialegenskaper för betong med vct 0.70

Materialegenskaperna för den aktuella betongen har tagits från ”material 10” i kapitel 9, som har en hydratationsgrad av 0.6, vilket är rimligt för betong med vct 0.70 efter 56 dygns uttorkning. Desorptionsisotermen visas i figur 11.2.1.

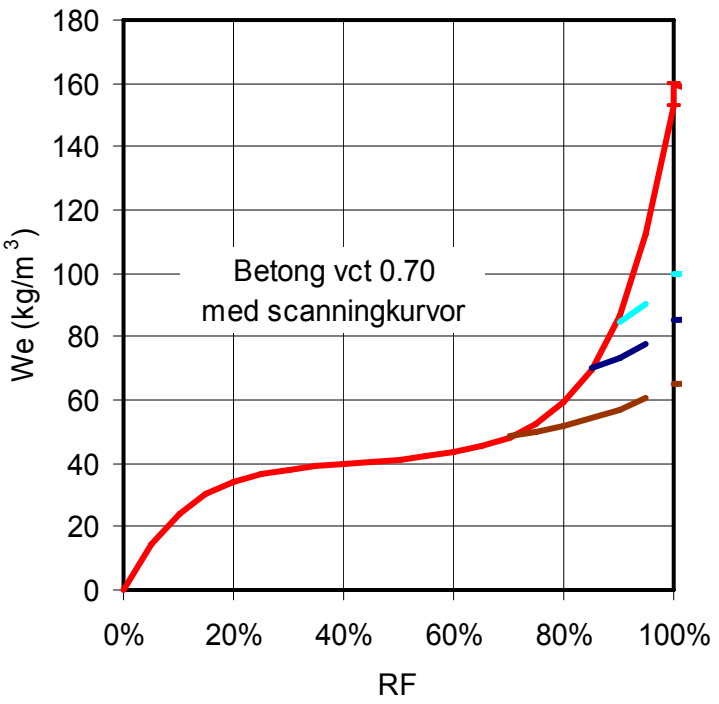


Figur 11.2.1 Desorptionsisoterm för betong med vct 0.70, 56 dygn gammal, punkterna från ”material 10” i kapitel 9.

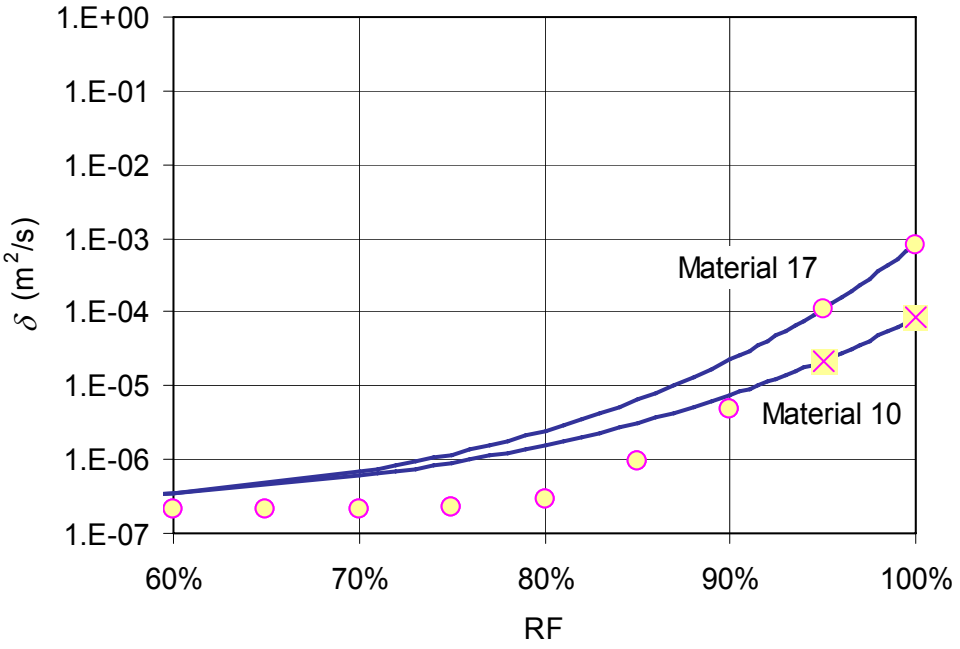
Eftersom betongen blir uppfuktad vid vatteninsugning från avjämningsmassan behövs övergångskurvor från desorptionsisotermen. De scanningkurvor som använts i en del av beräkningarna åskådliggörs i figur 11.2.2.

Fukttransportkoefficienter har valts från kapitel 9, från ”material 17” som har 5-10 gånger så stor koefficient som de som beräknades med ekvation 9.3.3, dvs. ”material 10”. Dessa båda visas i figur 11.2.3.

Den initiella fuktfördelningen i betongen då avjämningsmassan appliceras, och vatteninsugningen startar, har valts från mätningarna i avsnitt 5.3, se figur 5.3.5.



Figur 11.2.2 Desorptionsisoterm med scanningkurvor

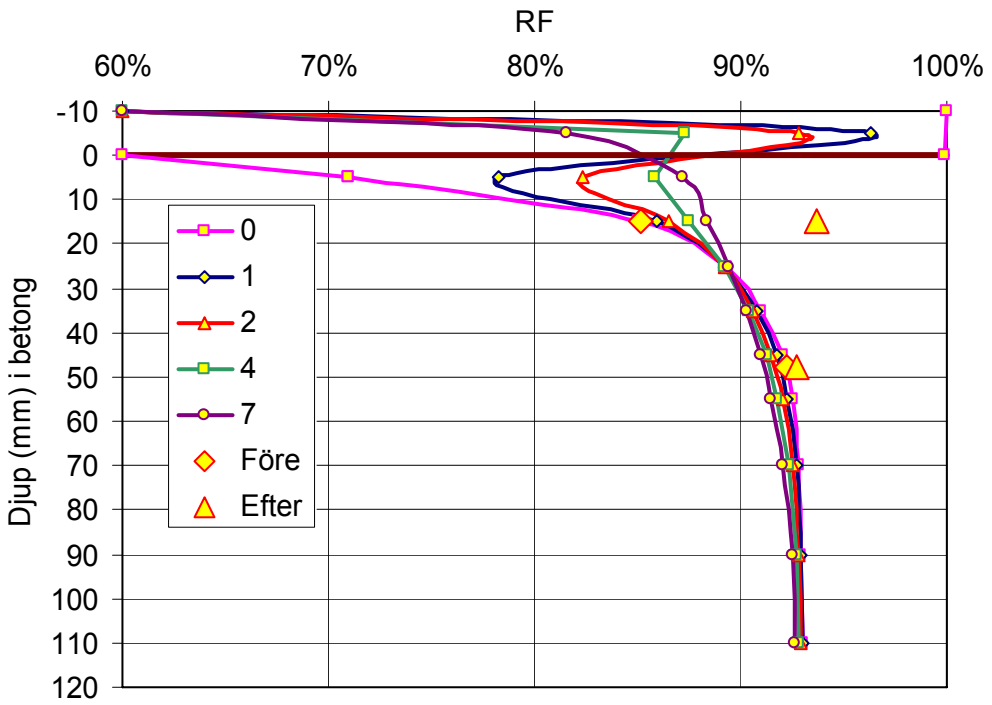


Figur 11.2.3 Fukttransportkoefficienter för betong med vct 0.70, 56 dygn gammal. Punkterna som markerar "material 17" har 5-10 gånger högre transportkoefficient vid 95-100 % RF än material 10.

11.3 Beräkning med material 17 & avjämningsmassa typ 1

Den första beräkningen har gjorts med materialegenskaper för betongen enligt ”material 15”, dvs. de som i kapitel 10 för vct 0.70 visade sig ge bäst överensstämmelse mellan beräknad och uppmätt vatteninsugning. För avjämningsmassan har materialegenskaper för ”typ 1” använts, dvs. relativt liten fuktkapacitet, även vid höga RF.

Beräkningsresultaten framgår av figur 11.3.1.



Figur 11.3.1 Beräknade RF-profiler 0-7 dygn efter avjämning med massa typ 1. Uppmätta RF före och efter 7 dygns avjämning visas som punkter.

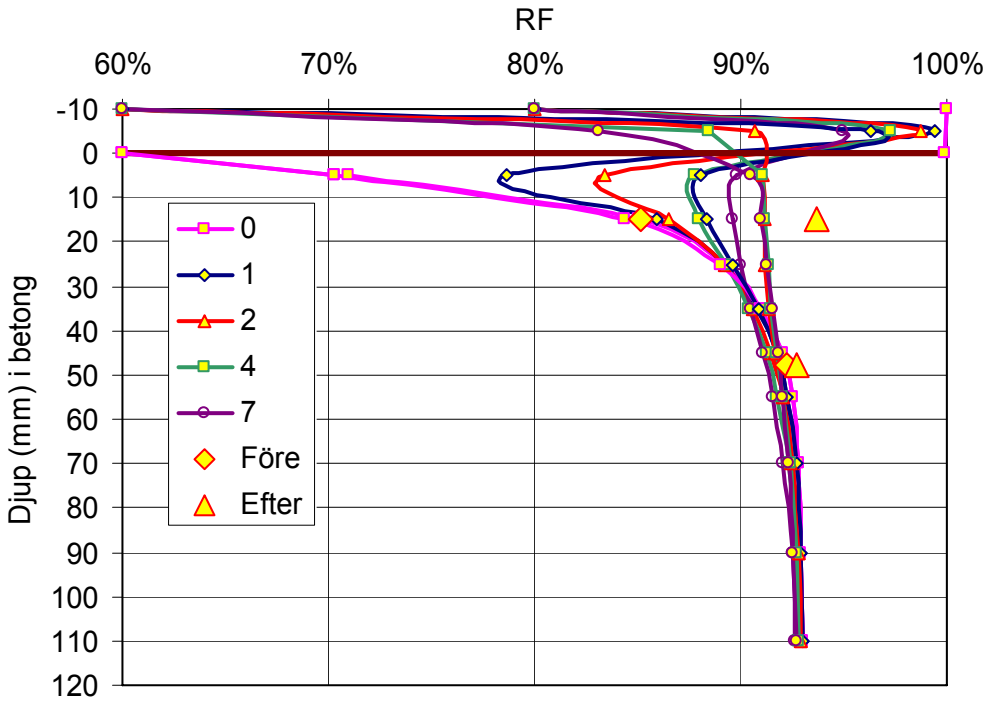
I figuren syns förutsättningar tydligt: Start-RF = 100 % i den 10 mm tjocka avjämningsmassan, torkklimat 60 % RF för betongytan före avjämning och detsamma för avjämningsmassan direkt efter avjämning.

Av resultaten framgår att betongen ”suger” åt sig en hel del fukt från avjämningsmassan men att RF inte alls stiger så högt som i mätningarna innan avjämningsmassan har hunnit torka ut. Den ”uteblivna” RF-höjningen beror säkert delvis på den antagna låga fuktkapaciteten hos avjämningsmassan. Denna får snabbt en låg RF även efter rätt blygsam uttorkning.

11.4 Beräkning med material 17 & avjämningsmassa typ 2

Den andra beräkningen har gjorts med samma materialegenskaper för betongen men med materialegenskaper för avjämningsmassan av ”typ 2” använts, dvs. en mycket större fuktkapacitet vid höga RF, jämför figur 11.1.1.

Beräkningsresultaten framgår av figur 11.4.1.



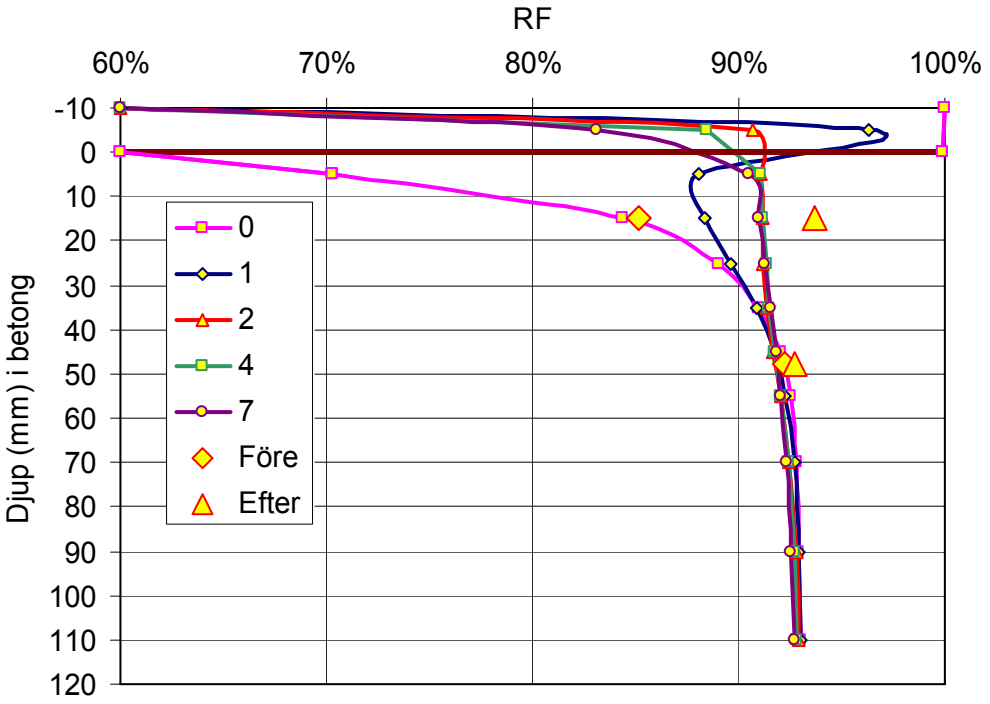
Figur 11.4.1 Beräknade RF-profiler 0-7 dygn efter avjämning med massa typ 2. Uppmätta RF före och efter 7 dygns avjämning visas som punkter.

Resultaten visar att avjämningsmassans desorptionsisoterm har stor inverkan på vatteninsugningsförloppet. Nu blir RF betydligt högre i betongen, vilket beror på att RF i avjämningsmassan inte alls sjunker lika fort. Det är dock en bit kvar till uppmätt RF på djupet 15 mm i betongen.

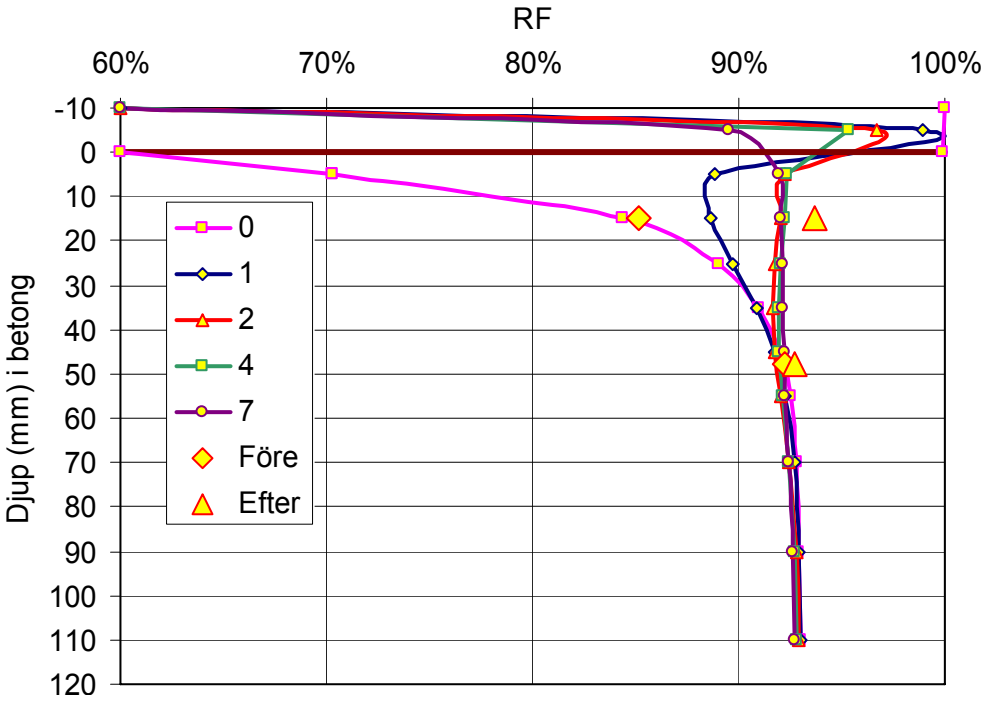
11.5 Beräkning med material 17, men scanningkurvor för betongen

Den tredje och fjärde beräkningen har gjorts med samma fukttransportkoefficienter för betongen men med scanningkurvor enligt figur 11.2.2 som sorptionskurva, olika för olika djup. Materialegenskaper för avjämningsmassan av ”typ 1” använts i den tredje beräkningen, se figur 11.5.1, dvs. en liten fuktkapacitet vid höga RF, och med egenskaper av ”typ 2” i den fjärde beräkningen, se figur 11.5.2, dvs. en större fuktkapacitet vid höga RF.

Beräkningarna visar att den låga fuktkapaciteten för betongen, genom scanningkurvornas låga lutning, ger en mycket snabbare RF-ökning än tidigare.



Figur 11.5.1 Beräknade RF-profiler 0-7 dygn efter avjämning med massa typ 1, där sorptionskurvan hos betongen representeras av scanningkurvor. Uppmätta RF visas som punkter.

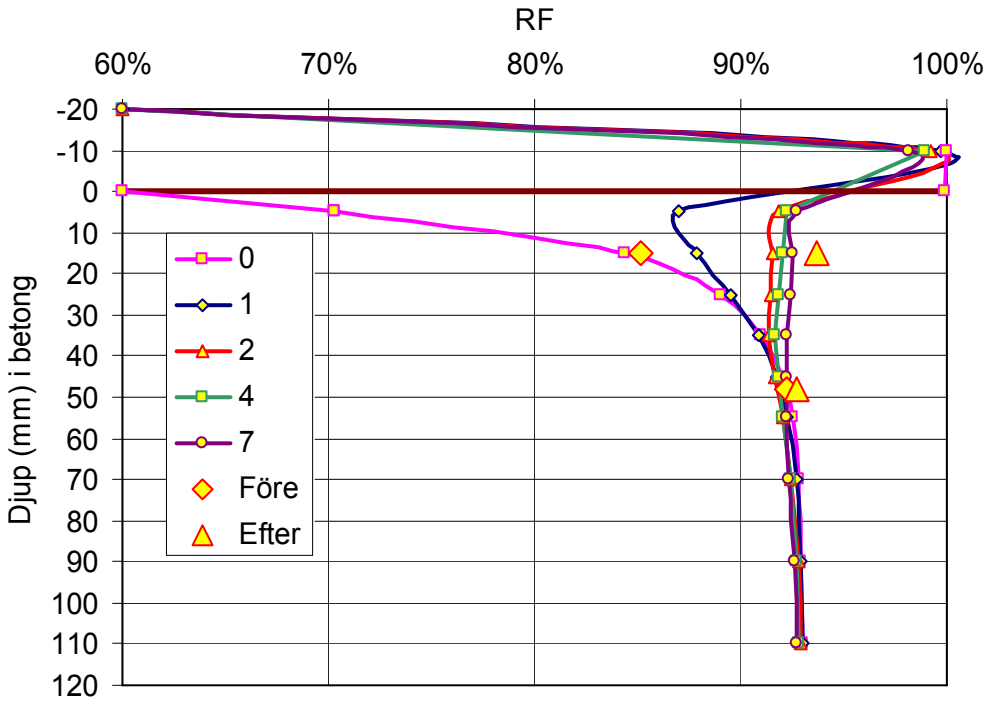


Figur 11.5.2 Beräknade RF-profiler 0-7 dygn efter avjämning med massa typ 2, där sorptionskurvan hos betongen representeras av scanningkurvor. Uppmätta RF före och efter 7 dygns avjämning visas som punkter.

11.6 Beräkning med material 17 & 10, avjämningsmassa typ 2, scanningkurvor för betongen. Större tjocklek

Den femte beräkningen har gjorts med samma materialegenskaper för betongen som i avsnitt 11.5, med sorptionskurvor enligt scanningkurvor, olika för olika djup. Materialegenskaper för avjämningsmassan av ”typ 2” har använts, dvs. en stor fuktkapacitet vid höga RF. Nu prövas effekten av en större tjocklek hos avjämningsmassan, 20 mm istället för 10 mm.

Resultaten visas i figur 11.6.1.

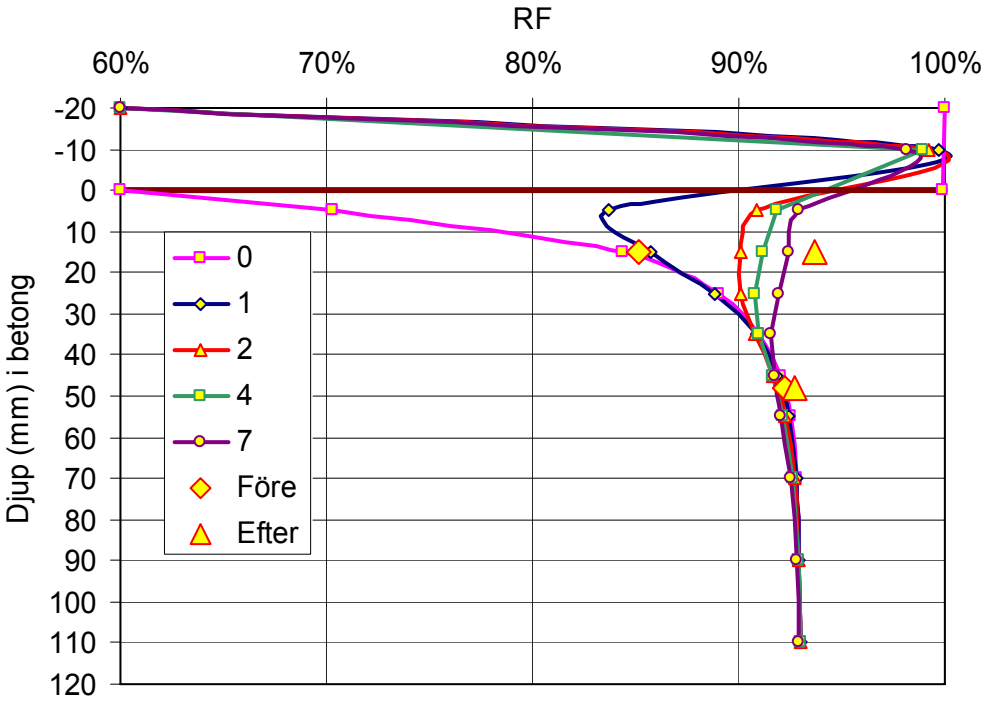


Figur 11.6.1 Beräknade RF-profiler 0-7 dygn efter avjämning med massa typ 2, nu med tjockleken 20 mm. Sorptionskurvan för betongen representeras av scanningkurvor. Uppmätta RF före och efter 7 dygns avjämning visas som punkter.

RF på djupet 15 mm i betongen är nu mycket nära uppmätt värde. Av beräknade profiler framgår at avjämningsmassan nu håller RF över 95 % i undre delen under mycket längre tid och att RF i betongen mycket snabbt stiger till över 90 % inom något dygn.

Den sjätte beräkningen har precis samma förutsättningar men fukttransportkoefficienterna för betongen har minskats till dem som användes för “material 10”, dvs. 5-10 gånger lägre vid RF = 95-100 %, se figur 11.2.3.

Resultaten framgår av figur 11.6.2.



Figur 11.6.2 Beräknade RF-profiler 0-7 dygn efter avjämning med massa typ 2, nu med tjockleken 20 mm. Scanningkurvor för betongen och lägre fukttransportkoefficient. Uppmätta RF före och efter 7 dygns avjämning visas som punkter.

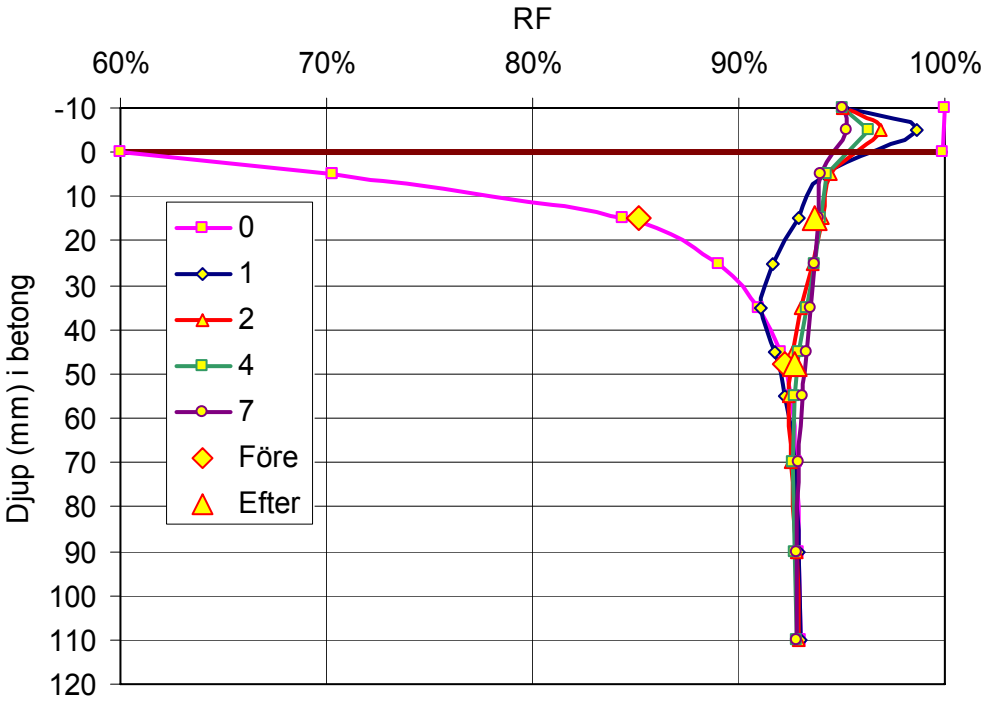
Skillnaden syns främst som ett långsammare uppfuktningsförlopp i betongens översta 30 mm.

11.7 Beräkning med material 17 & avjämningsmassa typ 2, scanningkurvor för betongen. Sämre torkklimat

I samtliga ovanstående beräkningar har RF inte ökat alls på större djup än 40 mm, tvärtemot vad som indikerades i mätningarna, även om dessa gav en mycket liten effekt. I dessa beräkningar var uttorkningsklimatet 60 % RF direkt efter avjämning, vilket naturligtvis är orimligt. En avjämningsmassa får inte torka så omedelbart med tanke på risken för plastiska krympsprickor. Avjämningen i sig har också den effekten att det blir fuktigare i lokalen. Uttorkningen de första dygnen efter avjämning, då den huvudsakliga vatteninsugningen sker, är därför inte alls så gynnsamma som 60 % RF.

I en särskild beräkning prövades effekten av torkklimatet på vatteninsugning från en avjämningsmassa. Samma materialegenskaper som tidigare användes, dvs. betong som material 17 och avjämning typ 2, men med tjockleken 10 mm hos avjämningsmassan. Flera olika torkklimat prövades med allt högre RF.

Resultaten för torkklimatet 95 % RF visas i figur 11.7.1. Dessa skall jämföras med figur 11.5.2, som har samma förutsättningar utom just när det gäller torkklimatet.



Figur 11.7.1 Beräknade RF-profiler 0-7 dygn efter avjämning med massa typ 2. Sorptionsisotermen för betongen representeras av scanningkurvor. Sämre torkklimat, 95 % RF. Uppmätta RF före och efter 7 dygns avjämning visas som punkter.

Med sämre torkklimat för avjämningsmassan blir RF-höjningen i betongen allt större. Detta beror naturligtvis på att RF i avjämningsmassan ligger kvar på högre nivåer allt längre och betongen får längre tid på sig att ”suga åt sig” vatten från avjämningsmassan.

11.8 Slutsatser av beräkningarna för vatteninsugning från avjämningsmassa

Av beräkningarna av vatteninsugning från avjämningsmassor kan följande slutsatser dras.

a) En avjämningsmassa innebär, precis som mätningarna visade, en mycket mer begränsad vattentillförsel till betongen än regn. Vattnet i avjämningsmassan är bundet i ett porsystem vilket innebär att RF snabbt sjunker under 100 % i underkanten av avjämningsmassan då betongen suger åt sig en del vatten. Den begränsade tjockleken innebär också en begränsning i hur mycket vatten som är tillgängligt.

b) Avjämningsmassans fuktegenskaper har stor betydelse för hur mycket vatten som betongen hinner ta åt sig, främst dess fuktkapacitet, dvs. lutningen hos sorptionskurvan vid höga RF.

c) RF-ökningen i betongens ytskikt måste simuleras med användning av scanningkurvor. Enbart med desorptionsisotermen för betongen hamnar RF långt från uppmätta värden.

d) Betongens fukttransportförmåga har främst inverkan på hur snabbt en RF-höjning sker, inte till vilken nivå RF når. För det är det mer fråga om hur länge avjämningsmassans RF är hög, innan den hinner torka.

e) Beräkningarna gav ingen effekt av insugning från 10, eller 20 mm, avjämningsmassa på djup större än 60 mm, trots att den använda betongen har stor insugningsförmåga. Detta stämmer väl med den uppmätta lilla RF-ökningen på djupet 48 mm.

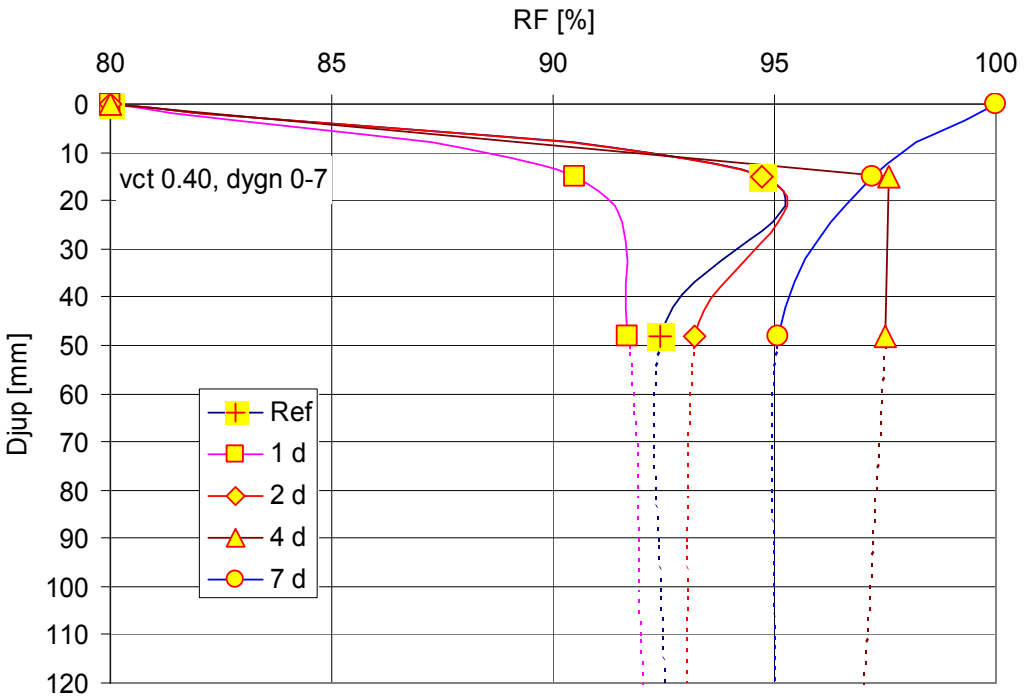
f) Bara om ett sämre torkklimat simulerades kunde den uppmätta RF-höjningen på djupet 15 mm i betongen nås.

12 Beräkningar av vatteninsugning från regn i nygjuten betong

I laboratorieundersökningen som redovisades i kapitel 3 utsattes olika betonger för regn redan tre timmar efter gjutning. Betongerna med vct över 0.5 fick egentligen aldrig RF särskilt mycket under 100 %, vilket inte var förväntat ens utan regn. De tre betongerna med vct på 0.35-0.45 fick alla en tydlig självuttorkning trots att de utsattes för regn mycket tidigt. Effekten av regnets varaktighet var också tydlig i dessa betonger. En av dessa, betongen med vct 0.40, har valts ut för närmare analys av vatteninsugningsförloppet och jämförelser med beräknad vatteninsugning.

12.1 Mätvärden, betong med vct 0.40, regn från 3 timmar

Uppmätta RF-profiler efter sju dygn för betongen med vct 0.40 redovisas i figuren nedan.



Figur 12.1.1 Uppmätta RF efter olika varaktigheter hos regn med start 3 timmar efter gjutning. RF-profiler efter sju dygn. Betongen med vct 0.40 vid + 5°C och 80 % RF

Mätvärdena är ju inte helt logiska. Referensbetongen utan regn är inte den torraste, efter sju dygn! Betongen som utsatts för regn under längst tid är inte den fuktigaste. Detta säger bara att denna typ av mätningar är svåra, alldeles särskilt vid så låg temperatur som +5°C. Vid jämförelser med beräkningar nedan måste därför detta beaktas.

Beräkningarna sträcker sig sju dygn fram i tiden, då de första mätvärdena finns för jämförelse.

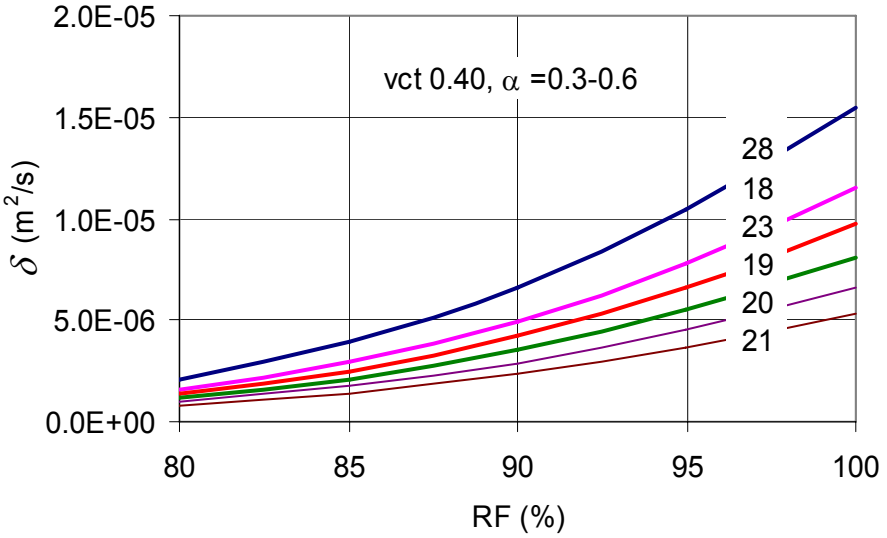
12.2 Materialegenskaper

Materialegenskaperna har beräknats ur betongsammansättningen och hydratationsgraden, enligt ovan. För de olika beräkningarna har hydratationsgrader mellan 0.3 och 0.6 använts. Betongerna med dessa olika hydratationsgrader har getts nummer enligt tabell 12.1.

TABELL 12.1 Material som använts i beräkningarna, med respektive hydratationgrad

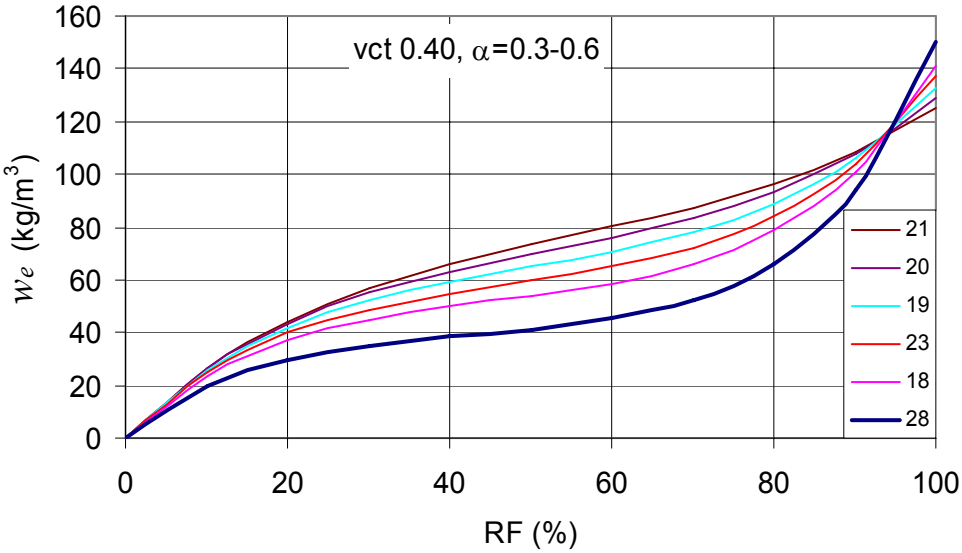
Material	α
28	0.3
18	0.4
23	0.45
19	0.5
20	0.55
21	0.6

Fukttransportkoefficienterna för dessa olika betonger har sammanställts i figur 12.2.1.

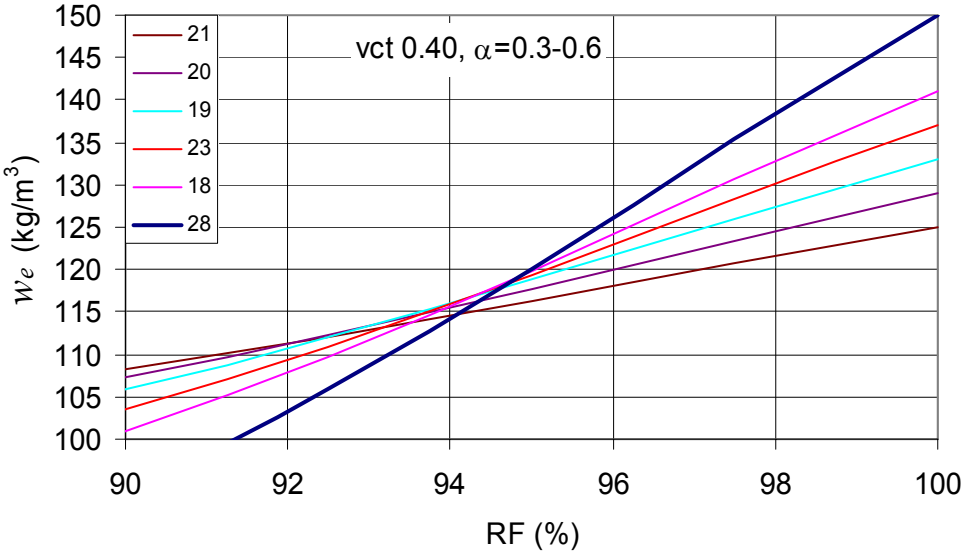


Figur 12.2.1 Fukttransportkoefficienter för de olika betongerna i beräkningarna; med allt större hydratationsgrad uppifrån och ner.

Desorptionskurvorna för dessa betonger visas i figur 12.2.2 och 12.2.3, dels som hela kurvan och dels som en förstoring i området 90 -100 % RF. Fuktkapaciteten är mindre ju större hydratationsgraden är, i detta område.



Figur 12.2.2 Desorptionsisotermer för de olika betongerna i beräkningarna; med allt större hydratationsgrad nerifrån och upp (under 94 % RF).



Figur 12.2.3 Desorptionsisotermer för de olika betongerna i beräkningarna; med allt större hydratationsgrad nerifrån och upp (under 94 % RF). Detalj av figur 12.2.2.

12.3 Beräkning 1, α = 0.40 efter 1 dygn, regn 7 dygn

Den första beräkningen har gjorts för fallet med regn under sju dygn, med start tre timmar efter gjutning.

12.3.1 Hydratationsgradsutveckling

För den aktuella betongen har hydratationsutvecklingen och kemisk bindning av vatten uppskattats under den första veckan.

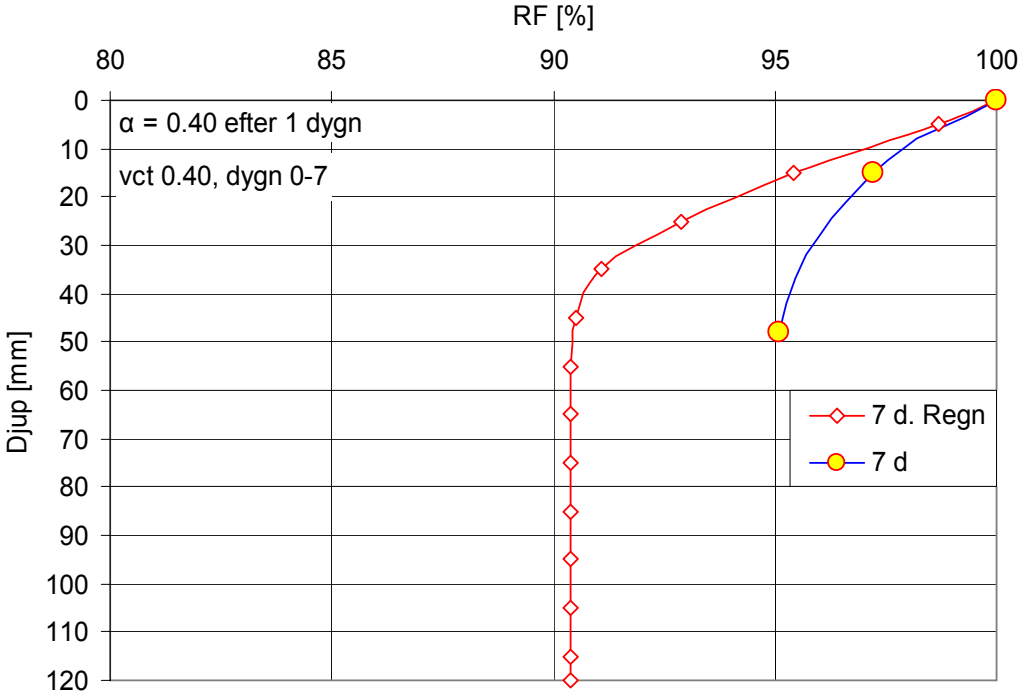
TABELL 12.2 Hydratationsutveckling och kemiskt bundet vatten första veckan

Material	Dygn	α	Δα	w_n (kg/m3)	Δw_n
18	0 - 1	0.4	0.4	43.5	43.5
19	1 - 2	0.5	0.1	54.4	10.9
20	2 - 4	0.55	0.05	59.8	5.4
21	4 -7	0.6	0.05	65.3	5.4

Beräkningen har gjorts stegvis så att betongen först getts en självuttorkning av att det kemiskt bundna vattnet minskat fukthalten. Därefter har fukttransport från den våta ytan beräknats. I nästa tidsteg har sedan den beräknade fukthalten på varje djup minskats med ökningen av mängden kemiskt bundet vatten i nästa tidsteg o s v.

12.3.2 Beräkningsresultat

Beräkningsresultatet visas i figur 12.3.1.



Figur 12.3.1 Beräknade och uppmätta fuktprofiler vid sju dygns ålder efter sju dygns regn, vct 0.40 med ökande hydratationsgrad med tiden, med start vid 0.40. Mätvärden som större punkter

Överensstämmelsen är inte helt perfekt. En lägre hydratationsgrad prövas nedan.

12.4 Beräkning 2, α = 0.40 efter 1 dygn, regn 1 dygn

Den andra beräkningen har gjorts för fallet med regn under ett dygn, med start tre timmar efter gjutning, följt av uttorkning under sex dygn i +5°C och 80 % RF.

12.4.1 Hydratationsgradsutveckling

För den aktuella betongen har hydratationsutvecklingen och kemisk bindning av vatten uppskattats under den första veckan, se tabell 12.3.

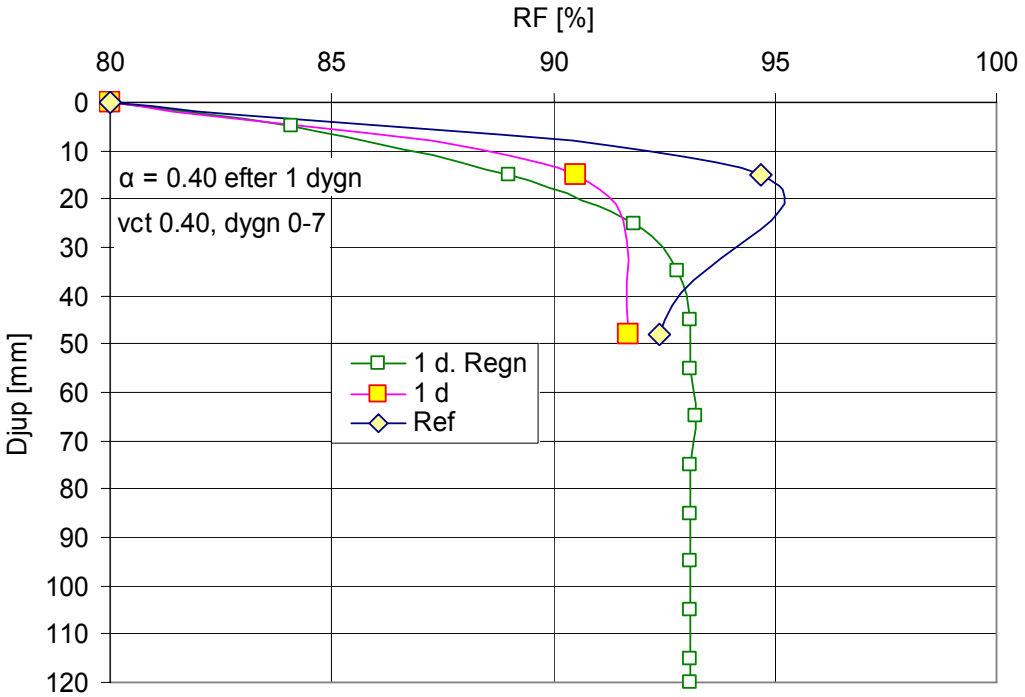
TABELL 12.3 Hydratationsutveckling och kemiskt bundet vatten första veckan

Material	Dygn	α	Δα	w_n (kg/m3)	Δw_n
18	0 - 1	0.4	0.4	43.5	43.5
23	1 - 2	0.45	0.05	48.9	5.4
19	2 - 4	0.5	0.05	54.4	5.5
20	4 -7	0.55	0.05	59.8	5.4

Beräkningen har gjorts stegvis på samma sätt som ovan. Efter det första dygnets vatteninsugning, beräknas fukttransporten på varje djup, med omfördelning och uttorkning uppåt.

12.4.2 Beräkningsresultat

Beräkningsresultatet visas i figur 12.4.1. Som jämförelse visas mätvärdena dels från provkroppen med ett dygns regn och dels referensprovkroppen utan regn.



Figur 12.4.1 Beräknade och uppmätta fuktprofiler vid sju dygns ålder efter ett dygns regn och sex dygns uttorkning, vct 0.40 med ökande hydratationsgrad med tiden, med start vid 0.40. Mätvärden som större punkter

Självuttorkningen har uppenbarligen uppskattats relativt precis. Vid uttorkning så tidigt som efter ett dygn, vid + 5°C, avstannar dock hydratationen i det närmaste. Detta har prövats i nästa beräkning.

12.5 Beräkning 3, α = 0.40 konstant, regn 1 dygn

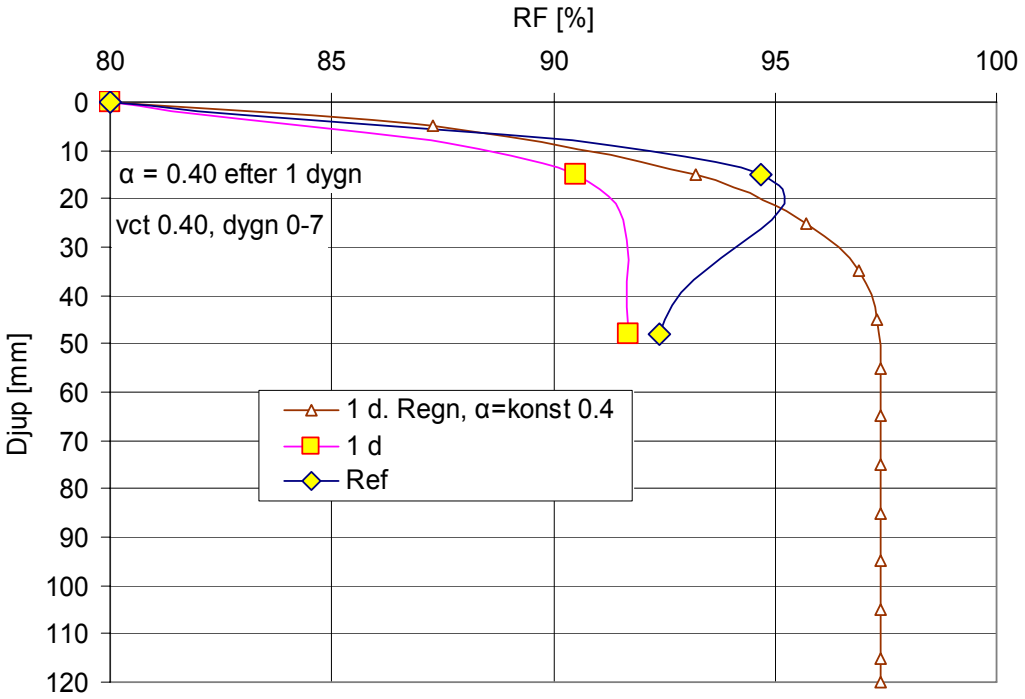
Den andra beräkningen har gjorts för fallet med regn under ett dygn, med start tre timmar efter gjutning, följt av uttorkning under sex dygn i +5°C och 80 % RF..

12.5.1 Hydratationsgradsutveckling

För den aktuella betongen har hydratationsutvecklingen och kemisk bindning av vatten uppskattats under den första veckan genom att utgå från att hydratationsgraden nått 0.4 under första dygnet och därefter inte ökat mera.

12.5.2 Beräkningsresultat

Beräkningsresultatet visas i figur 12.5.1. Jämförelse görs med mätvärdena för ett dygns regn och referensen utan regn.



Figur 12.5.1 Beräknade och uppmätta fuktprofiler vid sju dygns ålder efter ett dygns regn och sex dygns uttorkning, vct 0.40 med konstant hydratationsgrad 0.40. Mätvärden som större punkter

Med denna hydratationsgrad blir självuttorkningen betydligt mindre. En ännu lägre hydratationsgrad prövas nedan.

12.6 Beräkning 4, α = 0.30 konstant, regn 7 dygn

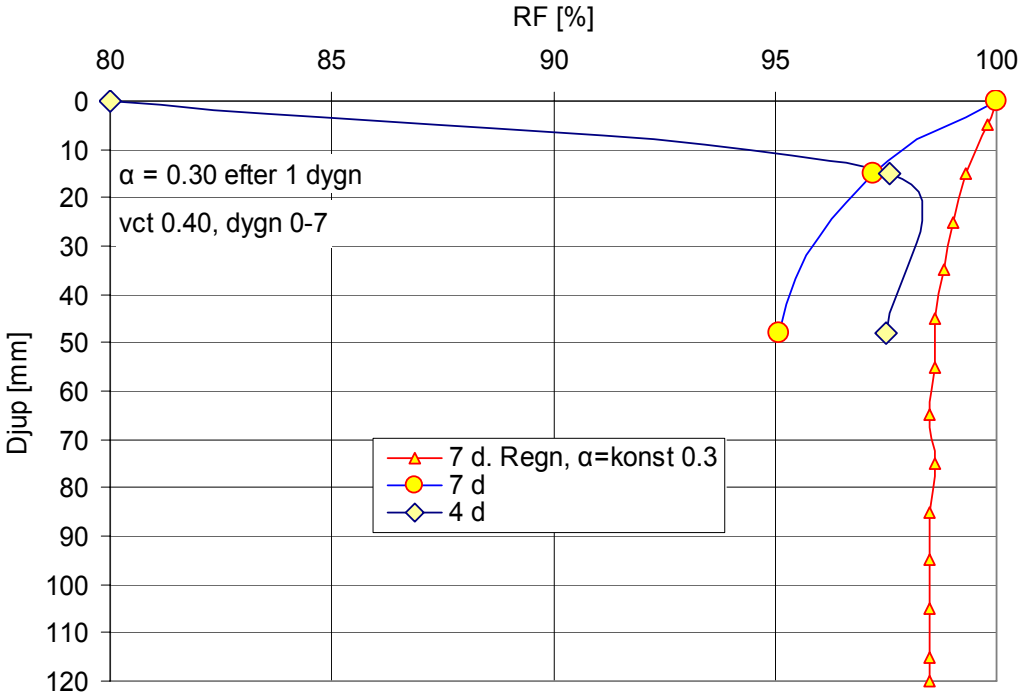
Den fjärde beräkningen har gjorts för fallet med regn under sju dygn, med start tre timmar efter gjutning, men nu med lägre hydratationsgrad, α = 0.3 konstant under hela sjudygnsperioden vid +5°C.

12.6.1 Hydratationsgradsutveckling

För den aktuella betongen har hydratationsutvecklingen och kemisk bindning av vatten uppskattats under den första veckan genom att utgå från att hydratationsgraden nått 0.3 under första dygnet och därefter inte ökat mera.

12.6.2 Beräkningsresultat

Beräkningsresultatet visas i figur 12.6.1. Värdena jämförs med mätvärdena för fyra respektive sju dygns regn.



Figur 12.6.1 Beräknade och uppmätta fuktprofiler vid sju dygns ålder efter sju dygns regn, vct 0.40 med konstant hydratationsgrad 0.30. Mätvärden som större punkter, där prov med 4 dygns regn visas som referens.

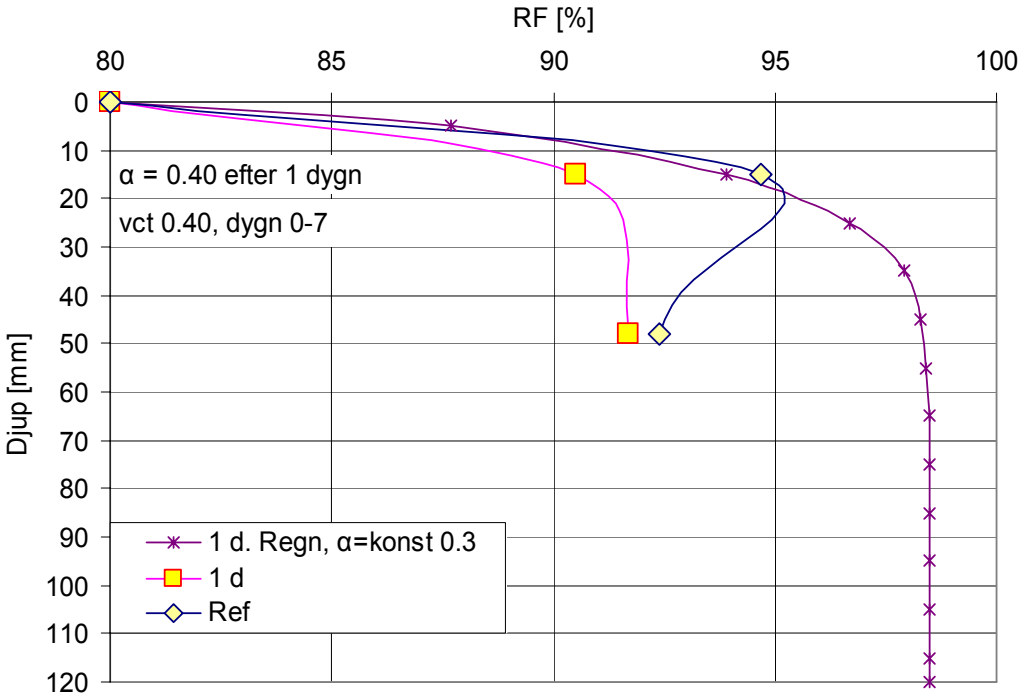
Med denna låga hydratationsgrad blir självuttorkningen liten men vatteninsugningen ungefär som mätvärdena indikerar. För att simulera ett så tidigt regn fordras att dessa båda motstridande process kvantifieras precis rätt.

12.7 Beräkning 5, α = 0.30 konstant, regn 1 dygn

Den femte beräkningen har gjorts för fallet med regn under ett dygn, med start tre timmar efter gjutning, följt av uttorkning under sex dygn, också här med lägre hydratationsgrad, α = 0.30 konstant under hela sjudygnsperioden vid +5°C.

12.7.1 Beräkningsresultat

Beräkningsresultatet visas i figur 12.7.1.



Figur 12.7.1 Beräknade och uppmätta fuktprofiler vid sju dygns ålder efter ett dygns regn och sex dygns uttorkning, vct 0.40 med konstant hydratationsgrad 0.30. Mätvärden som större punkter

Med denna låga hydratationsgrad blir självuttorkningen alldeles för liten. Uttorkningen efter ett dygns vatteninsugning sker till ungefär samma djup som i tidigare beräkningar.

12.8 Beräkning 6, α = 0.40 konstant, regn 7 dygn

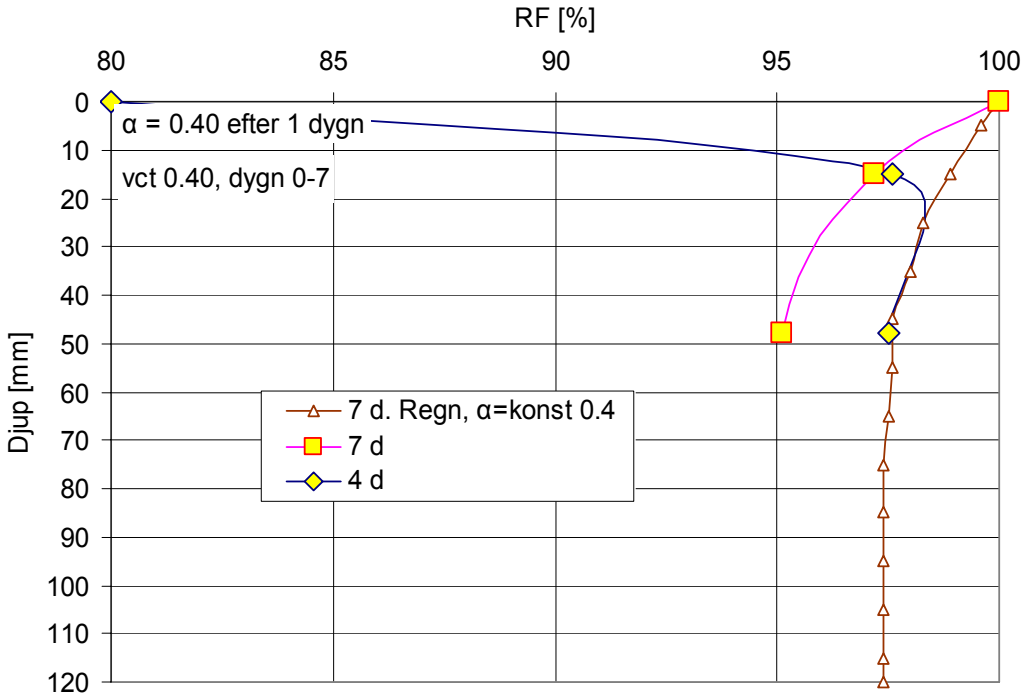
Den sjätte beräkningen har gjorts för fallet med regn under sju dygn, med start tre timmar efter gjutning, men med hydratationsgraden α = 0.4 konstant under hela sjudygnsperioden vid +5°C, precis som i den tredje beräkningen.

12.8.1 Hydratationsgradsutveckling

För den aktuella betongen har hydratationsutvecklingen och kemisk bindning av vatten uppskattats under den första veckan genom att utgå från att hydratationsgraden nått 0.4 under första dygnet och därefter inte ökat ytterliggare.

12.8.2 Beräkningsresultat

Beräkningsresultatet visas i figur 12.8.1.



Figur 12.8.1 Beräknade och uppmätta fuktprofiler vid sju dygns ålder efter sju dygns regn, vct 0.40 med konstant hydratationsgrad 0.40. Mätvärden som större punkter, där prov med 4 dygns regn visas som referens.

Denna beräkning ger en bra överensstämmelse med uppmätta värden, särskilt med tanke på den mätosäkerhet man har i mätningarna och den skillnad som erhållits mellan provkropparna, se figur 12.8.1.

12.9 Slutsatser av beräkningarna med mycket tidigt regn.

Av jämförelserna mellan beräknade och mätta fuktprofiler vid sju dygns ålder, efter regn och uttorkning vid låg temperatur kan följande slutsatser dras:

- Fuktförhållandena efter vatteninsugning i så tidig ålder som redan efter några timmar är mycket svåra att beskriva korrekt. Här är två eller tre motstridande processer som måste alla kvantifieras exakt eftersom resulterande fuktprofiler är ”skillnaden” mellan dem:
    - o självuttorkning, som blir mindre med lägre hydratationsgrad
    - o vatteninsugning, som blir större med lägre hydratationsgrad
    - o uttorkning, som blir snabbare vid lägre hydratationsgrad.
- För att verifiera dessa processer krävs att fördelningen av fukthalt och kemiskt bundet vatten, dvs hydratationsgrad, på olika djup mäts under själva insugnings- och uttorkningsförloppen.

- Angreppssättet med materialegenskaper som beror på hydratationsgraden på respektive djup bedöms som fullt rimlig att använda för att beskriva vatteninsugning i tidig ålder.

- Beräkningarna stämmer relativt väl med uppmätta fuktprofiler.

13 Förslag till modell för vatteninsugning i betong

13.1 Förutsättningar

Från jämförelserna mellan uppmätta och beräknade fuktprofiler i ett stort antal fall med högst skilda förutsättningar framgår det att vatteninsugning i betong kan beskrivas som en ”fukttransportprocess”, dvs. genom att beräkna fukttransport på olika djup med ånghalts- eller RF-gradienter. För att detta skall stämma är tre förutsättningar nödvändiga

a) Varaktigheten hos regnet eller de blöta förhållandena på betongytan måste kunna kvantifieras ordentligt. Det räcker inte med att ha tillgång till väderdata som anger om det regnat eller inte eller hur mycket det regnat. Det måste också finnas säkra observationer av hur länge, och var, det stått vatten på ytan efter regn, också sedan taket är på och byggnaden är tät. Beräkningar av vatteninsugning blir inte noggrannare än hur väl man kan beskriva tidigare fukttillstånd på betongytan.

Figur 13.1 Exempel på nödvändig observation för att beräkningar av vatteninsugning skall bli tillförlitliga. Foto: L-O Nilsson

b) Övergångskurvor, scanningkurvor, måste användas för betongen. Det räcker inte med desorptionsisotermer för betongen.

c) Alla materialegenskaper måste beskrivas som funktion av betongens porstruktur, lämpligen genom olika hydratationsgrad på olika djup.

d) Betongens hela fukthistoria måste vara känd och hänsyn till denna måste tas för kvantifiering av dess materialegenskaper. Så t ex har tidiga regn strax efter gjutning stor inverkan på vatteninsugningen många månader senare.

e) Tjocklek och egenskaper hos en eventuell avjämningsmassa och torkklimatet efter avjämning måste vara kända för att insugning i betongen skall kunna förutsägas.

13.2 Vatteninsugningsmodell i matematiska termer

Ovanstående förutsättningar kan uttryckas på följande sätt i matematiska termer.

13.2.1 Randvillkor

- ***t***(RF(x=0)=100%) måste vara väl kända, dvs. perioder med vatten på ytan

- ***RF***(x=0, t) då RF < 100 % måste vara någorlunda känd, för att beskriva betongens porstrukturutveckling och därmed egenskapsutveckling

- ***RF***(x=-*d*, t), där ***d*** är tjockleken hos en avjämningsmassa måste vara någorlunda känd, dvs. torkklimatet efter avjämning

13.2.2 Begynnelsevillkor

- RF(x, t_0) måste vara någorlunda känd vid tidpunkten t_0 då vatteninsugningen startar, dvs. betongens fukthistoria från gjutning måste vara någorlunda beskriven för att en vatteninsugningsberäkning skall bli tillförlitlig.

13.2.3 Porstruktur- och egenskapsutveckling och fukthistoria

- ***vct*** & ***C***; betongens sammansättning måste naturligtvis vara känd, särskilt vattencementtalet, cementtypen och cementhalten

- α(x,t) dvs. betongens hydratationsgrad som funktion av tiden, på olika djup, måste vara känd. Detta innebär att temperatur- och fukthistorien hos betong måste vara dokumenterad

- w_n(x, t) dvs. det kemiskt bundna vattnet är en väsentlig del av denna fukthistoria och måste kunna beskrivas från gjutningstillfället.

- materialegenskaperna måste beskrivas som funktion av betongens porstrukturutveckling, dvs. som funktion av α.

13.2.4 Fukttransportegenskaper

- $\delta(\phi, \alpha)$ kan användas för beräkning av fukttransport i betongen. Alternativt kan denna omräknas till en koefficient $D_\phi(\phi, \alpha)$ med RF som transportpotential eller till en fundamentalpotential $\psi(\phi, \phi_{ref}, \alpha)$.

- $\delta(\phi, \alpha)$ kan tillsvidare beräknas med ekvationer som getts i denna rapport, men korrigerade med en faktor 2.5-10 för höga RF för betonger med vatten-cement på 0.5 eller högre.

13.2.5 Fuktbindningsegenskaper

- $w_e(\phi, \alpha)/C$ för uppfuktning från desorptionsisotermen måste vara kvantifierad, dvs. scanningkurvorna vid uppfuktning efter tidigare uttorkning måste vara kända, särskilt deras lutning, dvs. fuktkapaciteten under vatteninsugning. Detta är viktigare för vatteninsugning än desorptionskurvorna.

14 Förslag till fortsatt forskning

I arbetet med utvärdering av mätningarna och genomförandet av beräkningarna har följande uppgifter för framtida forskning särskilt identifierats, där behovet av ny kunskap är störst.

a. Materialegenskaper som funktion av hydratationsgrad också vid mycket låg ålder, särskilt fukttransportegenskaper. Här saknas en bra mätmetod av naturliga skäl. Sådana mätningar tar traditionellt lång tid och då är det inte ”tidig ålder” längre!

b. Övergångskurvor, scanningkurvor, vid uppfuktning efter uttorkning, för olika betonger och ålder. En begränsad sådan studie avslutas[13] vid BML LTH under 2006.

c. Hydratationsutveckling hos cement vid begränsad fukttillgång, dvs. i delvis uttorkad betong. En ny metod för detta är under utveckling[19] vid BML på LTH.

d. Omsorgsfulla mätningar av både RF-profiler och fukthaltsprofiler, åtminstone uppsugen vattenmängd, helst också i fält.

e. Beskrivning av perioder med vatten på betongytor under olika väderbetingelser och produktionsteknik. Fältstudier både i traditionellt och industriellt byggande.

f. Beräkningsprogram som beskriver fuktförhållanden på det sätt som beskrivits ovan som också är användarvänligt, väldokumenterat och lätt utvecklingsbart.

15 Referenser

[1] Salievski, R (2003) *Uttorkning av prefabricerade bjälklag* rapport TVBM-5052, Avd Byggnadsmaterial, LTH

[2] Johansson, N (2005) *Uttorkning av betong - Inverkan av cementtyp, betongkvalitet och omgivande fuktförhållanden.* licentiatavhandling TVBM-3124, Avd Byggnadsmaterial, LTH

[3] Abrahamsson, A & Tammo, K (2003) *Inverkan av regn och avjämningsmassa på uttorkning av betong* rapport TVBM-5053, Avd Byggnadsmaterial, LTH

[4] Linné, B & Utgenannt, P (1995) Uttorkning av betong – en fältstudie, rapport - 5029, Avd Byggnadsmaterial, LTH

[5] Fagerlund, G & Nilsson, L-O (2006) Kompendium i Byggnadsmaterialvetenskap, kapitel 8. Avd Byggnadsmaterial, LTH.

[6] Arfvidsson, J & Hedenblad, G (1991) *Calculations of moisture penetration depth in concrete*. Uppdragsraport U91.06, Avd Byggnadsmaterial, LTH

[7] Fagerlund, G & Hedenblad, G (1993) *Calculation of the moisture time-fields in concrete*. Rapport TVBM-3052, Avd. Byggnadsmaterial, LTH

[8] Hedenblad, G (1993) *Water vapour permeability of cement based materials*, doktorsavhandling TVBM-1014, Avd Byggnadsmaterial, LTH.

[9] Johansson, P (2005) *Water Absorption in Two-layer Masonry Systems - properties, profiles and predictions*, doktorsavhandling TVBM-1024, Avd Byggnadsmaterial, LTH.

[10] Arfvidsson, J (1989) Datormodell för tvådimensionell fukttransport. Manual för JAM-2.0. Avd Byggnadsfysik, LTH

[11] Arfvidsson, J (1994) *Isothermal moisture processes in porous materials*. doktorsavhandling TVBH-1007. Avd Byggnadsfysik, LTH

[12] Hedenblad, G & Arfvidsson, J (2002) *TorkaS. Version 2.0 för bedömning av uttorkningstid hos betong med byggcement*. Avd Byggnadsmaterial & Byggnadsfysik, LTH

[13] Nilsson, L-O (1980) *Hygroscopic moisture in concrete – drying, measurements and related material properties*, doktorsavhandling TVBM-1003, Avd Byggnadsmaterial, LTH.

[14] Norling-Mjörnell, K (1997) *Moisture conditions in high performance concrete – mathematical modelling and measurements*, doktorsavhandling P-97:6, inst. f. Byggnadsmaterial, Chalmers, Göteborg

[15] Åhs, M (2006) Uppmätta scanningkurvor för några betonger. Personlig kommunikation, Avd Byggnadsmaterial, LTH.

[16] Nilsson, L-O, Hedenblad, G & Norling-Mjörnell, K (1997) *Fuktegenskaper*. Kapitel 14 i Betonghandboken Högpresterande betong. Svensk Byggtjänst, Stockholm

[17] Hedenblad, G (1996) *Materialdata för fukttransportberäkningar.* FuktGruppens informationsskrift, BFR-rapport T19:1996, Svensk Byggtjänst, Stockholm

[18] Anderberg, A (2004) *Moisture properties of self-levelling flooring compounds*, licentiatavhandling, rapport TVBM-3120, Avd Byggnadsmaterial, LTH

[19] Gerstig, M & Wadsö, L (2006) *En ny metod för mätning av hydratationshastighet med isoterm kalorimetri.* Personlig kommunikation, Avd Byggnadsmaterial, LTH

Datorverktyget *KFX03*

för en-dimensionell beräkning av samtidiga fukt- och temperaturändringar med fuktberoende materialegenskaper och tidsvarierande randvillkor.

Bakgrund

Datorverktyget KFX har successivt utvecklats vid institutionen för Byggnadsmaterial vid Chalmers. Ursprunget är ett datorverktyg ”KortFukt” som Bengt Elmarsson gjorde på 1980-talet inför en doktorandkurs på Chalmers, avsett för beräkningar av fukt i en yttervägg. Programmet har omarbetats av Bengt Hedberg och utvecklats ytterligare av Mats Rodhe, båda i samarbete med Lars-Olof Nilsson. Programmet KFX har använts under många år i kurser och forskarutbildningen vid Chalmers och kursdeltagarna och doktoranderna har tagit programmet med sig och ibland använt det för skilda tillämpningar. Programmet har också använts av några skadeutredare i mer avancerade tillämpningar. Institutionen för Byggnadsmaterial vid Chalmers har använt KFX i många olika typer av uppdrag, från ytterväggar till konstruktioner mot mark och biltunnlar i berg!

Ursprungligen, och fram t o m 2002 kunde materialegenskaperna bara anges som konstanter, vilket skapade stora begränsningar. Nu har en uppgradering gjorts av Mats Rodhe, KFX03.

Programmet

Programmet beräknar en-dimensionella fuktfördelningar icke-stationärt genom att med finita-differensmetod, numeriskt lösa massbalansekvationen för fukt och stationärt beräkna temperaturfördelningen i varje tidssteg. Beräkningarna görs i Excelblad med hjälp av makron och Visual Basic. 10 celler med mellanliggande skikt med fuktmotstånd måste användas.

Fukttransport beskrivs med ekvationerna

$$q = \delta \frac{\Delta v}{\Delta x} = \frac{\Delta v}{Z} \quad \left[kg/(m^2 \cdot s)\right]$$

där v är ånghalten, δ är fukttransportkoefficienten och Z är fuktmotståndet.

I den senaste versionen KFX03 kan indata anges fuktberoende och ytterligare alternativ att ange randvillkor har inarbetats.

Materialegenskaper

Fukttransportkoefficienten δ anges som fuktberoende, dvs ökande med ökande RF, med hjälp av tre parametrar. Fuktmotståndet Z hos ett skikt anges som konstant.

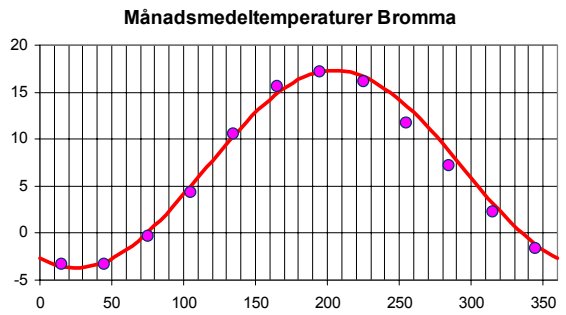
Fukthaltsändringar beskrivs med hjälp av materialens sorptionskurva, vars ”omvända S-form” kan beskrivas med fyra parametrar.

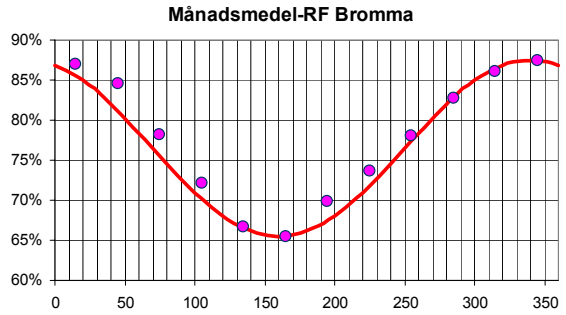
Parametrarna för materialegenskaperna finns ännu inte i en databas utan måste anges av användaren.

Tidssteget måste anges av användaren. Beräkningsresultaten visar tydligt om tidssteget är för kort och behöver göras större.

Randvillkoren

Randvillkoren på de två sidorna kan anges på olika sätt. Klimatet på Sida I (”ute”) kan anges med temperatur och relativ fuktighet som varierar sinusformat, med ett medelvärde, amplitud och fasförskjutning. Exempel på indata (kurvor) och klimatdata från SMHI (punkter) visas i nedanstående figurer.

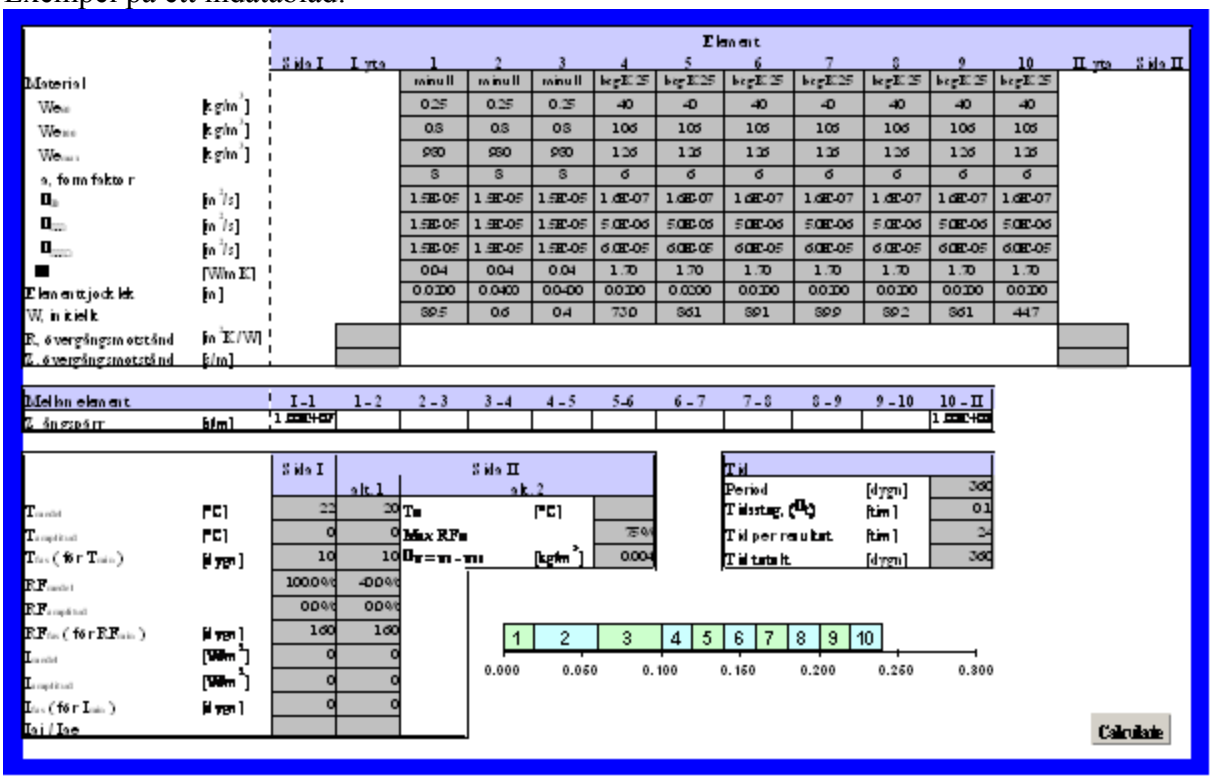




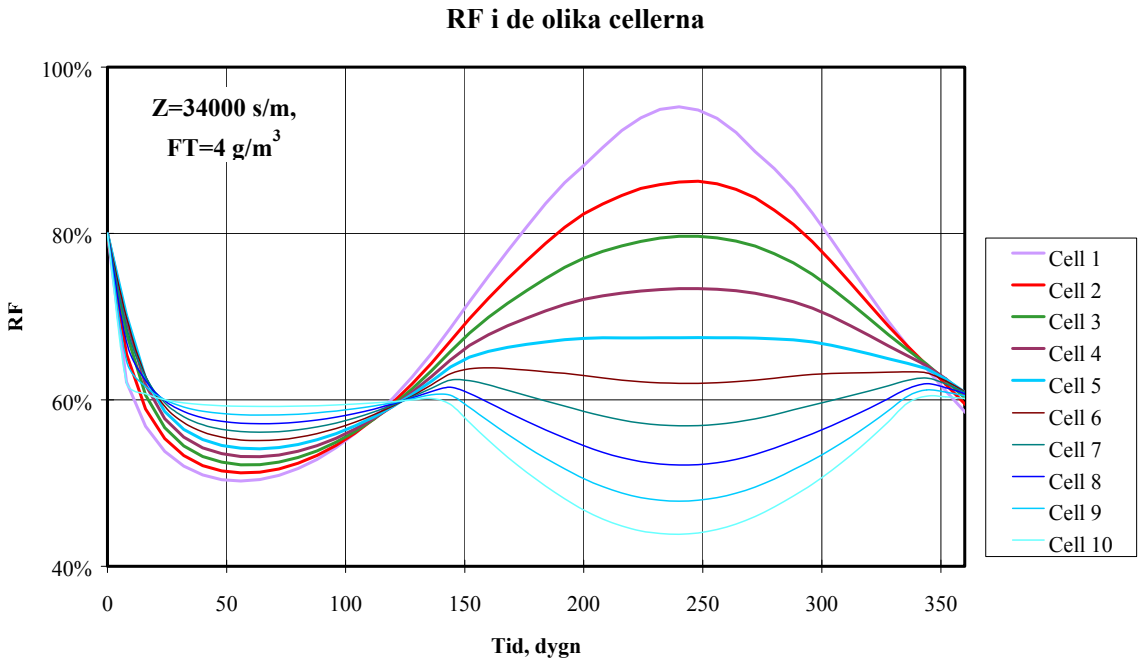
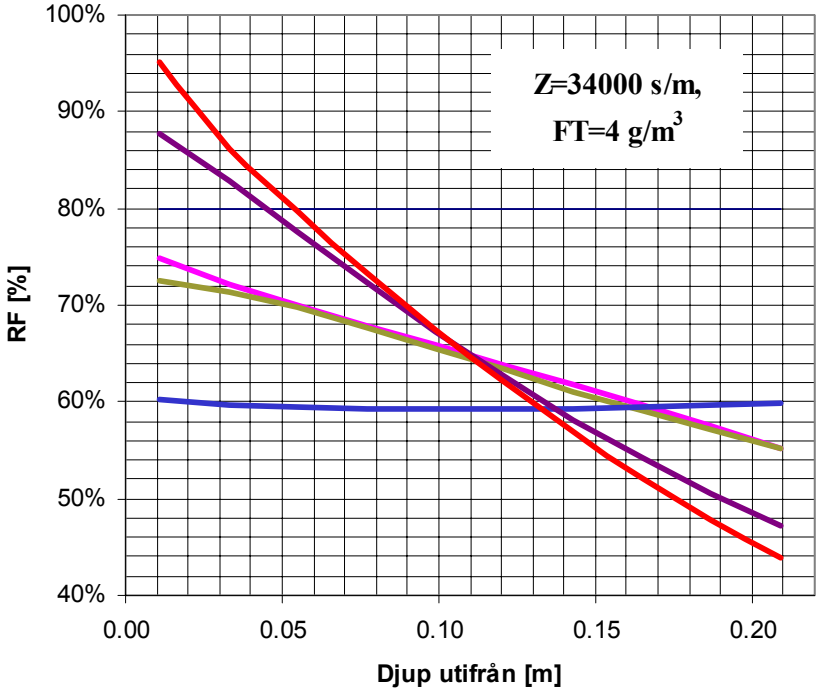
Strålning, t ex solstrålning, kan anges som en sinusvariation med en medelintensitet, amplitud och fasförskjutning.

Klimatet på andra sidan, Sida II (”inne”) kan anges på två alternativa sätt. Alternativ 1 är detsamma som på Sida I. I alternativ II kan istället en konstant innetemperatur anges och ett fukttillskott. Programmet räknar då om ånghalten och RF inne från uteluftens ånghalt. En övre gräns för RF inne kan sättas.

Exempel på ett indatablad:



Beräkningsresultat

RF och fukthaltsprofiler visas under beräkningens gång i ett diagram. Beräkningsresultaten i form av profiler av temperatur, RF, fukthalt och ånghalt kan begäras skrivas till ett Excelark efter ett visst antal tidssteg. Från detta ark kan sedan resultaten redovisas på en mängd olika sätt, som fuktprofiler eller som RF eller fukthalt som funktion av tiden i olika punkter.

Exempel på alternativa sätt att presentera beräkningsresultaten: