

FUKTMÄTNING I BETONG MED LÅGT VCT, STEG 3



Peter Johansson

2016-06-17

FÖRORD

Under senare år har det blivit allt vanligare att betong med lågt vattencementtal (vct) används i husbyggnadssammahang. Syftet är att uppnå kortare uttorkningstider och därmed kortare byggtid. För att undvika skador orsakade av otillräckligt uttorkad byggfukt krävs att uttorkningsförloppet hos betong kontrolleras genom mätning. Sedan cirka 15 år har systemet med fuktkontrollanter auktoriserade av Rådet för ByggKompetens (RBK) haft en avgörande betydelse för att säkerställa kvaliteten på mätning av relativ fuktighet (RF) i betong. Detta har tillfört en betydande trovärdighet och ny kunskap.

Vi vill passa på att rikta ett stort tack till SBUF som har finansierat de tre delstudier som sammanfattas i rapporten. Den gynnsamma finansieringssituationen har möjliggjort att projektgruppen kunnat agera fritt och har getts möjlighet att utforma undersökningarna utan medverkan av särintressen.

Avvikelser inom RBK-systemet

Allt sedan användningen av betong med låga vattencementtal fått en ökad utbredning har också några fall med motstridiga mätresultat noterats. Under hösten 2011 kontaktades RBK av en RBK-auktoriserad fuktkontrollant angående ett byggprojekt där RF-mätning utförts med två skilda mätmetoder inom ett och samma objekt. Resultaten från mätningarna visade på betydande systematiska skillnader mellan mätmetoderna uttaget prov och borrhålsmätning. Skillnaden var i storleksordningen 4-7% RF vilket vanligen motsvarar flera månader i uttorkningstid. Mätningar utfördes även av ytterligare en auktoriserad kontrollant i ett annat projekt med snarlikt resultat. RBK utförde med anledning av detta en revision av genomförda mätningar inklusive ett arbetsplatsbesök för att klarlägga om fuktkontrollanterna avvikit från RBKs fuktmätningrutiner utan att några brister kunde noteras. Orsak till avvikelserna i mätresultat mellan de två mätmetoderna kunde inte klarläggas.

Avvikelser vid mätningar inför TorkaS3

Vid laboratoriemätningarna bakom datorprogrammet TorkaS3, Arfvidsson och Hedenblad [2007], utfördes RF-mätningar på betong med vattencementtal i intervallet 0.38-0.63 enligt Johansson [2012]. Mätningarna gjordes med två principiellt olika metoder, dels mätning i borrhål med kvarsittande givare, HumiGuard, och dels mätning på uttaget prov med Vaisalagivare. Vid mätningarna observerades systematiska avvikelser på samma sätt som de som observerats inom RBK-organisationen för betonger med låga vattencementtal.

Steg 1 och Steg 2 av SBUF-projektet "Fuktmätning i betong med lågt vct"

Det huvudsakliga syftet med dessa projekt var att klarlägga varför uttaget prov och borrhålsmätning i betong med lågt vct ibland ger olika resultat. I uppgiften ingick också att visa vilken av RBK-systemets mätmetoder, borrhålsmätning eller uttaget prov, som ger ett RF-värde som överensstämmer med betongens RF. Projektet som helhet finansierades av SBUF och uppdelades i två delstudier; Steg 1 där ett stort antal mätförsök utfördes, SBUF-projekt 12656, och Steg 2 där datorberäkningar utfördes, SBUF-projekt 12706.

RF-mätningar som gjordes inom det första projektet på uttagna prov visade systematiskt lägre värden jämfört med mätningar i borrhål. Orsak till skillnaden mellan mätmetoderna var flera men det som verkade mest avgörande var hantering av proven i omgivande luft då fukt förloras till omgivningen. Resultaten från de båda delprojekten visade på att det finns ett flertal faktorer, se punktlista nedan, som inverkar på resultatet vid RF-mätning på uttaget prov

från betong med lågt vct. Effekten av dessa faktorer, enskilda eller tillsammans, är orsak till att RF-mätning på uttagna prov kan ge missvisande lågt resultat. Faktorer som påverkar mätresultatet vid uttaget prov är:

- * Tiden som provbitarna hanteras i omgivande luft
- * Storleken hos de uttagna provbitarna
- * Värme som tillförs provet på grund av borrningen
- * Andelen ballast hos betongen samt ballastens storlek
- * Om provbehållaren är av glas eller plast

Resultaten från de båda projekten var samstämmiga och visade att RF-mätning i borrhål är den metod som ger mest rättvist resultat medan mätning på uttaget prov tenderar till att underskatta RF-nivån.

Denna rapport gäller Steg 3 av SBUF-projektet "Fuktmätning i betong med lågt vct"

Syftet med Steg 3, SBUF-projekt 12941, var att utvärdera resultaten från Steg 1 och 2 för att avgöra om tillräcklig kunskap förelåg för att sammanställa konkreta anvisningar för RF-mätning i betong med lågt vct. Förutsatt att så var fallet skulle RBK-systemets fuktmättningsmanual revideras och resultaten spridas i form av den reviderade manualen samt på RBKs hemsida www.rbk.nu.

Efter utvärdering av resultaten från Steg 1 och 2 tog RBK beslutet att tillsvidare helt frångå mätmetoden uttaget prov vid RF-mätning i betong. Detta har gällt sedan den 9 januari 2015 och sedan dess tillåts endast RF-mätning enligt principen borrhålsmätning. Anledningen var att resultaten i Steg 1 och 2 visade på att uttaget prov systematiskt gav lägre mätresultat än vid borrhålsmätning i betong med lågt vct. Vid mätning i betong med väsentligt högre vct erhålls överensstämmelse i mätresultat enligt tidigare erfarenhet. För att även fortsättningsvis kunna nyttja mätmetoden uttaget prov inom RBK-systemet vid högre vct utvidgades projektet något. Kompletterande mätförsök behövdes för att reda ut var brytpunkten i vct låg där metoderna började ge avvikande resultat. Därefter skulle uttaget prov kunna tillåtas inom ett fastställt intervall avseende vct. Kompletterande finansiering söktes, vilken också beviljades i SBUF-projekt 13085. Resultaten redovisas inte separat utan som en del i denna rapport. Under år 2014 lanserade Cementsa ett nytt cement, Bascement, som innehåller det mineraliska tillsatsmaterialet flygaska. Eftersom Bascementet i princip hade ersatt Byggcementet i hela Sverige vid projektets starttid togs beslutet att detta cement skulle användas i de kompletterande försöken. Detta istället för Byggcement som användes i Steg 1 och 2 och som inte innehåller flygaska.

Projektledare

-Ted Rapp, Sveriges Byggindustrier/RBK

Arbetsgrupp

-Stefan Backe Avd. Byggnadsmaterial, LTH
-Peter Johansson Avd. Byggnadsmaterial, LTH

Referensgrupp

-Hans Hedlund, Skanska Teknik/SBUF
-Fredrik Gränne, NCC

FÖRORD.....	1
1 INLEDNING.....	4
2 METOD.....	5
2.1 INLEDNING.....	5
2.2 PROVKROPPAR.....	5
2.2.1 Betongen.....	5
2.2.2 Hantering.....	6
2.3 MÄTNINGAR.....	7
2.3.1 Provplan.....	7
2.3.2 Beskrivning av RF-givare.....	9
2.3.3 Kalibreringsrutiner.....	13
2.3.4 RF-mätning i borrhål.....	15
2.3.5 RF-mätning på uttaget prov.....	16
2.3.6 Inverkan av RF-sensors fuktkapacitet.....	19
2.3.7 Kontroll av läckage genom RF-givare vid borrhålsmätning.....	25
3 RESULTAT.....	26
3.1 INLEDNING.....	26
3.2 RF-MÄTNINGAR.....	26
3.3 FUKTKAPACITET HOS RF-GIVARE.....	33
3.4 FUKTLÄCKAGE GENOM RF-GIVARE.....	34
4 SAMMANFATTNING AV RESULTAT.....	35
4.1 RF-MÄTNINGAR.....	35
4.1.1 Mätning på betong vct 0,38.....	35
4.1.2 Mätning på betong vct 0,50.....	35
4.1.3 Mätning på betong vct 0,55.....	35
4.1.4 Mätning på betong vct 0,50 med slagg.....	36
4.1.5 Mätning på betong vct 0,55 med slagg.....	36
4.1.6 Jämförelse av uppmätt RF med olika givare i borrhål.....	36
4.1.7 Jämförelse med och utan slagg samt olika vct.....	37
4.1.8 Jämförande borrhålsmätning i en provkropp med olika Testo-givare.....	37
4.2 MÄTSYSTEMETS KÄNSLIGHET.....	37
4.2.1 Inverkan på visad RF-nivå när Vaisala HMP44 loggas.....	37
4.2.2 Fuktkapacitet hos provade RF-givare.....	38
4.2.3 Effekten av fuktläckage hos provade RF-givare.....	38
4.2.4 Jämförelse av borrhålsmätning och uttaget prov.....	38
4.2.5 Återmontage av RF-givare.....	39
4.2.6 Jämförelse av insvägningsförloppet för fyra olika varianter av RF-givare vid borrhålsmätning.....	42
4.2.7 Jämförelse av insvägningsförloppet för HumiGuard monterad vid borring alternativt tre dygn efter borring.....	44
5 SLUTSATSER.....	45
5.1 INLEDNING.....	45
5.2 UTTAGET PROV UNDERSKATTAR RF OAVSETT VCT.....	45
5.3 LÅGA RF-NIVÅER OCH LÅNG TID TILL JÄMVIKT MED TESTO.....	45
5.4 INVERKAN PÅ RF-NIVÅN NÄR GIVARE LOGGAS.....	46
5.5 BORRHÅLSMÄTNING MED HUMIGUARD, VAISALA HMP44 OCH HMP110.....	46
5.6 ÅTERMONTAGE I BORRHÅL.....	47
6 BEHOV AV FORTSATT UTREDNING.....	48
7 REFERENSER.....	49
8 APPENDIX.....	50

1 INLEDNING

I de två tidigare projekten, SBUF-projekt 12656 och 12706, har orsaker till skillnad i mätresultat mellan RBK-metoderna uttaget prov och borrhålsmätning förklarats, se Johansson [2014] och Åhs [2014]. De båda projekten visade att mätning på uttaget prov underskattar RF-nivån för låga vattencementtal (vct) och att RF-mätning i borrhål är den metod som ger mest rättvist resultat avseende RF-nivån i betong.

Efter att en utvärdering av resultaten från de tidigare projekten utförts, inom ramen för detta projekt, togs mätmetoden uttaget prov bort från RBK-systemet. I dagsläget kan därför endast principen för borrhålsmätning användas för RBK-mätningar vilket kan anses förknippat med viss risk ur ett långsiktigt perspektiv. Detta eftersom möjligheten att parallellt kunna jämföra principiellt olika mätmetoder, och därmed upptäcka förändringar hos någondera metoden, minskar. Detta projekt utökades därför till att även omfatta ett antal mätförsök. Syftet med mätningarna var att undersöka om metoden uttaget prov kunde användas för betong med högre vct, och i så fall vilket vct som kunde anses utgöra brytpunkten. För att hitta den eventuella brytpunkten, med avseende på vct, jämfördes ett antal RF-mätningar på betong med tre olika vct. Eftersom Byggcement, som användes i Steg 1 och 2, i stort sett utgått när mätningarna i Steg 3 skulle påbörjas togs beslutet att använda Bascement vilket idag är vanligt förekommande vid betongtillverkning i Sverige. Detta resulterade i sin tur i att även tid till fuktjämvikt och påverkan av givarnas fuktkapacitet kom att behöva utvärderas för att konkreta riktlinjer avseende mätning skulle kunna utformas inom detta projekt.

2 METOD

2.1 INLEDNING

Projektet inleddes med att gå igenom rapporterna från Steg 1 och Steg 2 varvid RBK tog beslutet om att mätmetoden uttaget prov helt skulle utgå ur RBK-systemet, trots att rapporterna endast behandlade betong med lågt vct. De RBK-auktoriserade fuktkontrollanterna informerades om detta och auktorisationerna avseende denna metod återkallades. Rapporterna från Steg 1 och 2 publicerades på RBKs hemsida www.rbk.nu. Eftersom önskemålet var stort om att uttaget prov skulle få användas inom RBK-systemet, för högre vct, påbörjades inte arbetet med att revidera *Manual fuktmätning i betong*, vilket skulle utföras baserat på resultaten från Steg 1 och 2, utan fokus riktades på vidare utredning av metoden uttaget prov. En kompletterande ansökan skickades till SBUF som beviljade ett antal mätförsök avsedda för att utreda mätning med uttaget prov i betong med högre vct. Arbetet med att revidera manualen, vilket skulle ingå i detta projekt, sköts på framtiden till det att mätmetoden uttaget provs vara eller inte vara utretts. I denna rapport redovisas fortsättningsvis i huvudsak de kompletterande mätningarna vilka även visade sig ge följdverkningar på rutinerna för borrhålsmätning. Resultaten i rapporten har presenterats på RBK:s informationsdag den 11 maj 2016 då rapporten förelåg som remissutgåva.

2.2 PROVKROPPAR

2.2.1 Betongen

Försöken gjordes på betonger vilka blandades med fem olika sammansättningar, både med och utan tillsats av slagg, se tabell 2.1. Som huvudsakligt bindemedel användes Bascement från Cementa AB vilket, förutom huvudkomponenten Portlandcement, innehöll tillsats av flygaska och kalkstensmjöl. Blandningarna som gjordes med Bascement utan tillsats betecknas B medan de med tillsats av slagg betecknas BS, vilket framgår i tabell 2.1.

För betong med Portlandcement kan vct användas som ett mått på en rad egenskaper. Begreppet vct är kvoten av mängden vatten i kg och mängden cement i kg enligt följande ekvation;

$$vct = \frac{\text{vatten}}{\text{cement}}$$

Om man använder andra bindemedel tillsammans med Portlandcement är vct-begreppet otillräckligt och istället ger det ekvivalent vattencementtalet, vct_{ekv} , en bättre beskrivning av betongens egenskaper. Nedanstående ekvation beskriver vct_{ekv} där mängden slagg respektive flygaska betecknas med S och FA och tillhörande effektivitetsfaktorer betecknas k_1 och k_2 .

$$vct_{ekv} = \frac{\text{vatten}}{(\text{cement} + k_1 * S + k_2 * FA)}$$

Eftersom samtliga blandningar baserades på ett Portland-flygaskecement, dessutom tillsattes slagg i två av varianterna, används fortsättningsvis begreppet vct som en benämning på det ekvivalenta vattencementtalet, vct_{ekv} .

Tabell 2.1 Betongrecept med delmaterial angivna som vikt per volymenhet samt sättmått och lagringsförhållande. Uppmätta värden avseende sättmått ligger inom intervallet för sättmått S2.

	Beteckning				
	38B	50B	55B	50BS	55BS
Ekvivalent vattencementtal	0,38	0,50	0,55	0,50	0,55
Delmaterial (kg/m³)					
Cement (Cementa Bascement)	450	380	350	325	300
Slagg (densitet 2900 kg/m ³ , k=0,8)*	0	0	0	65	60
Vatten	171	190	192,5	188,5	191,4
Ballast (0-8mm)	880	937	966	933	960
Ballast (8-12mm)	440	415	411	414	409
Ballast (12-16mm)	440	415	411	414	409
Flyttillsats (Sika Evo 26)	2,2	0,8	0,8	0,8	0,8
Sättmått/lagringsförhållande					
Sättmått (mm)	78	73	95	70	88
Förseglad lagring	X				
Värmeisolerad mantelyta	X				
Värmeisolerad botten	X	X	X	X	X

*Uppgifter och material från Thomas Concrete Group AB, Göteborg

2.2.2 Hantering

Betong med recept enligt tabell 2.1 göts i 5-liters burkar av plåt med höjden 150 mm, se Figur 2.1. Samtliga varianter göts inom loppet av några dagar och lagrades därefter under två månader i temperaturreglerat utrymme, före RF-mätningarna påbörjades, med temperaturen $20 \pm 1,5^\circ\text{C}$. Provkropparna med märkning 38B förseglades direkt efter gjutning och förblev förseglade under hela förloppet. Proven märkta 38B försågs också med värmeisolering både på undersidan samt mantelytan under de första dygnet för att möjliggöra jämförelse av resultaten med tidigare mätningar enligt Johansson [2014]. Övriga varianter av provserien tilläts enkelsidig uttorkning under hela lagringsförloppet och dess övre yta exponerades därför för rummets relativa fuktighet vilken varierade med hänsyn till variationer hos utomhusluften. Eftersom mätresultaten från proven som torkade enkelsidigt skulle jämföras direkt med varandra inverkade inte rumsluftens variationer med avseende på relativ fuktighet. De förseglade proven lagrades med förslutet plåtlock fram till RF-mätningarna påbörjades. Under mätförloppet förseglades överytan med gummiduk eftersom duken på enklare sätt möjliggjorde montage av mätrör.



Figur 2.1 Lagring av provkroppar vilka göts i 5-liters burkar av plåt. De tre proven till höger i figuren, med beteckning 38B, var under lagringen försedda med lock för försegling samt betongtäckmatta längs mantelytan för värmeisolering. Övriga prov tilläts enkelsidig uttorkning under hela lagringsförloppet.

2.3 MÄTNINGAR

2.3.1 Provplan

Jämförande mätningar av relativ fuktighet (RF) har genomförts dels som borrhålsmätningar och dels som mätning på uttagna prov. I en tidigare studie, Johansson (2014), visades att mätningar på uttaget prov underskattar RF-nivån för betong med vct 0,38 samt också orsakerna till detta. Syftet med denna studie var huvudsakligen att undersöka om de olika metoderna möjligen överensstämmer för betonger med något högre vct. Jämförande mätningar, dels i borrhål och dels på uttagna prov, gjordes därför på betonger med vct 0,50 respektive 0,55 och för den lägre vct-nivån gjordes enbart borrhålsmätningar. För att möjliggöra jämförelse med resultat från det tidigare projektet förseglades proven med vct 0,38 medan övriga prov tilläts torka genom den övre ytan. Syftet med att tillåta uttorkning för proven med de högre vct-nivåerna var att de skulle nå relevanta RF-nivåer som är aktuella i sammanhang när RBK-systemets mätrutiner tillämpas, vanligtvis 80-85% RF. Självuttorkningen är helt enkelt inte tillräcklig med dessa vct för att nå 85% RF oavsett lagringstid.

Gjutningen genomfördes inom loppet av några dagar och eftersom proven lagrades under samma tidsperiod i samma utrymme var de direkt jämförbara med avseende på härdningsförhållande. Lagringsklimatet var temperaturstyrt till $20 \pm 1,5^{\circ}\text{C}$ medan styrning avseende luftens RF saknades. Alla RF-mätningar, både borrhålsmätning och uttaget prov, genomfördes på betong som lagrats i två månader.

Tabell 2.2 Provplan med förteckning över fabrikat/modell av RF-givare som monterats i borrhål eller i provrör. Givarbeteckningar inom parantes används fortsättningsvis i rapporten.

Beteckning/provkropp	Givare för mätning på uttagna prov			Givare för mätning i borrhål					
	Vaisala HMP110 (HMP110)	Loggad Vaisala HMP44 (HMP44 Pico)	Vaisala HMP44 (HMP44)	Vaisala HMP110 (HMP110)	Loggad Vaisala HMP44 (HMP44 Pico)	HumiGuard	Testo 605-H1 med tejp (605 med tejp)	Testo 605-H1 utan tejp (605 utan tejp)	Testo 05726172 med teflonfilter (635)
38B-1					V26		10-1	11-2	T9
38B-2							10-2	11-3	T10
38B-3					V35		10-3	11-4	T8
50B-1		V-26,- V35		VA1	V40	X	10-4		
50B-2	VA1	V40		VA2		X	10-5		T6
50B-3	VA2	V57		VA3	V57	X			
55B-1	VA3	V58		VA4	V58	X	10-6		
55B-2	VA4	V59		VA5		X			T7
55B-3	VA5	V61		VA6		X	10-8		
50BS-1			V46, V53	VA7	V59	X	10-9		
50BS-2	VA6	V64		VA8		X	10-10		
50BS-3	VA7, VA8			VA9	V61	X	10-11		
55BS-1	VA9		V51	VA10	V64	X	10-12		
55BS-2	VA12		V49	VA11		X	10-15		
55BS-3	VA10, VA11			VA12		X	10-16		

2.3.2 Beskrivning av RF-givare

Inledning

Enligt provplanen i Tabell 2.2 genomfördes mätningarna på de uttagna proven med givare av fabrikat Vaisala modell HMP44 och HMP110 (Vaisala Oyj, Helsingfors, Finland), se figur 2.5 och 2.6. Båda givarna avlästes manuellt med handavläsningsinstrument medan att antal HMP44 var kopplade till en Picologger som lagrade mätresultat med två minuters intervall vilket möjliggjorde kontroll av givarnas insvängningsförlopp samt temperaturvariation.

Vid borrhålsmätningarna användes, förutom samma givare som för de uttagna proven, också fabrikaten HumiGuard (Nordisk Industrifysik AB, Järfälla, Sverige), se figur 2.7, samt Testo (Nordtec Instrument AB, Göteborg, Sverige) enligt figur 2.2 och 2.4. HumiGuard givarna förbrukas i samband med att de demonteras efter avslutad mätning vid var enskild mätpunkt och fungerar således enligt engångsprincipen. Testo av varianterna 605 och 635 kunde återmonteras vilket även gällde Vaisala. Givarnas känslkropp, det vill säga sensorn, skyddades mot damm enligt olika principer vilket framgår av beskrivning för respektive givare nedan.

Testo 605-H1 och Testo 05726172

Figur 2.2 visar RF-givare Testo 605-H1 för vilken display och sensor utgör en sammanhängande enhet. Bilden visar givare vars sensor är belagd med skyddstejp.

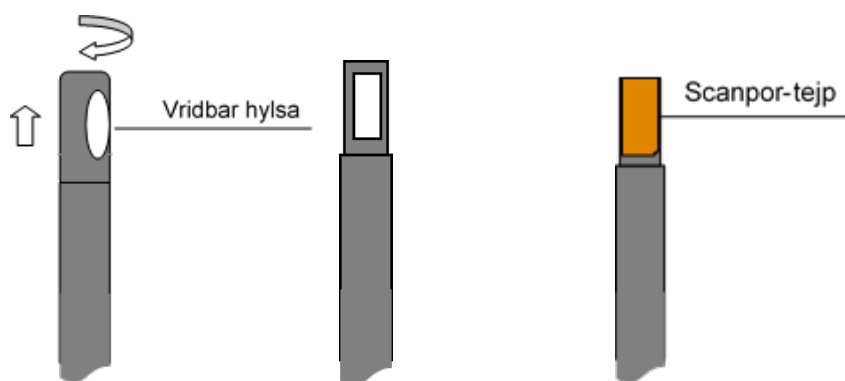


Figur 2.2 Testo 605-H1 försedd med tejp som skydd över RF-sensorn (fabrikat Scanpor 10x40 mm)

Den andra mätutrustningen av fabrikat Testo, vilken i denna rapport betecknas 635, har separat avläsningsinstrument (beteckning Testo 635) och givare (beteckning 0572.6172) vilka visas i figur 2.4. Båda varianterna, det vill säga 605 och 635, bygger på en kapacitiv mätprincip där RF-sensorn, Testo®, är tillverkad av ett hygroskopiskt material. Kapacitansen ökar med ökande fukttinhåll. Givarna ska användas med ett dammskydd monterat över sensorn. Till givare 605 används kirurgtejp av märket "Scanpor". Till givare 635 (0572.6172) används ett därför avsett teflonfilter från Testo. Vid montering av Scanpor-tejp (Scanpor, Bard Medical,

Covington, USA) ska först den vridbara hylsan i änden av 605, som är monterad vid leverans, demonteras. Därefter monteras en 40 mm lång (10 mm bred) tejpbit på tvären över botten vilken därefter viks upp utmed givarens sidor för att täcka över hålen på sidorna. Hylsan återmonterades inte under mätningen, se figur 2.3.

Scanpor-tejpen anges som ånggenomsläpplig och på marknaden finns liknande tejper såsom en med handelsnamnet Micropore (Micropore, 3M Svenska AB, Kungälv, Sverige). Vid mätningarna monterades Scanpor-tejp enligt RBKs anvisningar men för att undersöka om det rådde påtaglig skillnad mellan Sacnpor och alternativ tejp genomfördes en fördjupad undersökning vilken redovisas i avsnitt 3.10. Vid den fördjupade undersökningen mättes fuktkapaciteten hos de två varianterna av tejp.



Figur 2.3 Demonteringsrutin för vridbar plasthylsa till Testo 605. Figuren till höger visar sensor med demonterad plasthylsa och skyddstejp applicerad. Se även figur 2.2.

Vid mätningarna med Testo 635 var sensorn försedd med teflonfilter enligt figur 2.4. För att undersöka filtrets eventuella inverkan på mätresultaten gjordes mätningar av fuktkapaciteten dels med teflonfilter och dels med öppet gallerskydd över sensorn, se avsnitt 3.10. Avläsning av RF och temperatur utfördes 5-10 sekunder efter det att instrumentets strömbrytare aktiverats. Mellan individuella avläsningar slogs instrumentet av.



Figur 2.4 Testo 635 avläsningsinstrument samt tillhörande RF-givare, Testo 05726172, försedd med teflonfilter.

Vaisala HMP44 och HMP110 (tillverkarbeteckning HMP40S)

Givare av fabrikat Vaisala och modell HMP44 samt HMP110 visas i figur 2.5 respektive figur 2.6. Dessa givare bygger på en kapacitiv mätprincip och RF-sensorn, Humicap®, är tillverkad av ett hygroskopiskt material. Kapacitansen ökar med ökande fuktinnehåll. De båda mätutrustningarna har separerade avläsningsinstrument och givare och sensorerna var i båda fallen försedda med gallerskydd och pappersfilter under mätningarna. HMP110 kommer att ersätta HMP44 som inte tillverkas längre. Huvudsakliga skillnader är att HMP110 har aktiv elektronik placerad i sensorn. Detta möjliggör att resultat från kalibrering kan lagras i varje enskild givare vilket möjliggör att kalibrerad RF kan avläsas direkt vid mätning. Detta används inte vid mätning enligt RBK-systemet och användes inte i detta projekt. Den senare givaren har sensorhus av metall och är försedd med kontakt för kabelanslutning istället för kabel fast monterad på givaren som var fallet för den tidigare versionen.



Figur 2.5 Vaisala HMI41 avläsningsinstrument samt tillhörande RF-givare HMP44 försedd med gallerskydd och pappersfilter.



Figur 2.6 Vaisala HM40 avläsningsinstrument samt tillhörande RF-givare HMP110 försedd med gallerskydd och pappersfilter.

HumiGuard

HumiGuard-givare (två stycken med transparenta plasthylsor) samt kontaktklämmor (två stycken i svart plast) visas tillsammans med avläsningsinstrument i figur 2.7. Givarna kan inte återanvändas utan förbrukas vid var enskild mätpunkt. Vid montering kopplas givaren samman med en givarkontakt (se till höger i figuren). Med hjälp av ett monteringsdon förs givare och givarkontakt ner i mätröret som monterats i borrhålet i betongen. Givarkontakten trycks fast mot ett säte nere i mätröret och ett slutet utrymme bildas i botten på mätröret med givaren placerad omedelbart ovanför betongytan. Givarna har ett bästföredatum på sex

månader från tillverkningen. Vid avläsning kopplas avläsningsinstrumentets kabelklämmor till de gul/svarta trådarna som i sin tur är kopplade till kontaktdonet i den grå gummipluggen. RF-givaren innehåller en hygroskopisk elektrolyt, från vilken så mycket vatten upptas eller avges, att elektrolyten ständigt står i fuktjämvikt med betong i borrhålets botten. Dess elektriska ledningsförmåga, konduktans med enhet mikrosiemens (μS), varierar med RF hos omgivande luft. Efter avläsning av givaren används en mjukvara för att beräkna RF och temperatur utifrån avlästa värden i μS .



Figur 2.7 HumiGuard avläsningsinstrument med synlig display samt två tillhörande RF-givare med semitransparent plasthölje. Den högra sensorn är kopplad till en givarkontakt som används vid försegling av mätrör vid mätning i borrhål. Till vänster två anslutningsklämmor, med svart plasthölje, för anslutning till sensor vid avläsning.

2.3.3 Kalibreringsrutiner

HumiGuard

HumiGuard-systemet kompenserar för sensorernas drift genom att ett antal extra givare från samma tillverkningssats (lot) som de man använder för mätningarna, placeras i ett referensblock enligt figur 2.8. Referensblocket har stor termisk tröghet på grund av stor massa och innehåller fyra hålrum för montering av referensceller. Ett hål på minst 4 mm görs i referenscellens lock innan de placeras i referensblocket. Två till fyra RF-givare ur aktuell lot, tillverkningssats, kallade referensgivare placeras i referensblock tillsammans med varsin referenscell, som har kalibreringscertifikat från erkänt laboratorium och alstrar en RF på 85%. I samband med att givare i borrhål avläses, avläses också lotens referensgivare och avlästa värden används vid beräkning av RF och temperatur. RF-givare i en lot är inbördes likvärdiga i alla avseenden och avläsningar från referensgivare kan sägas utgöra en stickprovsmässig

kalibrering av givar-loten. Systemet med referensblock ersätter konventionella kalibreringsrutiner som normalt genomförs i precisionsfuktkammare.



Figur 2.8 HumiGuard referensblock och referenscell som används för kontroll av RF-sensorernas drift under mätperioden.

Vaisala och Testo

De provade givarna av fabrikaten Vaisala och Testo, oavsett modell, kalibrerades före och efter mätningarna i precisionsfuktkammare (Thunder scientific 2500). Tiden mellan de båda kalibreringsomgångarna varierade för de olika givarna och var som längst upp till cirka sex månader. Kalibreringen gjordes vid temperaturen 20 °C och RF i stegen 75, 85, 90 och 95%. Varje steg pågick under en varaktighet av minst sex timmar för att uppnå jämvikt. Precisionsfuktkammarens mätosäkerhet var $\pm 0,45\%$ RF och $\pm 0,03$ °C med täckningsfaktor $k=1$.

Vaisala-givarna av modell HMP44 avlästes delvis med handavläsningsinstrument, se figur 2.5, och delvis med Pico datalogger (Pico Technology, Cambridgeshire, UK). För att uppnå korrekta kalibreringsdata för mätsystemet togs separata kalibreringskurvor fram dels för fallet när HMP44-givaren avlästes med handavläsningsinstrument och dels när den var kopplad till datalogger.

Som komplement till kalibreringarna i precisionsfuktkammare kontrollerades givarnas kalibreringskurva både före och efter enskilda mätningar mot mättad saltlösning enligt RBKs fuktmättningsmanual version 5.3, RBK [2015], för egenkontroll av RF-givare. Kontrollen gjordes mot saltlösningen Kaliumklorid (KCl) av kvalitet pro-analysi vilken gav 85,1% RF vid 20 °C, se Nevander och Elmarsson [1994]. Mättade saltlösningar är emellertid känsliga för temperaturvariationer vilket kräver en stabil omgivningstemperatur för att de ska ge en konstant relativ fuktighet. Saltkontrollerna genomfördes därför i låda med omslutningsväggar

av 50 mm cellplast, se figur 2.9, vilken var försedd med aktiv temperaturkontroll som gav temperaturen $20 \pm 0,1$ °C.



Figur 2.9 Lagringskammare av extruderad cellplast XPS med temperaturstyrning för lagring av sensorer under saltkontroll.

2.3.4 RF-mätning i borrhål

Före RF-mätningarna startade lagrades alla provkroppar i samma utrymme under samma tidsperiod i två månader räknat från gjutning. Alla prov utom de märkta 38 (vct= 0,38) tilläts torka genom överytan medan de märkta 38 var förseglade under hela förloppet, det vill säga både under lagringen och mätningen. Under lagringen var proven förseglade med lock av plåt vilket demonterades cirka en vecka före borrhningen av provpunkter. I samband med att locken demonterades förseglades provens övre yta med en 2 mm tjock butylduk (SealEco AB, Värnamo, Sverige). Detta gjordes genom att ett cirkulärt stycke av duken skars till med samma diameter som plåtburkens innerdiameter. Butylduken placerades på betongens yta och anslutningen mellan butylduken och plåtbuken förseglades med butylbaserad fogmassa (Icopal, Malmö, Sverige), se tre stycken provkroppar till höger i figur 2.10.

I var provkropp borrades hål för fyra mätpunkter med placering enligt Figur 2.11. Hålen borrades från överytan och ner till 40% av provkroppens tjocklek vilket motsvarar djupet 60 mm. Provhålen tilläts olika konditioneringstid innan respektive givare monterades beroende på fabrikat hos givare enligt RBK-systemet. Detta innebär i korthet att givare av fabrikat HumiGuard kan monteras direkt i samband med borrhning av mätthålen medan givare av fabrikat Vaisala och Testo får monteras tidigast tre dygn efter borrhning. Vid laboratorieförsöken inom denna undersökning, avseende RF-mätning i borrhål, följdes RBKs anvisningar, se RBK [2015].



Figur 2.10 RF-givare av olika modell och fabrikat monterade i provkroppar med placering enligt tabell 2.1. Tre av provkropparna är förseglade vilka kan observeras till höger i bild, genom att överytan är belagd med butylduk.



Figur 2.11 Exempel på provkropp under uttorkning med följande RF-givare monterade från vänster; 605 med tejp, HumiGuard, HMP44-Pico samt HMP110. Givarbenämningar enligt tabell 2.2.

2.3.5 RF-mätning på uttaget prov

Efter att borrhålsmätningarna avslutades togs prov ut från alla provkroppar för RF-mätning. RBKs riktlinjer för uttaget prov är i sin helhet inaktuella sedan hösten 2015 eftersom metoden utgick. Anledningen till att metoden utgick är delvis ett resultat av en tidigare undersökning, [Johansson 2014], där mätmetoderna borrhålsmätning och uttaget prov jämfördes. Slutsatserna från undersökningen var huvudsakligen att mätmetoden uttaget prov underskattar RF-nivån eftersom fukt förloras under provtagningsförfarandet.

Vid provtagningen till denna delstudie gjordes därför avsteg från RBKs tidigare riktlinjer för uttagning av prov. I stället för att använda kärnborr vid provtagningen, spräcktes de cylinderformade provkropparna med en hydraulisk press, se figur 2.12. I en tidigare studie, se Johansson [2012] avsnitt 3.4.3, gjordes jämförelser mellan RF-mätning på uttagna prov, dels enligt RBKs provtagningsrutin och dels enligt spräckprincipen, vilken tillämpas i denna studie och beskrivs i följande avsnitt. Den tidigare studien visade inte på någon tydlig avvikelse i RF mellan prov uttagna enligt de två olika principerna. Vid jämförelse av medelvärdet för ett antal prov med samma härdningsbetingelser, visade mätningen på prov uttagna enligt RBKs provtagningsrutin, på något lägre RF.

Vid provtagningen demonterades proven från plåtburkarna och placerades därefter i en hydraulisk press, se figur 2.12.



Figur 2.12 Proven spräcktes i hydraulisk press inför uttagning av provbitar för RF-mätning.

Proven togs från djupet 40% av cylinderns höjd, det vill säga 50-70 mm från ytan. För att få ut en större provmängd valdes provtagningsintervallet 20 mm istället för RBKs tidigare anvisning om 15 mm. Vid provtagningen spräcktes cylindern i fyra lika delar varav en del kan ses i figur 2.13. Efter spräckningen vilken tog cirka 30 sekunder märktes provtagningsdjupet som ett intervall om 50-70 mm från gjutytan, se figur 2.13.



Figur 2.13 Provbit efter spräckning för vidare uttagning av provbitar från tre djup som anges från gjutytan.

Vid provtagningsförfarandet samarbetade tre provtagare. En spräckte ut provbitar, samtidigt som två kollegor bilade ut provbitar och placerade dessa i provrör. Vid behov fick vissa av de utbilade proven sönderdelas med hammare för att rymmas i provrören och därefter förseglades provröret med gummikork, se Figur 2.14.



Figur 2.14 Uttagna provbitar från respektive djup placeras i glaströr som förseglas med gummikork i väntan på RF-mätning.

Enligt tidigare mätningar, se Åhs [2014], hade glaströren som användes här den totala volymen 71 cm^3 . En representativ provtagningsvolym i det tidigare projektet mättes till 22 cm^3 vilket ska jämföras med 15 cm^3 som är minsta tillåtna provtagningsvolym enligt RBKs

tidigare riktlinjer för uttaget prov. Provtagningsvolymen i detta projekt anses ligga väl i linje med de som mättes enligt Åhs [2014].

RF-mätning på de uttagna proven gjordes med givare av fabrikaten Vaisala och Testo, med två modeller av vardera fabrikat. De olika varianterna av givarna beskrivs detaljerat i avsnitt 2.2.2 och kalibreringsrutiner redovisas i avsnitt 2.2.3.

Före mätning på de uttagna proven konditionerades dessa i klimatbox tillsammans med RF-givarna för att minimera fel orsakade av temperaturskillnader, se figur 2.9. I klimatboxen där konditionering och mätning gjordes var temperaturen $20 \pm 0,1^\circ\text{C}$. Klimatboxen saknade emellertid RF-styrning. Vid RF-mätning i glasrören på de uttagna proven, se figur 2.15, monterades givarna efter olika lång konditioneringstid vilken tydligt framgår i avsnitt 3 där resultaten presenteras. I de flesta fall monterades givarna efter den minsta konditioneringstid som angavs i RBKs riktlinjer och i några fall tilläts en längre konditioneringstid eftersom den första möjliga dagen att montera givare inföll på en helgdag.



Figur 2.15 Mätning av relativ fuktighet på uttagna prov placerade i provrör med givare av fabrikat Vaisala HMP44.

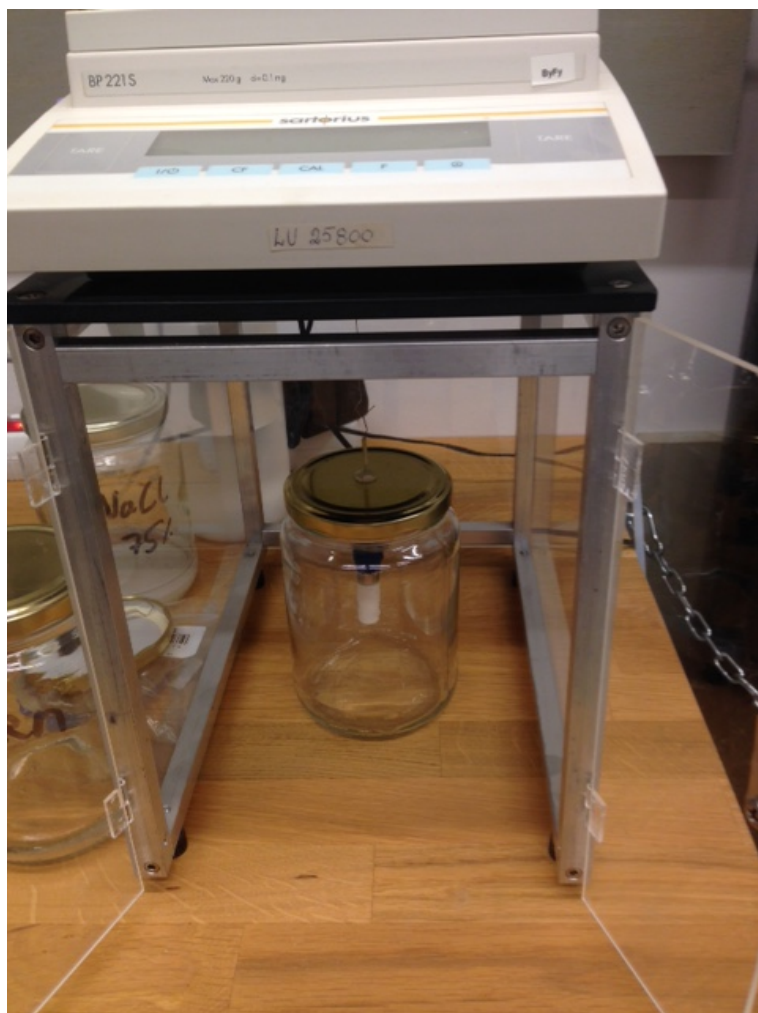
2.3.6 Inverkan av RF-sensors fuktkapacitet

Fuktkapaciteten hos de provade sensorerna samt tillhörande filter eller gallerskydd mättes under projektet eftersom det fanns en misstanke om stora skillnader mellan de olika mätsystemen. Vid mätning med en givare som har stor fuktkapacitet hos sensor och/eller filter kan detta innebära att RF-nivån hos betongen underskattas eftersom en del av fukten åtgår för att fukta upp sensor och filter. En hög fuktkapacitet har störst inverkan vid mätning på betonger med lågt vct och som har tillåtit lång härdningstid och därmed uppnått en tät struktur. En tät struktur hos betongen, medför en lägre fuktkapacitet (jämviksfuktkurva), vilket i sin tur resulterar i en större sänkning av RF-nivån när sensorn samt dess filter tillåts absorbera fukt från betongen.

Fuktkapaciteten mättes för olika RF-sensorer med eller utan tillhörande filter vid RF-nivåerna 35, 75, 85 och 94,5%. Inför försöket kapades merparten av givarna så att endast den del som

placerades i klimaten skulle representera den del som i praktiken har kontakt med betongen i borrhålen. Ett undantag var Vaisala HMP110 som inte kapades eftersom givarhuset, det vill säga skyddet för sensorn, var tillverkat i aluminium och kunde därmed inte absorbera fukt. Kabeluttaget till HMP110 förseglades däremot för säkerhets skull eftersom den del av utförandet var i plast, se figur 2.21 och 2.22. Hålet som uppstod på de kapade givarna förseglades med blå butylbaserad tätningsmassa. Butyl är ett material med mycket låg fuktgenomsläpplighet såväl som fuktabsorption, vilken också mättes vid försöket, se figur 2.28.

I vissa fall mättes fuktkapaciteten endast på filtret vilket framgår i figur 2.17–2.28 som visar de provade kombinationer av givare, filter och tätningsmassa. Proven, egentligen givarna med mera, exponerades för de olika RF-nivåerna i glasburkar, se figur 2.16. De olika RF-nivåerna skapades genom att burkarna försågs med mättade saltlösningar på botten och proven hänges fritt i ståltråd över saltlösningarna. Alla mätningar startade vid den lägsta RF-nivån och vid jämvikt flyttades respektive sensor till burk med närmast högre RF-nivå vilket gjordes genom att lock och givare flyttades som en enhet. Vägning kunde ske kontinuerligt under försöket eftersom locken var försedda med hål för den ståltråd som givarna var fixerade till.



Figur 2.16 Vägning av RF-sensor vid pågående exponering för olika RF-nivåer med hjälp av mättade saltlösningar i glasburkar.

De följande figurerna 2.17–2.27 nedan visar kombinationer av givare och/eller filter som provades med avseende på fuktkapacitet. I figuren 2.28 visas ett prov av den butylbaserade

tätningssmassa som användes för att försegla den kapade ytan hos givarna tillsammans med en balansvikt. Balansvikten, av rostfritt stål, var nödvändig eftersom den provade tätningssmassan hade låg vikt med följd att jämviktsläget var svårt att registrera med våg. Mängden tätningssmassa valdes så att den skulle representera den mängd som krävdes vid försegling av de kapade givarna.



Figur 2.17 HumiGuard-givare med sensor och plasthölje.



Figur 2.18 Kapad och förseglad HMP44-givare med sensor, gallerkydd och pappersfilter.



Figur 2.19 Kapad och förseglad HMP44-givare med sensor och gallerkydd utan filter.



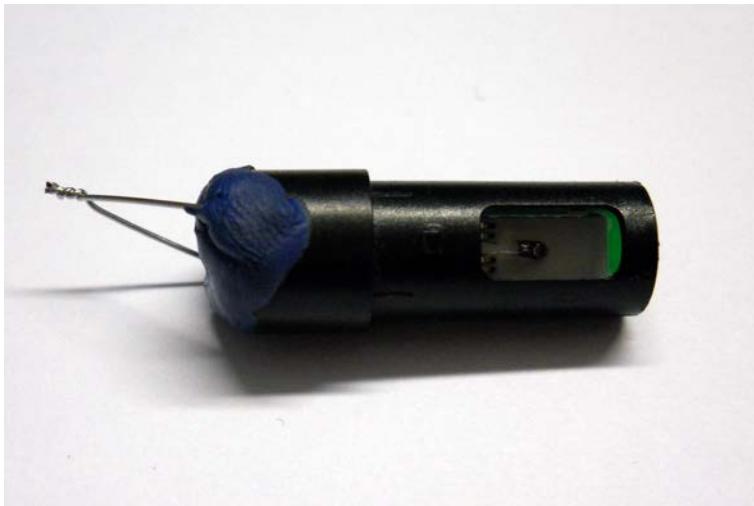
Figur 2.20 Kapad och förseglad HMP44-givare med sensor, gallerkydd och demonterat pappersfilter.



Figur 2.21 HMP110-givare med sensor, gallerkydd samt pappersfilter och förseglat kabeluttag i bakstycket.



Figur 2.22 HMP110-givare försedd med gallerskydd utan filter och förseglat kabeluttag i bakstycket.



Figur 2.23 Kapad och förseglad 605-givare med sensor utan skyddshuv.



Figur 2.24 Kapad och förseglad 605-givare med sensor utan skyddshuv och försedd med tejp (Micropor 10x40mm).



Figur 2.25 Kapad och förseglad 635-givare med sensor och teflonfilter.



Figur 2.26 Kapad och förseglad 635-givare med sensor och öppet gallerskydd.



Figur 2.27 Gallerskydd till 635-sensor.



Figur 2.28 Tättningsmassa av butyl (Platon) monterad tillsammans med referensvikt.

2.3.7 Kontroll av läckage genom RF-givare vid borrhålsmätning

Tätheten hos de olika RF-givarna och tillhörande system såsom plaströr och tättningsmassa provades. Alla givarkombinationer för borrhålsmätning som användes vid försöken provades, se tabell 2.2. Under försöket monterades givarna i tillhörande plaströr vilka i sin tur monterades i provrör av glas, se figur 2.29. Försegling mellan plaströr och provrör gjordes med samma tättningsmassa som användes då givarna monterades i betongproven och på samma sätt förseglades givarna i plaströren.

Före monteringen av givare fylldes vatten på i provrör till en höjd om två till tre centimeter från dess botten. Eftersom provrören innehöll fritt vatten under försöket var RF i intervallet 98-100% vilket bekräftades av givarnas utslag. Provrören med vatten och givare placerades i normal laboratoriemiljö och vägdes regelmässigt. Syfte var att registrera en förmodad viktminskning som följd av fuktläckage genom givare och/eller tätningssystem. För vissa av givarna kunde inte anslutningskabeln demonteras vilket tydligt framgår i figur 2.29.



Figur 2.29 RF-sensorer monterade i provrör av glas för kontroll av anslutningarnas täthet.

3 RESULTAT

3.1 INLEDNING

I detta avsnitt redovisas en utvald del av resultaten från steg 3 av studien och syftet har främst varit att visa på om det var möjligt att identifiera en brytpunkt med avseende på vattencementtal för vilket resultaten från borrhålsmätning och uttaget prov överensstämmer. Fuktkapaciteten hos givarnas aktiva del, det vill säga sensorn, redovisas också eftersom denna kan vara avgörande i strävan att finna och förklara orsaken till varför vissa fabrikat eller modeller av RF-givare visade systematiska avvikelser i förhållande till varandra. Samtliga resultat från de försök som beskrivs i avsnitt 2 redovisas i Appendix till denna rapport. Givarbeteckningar inom parantes används fortsättningsvis i rapporten.

3.2 RF-MÄTNINGAR

Resultat avseende RF-nivå från mätning i borrhål och på uttagna prov redovisas i tabellerna 3.1 till 3.3. För både borrhålen och de uttagna proven anges det första avlästa värdet tillsammans med värdet vid jämvikt samt differensen mellan dessa. De båda värdena är hämtade från resultaten i Appendix och värdet vid jämvikt har där markerats med en ring i respektive figur. En negativ differens innebär att den första avläsningen underskattade RF-nivån med det angivna beloppet. För prov med $vct \geq 0,4$ tillåter RBKs rutiner att första avläsningen kan ske tidigast 12 timmar efter montering av givaren medan motsvarande tid är två dygn när $vct < 0,4$. Av praktiska skäl gjordes den tidigaste avläsningen ett dygn efter montering av givare för prov med $vct \geq 0,4$ medan för prov med $vct < 0,4$ kunde RBKs krav om avläsning vid två dygn följas.

Tabell 3.1 Resultat från RF-mätning på uttagna prov, från enskilda mätpunkter, redovisade i % vid tiden för RBK-avläsning samt vid uppnådd jämvikt. Toleransen avseende RF mellan RBK-avläsning och jämviktsläge anges som negativ när RF underskattas vid tiden för RBK-avläsning.

Beteckning/provkropp	Vaisala HMP110 (HMP110)			Vaisala HMP44 (HMP44)		
	RF-nivå vid första avläsning 1 dygn efter givarmonitage	RF-nivå vid jämvikt	Avvikelse mellan avläsning vid 1 dygn och vid jämvikt	RF-nivå vid första avläsning 1 dygn efter givarmonitage	RF-nivå vid jämvikt	Avvikelse mellan avläsning vid 1 dygn och vid jämvikt
50B-1				82,9	83	-0,1
50B-1				83,5	83,5	0
50B-2	81,9	82,0	-0,1	82,6	82,6	0
50B-3	82,8	82,6	0,2	83,5	83	0,5
55B-1	84,7	84,8	-0,1	82,4	82,1	0,3
55B-2	83,8	84,5*	-0,7	85,5	85,3	0,2
55B-3	84,3	84,7	-0,4	86,1	85,9	0,2
50BS-1				81,6	81,6	0
50BS-1				81,0	81,3	-0,3
50BS-2	82,4	82,5	-0,1	83,0	82,2*	
50BS-3	81,9	81,8	0,1			
50BS-3	80,9	81,2	-0,3			
55BS-1	83,1	83,3	-0,2	81,6	81,6	0
55BS-2	85,1	85,1	0	84,0	84,0	0
55BS-3	84,9	84,9	0			
55BS-3	82,2	82,3	-0,1			

* Värdet från sista avläsningen eftersom jämvikt inte nåddes under mätperioden

Resultaten i tabell 3.1 från mätning på uttagna proven visar att Vaisala HMP110 behöver något längre tid till jämvikt eftersom differensen mellan första avläsning och slutavläsning i flera fall är negativ vilket inte förekommer hos Vaisala HMP44, förutom i något fall. I tabellerna 3.2 och 3.3 som följer finns sammanställningen av alla resultaten från borrhålsmätningarna. Resultat från Pico-loggade HMP44 justerades enligt avsnitt 9 i Appendix med hänsyn värmeutvecklingen hos de loggade givarna.

Tabell 3.2 Resultat från RF-mätning i borrhål från enskilda mätpunkter redovisade i % vid tiden för RBK-avläsning samt vid uppnådd jämvikt. Toleransen avseende RF mellan RBK-avläsning och jämviktsläge anges som negativ när RF underskattas vid tiden för RBK-avläsning.

Beteckning/provkropp	Vaisala HMP110 (HMP110)			Loggad Vaisala HMP44 (HMP44 Pico)			HumiGuard		
	RF-nivå vid första avläsning efter givarmonterage	RF-nivå vid jämvikt	Avvikelse mellan första avläsning och avläsning vid jämvikt	RF-nivå vid första avläsning efter givarmonterage	RF-nivå vid jämvikt	Avvikelse mellan första avläsning och avläsning vid jämvikt	RF-nivå vid första avläsning efter givarmonterage	RF-nivå vid jämvikt	Avvikelse mellan första avläsning och avläsning vid jämvikt
38B-1				87,7 ²	87,6	0,1			
38B-2									
38B-3				87,6 ²	86,3*				
50B-1	82,9 ¹	83,7	-0,8	84,4 ^{0,5}	84,8	-0,4	86,2 ⁷	85,2*	
50B-2	83,5 ¹	84,1	-0,6				87,9 ⁷	86,8*	
50B-3	83,5 ¹	84,1	-0,6	84,4 ^{0,5}	84,5	-0,1	86,2 ⁷	85,2*	
55B-1	84,1 ¹	84,3	-0,2	85,8 ^{0,5}	85,8	0,0	89,0 ⁷	88,3*	
55B-2	85,6 ¹	86,3	-0,7				88,6 ⁷	87,8*	
55B-3	85,9 ¹	86,8	-0,9				88,4 ⁷	87,5*	
50BS-1	81,4 ¹	82,0	-0,6	84,5 ^{0,5}	84,9	-0,4	84,5 ⁷	82,5*	
50BS-2	83,1 ¹	83,6	-0,5				85,1 ⁷	83,5*	
50BS-3	82,6 ¹	83,0	-0,4	84,0 ^{0,5}	84,4	-0,4	85,4 ⁷	83,9*	
55BS-1	83,7 ¹	83,3	0,4	85,1 ^{0,5}	85,2	-0,1	85,5 ⁷	84,5*	
55BS-2	83,7 ¹	84,2	-0,5				87,1 ⁷	85,8*	
55BS-3	83,2 ¹	83,4	-0,2				87,1 ⁷	85,6*	

* Värdet från sista avläsningen eftersom jämvikt inte nåddes under mätperioden

y^x Där x anger tiden i dygn från montering av givare till första avläsning

Enligt resultaten i tabell 3.2 nådde Vaisala HMP110 jämvikt under mätningen men RF-nivån vid RBK-avläsningen underskattades med cirka 0,5-1% jämfört med jämviktsvärdet. Vaisala HMP44 nådde jämvikt vid tiden för RBK-avläsning och ingen tydlig avvikelse kunde noteras. HumiGuard-givarna gav stigande RF-nivåer från första avläsningen och något jämviktsläge kunde generellt inte identifieras för givarna vilket i praktiken innebär att avläsning enligt RBKs fuktmätningrutiner överskattar RF-nivån. Avläsning enligt RBK tillåts tidigast 4 dygn efter givarmonterage men av praktiska skäl kunde avläsning av givarna inte genomföras förrän efter 7 dygn.

Tabell 3.3 Resultat från RF-mätning i borrhål från enskilda mätpunkter redovisade i % vid tiden för RBK-avläsning samt vid uppnådd jämvikt. Toleransen avseende RF mellan RBK-avläsning och jämviktsläge anges som negativ när RF underskattas vid tiden för RBK-avläsning.

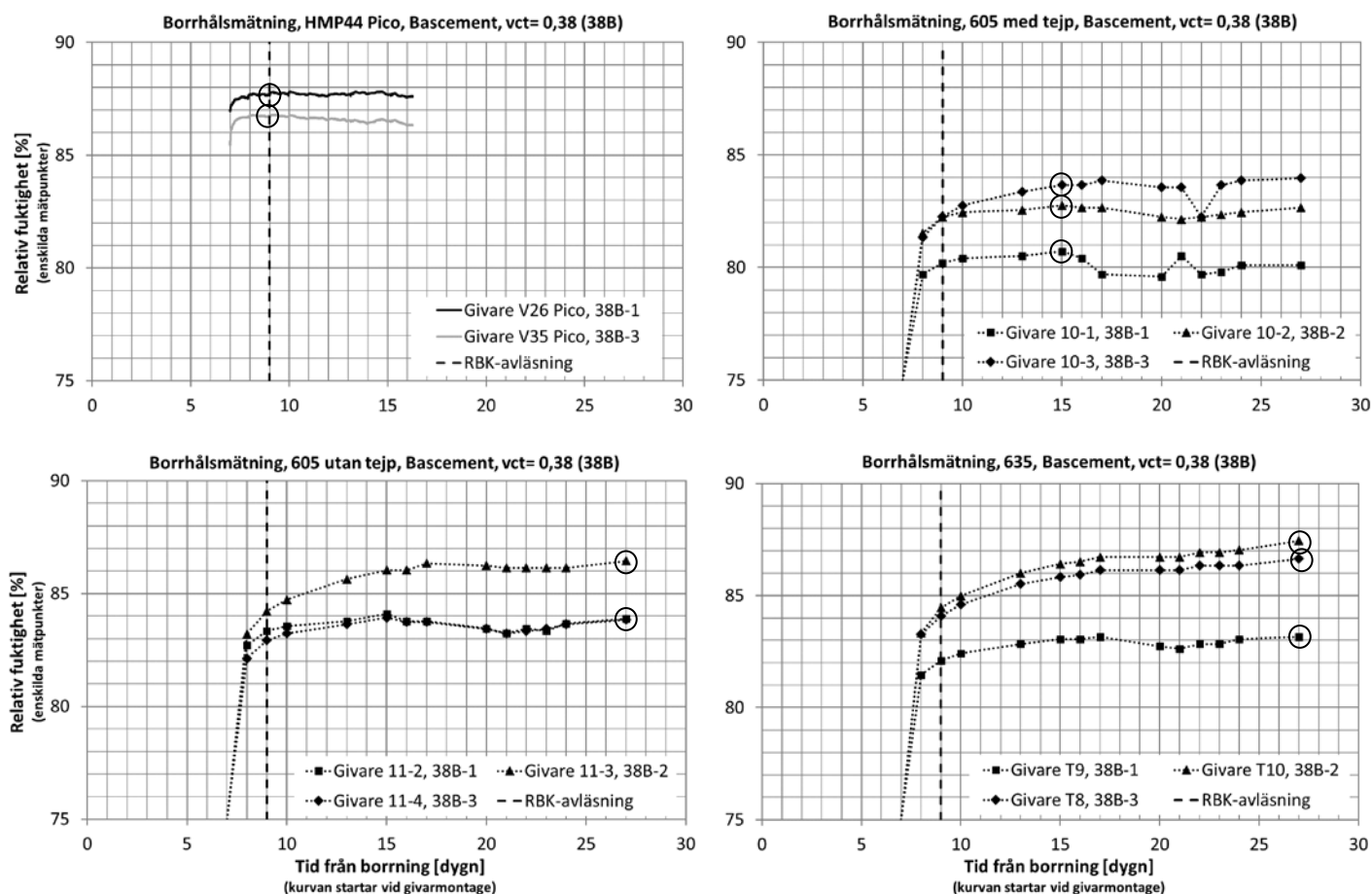
Beteckning/prov kropp	Testo 605-H1 med tejp (605 med tejp)			Testo 605-H1 utan tejp (605 utan tejp)			Testo 05726172 med teflonfilter (635)		
	RF-nivå vid första avläsning efter givar montage	RF-nivå vid jämvikt	Avvikelse mellan första avläsning och avläsning vid jämvikt	RF-nivå vid första avläsning efter givar montage	RF-nivå vid jämvikt	Avvikelse mellan första avläsning och avläsning vid jämvikt	RF-nivå vid första avläsning efter givar montage	RF-nivå vid jämvikt	Avvikelse mellan första avläsning och avläsning vid jämvikt
38B-1	80,2 ²	80,7	0,5	83,6 ²	83,8*		82,1 ²	83,2	-1,1
38B-2	82,2 ²	82,8	-0,6	84,7 ²	86,4*		85,0 ²	87,4*	
38B-3	82,3 ²	83,7	-1,4	82,9 ²	83,8*		84,1 ²	86,6*	
50B-1	81,5 ¹	81,7	-0,2						
50B-2	81,2 ¹	82,0	-0,8				83,8 ¹	85,7 ⁸	-1,9
50B-3									
55B-1	84,0 ¹	84,8	-0,8						
55B-2							86,1 ¹	87,0	-0,9
55B-3	83,6 ¹	84,8	-1,2						
50BS-1	77,3 ¹	78,2	-0,9						
50BS-2	79,5 ¹	80,2	-0,7						
50BS-3	78,4 ¹	79,0	-0,6						
55BS-1	80,9 ¹	83,0	-2,1						
55BS-2	81,1 ¹	82,4	-1,3						
55BS-3	80,0 ¹	82,0	-2,0						

* Värdet från sista avläsningen eftersom jämvikt inte nåddes under mätperioden

y^x Där x anger tiden i dygn från montering av givare till avläsning

Enligt resultaten i tabell 3.3, för betong vct 0,38, uppnådde inte Testo 605 utan tejp eller Testo 635 jämvikt under mätperioden. Avläsning enligt RBKs fuktmätningrutiner innebär att RF-nivån underskattas. För samtliga vct gjordes mätning med Testo 605 försedd med tejp som visade att jämviktsläge nåddes under mätperioden men att RF-nivån underskattades med upp emot 2% vid tidpunkten för RBK-avläsning. RF-nivån mättes endast i två mätpunkter med Testo 635, en mätpunkt i vardera betongen, vct 0,5 och vct 0,55. För inget av fallen nåddes jämvikt vid tidpunkten för RBK-avläsning och RF-nivån underskattades mest för betongen med vct 0,50.

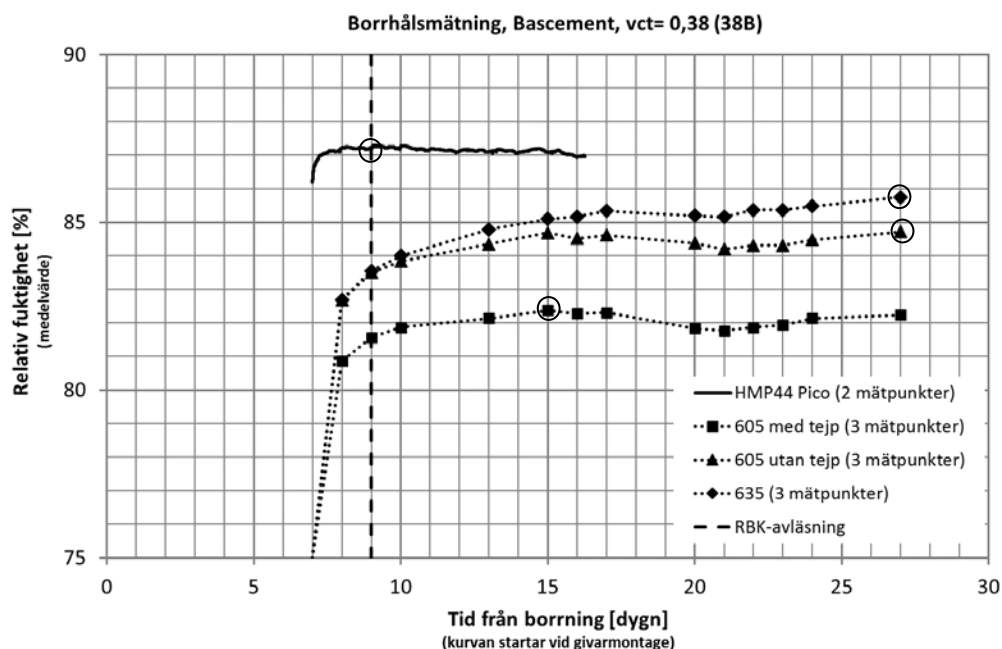
Figur 3.1 visar RF-nivåerna för borrhålsmätningar i betong vct 0,38 som funktion av tid för enskilda mätpunkter. Var och en av de fyra delfigurerna visar ett fabrikat eller en variant av givare och resultaten från Testo 605 är uppdelade med hänsyn till om sensorn var försedd med skyddstejp eller var oskyddad. Eftersom resultaten representerar enskilda mätpunkter ger avvikelserna mellan de olika serierna i respektive delfigur en bild av spridningen mellan olika mätpunkter och givare. Observationer markerade med ring anger avläsning vid jämvikt alternativt den sista möjliga avläsningen före respektive mätning avslutades. I tabell 3.1 till 3.3 har de fall där jämvikt inte nåddes markerats med asterisk (*).



Figur 3.1 Relativ fuktighet mätt i borrhål med givare av olika fabrikat eller modell för betong med vct= 0,38. Figurerna är uppdelade efter givarnas fabrikat eller modell och diagrammen visar resultat från enskilda mätpunkter. Vaisala-givarna loggades medan Testo avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. Samtliga givare monterades 7 dygn efter borrhål. Avläsningar markerade med ring används som jämviktsvärden till sammanställningen i tabell 3.2-3.3.

Resultaten i figur 3.1 anger stor spridning, upp till cirka 4% RF, mellan enskilda mätpunkter för en viss variant av givare. Eftersom mätningarna med de olika givarna gjordes med olika antal givare kan rimligen inte spridningen mellan de olika givarvarianterna jämföras. RF-nivån hos Testo-givarna, både 605 med och utan tejp samt 635, steg under hela mätförloppet och något jämviktsläge kunde inte identifieras under de 20 dygnen givarna var monterade i borrhålen.

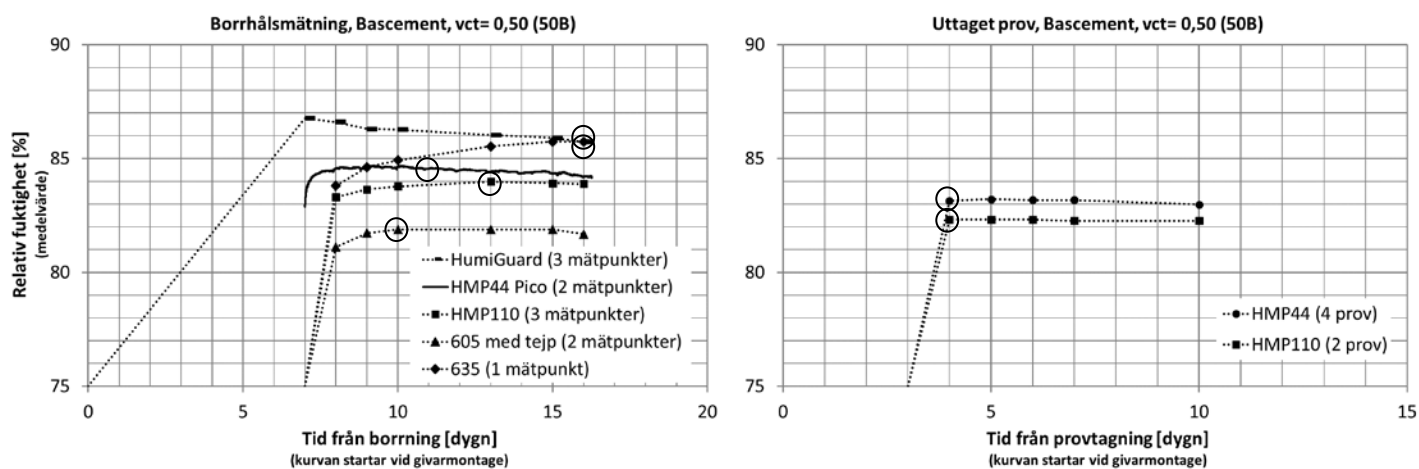
En sammanställning av resultaten i figur 3.1 visas som medelvärde för respektive fabrikat och variant av givare i figur 3.2. Genom medelvärdesbildningen döljs spridningen mellan de individuella mätpunkterna med skillnaden i RF-nivå mellan de olika givarfabrikaten blir tydligare. Resultaten från proven med de två högre vct-nivåerna, 0,50 och 0,55, visas som medelvärde för de olika fabrikaten eller varianterna av givare enligt figur 3.3 och 3.4.



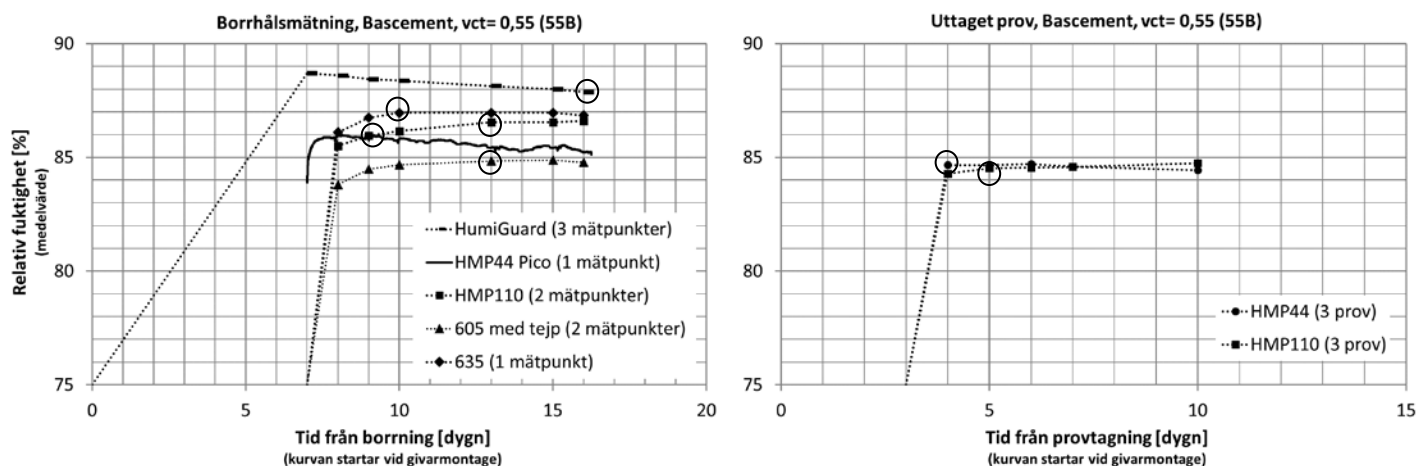
Figur 3.2 Relativ fuktighet mätt i borrhål med givare av olika fabrikat eller modell för betong med vct= 0,38. Figuren visar medelvärde av två eller tre mätpunkter uppdelade efter givarnas fabrikat eller modell. Vaisala-givarna loggades medan Testo avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. Samtliga givare monterades 7 dygn efter borrning. Avläsningar markerade med ring används som jämviktswärden.

Resultaten för vct 0,38 i figur 3.2 visar att Testo 605 utan tejp och Testo 635 ökar under hela mätförloppet, även efter att de varit monterade 20 dygn i borrhål. Testo 605 med tejp intar ett jämviktssläge åtta dygn efter givarmontage. Detta innebär att RF-nivån vid tidpunkten för RBK-avläsning kan underskattas med mer än 2%-enheter för Testo 635. När det gäller Testo 605 med tejp visar den lägst RF, både vid tidpunkten för RBK-avläsning och vid jämvikt. Den Pico-loggade Vaisala HMP44 nådde jämvikt snabbt, vilken uppnåddes vid tidpunkten för RBK-avläsning. Givaren visade på något sjunkande beteende med tiden vilket sannolikt kan förklaras med att loggningen resulterade i värmeutveckling hos givaren. Effekten av givarens värmeutveckling har undersökts och redovisas i avsnitt 9 i Appendix. Redovisat jämviktssläge har korregerats med hänsyn till påverkan av värmeutveckling hos givaren.

Figureorna 3.3 och 3.4 visar jämförelse av RF-nivåer med olika mätmetoder för betong med vct 0,50 respektive 0,55. Resultaten utgör medelvärde av flera givare av samma slag utom i något fall där en viss givare endast förekommer i en mätpunkt. De båda figurena 3.3 och 3.4 är uppdelade så att den vänstra delfiguren visar resultat från borrhålsmätning medan den högra visar resultat från mätning på uttagna prov.



Figur 3.3 Relativ fuktighet mätt i borrhål (vänstra figuren) och på uttaget prov (högra figuren) för betong med vct= 0,50. I respektive figur visas resultat från givare av olika fabrikat eller modell som medelvärden, utom för 635 som endast var monterad i en mätpunkt. HMP44 Pico för borrhålmätning loggades medan övriga givare avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. Avläsningar markerade med ring används som jämviktsvärden till sammanställningen i tabell 3.1-3.3.



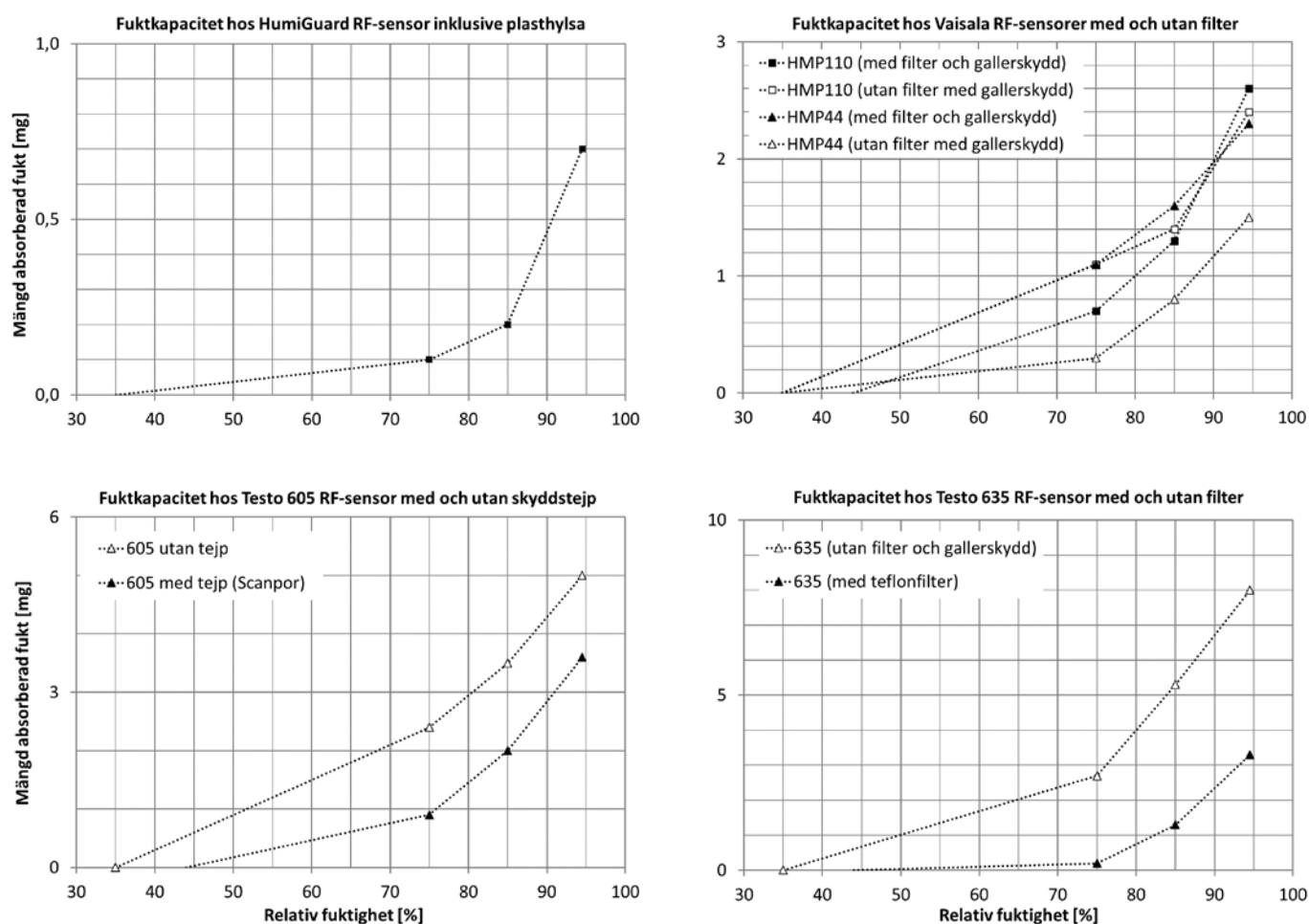
Figur 3.4 Relativ fuktighet mätt i borrhål (vänstra figuren) och på uttaget prov (högra figuren) för betong med vct= 0,55. I respektive figur visas resultat från givare av olika fabrikat eller modell som medelvärden, utom för 635 och HMP44 Pico som endast var monterade i en mätpunkt. HMP44 Pico för borrhålmätning loggades medan övriga givare avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. Avläsningar markerade med ring används som jämviktsvärden till sammanställningen i tabell 3.1-3.3.

Vid en jämförelse av resultaten från borrhålmätningarna i figurerna 3.3 och 3.4 är spridningen mellan de olika givarna cirka 3%-enheter för vct 0,55 och för vct 0,5 ökar spridningen till 4%-enheter. För borrhålmätningarna visade HumiGuard högst värde även om den sjönk under hela mätförloppet. Den borrhålsmonterade Testo 635 visade stigande RF under hela förloppet för vct 0,50 men för vct 0,55 nåddes jämvikt efter tre dygns montering.

Sammanfattningsvis råder systematisk spridning om cirka $\pm 2\%$ RF mellan olika fabrikat eller varianter av borrhålsmonterade givare. Spridningens storlek är anmärkningsvärt stor i förhållande till resultat från tidigare borrhålsmätningar som gjorts i projektets steg 1. Orsaken till skillnaden, det vill säga att dessa borrhålsmätningar ger större spridning jämfört steg 1, är sannolikt att bindemedelssammansättningen har förändrats. I projektets steg 1 var bindemedlet Byggcement medan dessa mätningar är gjorda på betong med Bascement som bindemedel vilket innehåller tillsats av flygaska. Oavsett spridningen hos borrhålsmätningarna har det inte varit möjligt att identifiera rimlig överensstämmelse mellan resultaten från de uttagna proven och borrhålsmätningarna för någon av vct-nivåerna 0,50 eller 0,55.

3.3 FUKTKAPACITET HOS RF-GIVARE

I figur 3.5 redovisas fuktkapaciteten för de RF-givare som användes vid mätningarna och i förekommande fall provades givarna med och utan filter eller skyddstejp. Figurerna är uppdelade efter givarfabrikat eller variant av givare och samtliga konditionerade till 33% relativ fuktighet före försöket påbörjades. Därefter ökades den relativa fuktigheten stegvis till 75, 85 och 95% varefter jämvikt inväntades.



Figur 3.5 Fuktkapacitet för RF-sensorer, HumiGuard, Vaisala och Testo, under stegvis absorption från 35% relativ fuktighet med jämvikt vid 75, 85 och 95% relativ fuktighet. Undersökningen gjordes för två varianter av Vaisala, HMP44 och HMP110, samt två varianter av Testo, 605 och 635.

Vid en jämförelse av fuktkapaciteten hos de olika givarna med filter och i förekommande fall gallerskydd, se fyllda punkter, kan dessa ungefärligen rangordnas efter ökande fuktkapacitet. En sådan rangordning innebär att HumiGuard har lägst fuktkapacitet och i stigande ordning följer Vaisala HMP44, Vaisala HMP110, Testo 635 och slutligen Testo 605 med högst fuktkapacitet. Skillnaderna i fuktkapacitet kan vara en möjlig förklaring till att HumiGuard ofta visar höga värden jämfört med övriga givare medan Testo 605 i många fall visar låga värden.

När det gäller Testo 605 och Testo 635 registrerades markant lägre fuktkapacitet när dessa var försedda med tejp respektive teflonfilter, jämfört med fallet då tejp och teflonfilter saknades. Detta borde egentligen vara orimligt eftersom tejp och teflonfilter har mätbara fuktkapaciteter. Förklaringen till att båda givarna visade lägre fuktkapacitet med tejp eller teflonfilter är sannolikt att dessa båda skyddsskikt har så pass högt ånggenomgångsmotstånd att de utgör en fuktskyddande barriär. Detta får till följd att tiden till jämvikt blir mycket lång vilket tydligt noterades vid borrhålsmätning i betong med lågt vct för de båda givarna.

3.4 FUKTLÄCKAGE GENOM RF-GIVARE

Resultaten från läckagetest av RF-givarnas tätningssystem redovisas detaljerat i avsnitt 10 i Appendix. Sammanfattningsvis resulterade läckagetestet i att det som mest avgick cirka 10 mg vatten under 30 dygn. Hur detta påverkar RF-nivån i provhålet är mycket komplicerat att avgöra utan omfattande datorsimulering. Resultatet från en datorsimulering kommer emellertid också att bjuda på osäkerheter eftersom en rad antagande måste göras. Uppskattningsvis resulterar det ackumulerade läckaget under 30 dagar i en sänkning av RF-nivån om cirka 0,2%. Detta förutsätter att effekten av förlorad fukt är likvärdig både för uttaget prov och borrhålsmätning. För de testade mätmetoderna är effekten av läckage försumbar. Givaren sitter normalt monterad 12 – 48 timmar vilket ju är en bråkdel av de 30 dygnen som försöken pågick.

4 SAMMANFATTNING AV RESULTAT

4.1 RF-MÄTNINGAR

4.1.1 Mätning på betong vct 0,38

HMP44 uppnådde jämvikt vid tidpunkten för RBK-avläsning vilket är 48 timmar efter givarmontage, medan Testo behövde längre tid. Modellen 605, med och utan tejp, samt 635 visade generellt låga RF-nivåer jämfört med Vaisala och då speciellt 605 med tejp. 635 verkar vara den givare som krävde längst tid till jämvikt och vid tiden för RBK-avläsning, visade 635 cirka 2% lägre RF jämfört med slutavläsningen som gjordes 18 dygn senare. Enligt resultaten från Steg 1 gav mätning på uttaget prov lägre RF än vid borrhålsmätning för vct 0,38, se Johansson [2014].

4.1.2 Mätning på betong vct 0,50

Uttagna prov visade generellt på låg RF-nivå oavsett givare men även borrhålsmonterad 605 med tejp visade låga värden. RF hos borrhålsmonterade HumiGuard minskade som funktion av tiden under hela mätförloppet utan att jämvikt uppnåddes.

Testo 605 med tejp visade låga RF-nivåer jämfört med Testo 635 samt Vaisala. 635 behövde cirka åtta dygn för att uppnå jämvikt och vid mätperiodens slut visade den 2% högre RF än vid tidpunkten för RBK-avläsning. Testo 605 med tejp behövde tre dygn från givarmontage i borrhål för att uppnå jämvikt. Vaisala HMP110 behövde mellan tre till sex dygn för att komma till fuktjämvikt. Någon exakt tidpunkt går inte att fastställa eftersom avläsning inte utfördes dygn fyra och fem på grund av att det var helg.

Mätningarna med Vaisala HMP44 och HMP110 på uttagna prov nådde snabbt ett tillfredsställande jämviktsläge cirka ett respektive två dygn efter montering. Vid jämförelsen med alla mätmetoder för denna betongsammansättning visade uttagna proven lägst RF-nivå tillsammans med borrhålsmätning utförd med 605 och tejp.

4.1.3 Mätning på betong vct 0,55

Testo 605 visar låga RF-nivåer jämfört med 635 och ingen av givarna nådde jämvikt vid tidpunkten för RBK-avläsning, vilket är 12 timmar efter givarmontage vid detta vct. Testo 635 bedöms behöva vara monterade minst tre dygn för att uppnå ett tillfredsställande jämviktsläge och Testo 605 i minst sex dygn. För Vaisala HMP110 behövde två av givarna vara monterade sex dygn medan den tredje givaren nådde jämvikt två dygn efter givarmontage.

Den loggade borrhålsmätningen med Vaisala HMP44 visade att jämvikt inte uppnåddes till tidpunkten för RBK-avläsning. För att uppnå jämvikt krävdes det att givaren var monterad cirka ett dygn.

För HumiGuard minskade RF-nivåerna för samtliga mätpunkter som funktion av tiden varför jämviktsläget var omöjligt att fastställa.

Mätningarna med Vaisala HMP44 och HMP110 på de uttagna proven visade generellt på lägre RF jämfört med borrhålsmätningarna förutom vid mätning med Testo 605 med tejp som gav likvärdiga resultat. De uttagna proven nådde fuktjämvikt efter ett dygn för HMP44, två dygn för en av HMP110-givarna och sju dygn för de resterande två HMP110.

4.1.4 Mätning på betong vct 0,50 med slagg

Testo 605 med tejp visade lägst RF-nivå jämfört med alla andra mätningar inklusive de på uttagna prov. Två av de tre 605-givare bedömdes nå jämvikt efter att de varit monterade minst 3 dygn vilket innebär att RBKs krav på jämvikt är otillräckligt.

Borrhålsmätningar med HMP110 behövde mellan två till sex dygn för att uppnå ett rimligt jämviktsläge. RBKs riktlinjer om tillåten avläsning efter 12 timmar, vid ett vct $\geq 0,40$, är inte ett tillräckligt kriterium.

För HumiGuard sjönk RF-nivåerna för mätpunkterna som funktion av tiden.

Vid borrhålsmätning måste HMP44 vara monterad cirka två dygn för att uppnå jämvikt vilket innebär att RBKs riktlinjer om tillåten avläsning efter 12 timmar inte fungerar.

Anledningen till att flera av givarna behövde längre tid till jämvikt för denna mätning, jämfört med motsvarande mätning på vct 0,5 utan tillsats av slagg, kan vara ett resultat av att betongen sannolikt får en minskad fuktkapacitet med slaggtillsats. Betongens minskade fuktkapacitet gör att fukten som åtgår för att fukta upp sensorn till jämviktsläget måste hämtas från större djup. Den längre transportvägen gör att tiden till jämvikt mellan sensor och betong blir längre. Omvänt gäller att en betong med hög fuktkapacitet har tillräcklig mängd fukt på borrhålets ytor för att fukta upp sensorn till jämvikt vilket då går snabbare.

Resultat från individuell RF-mätning på uttagna prov visas i figur 31 och 32 i Appendix för HMP44 och HMP110. Tid till fuktjämvikt varierade mellan ett till tre dygn. För en av HMP44-givarna var avläst värde konstant sjunkande. Vid jämförelsen med alla mätmetoder för denna betongsammansättning visade uttagna proven lägst RF förutom vid borrhålsmätning utförd med 605 och tejp vilken visade lägre.

4.1.5 Mätning på betong vct 0,55 med slagg

Testo 605 med tejp visade lägst RF-nivå och för denna betongsammansättning, även jämfört med de uttagna proven. Två av givarna Testo 605 behövde vara monterade minst sex dygn medan den tredje givaren behövde åtta dygn för att nå jämvikt vilket visade att RBKs krav på jämvikt är otillräckligt.

RF-nivåerna för HumiGuard var högst och minskade som funktion av tiden.

För de borrhålsmonterade HMP110 nåddes fuktjämvikt efter cirka sex dygn och således är RBKs jämviktskriterium, som gäller avläsning efter 12 timmars montering, för detta vct inte tillräckligt.

För denna betongsammansättning påträffades bättre överensstämmelse mellan resultaten från borrhålsmonterade givare och de uttagna proven även om resultaten från uttagna prov var något lägre. För de uttagna proven nådde HMP44 jämvikt efter ett dygn medan HMP110 behövde mellan ett till två dygn.

4.1.6 Jämförelse av uppmätt RF med olika givare i borrhål

En direkt jämförelse av uppmätta RF nivåer mellan de olika betongsammansättningarna kan inte göras eftersom de skiljde sig åt med avseende på vct och inblandning av slagg. Emellertid

kan mätresultatet från de olika givarna jämföras inom respektive betongsammansättning och då framkommer att HumiGuard aldrig nådde jämvikt utan sjönk under hela mätförloppet. Således är en jämförelse av RF-nivån vid jämvikt mellan HumiGuard och övriga givare omöjlig. Testo 635, Vaisala HMP44 och Vaisala HMP110 visade i genomsnitt lika med spridning inom intervallet $\pm 1\%$ RF. För samtliga betongsammansättningar var Testo 605 med tejp den givare som gav lägst RF, cirka 2-4% lägre jämfört med Testo 635 och Vaisala.

Spridningen i resultat mellan de olika mätmetoderna var större för betongsammansättningarna med lägre vct och/eller inblandning av slagg. Orsaken är sannolikt att dessa betongsammansättningar har lägre fuktkapacitet och samtidigt lägre fukttransportförmåga vilket gör att skillnader mellan olika givare, med avseende på fuktkapacitet hos sensor och filtrets ånggenomgångsmotstånd, tydligare inverkar på jämviktsläget mellan sensor och betong.

4.1.7 Jämförelse med och utan slagg samt olika vct

Vid jämförelse av resultat från alla givare framkom att spridningen avseende RF mellan olika mätmetoder var något större, cirka 1% mellan högsta och lägsta, när betongen innehöll slagg. Ett liknande mönster påträffades när spridningen mellan olika mätmetoder jämfördes i betonger med olika vct. Spridningen var cirka 1% större, mellan högsta och lägsta RF, för vct 0,50 jämfört med vct 0,55. Som exempel kan nämnas att avvikelser mellan högsta och lägst RF för vct 0,55 utan slagg var cirka 3% medan motsvarande avvikelse var cirka 5% för vct 0,50 med slagg.

4.1.8 Jämförande borrhålsmätning i en provkropp med olika Testo-givare

Jämförande mätningar gjordes i betong vct 0,38 med Testo 605 utan skyddshuv eller tejp samt Testo 635 med gallerskydd alternativt teflonfilter. Testo 635 med teflonfilter visade cirka 2% högre RF-nivå jämfört med Testo 605 vilket på liknande sätt noterades vid huvudförsöken, se avsnitt 3.1–3.5. Mätningen med Testo 635 försedd endast med gallerskydd, det vill säga utan teflonfiltret, visade emellertid på samma RF-nivå som Testo 605.

4.2 MÄTSYSTEMETS KÄNSLIGHET

4.2.1 Inverkan på visad RF-nivå när Vaisala HMP44 loggas

Vid kontinuerlig inkoppling till logger, jämfört med när avläsning gjordes momentant med handavläsningsinstrument, var uppvärmningseffekten tydlig. Detta noterades när givaren placerades i precisionsfuktkammare med konstant temperatur och RF-nivå. Givaren visade 2% lägre RF, samt en förhöjd temperatur. När motsvarande test gjordes med givaren monterad i borrhål sjönk RF-nivån med 0,65% vid logger i kontinuerlig drift. Att RF-nivån i borrhålet inte sänktes lika mycket som den i precisionsfuktkammaren beror på att betongen närmast givaren värmdes något med följd att dess RF-nivå ökade. Detta eftersom betongens sorptionsisoterm, eller egentligen fuktbindningsförmåga, sjunker med ökande temperatur.

Eftersom loggern var i kontinuerlig drift både vid framtagning av kalibreringskurvor samt vid alla loggade borrhålsmätningar är det ett rimligt antagande att dessa kalibreringskurvor kan justeras ner med 1,35% RF. Det är emellertid osäkert om samma korrektion kan gälla för loggade mätningar på uttagna prov eftersom uppvärmningseffekten för givare monterad i provrör inte undersöktes. Trots osäkerhet i frågan är det högst sannolikt att de uttagna proven i provröret närmast RF-givaren värms på liknande sätt som betongen i borrhålen. Med hänsyn till ovanstående resonemang justerades samtliga kalibreringskurvor för Picologgade HMP44-givare ner med 1,35% RF för att kompensera för effekten av uppvärmningen.

4.2.2 Fuktkapacitet hos provade RF-givare

Fuktkapacitet för de två olika varianterna av Vaisala-givare jämfördes och då framgick tydligt att HMP110 generellt har något högre fuktkapacitet jämfört med HMP44. När givarna var försedda med filter ökade fuktkapaciteten för båda givarna vilket var förväntat.

Resultat från Testo 605 med helt öppen sensor, det vill säga utan huv eller tejp gav oväntat den högsta fuktkapaciteten. Sensor försedd med huv eller med Scanpor-tejp visade något lägre fuktkapacitet. Jämförelsen av de två tejporna Scanpor, vilken är godkänd vid RBK-mätning, samt Micropor gav att den senare hade dubbelt så hög fuktkapacitet och bör därför undvikas.

Testo 635 utan filter hade markant högre fuktkapacitet jämfört med när den är försedd med teflonfilter vilket var mycket förvånande.

Skillnaden i fuktkapacitet när Testo-givarna, 605 och 635, var försedda med tejp (605) eller teflonfilter (635) var markanta. Givarna uppvisade en lägre fuktkapacitet när de var försedda med tejp eller filter, trots att exempelvis tejp har en i sammanhanget märkbar fuktkapacitet. Att givaren har en lägre fuktkapacitet med filter eller tejp tyder således på att dessa skikt har en "fuktskyddande" effekt och utgör barriär mellan den aktiva delen av sensorn och omgivande luft. RF-nivån underskattas förmodligen eftersom allt tyder på att filtret och tejp har stort ånggenomgångsmotstånd vilket gör att en ånghaltsgradient kan råda mellan sensor och prov under lång tid. Ett långsamt insvägningsförlopp kan lätt tolkas som jämvikt, med följd att användaren läser av ett allt för lågt värde.

Utvecklingen inom betongområdet under de senaste åren indikerar att Portlandcementet i allt högre grad kommer att ersättas med mineraliska tillsatser såsom slagg och/eller flygaska. Studier som gjorts under senare år på betong med mineraliska tillsatser indikerar att dessa har flackare sorptionsisoterm, det vill säga lägre fuktkapacitet, i fuktområdet som är av intresse för denna typ av mätningar, se Saeidpour [2015]. Med hänsyn till den förväntade utvecklingen inom betongområdet är det också avgörande att känna givarnas fuktkapacitet så att varianter med en lägre fuktkapacitet kan vidareutvecklas av instrumenttillverkaren.

4.2.3 Effekten av fuktläckage hos provade RF-givare

Läckage som skulle kunna inverka på resultatet vid RF-mätning i betong uppmättes endast för en tidigare variant av 605. Eftersom den inte längre används för RBK-mätningar anses inte resultatet vara av relevans för RBK-systemet. Flera av provuppställningarna gav näst intill likvärdiga resultat, det vill säga ett mycket litet fuktläckage. Sammanfattningsvis resulterade läckagetestet i att det som mest avgick cirka 10 mg vatten under 30 dygn.

Beräkningar visade att det ackumulerade läckaget under 30 dagar resulterade i en sänkning av RF-nivån om cirka 0,2%. Resonemanget förutsätter att effekten av förlorad fukt är likvärdig både för uttaget prov och borrhålsmätning. Utfört test visar att läckage är en försumbar felkälla vid mätning enligt RBK-systemet.

4.2.4 Jämförelse av borrhålsmätning och uttaget prov

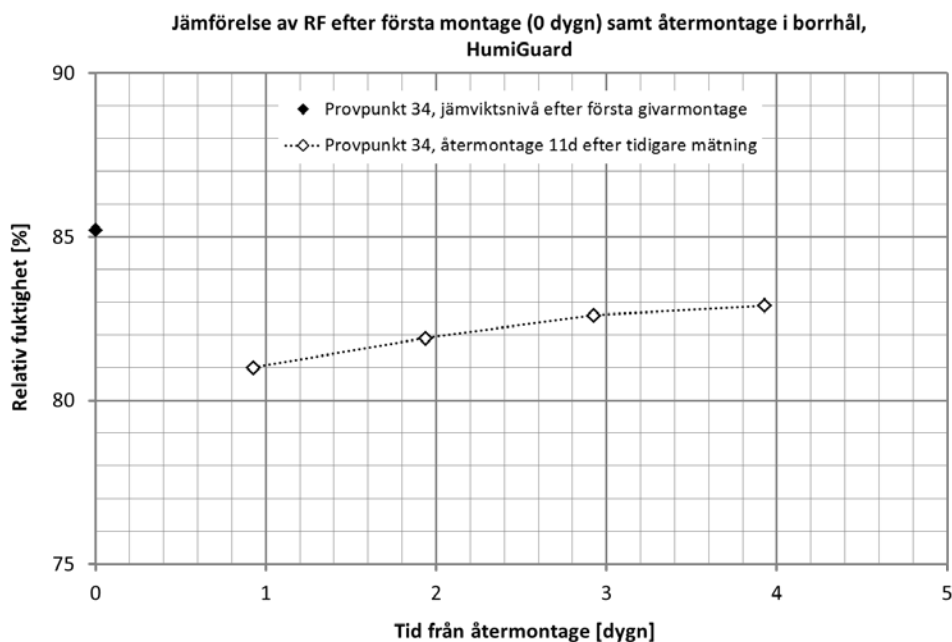
Syftet med de kompletterande mätningarna var att undersöka om det råder överensstämmelse i RF-nivå mellan borrhålsmätning och uttaget prov i vct-intervall 0,50 – 0,55. Resultaten i figurerna 3.3 och 3.4 visar att uppmätt RF-nivå är lägre för uttagna prov oavsett provad betongsammansättning, med undantag för borrhålsmätning med Testo 605 och tejp.

För vct 0,50 visade borrhålsmätningarna med Testo 605 och tejp lägst RF, oavsett om betongen innehöll slagg eller inte, medan för vct 0,55 var RF lika för borrhålsmätningarna med Testo 605 och de uttagna proven. En förklaring till varför Testo 605 i kombination med tejp sannolikt underskattar RF-nivån bedöms vara kombinationen av att sensorn med relativt hög fuktkapacitet var försedd med filter med högt ånggenomgångsmotstånd samtidigt som mätningen gjordes på betong med lågt vct. En sådan betong har låg fuktkapacitet samt låg fukttransportförmåga vilket gör att det uppstår en gradient med avseende på RF mellan sensor och betong. Med de givna villkoren blir tiden till jämvikt mycket lång med följd att man vid avläsning kan vilseledas och göra bedömningen att jämvikt är uppnådd. Resultatet blir att avläsningen sker före uppnådd fuktjämvikt med följd att RF-nivån underskattas.

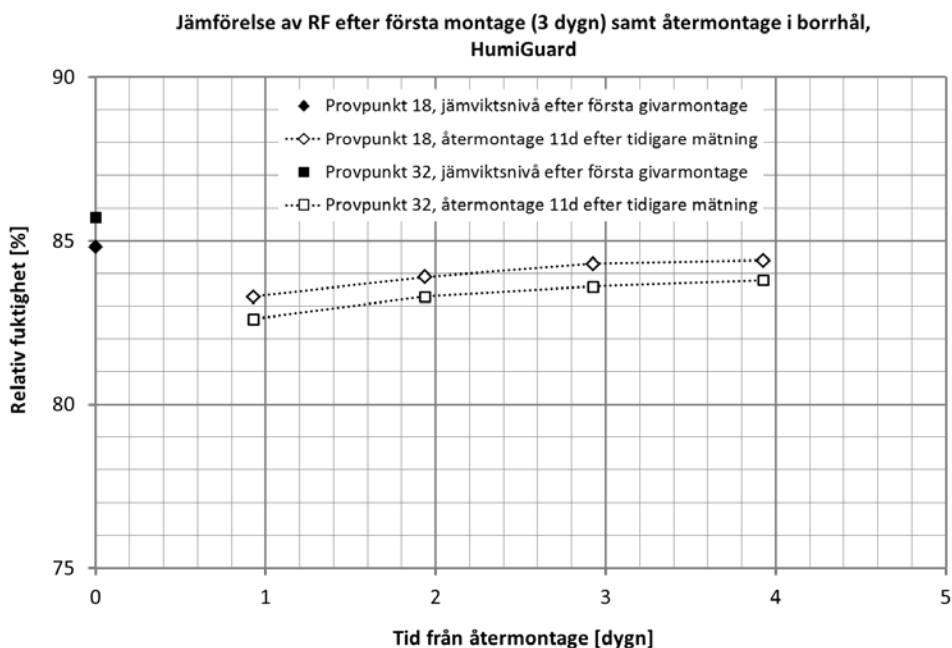
Sammanfattningsvis kunde inte någon brytpunkt med avseende på vct identifieras där resultat från borrhålsmätning och uttaget prov överensstämmer. Resultaten från denna studie styrker slutsatserna från steg 1 av projektet som visade att RF-nivån underskattas vid mätning på uttaget prov, se Johansson [2014]. Denna undersökning visar dessutom att skillnaden i RF-nivå inte enbart gäller betong med låga vct vilket i praktiken innebär att RF-mätning på uttaget prov kan räknas som en utdömd metod.

4.2.5 Återmontage av RF-givare

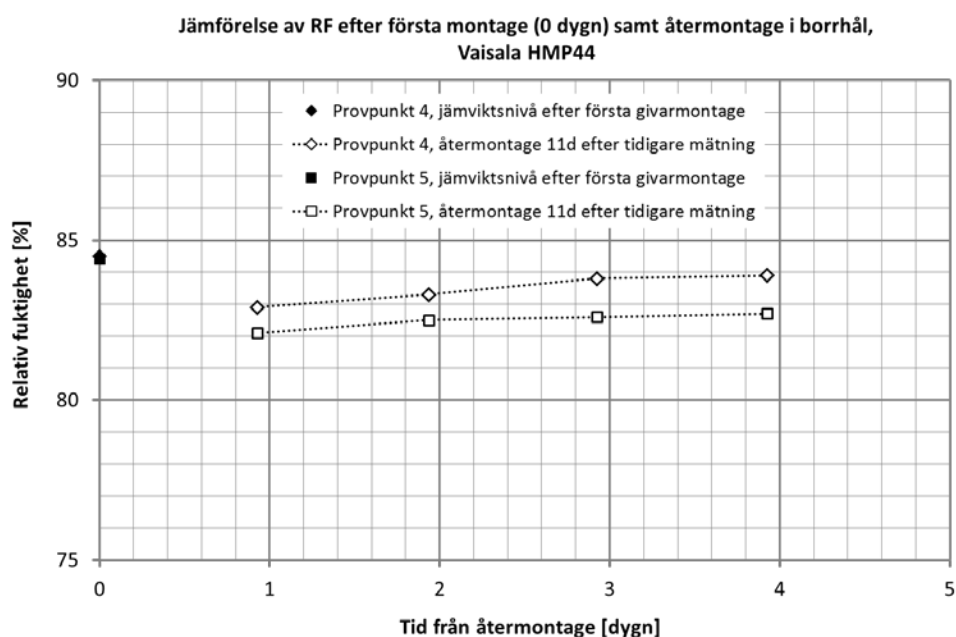
Under projektets steg 1 [Johansson 2014] återmonterades RF-givare i borrhål där givare av samma modell tidigare varit monterad. Syftet med detta var att undersöka om ett borrhål kan användas flera gånger för att följa uttorkningen av en betongkonstruktion. Försöken gjordes på betong, vct 0,38 och Byggcement, som lagrades förseglad under åtta månader i rumstemperatur före mätningarna startade. En sammanställning av resultaten från studien redovisas i figur 4.1–4.6. Resultaten visar att RF-nivån sjunker mellan 1 och 2% vid återmontage jämfört med när RF-givaren monteras för första gången i borrhålet. RF-sänkningen vid återmontage gäller generellt för alla tre provade givare och oavsett om givaren monterades direkt vid borring eller tre dygn efter borring vid första montaget. Tiden mellan att givarna avlägsnades ur mätområdet efter första avläsningen och att en ny givare monterades var 11 dygn.



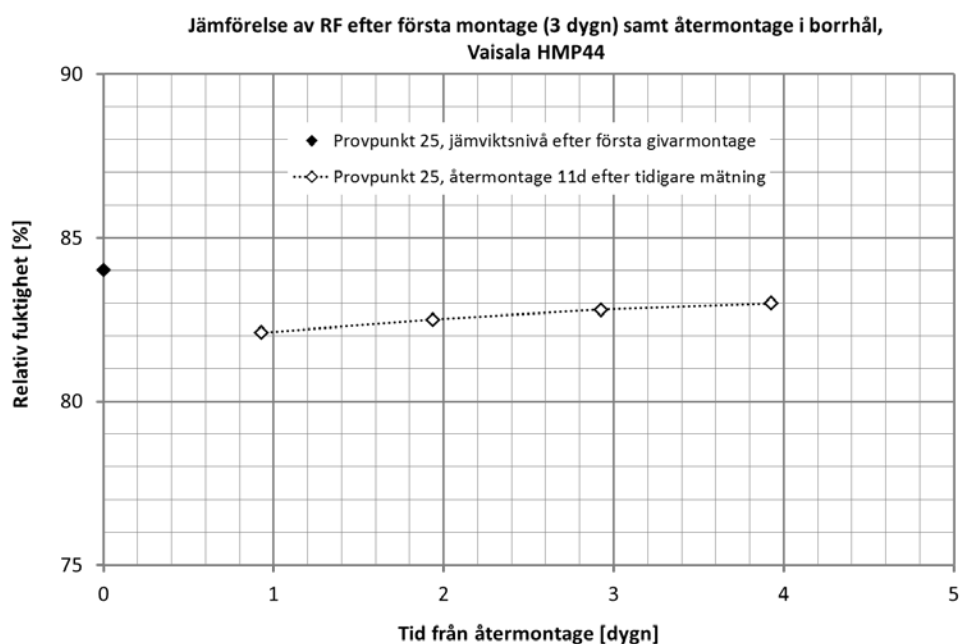
Figur 4.1 Jämförelse av resultat från enskild borrhålsmätning med givare, HumiGuard, monterad vid borrhåll samt återmonterade i samma borrhål 11 dygn efter demontering.



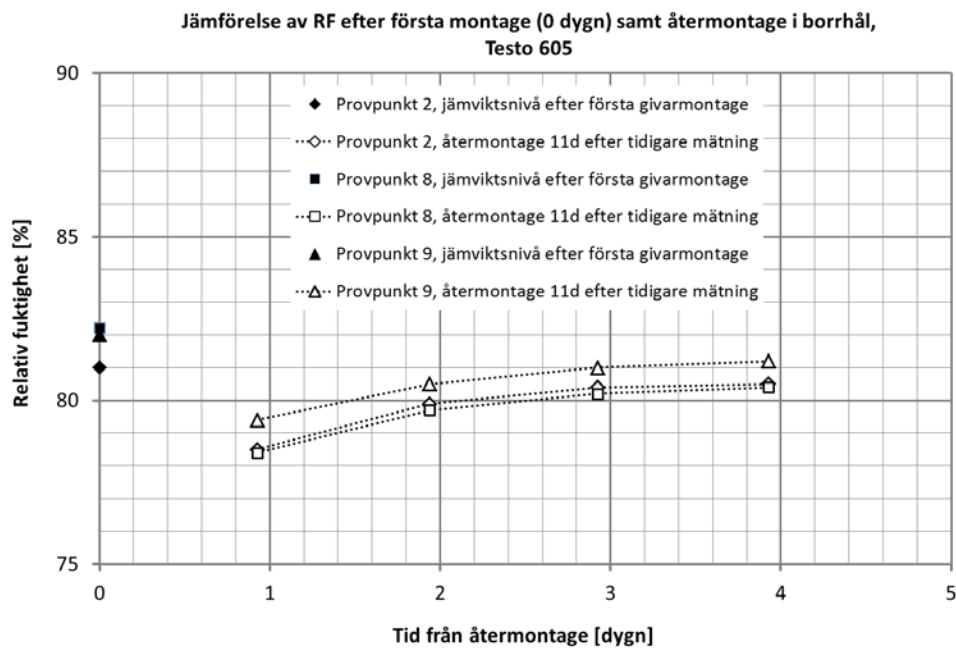
Figur 4.2 Jämförelse av resultat från enskild borrhålsmätning med givare, HumiGuard, monterad tre dygn efter borrhåll samt återmonterade i samma borrhål 11 dygn efter demontering.



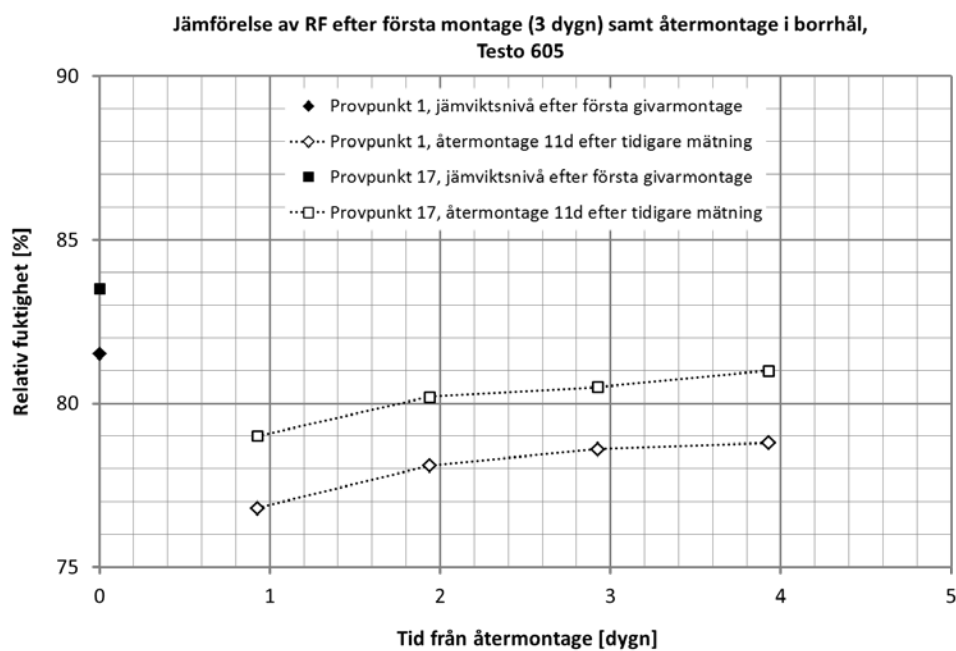
Figur 4.3 Jämförelse av resultat från enskild borrhålsmätning med givare, Vaisala HMP44, monterad vid borring samt återmonterade i samma borrhål 11 dygn efter demontering.



Figur 4.4 Jämförelse av resultat från enskild borrhålsmätning med givare, Vaisala HMP44, monterad tre dygn efter borring samt återmonterade i samma borrhål 11 dygn efter demontering.



Figur 4.5 Jämförelse av resultat från enskild borrhålsmätning med givare, Testo 605, monterad vid borring samt återmonterade i samma borrhål 11 dygn efter demontering.



Figur 4.6 Jämförelse av resultat från enskild borrhålsmätning med givare, Testo 605, monterad tre dygn efter borring samt återmonterade i samma borrhål 11 dygn efter demontering.

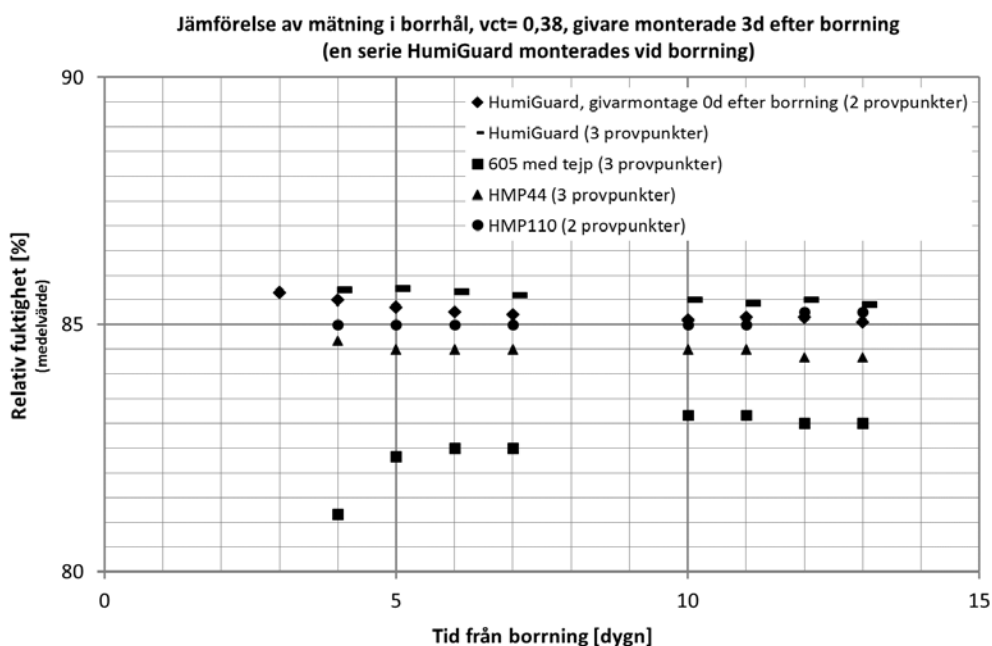
4.2.6 Jämförelse av insvängningsförloppet för fyra olika varianter av RF-givare vid borrhålsmätning

Vid försöken som gjordes under projektets första steg jämfördes insvängningsförloppet för olika givare vid borrhålsmätning. Resultaten som visas i figur 4.7 gäller mätningar på

förseglade plattor med vct 0,38 och Byggcement vilka lagrades åtta månader före mätningarna, se Johansson [2014]. Förseglingen medförde att ingen uttorkning skedde av plattan under lagringen och under mätförsöken. Alla varianter av givare monterades tre dygn efter borring och som jämförelse monterades en serie HumiGuard direkt vid borring såsom RBKs riktlinjer anger för givaren.

Vid jämförelse av insvängningsförloppet för de båda serierna av HumiGuard framgår att givarna som monterades vid borring visade på sjunkande RF-nivå från första avläsningstillfället, vilket gjordes tre dygn efter montering, och fram till cirka sju dygn. RF-nivån hos de HumiGuard-givarna som monterades tre dygn efter borring uppvisade endast marginellt sjunkande trend och bedöms därför kunna avläsas cirka två dygn efter montering medan de HumiGuard-givare som monterades vid borring behövde cirka sju dygn för att uppnå jämvikt.

Både HMP44 och HMP110 bedöms som stabila under insvängningsförloppet och en representativ RF-nivå uppnåddes efter givarna varit monterade två dygn. Insvängningsförloppet hos 605 med tejp visade sig vara mycket långsamt och ett jämviktsläge uppnåddes efter att givarna varit monterade sju dygn. RF-nivån för 605 med tejp var mellan 2,5 och 4% lägre i jämförelse med övriga givare.



Figur 4.7 Resultat från mätning i borrhål med fyra varianter av givare där samtliga monterades tre dygn efter borring. Som jämförelse monterades en serie av HumiGuard-givare i samband med borring.

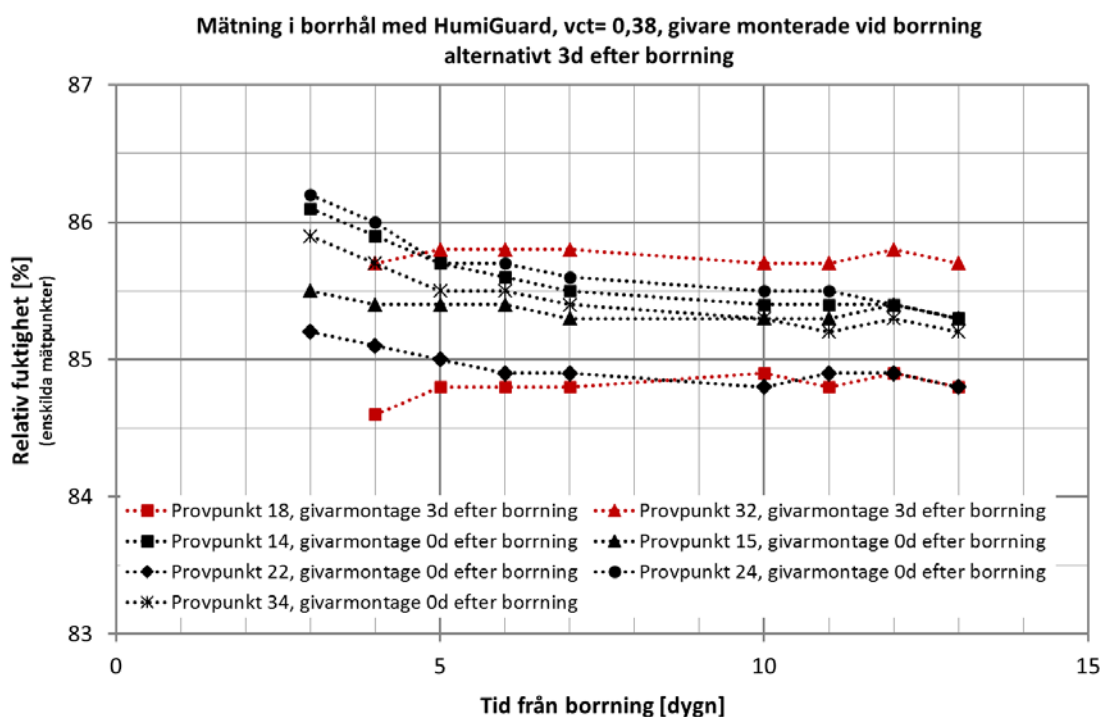
Resultaten av de kompletterande mätningarna i Steg 3 ger något annorlunda resultat avseende tid till fuktjämvikt för de olika givarna. Mätningarna är utförda i betong med vct 0,55 och 0,50 med ett cement innehållande flygaska samt med eller utan slagg tillsatt vid betongblandningen. För HumiGuard är det ingen skillnad mot tidigare. Ett konstant sjunkande RF-värde erhålls utan att ett jämviktsläge kan fastställas. För Vaisala HMP44 erhålls jämvikt ett till tre dygn efter givarmontage. Vaisala HMP110 behöver två till sex dygn för att uppnå jämvikt. Eftersom det bara finns avlästa RF-värden för dygn tre och sex, på grund av en mellanliggande helg, går det inte att fastställa exakt när jämvikt inträtt. Skillnaden mellan avläst RF dygn tre och sex är bara några tiondelar i procent RF för samtliga

betongblandningar. Samma sak gäller för 605 med tejp förutom vid vct 0,55 med slagg. I detta fall erhålls en skillnad på ca en procent RF mellan avläsning dygn tre och sex för två av givarna. Den tredje givaren når jämvikt först åtta dygn efter givarmontage. För Testo 635 är tid till jämvikt mellan tre till åtta dygn men bara en givare har använts och endast vid mätning på betong utan slagg.

4.2.7 Jämförelse av insvängningsförloppet för HumiGuard monterad vid borring alternativt tre dygn efter borring

Resultaten som visas i figur 4.8 togs fram under projektets steg 1 och gäller mätningar på förseglade plattor med vct 0,38 och Byggcement vilka lagrades åtta månader före mätningarna, se Johansson [2014]. RF-nivåerna som visas i figur 4.3 är individuella mätvärden från sju avläsningar på olika HumiGuard-givare varav fem givare monterades vid borring medan två monterades tre dygn efter borring.

Vid jämförelse av insvängningsförloppet för de olika givarna framkommer tydligt att de fem givare som monterades vid borring uppvisade sjunkande trend medan de som monterades tre dygn senare, det vill säga efter tre dygns konditionering av borrhålen, uppvisade en ökande trend. För de givare som monterades vid borring uppnåddes jämviktsläget efter cirka sju dygn och vissa av givarna behövde vara monterade upp till tio dygn. De två givare som monterades tre dygn efter borring nådde rimlig jämvikt efter att de varit monterade två dygn.



Figur 4.8 Jämförande resultat från mätning i borrhål med HumiGuard monterade dels vid borring och dels tre dygn efter borring.

5 SLUTSATSER

5.1 INLEDNING

Slutsatserna som redovisas i detta avsnitt utgör sammanvägda ställningstaganden vilka baseras på resultat från projektets samtliga tre delsteg. De två första delstegen har presenterats separat, se Johansson [2014] och Åhs [2014], medan resultaten från steg 3 redovisas i denna rapport, se avsnitt 3. En betydelsefull skillnad mellan de olika undersökningarna är att den första gjordes på betong med Byggcement som bindemedel, dvs. cement utan reaktiva mineraliska tillsatser men tillsats av kalkstensmjöl, medan simuleringarna avsåg betong med rent Portlandcement. Försöken som presenteras i denna rapport, det vill säga steg 3, gjordes emellertid på betong med Bascement vilket innehåller tillsats av flygaska och kalkstensmjöl.

5.2 UTTAGET PROV UNDERSKATTAR RF OAVSETT VCT

Resultaten visade i de flesta fall att uppmätt RF-nivå var lägre för uttagna prov oavsett betongsammansättning. En brytpunkt med avseende på vct eller betongsammansättning där borrhålmätning och uttaget prov visade på överrenstämmande resultat kunde därför inte hittas. Resultaten från denna studie styrker slutsatserna från projektets steg 1 att RF-nivån underskattas vid mätning på uttaget prov. Vid denna studie framgick det dessutom att skillnaden i RF-nivå inte enbart gäller betong med låga vct.

- Resultaten innebär i praktiken att RF-mätning på uttaget prov kan räknas som en utdömd metod.

5.3 LÅGA RF-NIVÅER OCH LÅNG TID TILL JÄMVIKT MED TESTO

Borrhålmätningarna med Testo 605 försedd med tejp visade låga RF-nivåer och orsaken bedömdes vara kombinationen av att sensorn med relativt hög fuktkapacitet var försedd med filter med högt ånggenomgångsmotstånd. Tiden till jämvikt blir därför mycket lång med följd att man vid avläsning kan vilseledas och göra bedömningen att jämvikt är uppnådd. Resultatet blir att avläsningen sker före uppnådd jämvikt med följd att RF-nivån underskattas.

Mätning av givarans fuktkapacitet visade att Testo 605 hade markant högre fuktkapacitet när den saknade skyddstejp, detta trots att tejpens har fuktkapacitet motsvarande 10-20% av givarens fuktkapacitet. Om givarens sensor tillåtits samma uppfuktning med tejpens monterad borde en högre fuktkapacitet mätts upp. Resultaten visade på motsatsen vilket indikerar att tejpens har betydande ånggenomgångsmotstånd och en första slutsats kan vara att tejpens borde exkluderas. Att inte ha tejpens monterad vid borrhålmätning, och då inte heller vid kalibreringsförfarandet, innebär istället att givaren behöver en större fuktmängd från betongen i borrhålet med resultat att betongens RF-nivå fortfarande underskattas.

Testo 635 med teflonfilter visade ett mycket långsamt insvängningsförlopp och behövde vara monterad 8 dygn för att uppnå rimlig jämvikt. Exempelvis kunde RF-nivån vid jämviktsläget vara 2% högre jämfört med tidpunkten för RBK-avläsning. Det långsamma insvängningsförloppet hos Testo 635 tyder på att teflonfiltret har ett förhållandevis högt ånggenomgångsmotstånd. Vid mätning av givarens fuktkapacitet med och utan filter bekräftades antagandet eftersom fuktkapaciteten hos själva sensorn utan filter var markant högre än givare försedd med filter. Vid jämförelse av fuktkapaciteten hos de olika givarnas sensorer hade Testo 635 högst fuktkapacitet vilket också bidrar till ett långsamt insvängningsförlopp.

- Testo 605 rekommenderas utgå från RBKs fuktmätningrutiner med hänsyn till ovanstående resonemang.
- När det gäller Testo 635 tyder mätningarna på att teflonfiltret har ett förhållandevis högt ånggenomgångsmotstånd. Sensorns höga fuktkapacitet medför att RF riskerar att underskattas för moderna betongsammansättningar med mineraliska tillsatser. Givaren rekommenderas att utgå från RBK-systemet.

5.4 INVERKAN PÅ RF-NIVÅN NÄR GIVARE LOGGAS

När RF-givare kopplas till en datalogger förses givaren med spänning vilken i sin tur resulterar i en uppvärmning av sensorn och som sekundär effekt värms betongen närmast sensorn. Den uppmätta RF-nivån påverkas både av att sensorn och betongen får högre temperaturer. Eftersom temperaturökningen hos sensorn blir olika beroende på hur den placeras, exempelvis i precisionsfuktkammare vid kalibrering eller i borrhål vid mätning, måste kalibreringskurvan justeras med hänsyn till flera faktorer.

Mätningar i denna studie visade att RF-nivån överskattades med cirka 1,35% vid borrhålmätning på grund av sensorns uppvärmning. Med hänsyn till detta resultat justerades samtliga kalibreringskurvor för Picologgade HMP44-givare ner med 1,35% RF.

- Vid mätningar när RF-givare kopplas till datalogger måste uppställningen undersökas så att loggningen inte innebär att givaren värms eller påverkas ur annan aspekt. Om sådana effekter upptäcks måste de gå att kvantifiera och därefter användas för att justera kalibreringskurvan. Detta är viktigt att beakta om utrustning för loggning ska användas inom RBK-systemet i framtiden.

5.5 BORRHÅLSMÄTNING MED HUMIGUARD, VAISALA HMP44 OCH HMP110

En avgörande skillnad mellan Steg 1 och Steg 3 var att generellt överensstämde RF-nivåerna från borrhålmätningar med HumiGuard och Vaisala väl, under den första studien, förutsatt att borrhålen tilläts minst 3 dygns konditionering före givarmonteringen. Resultaten visade då på likvärdig spridning, emellertid efter olika lång tid till jämvikt.

Under Steg 3 nådde generellt Vaisala HMP44 och HMP110 jämvikt, vilket tog cirka tre dygn efter givarmonteringen, även för lägre vct. HumiGuard monterad vid borrhning visade däremot på sjunkande RF-nivåer under tiden avläsningarna pågick, det vill säga upp till nio dygn. Avläsningarna av HumiGuard startade sju dygn efter monteringen vilket innebär att den sjunkande trenden pågick trots att givarna varit monterade cirka 16 dygn. För Vaisala HMP110 erhöles fuktjämvikt generellt efter två till sex dygn. Mellan dygn tre och sex utfördes inga avläsningar, på grund av mellanliggande helg, varvid tidpunkten för jämvikt inte går att fastställa. I samtliga av dessa fall uppgick skillnaden avseende avläst RF, mellan dygn tre och dygn sex, till maximalt 0,5% RF.

Under projektets steg 1 studerades insvägningsförloppet för HumiGuard som dels monterades vid borrhning och dels tre dygn efter borrhning. Givarna som monterades vid borrhning uppvisade samma sjunkande trend som noterades i denna studie medan de som monterades 3 dygn efter borrhning nådde jämvikt efter cirka 2 dygns monteringen. HumiGuard givarna som monterades vid borrhning hade sjunkande RF också efter 13 dygn vilket innebär att givarmonteringen vid borrhning måste anses som olämpligt. Orsaken till sjunkande RF när givare

monterats vid borring är att betongen, i det varma borrhålet, fuktar upp sensorn till nivåer som märkbart överstiger jämviktsläget. Förloppet som följer, då sensorn måste lämna fukt till betongen, riskerar att blir mycket långsamt för betonger med lågt vct och/eller mineraliska tillsatser. Detta eftersom dessa betongsammansättningar resulterar i både låg fuktkapacitet och låg fuktransportförmåga.

Med hänsyn till resultaten i kombination med den pågående utvecklingen kring nya betongsammansättningar, med en ökande mängd mineraliska tillsatser, föreslås följande mättrutiner för borrhålsmätning;

- Endast givare av fabrikat/modell; HumiGuard, Vaisala HMP44 och HMP110 med tillhörande pappersfilter används för borrhålsmätning.
- Givare monteras tidigast 3 dygn efter borring. Mätningarna som genomfördes i steg 1 indikerar att detta även gäller HumiGuard. Avläsning sker baserat på detta tidigast tre dygn efter monteringen för samtliga givare.
- Korrektur på grund av fuktkapaciteten hos givaren Vaisala HMP110 bör ökas i *Manual fuktmätning i betong* för att tillåta avläsning tre dygn efter givarmontage. För Vaisala HMP44 och HMP110 gäller idag +0,5% RF som tillägg till uppmätt RF. För Vaisala HMP110 föreslås +1,0% RF.
- Montering av givare i samband med borring utgår som metod.

5.6 ÅTERMONTAGE I BORRHÅL

När HumiGuard, Vaisala HMP44 eller Testo 605 återmonterades i tidigare använt mätthål sjönk RF-nivån 1-2% oberoende av givarfabrikat. Återmontage av givare gjordes 11 dygn efter att en tidigare monterad givare demonterats från mätthålet. Försöken gjordes på betong vct 0,38 med Byggcement som bindemedel, det vill säga cement utan reaktiva mineraliska tillsatser. Om istället betong med mineraliska tillsatser, såsom flygaska eller slagg använts hade RF-sänkningen sannolikt blivit större. Detta eftersom mineraliska tillsatser ger betong med flackare sorptionsisoterm vilket innebär att RF-nivå påverkas till högre grad när en viss mängd fukt förloras, exempelvis vid återmontage av givare. Därför föreslås följande;

- Baserat på resultaten från denna studie anses inte återmontage av RF-givare, i tidigare använt mätthål, ge tillförlitliga resultat. Detta får till följd att nya mätthål måste borraras för varje tillfälle givare ska monteras.

6 BEHOV AV FORTSATT UTREDNING

- Studera återmontage av givare i tidigare använt mätthål för betong med mineraliska tillsatsmaterial samt för längre tid mellan demontage och återmontage än 11 dygn
- Hur RF-sensors fuktkapacitet samt tillhörande filters fuktkapacitet och fukttransportförmåga inverkar på avvikelsen mellan verklig och uppmätt RF-nivå.
- Analysera fuktegenskaper hos framtida betongsammansättningar med mineraliska tillsatser genom att ta del av materialdata från pågående forskningsprojekt.
- Ta fram principiella riktlinjer för RBK-systemet vilka kan användas för att justera avläst RF med hänsyn till olika givares fuktkapacitet vilket blir nödvändigt för betonger med mineraliska tillsatser. Dessa betonger får både minskad fuktkapacitet samt fukttransportförmåga, jämfört med dagens betonger, vilket innebär att fuktkapaciteten hos en RF-sensor, till större del än idag, bidrar till att öka skillnaden mellan avläst och verklig RF.
- Ta fram kravspecifikation för nästa generation fuktgivare med tillhörande loggningssystem anpassat för kommande betonger och fuktkrav.
- Sannolikt är dagens kritiska fuktnivåer med avseende på alkalisk nedbrytning, orsakad av betong, inte relevanta för framtida betongsammansättningar. Detta eftersom inblandningen av reaktiva mineraliska tillsatser till en allt större del kommer att ersätta Portlandcementet. Den komponent hos det hydratiserade Portlandcementet som bidrar till alkalisk nedbrytning, det vill säga kalciumhydroxiden, bindas av de mineraliska tillsatserna samtidigt som mängden Portlandcement minskar. Dessa två faktorer sammantaget gör att framtida betongsammansättningar sannolikt orsakar minskad alkalisk nedbrytning. En fortsatt tillämpning av dagens kritiska fuktnivåer enligt AMA kan därför innebära att betongen torkas onödigt lång tid.

För att säkerställa rimliga uttorkningstider när framtida betongsammansättningar börjar tillämpas i större skala, vilka sannolikt har långsammare uttorkning, krävs en ökad förståelse kring kritiska fuktnivåer. Syftet med den föreslagna undersökningen är att ge konkreta fuktkrav för material som betongens ska beläggas med, det vill säga nya kritiska fuktnivåer.

- Ta fram materialdata för att möjliggöra omräkning av uppmätt RF till RF vid 20°C för betongsammansättningar med mineraliska tillsatser samt betong med vct ner till 0,32.

7 REFERENSER

Arfvidsson J. och Hedenblad G. (2007), “*A new model to calculate the drying of concrete*” Proceedings from the 10th International Building performance simulation association conference and exhibition, Tsinghua University, Beijing, China, September 3-6, 2007.

Johansson, P [2012] “Laboratoriestudien bakom TorkaS3”, Rapport TVBM-3165, Avd Byggnadsmaterial, LTH.

Johansson, P [2014] “Fuktmätning i betong med lågt vct, steg 1”, Rapport TVBM-3178, Avd Byggnadsmaterial, LTH.

Nevander L-E. och Elmarsson B. [1994], “Fukt handbok – teori och praktik”, Andra reviderade upplagan, AB Svensk Byggtjänst, Stockholm.

RBK [2015], “Fuktmättningsmanual – betong”, version 5.3, Rådet för ByggKompetens, Sveriges Byggindustrier.

Saeidpour, M [2015] “Experimental studies of sorption and transport of moisture in cement based materials with supplementary cementitious materials”, doktorsavhandling TVBM-1033, Avd Byggnadsmaterial, LTH.

Åhs, M [2014] “*Simulering av fuktmätning i betong med lågt vct*”, Rapport TVBM-3177, Avd Byggnadsmaterial, LTH.

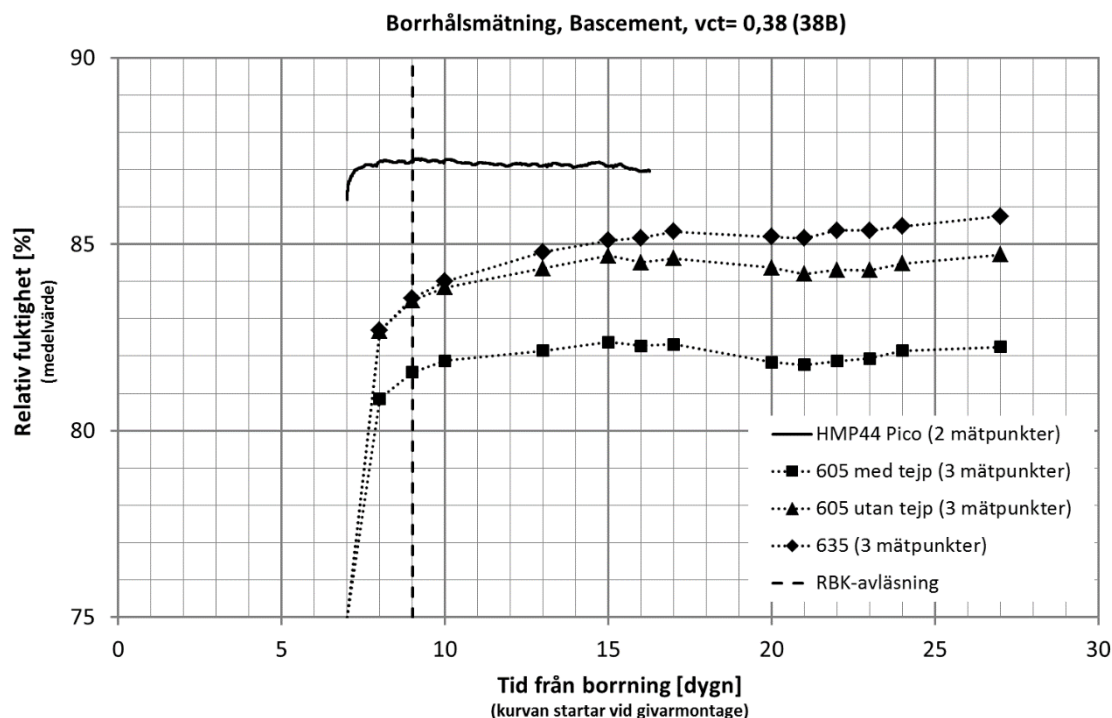
8 APPENDIX

Innehållsförteckning

Innehållsförteckning	1
1. Mätning på betong med vct 0,38	2
2. Mätning på betong vct 0,50	6
3. Mätning på betong vct 0,55	12
4. Mätning på betong vct 0,50 med slagg.....	19
5. Mätning på betong vct 0,55 med slagg.....	25
6. Jämförelse av RF för betong med och utan slagg.....	31
7. Tid till jämvikt för Vaisala HMP44 och HumiGuard monterade i borrhål	31
8. Jämförande borrhålsmätning i en provkropp med olika Testo-givare.....	33
9. Inverkan på visad RF-nivå när Vaisala HMP44 loggas	34
10. Fuktkapacitet samt läckage hos de provade RF-givarna	36
11. Referenser.....	44

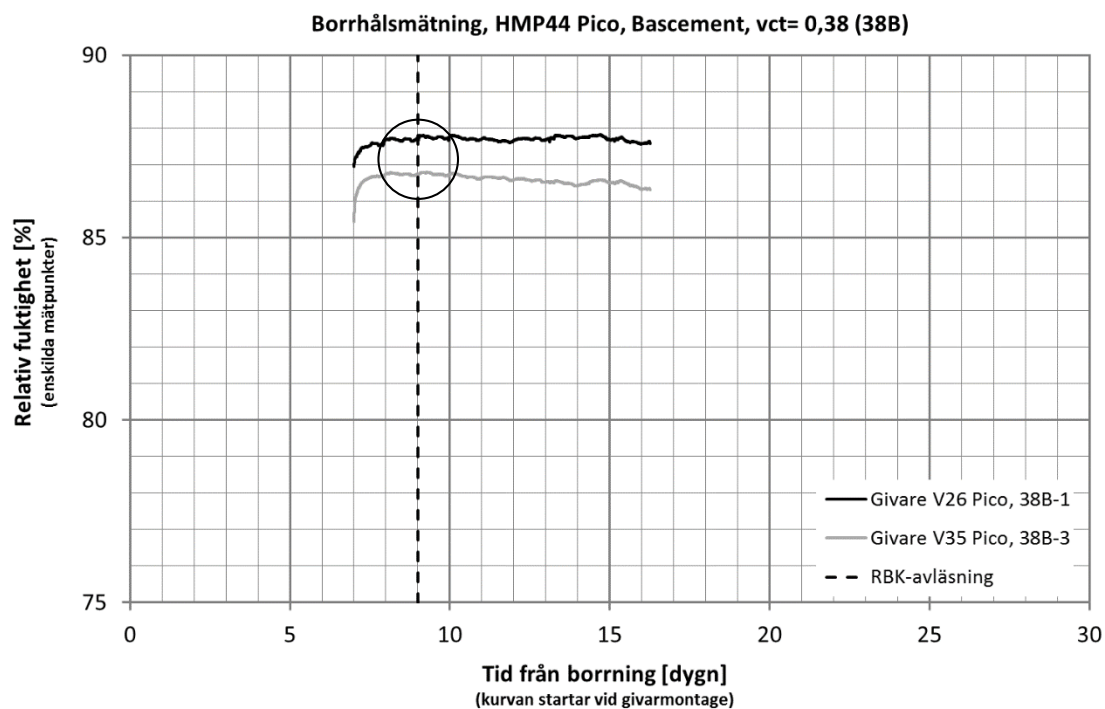
1. Mätning på betong med vct 0,38

I figurerna 1–6 visas kalibrerad RF för förseglade prov som funktion av tid från borrhål. HMP44-givarna var kopplade till datalogger och dess resultat visas därför kontinuerligt över mätperioden medan resultaten från Testo-givarna visas punktvis sammanbundna med streckade linjer. Resultaten i figuren 1 utgör en sammanställning och visar medelvärde från två eller tre mätpunkter beroende av givare. För dessa prov med vct 0,38 gjordes endast borrhålsmätning vilket framgår enligt provplan i tabell 2.2 i rapporten.

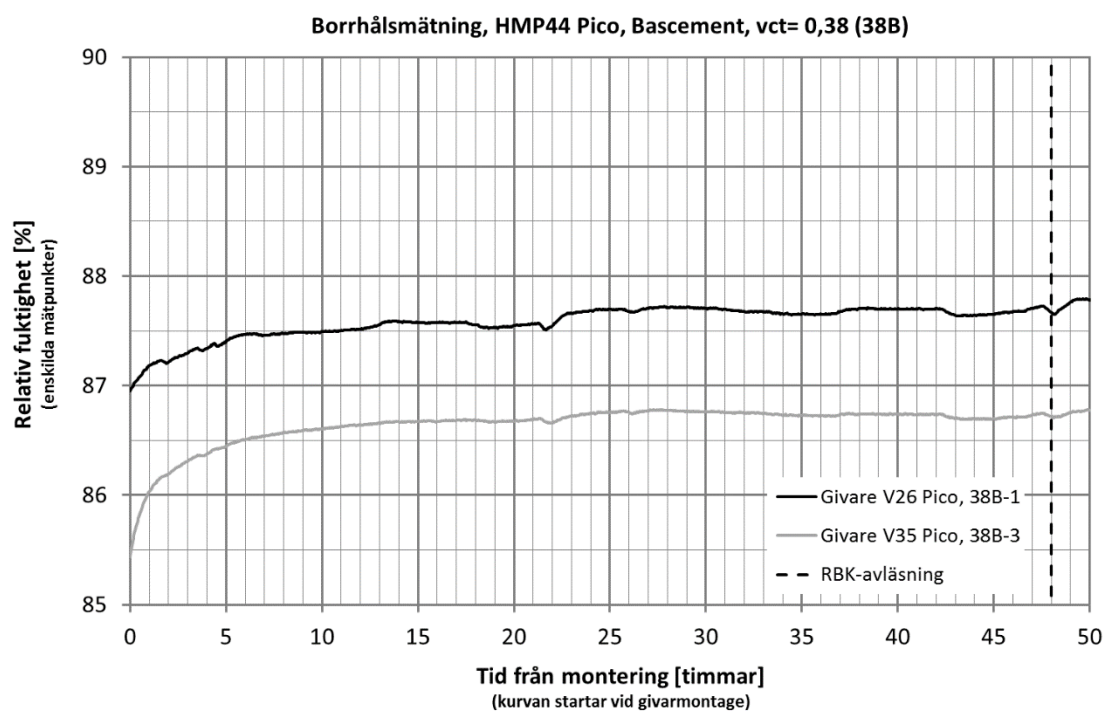


Figur 1 Relativ fuktighet som medelvärde mätt i borrhål med Vaisala HMP44 samt Testo 605 och 635. Vaisala-sensorerna loggades medan Testo avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. Samtliga givare monterades 7 dygn efter borrhålning. Resultat från Pico-loggad HMP44 justerad enligt avsnitt 8.

I de följande figurerna 2 och 3 visas loggade HMP44 i enskilda mätkroppar. I figuren 3 visas samma sak fast uppförstorat med avsikt att redovisa tid till fuktjämvikt efter givarmontage. Resultaten visar tydligt att HMP44 hinner uppnå jämvikt vid tidpunkten för RBK-avläsning vilket är två dygn efter givarmontage när vct i betongen understiger 0,40.

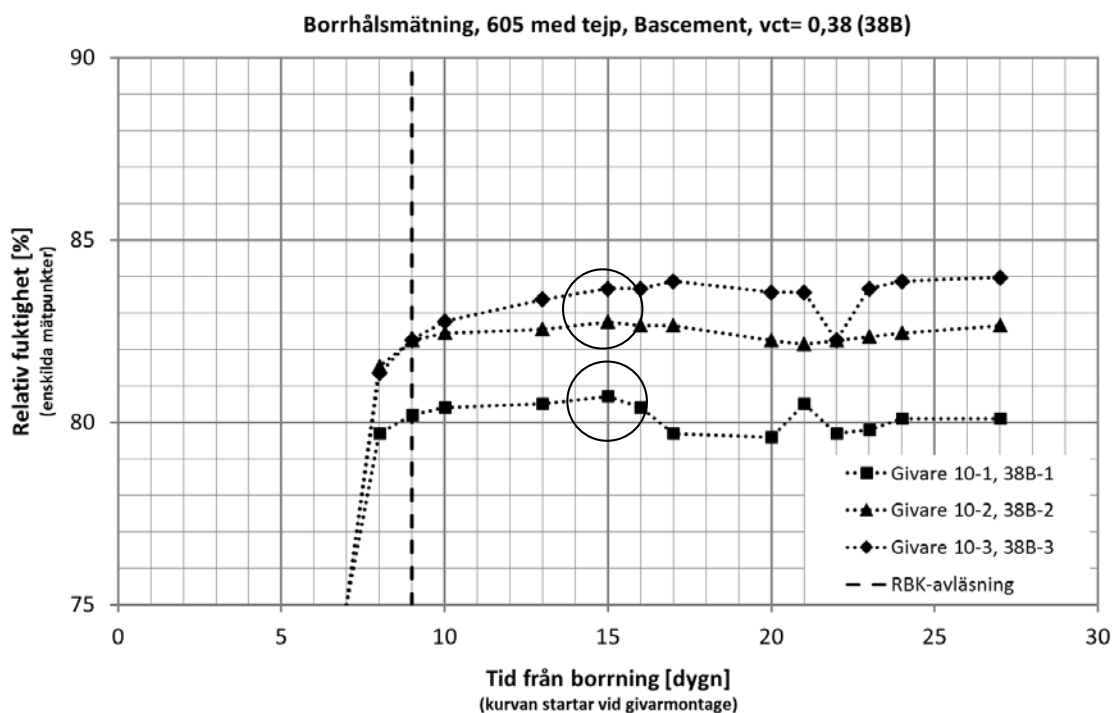


Figur 2 Relativ fuktighet från loggade Vaisala HMP44-givare i två mätpunkter i enskilda provkroppar. Givare monterades sju dygn efter borrhning och resultaten från Pico-loggern är justerade enligt avsnitt 9.

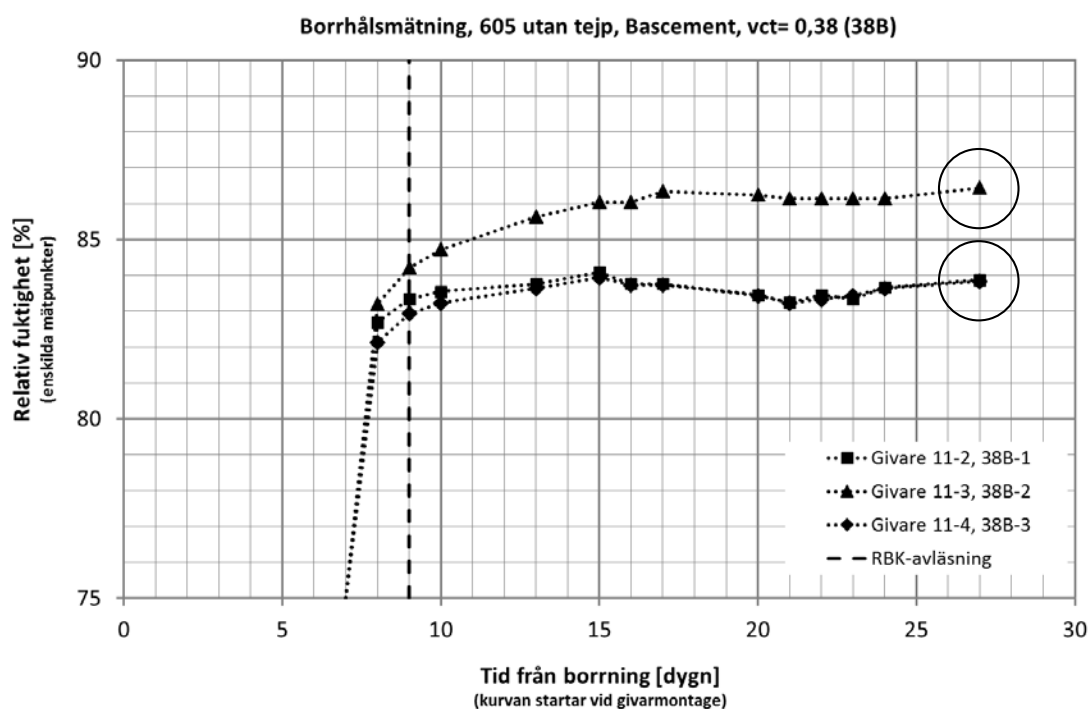


Figur 3 Insvägningsförloppet för två Pico-loggade HMP44-givare, från givarmonterage till avläsning enligt RBK. Resultaten är en del av de som visas i figur 2.

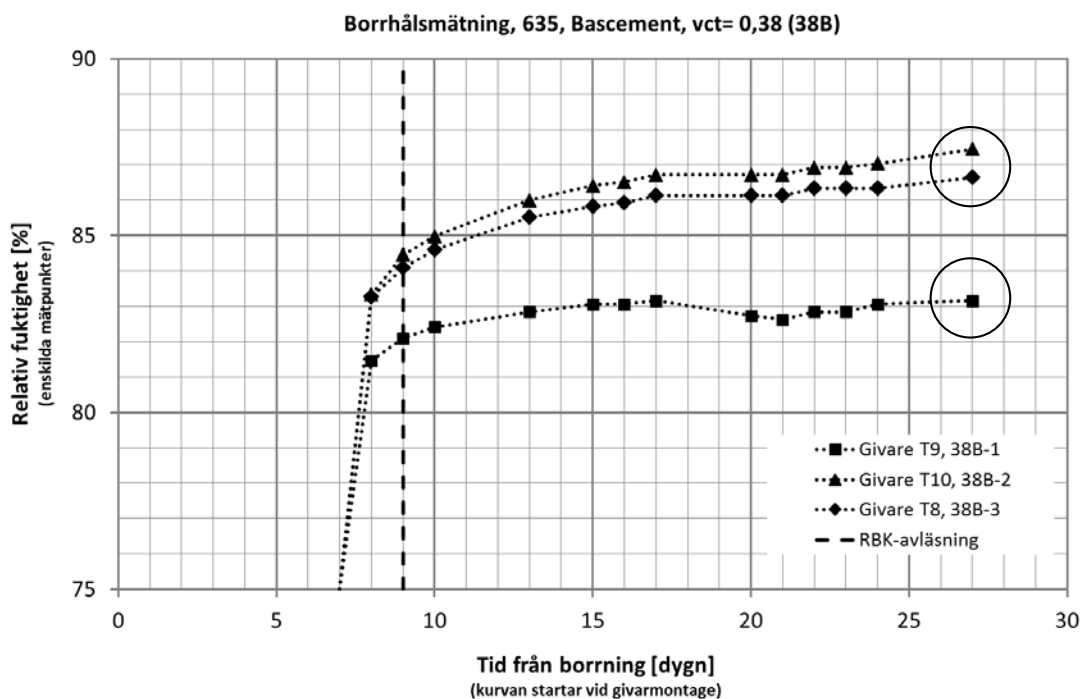
Figurerna 4–6 nedan visar resultat från enskilda Testo-givare av modellerna 605, med och utan tejp, samt 635. Generellt visar dessa givare låga RF-nivåer jämfört med Vaisala, speciellt 605 med tejp. 635 verkar vara den givare som behöver längst tid till jämvikt och vid tiden för RBK-avläsning, två dygn efter givarmonteringen, ligger den cirka två procent lägre jämfört med det sista avlästa mätvärdet.



Figur 4 Relativ fuktighet från tre mätpunkter i enskilda provkroppar där givarna, Testo 605 med Scanpor-tejp, avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. Samtliga givare monterades sju dygn efter borrhning. RBK-avläsning tillåts två dygn efter givarmonteringen vid vct < 0,4.



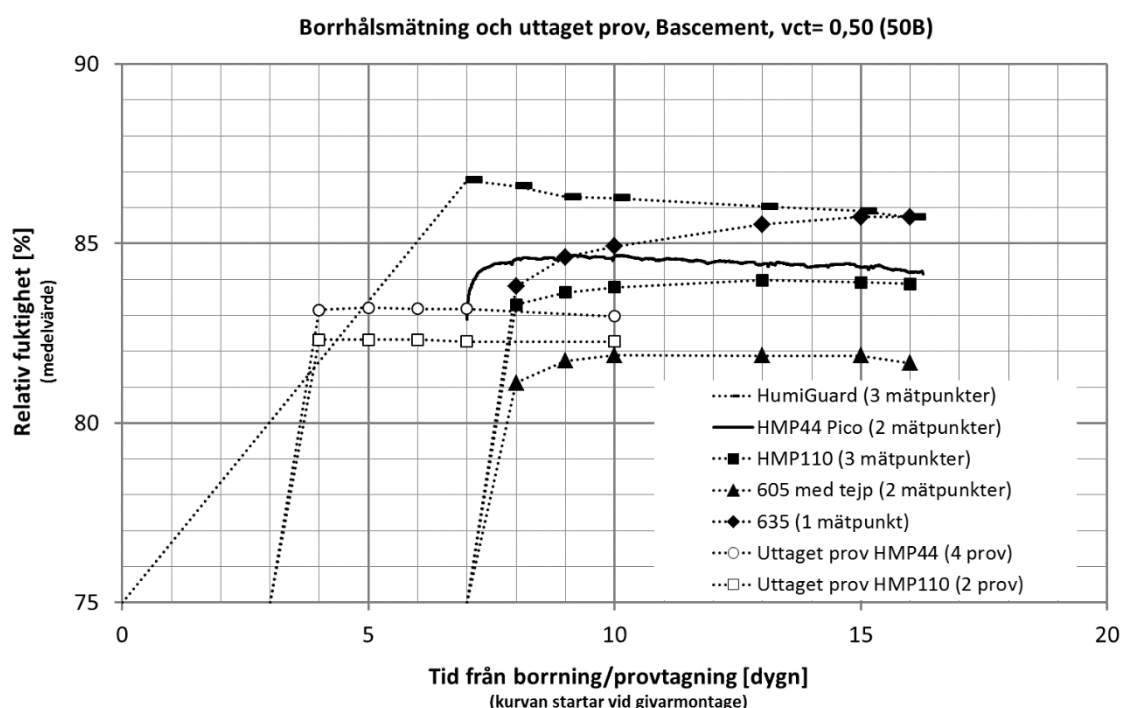
Figur 5 Relativ fuktighet från tre mätpunkter i enskilda provkroppar där givarna, Testo 605 utan tejp, avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. Samtliga givare monterades sju dygn efter borrhning. RBK-avläsning tillåts två dygn efter givarmonter vid vct < 0,4.



Figur 6 Relativ fuktighet från tre mätpunkter i enskilda provkroppar där givarna, Testo 635 med teflonfilter, avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. Samtliga givare monterades sju dygn efter borrhning. RBK-avläsning tillåts två dygn efter givarmonter vid vct < 0,4.

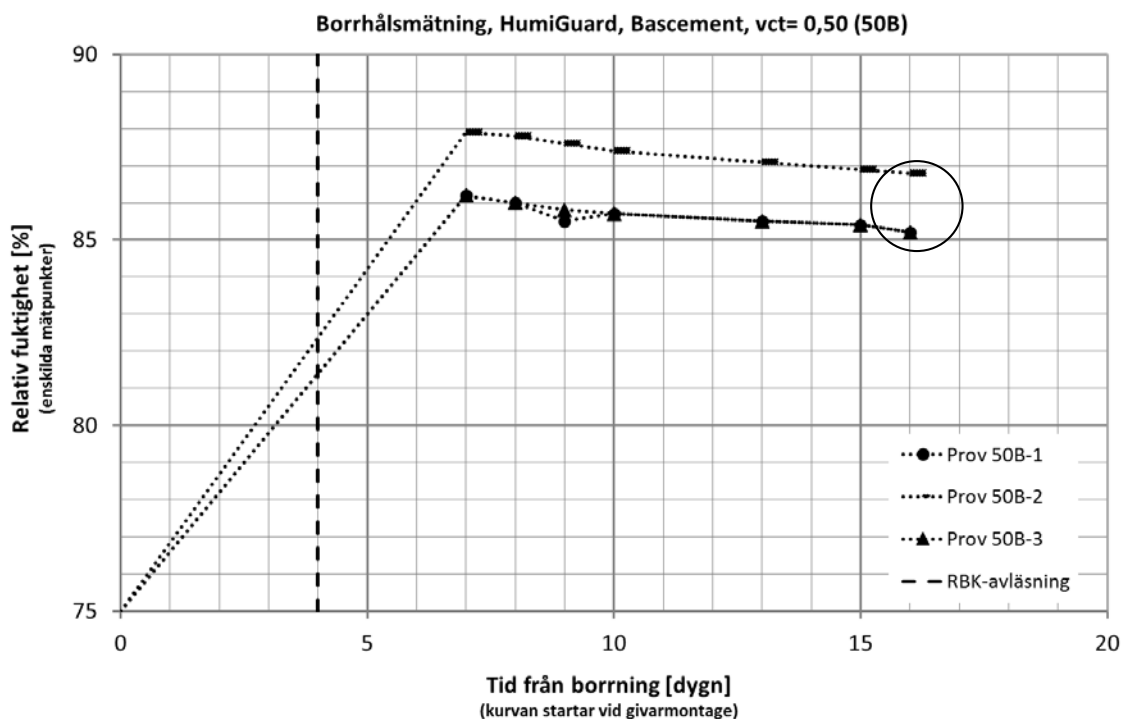
2. Mätning på betong vct 0,50

I figur 7 visas jämförelse av kalibrerad RF för uttagna prov och från borrhålsmätning som funktion av tid från provtagning respektive borrhning. RF-nivåerna utgör medelvärde utom i ett fall vilket gäller givare 635 då det endast fanns en sådan givare monterad i proven. HMP44-givarna för borrhålsmätningen var kopplade till datalogger och dess resultat visas därför kontinuerligt över mätperioden. Övriga givare, också HMP44 för uttagna prov, avlästes manuellt och visas punktvis sammanbundna med streckade linjer. Vilka givare, och också deras individuella märkning, som monterades i respektive provkropp framgår enligt provplan i tabell 2.2 i rapporten. De uttagna proven visade generellt lägst RF, oavsett givare, tillsammans med borrhålsmonterad 605 med tejp.



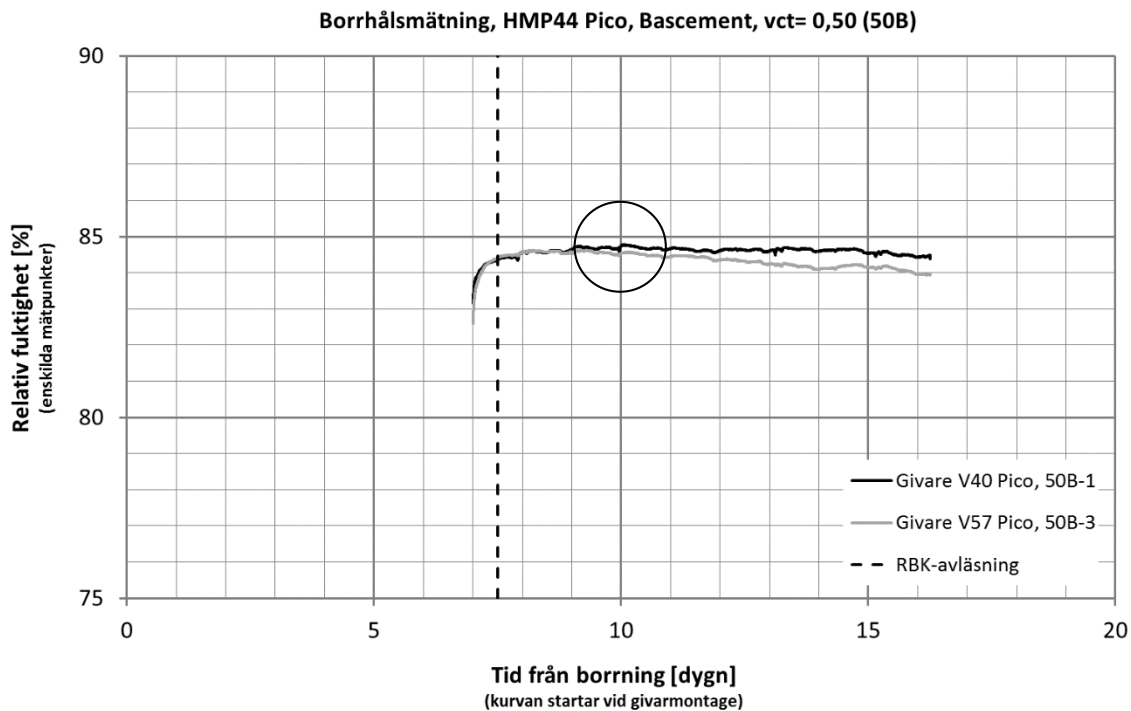
Figur 7 Relativ fuktighet mätt i borrhål och på uttagna prov redovisade som medelvärde utom för Testo 635 som endast finns i en mätpunkt. Vaisala HMP44 för borrhålsmätning loggades medan övriga sensorer avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. HumiGuard monterades i samband med borrhning medan övriga givare för borrhålsmätning monterades efter sju dygns konditioneringstid. Mätning på uttagna prov startade tre dygn efter provtagning.

För HumiGuard enligt figur 8 saknades avläsningar före sju dygn från montering varför det är omöjligt att bedöma huruvida tidpunkten för RBK-avläsning är lämplig. Det man emellertid kan notera är att avläst RF för samtliga tre mätpunkter minskade som funktion av tiden.

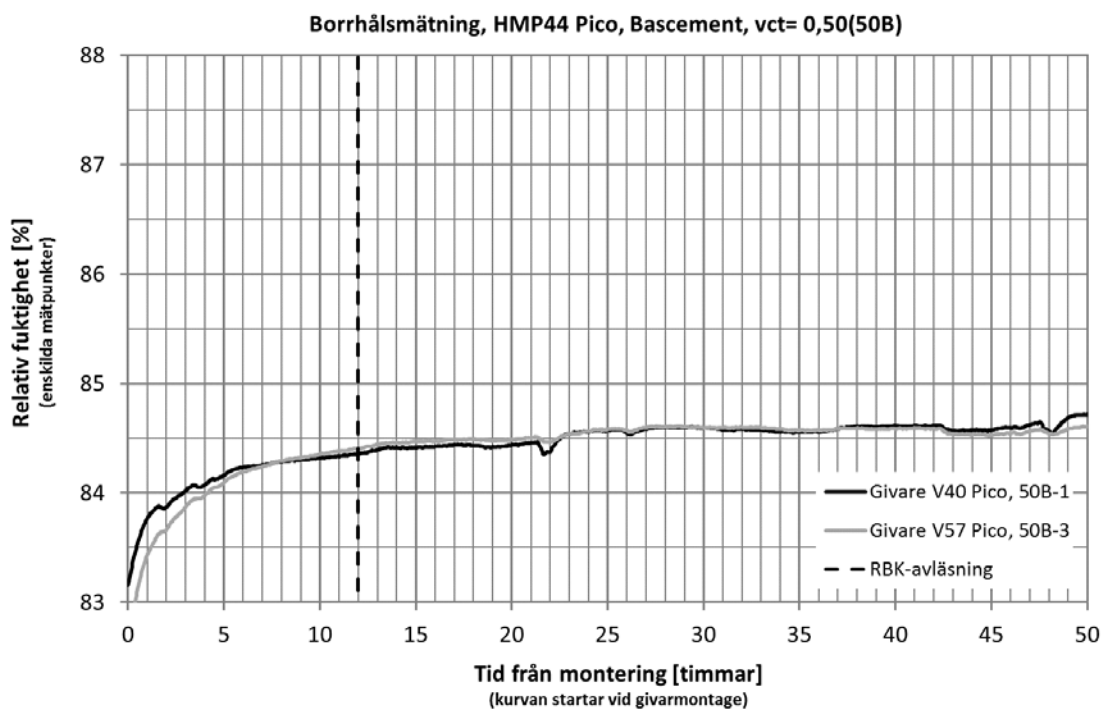


Figur 8 Relativ fuktighet från tre mätpunkter i enskilda provkroppar där givarna, HumiGuard, avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. Samtliga givare monterades i samband med borrhning som utfördes vid tiden 0 dygn.

I de följande figurerna 9 och 10 visas de loggade HMP44 som enskilda mätpunkter och i figuren 10 är mätperioden från montering av givarna till avläsning enligt RBKs riktlinjer förstorad. Resultaten visar att HMP44 inte hinner uppnå tillfredsställande jämvikt vid tidpunkten för RBK-avläsning vilket är 12 timmar efter givarmontage vid $vct \geq 0,4$. Figuren visar att en sådan avläsning tidigast kan göras tre dygn efter montering av givare.

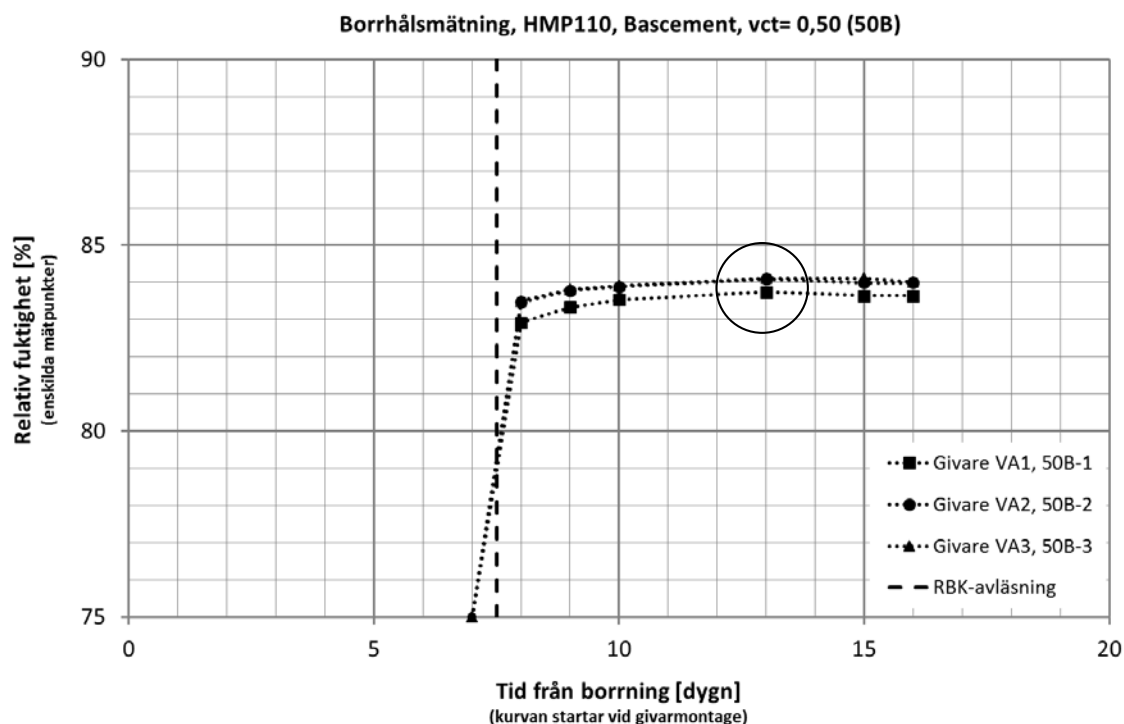


Figur 9 Relativ fuktighet från loggade Vaisala HMP44 i två mätpunkter i enskilda provkroppar. Givare monterades sju dygn efter borrhning och resultaten från Pico-loggern är justerade enligt avsnitt 9.



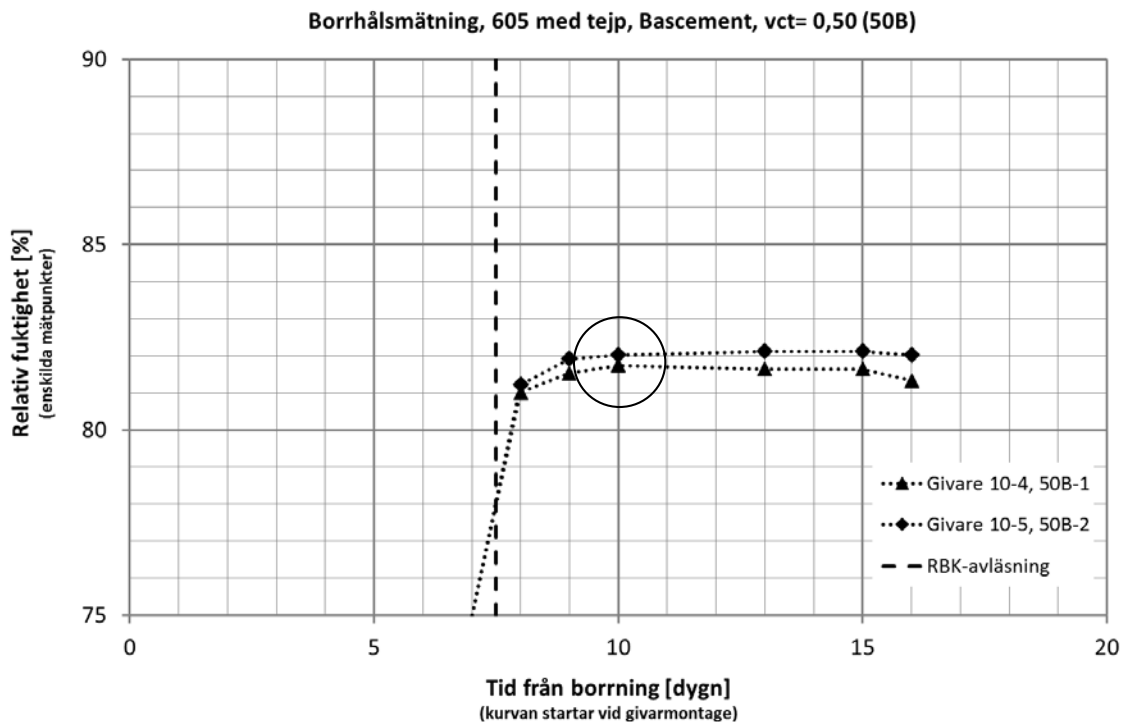
Figur 10 Insvägningsförloppet för två Pico-loggade HMP44-sensorer, från montering till avläsning enligt RBK vikt är 12 timmar efter givarmonterage. Resultaten är en del av de som visas i figur 9.

I figuren 11 visas resultat från borrhålsmätning med HMP110 vilken förhållandevis snabbt når en stabil RF-nivå.

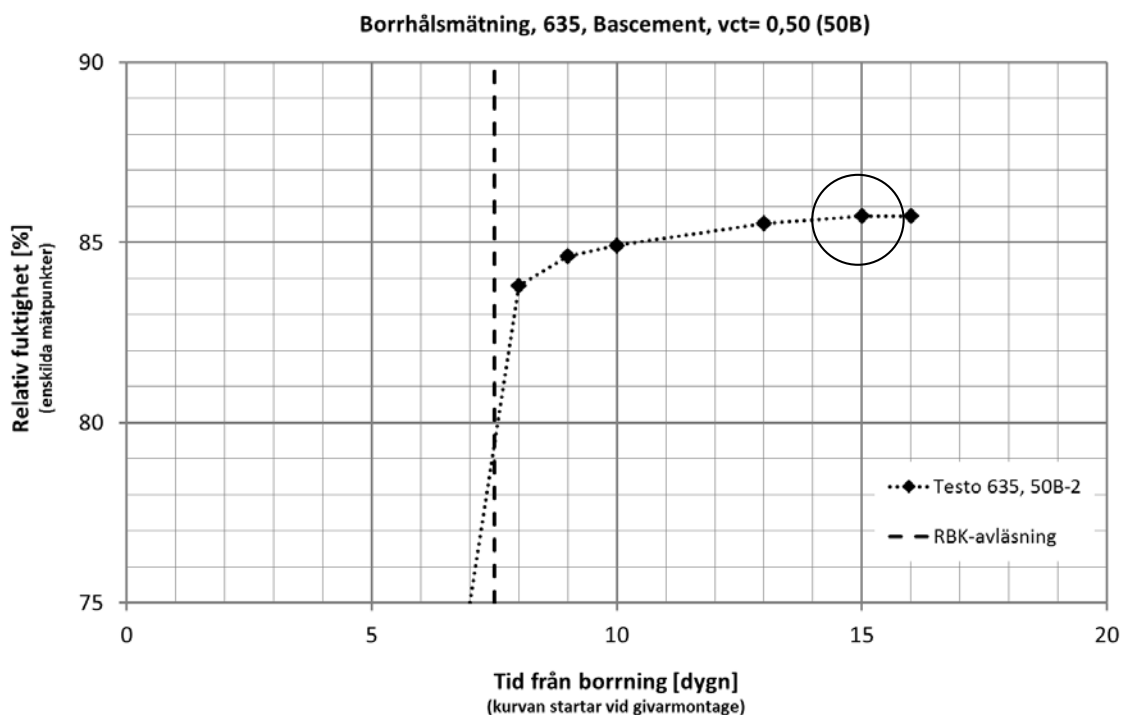


Figur 11 Relativ fuktighet från två mätpunkter i enskilda provkroppar där givarna, Vaisala HMP110, avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. Givarna monterades sju dygn efter borrhning. VA2 och VA3 gav lika resultat varför symbolerna för VA3 döljs. RBK-avläsning tillåts 12 timmar efter montering.

Figuren 12 och 13 nedan visar resultat från enskilda Testo av modellerna 605, med tejp, samt 635 med teflonfilter. 605 visar låga RF-värden jämfört med 635. Även om 635 vid mätperiodens slut visar högre RF verkar det vara den givare som behöver längst tid till jämvikt. Vid tiden för RBK-avläsning ligger den mer än 2 % lägre jämfört med det sista avläsa mätvärdet.

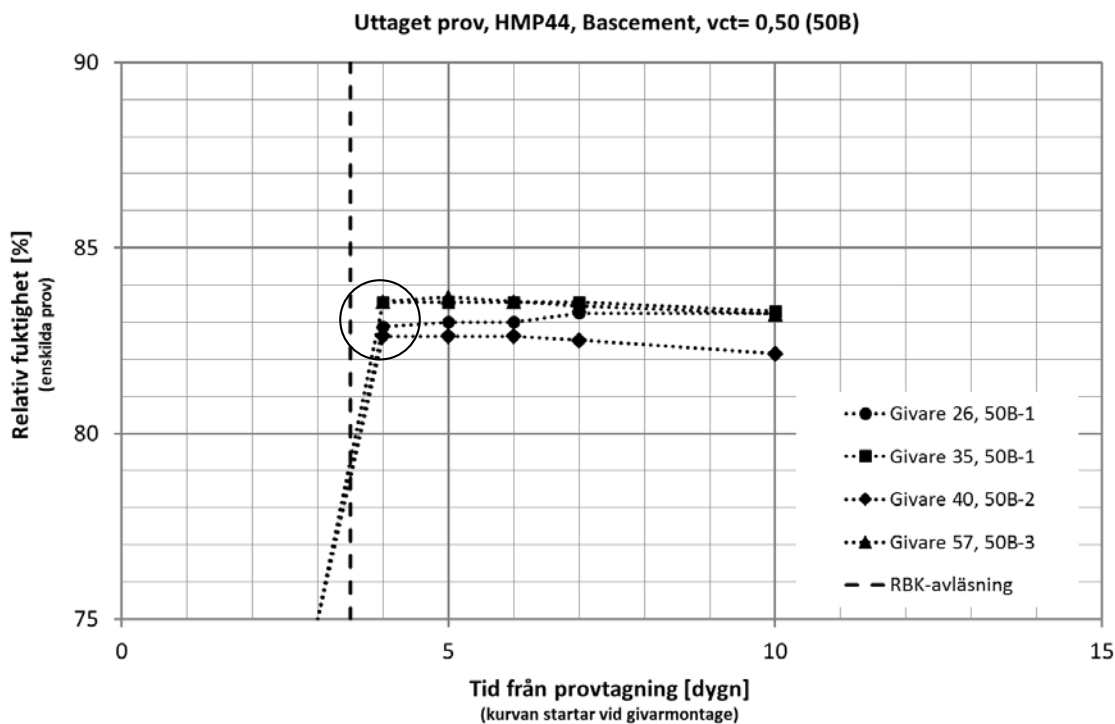


Figur 12 Relativ fuktighet från två mätpunkter i enskilda provkroppar där givarna, Testo 605 med Scanpor tejp, avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. Båda givare monterades sju dygn efter borrhning. RBK-avläsning tillåts 12 timmar efter montering.

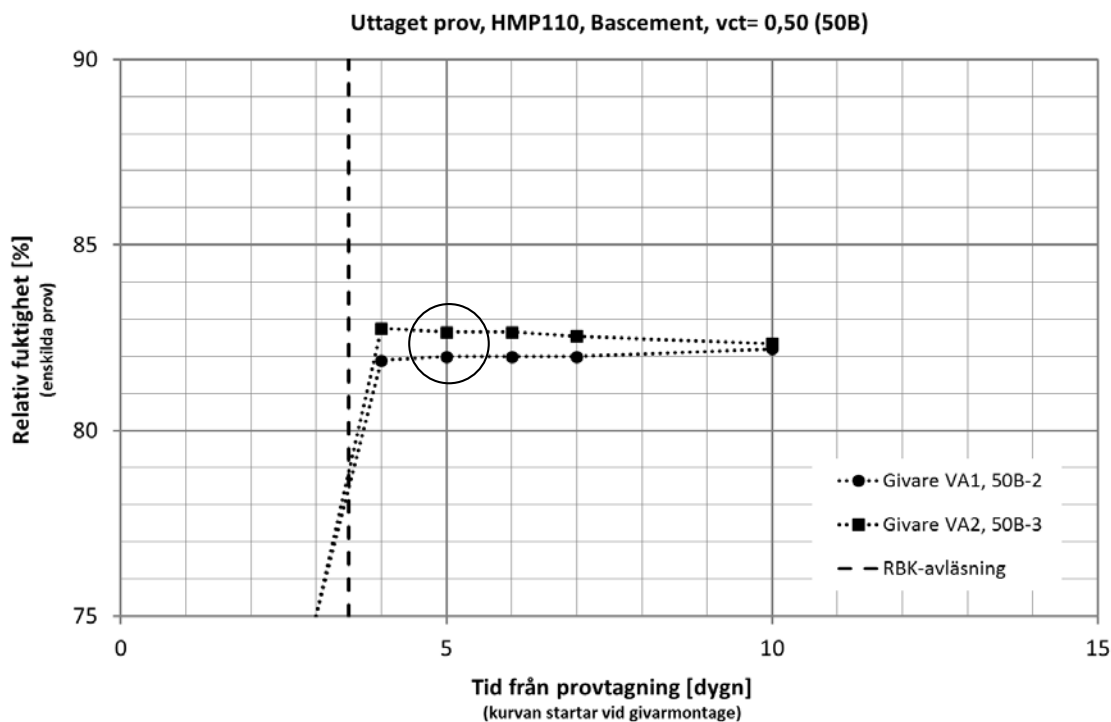


Figur 13 Relativ fuktighet från en mätpunkt med givare, Testo 635 med teflonfilter, som avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. Givaren monterades sju dygn efter borrhning. RBK-avläsning tillåts 12 timmar efter montering.

Resultat från individuell RF-mätning på uttagna prov visas i figur 14 och 15 för HMP44 och HMP110. Båda givarna nådde snabbt ett tillfredsställande jämviktsläge cirka 1 dygn efter montering. Vid jämförelsen med alla mätmetoder för detta vct visade uttagna proven lägst RF-nivå tillsammans med borrhålsmätning utförd med 605 och tejp.



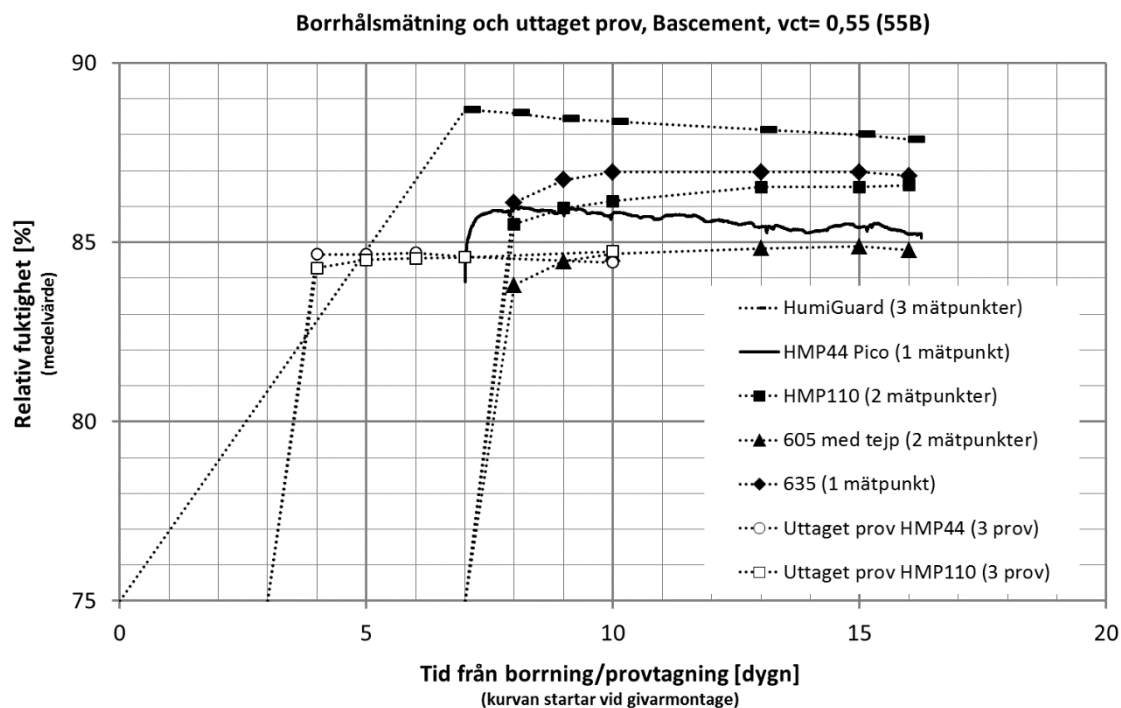
Figur 14 Relativ fuktighet på uttagna prov från tre enskilda provkroppar där givarna, Vaisala HMP44, avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. Givarna monterades tre dygn efter provtagning. RBK-avläsning tillåts 12 timmar efter montering.



Figur 15 Relativ fuktighet på uttagna prov från två enskilda provkroppar där givarna, Vaisala HMP110, avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. Givarna monterades tre dygn efter provtagning. RBK-avläsning tillåts 12 timmar efter montering.

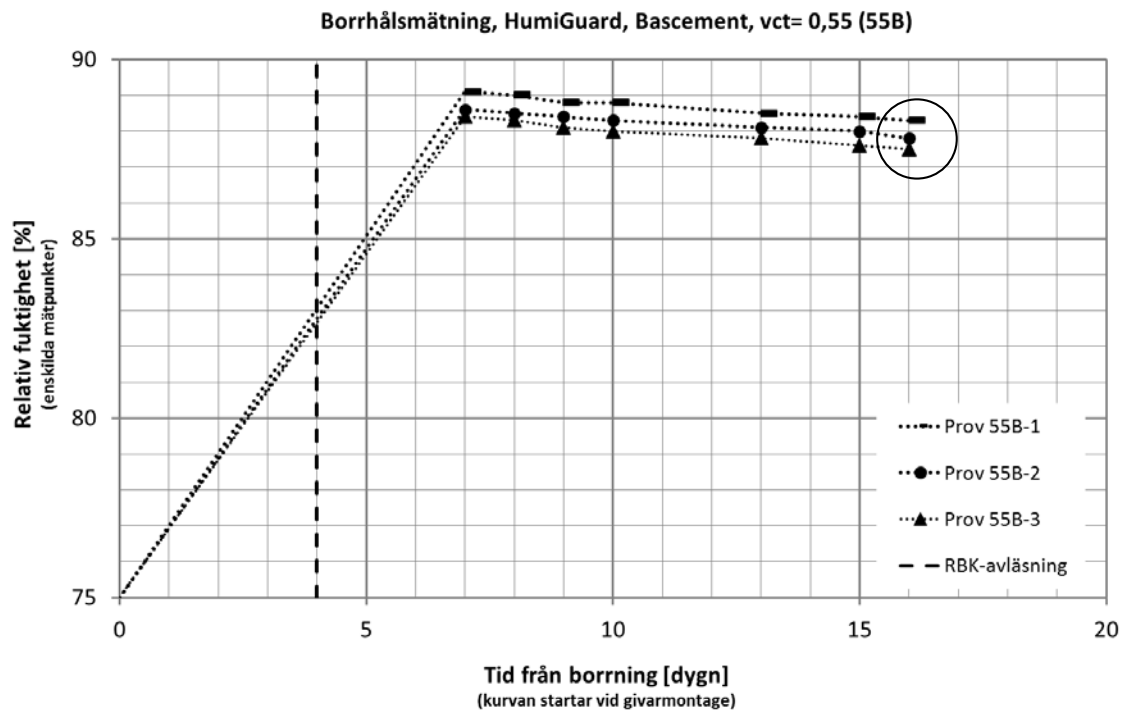
3. Mätning på betong vct 0,55

I figur 16 visas jämförelse av kalibrerad RF för uttagna prov och från borrhålsmätning som funktion av tid från provtagning respektive borrhning. RF-nivåerna är medelvärden utom i två fall vilket gäller HMP44 Pico samt 635 vilka endast monterades i en variant vardera. HMP44 Pico var kopplad till datalogger och dess resultat visas därför kontinuerligt över mätperioden. Övriga givare avlästes manuellt och visas punktvís sammanbundna med streckade linjer. Vilka givare, och också deras individuella märkning, som monterades i respektive provkropp framgår enligt provplan i tabell 2.2 i rapporten. De uttagna proven visade generellt lägre RF oavsett givare tillsammans med borrhålsmonterad 605 med tejp.



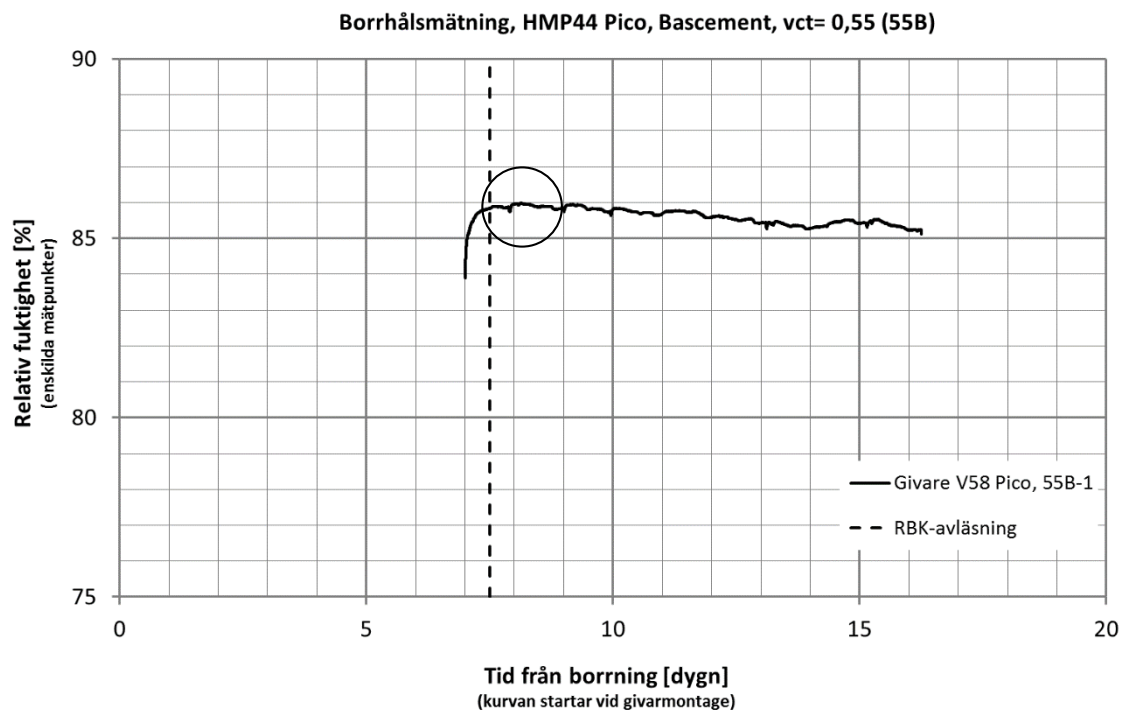
Figur 16 Relativ fuktighet mätt i borrhål och på uttagna prov redovisade som medelvärde utom för Testo 635 och Pico-loggad Vaisala HMP44 som endast finns i en mätpunkt vardera. Vaisala HMP44 Pico för borrhålsmätning loggades medan övriga sensorer avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. HumiGuard monterades i samband med borrning medan övriga givare för borrhålsmätning monterades efter sju dygns konditioneringstid. Mätning på uttagna prov startade tre dygn efter provtagning.

För HumiGuard i figur 17 saknas avläsningar före sju dygn från montering varför det är omöjligt att bedöma huruvida tidpunkten för RBK-avläsning är lämplig. Det man emellertid kan notera är att RF-nivåerna för samtliga tre mätpunkter minskade som funktion av tiden. Detta kan inte bero på uttorkning av betongen eftersom övriga givare ligger stabilt och studerad period är så kort.

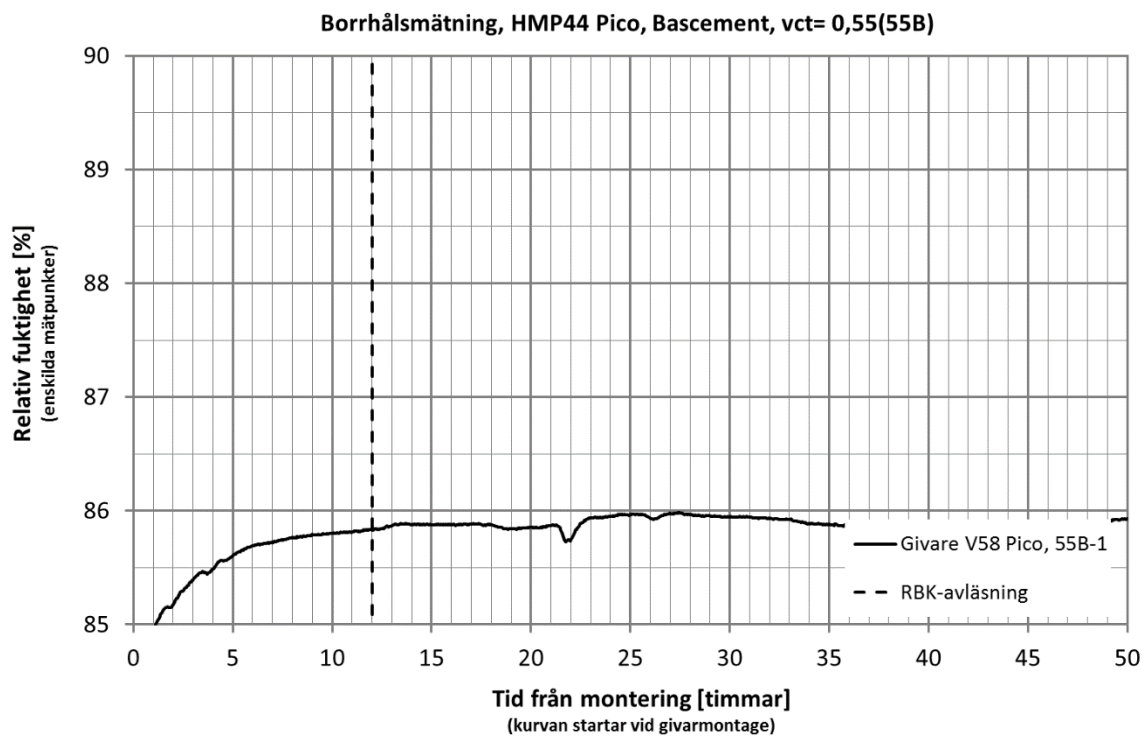


Figur 17 Relativ fuktighet från tre mätpunkter i enskilda provkroppar där givarna, HumiGuard, avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. Samtliga givare monterades i samband med borrhning.

Figureerna 18 och 19 visar resultat från den loggade borrhålsmätningen som gjordes i en enskild mätpunkt i betong med vct 0,55. I figuren 19 är mätperioden från montering av givarna till avläsning förstörad. Fuktjämvikt bedöms ha inträtt cirka ett dygn efter givarmonterage vilket medför att avläsning enligt RBK, 12 timmar efter givarmonterage, inte är tillämpligt.

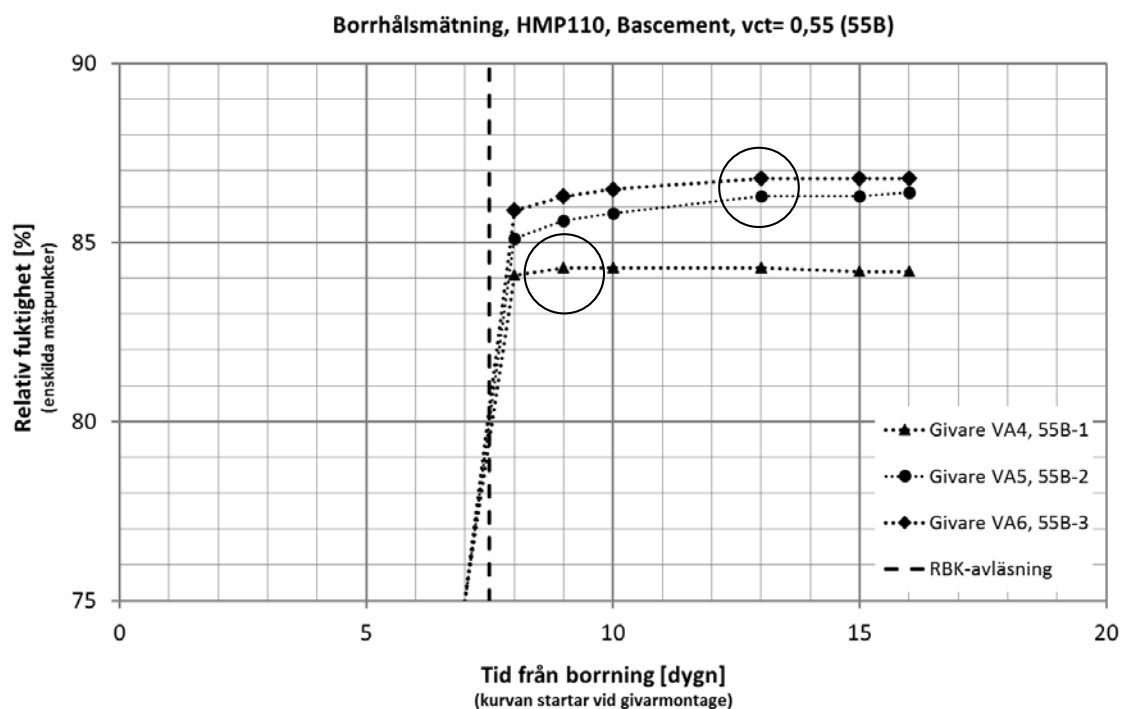


Figur 18 Relativ fuktighet från loggad Vaisala HMP44 i en provkropp. Givaren monterades sju dygn efter borrhning och resultaten från Pico-loggern justerade enligt avsnitt 9.



Figur 19 Insvängningsförloppet för Pico-loggad HMP44-sensor, från montering till avläsning enligt RBK. Resultat är en del av det som visas i figur 18.

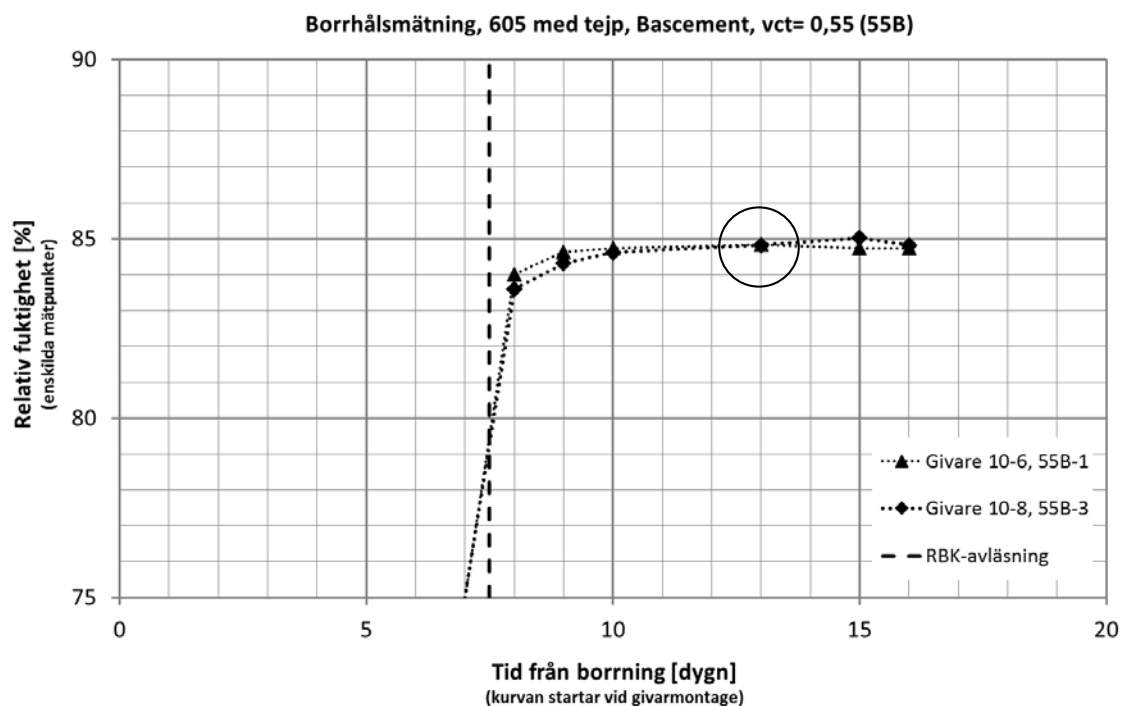
I figuren 20 visas resultat från tre individuella borrhålsmätningar med HMP110 varav två av mätpunkterna behöver flera dygn för att uppnå rimligt god jämvikt.



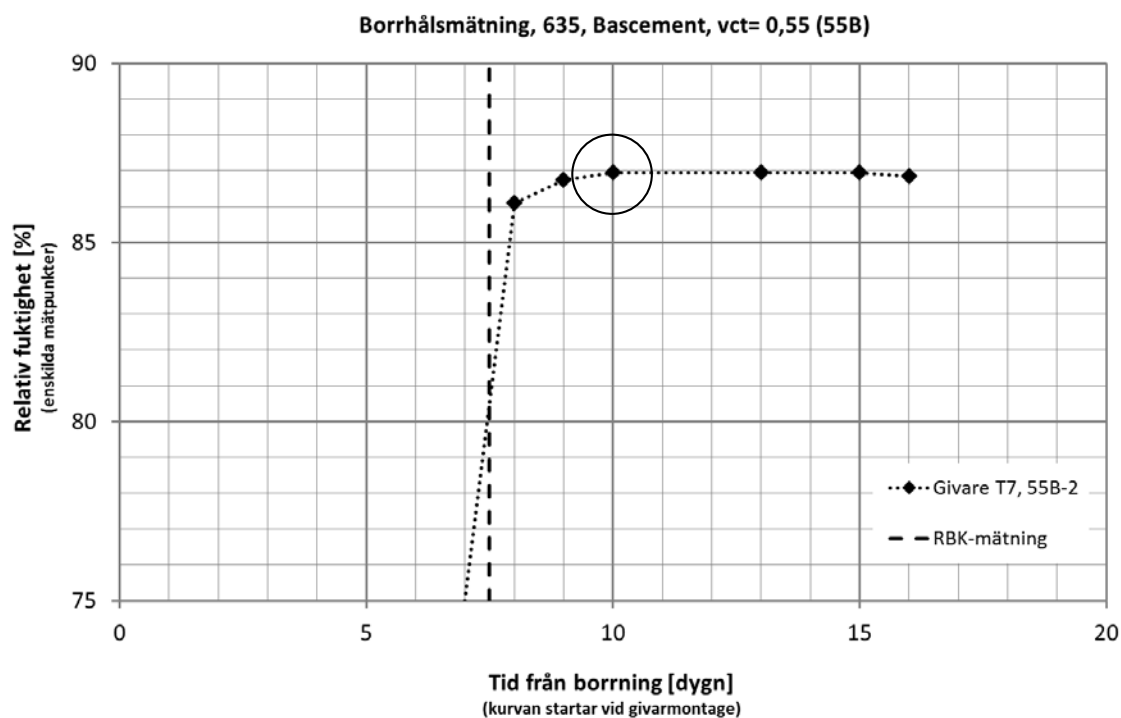
Figur 20 Relativ fuktighet från tre mätpunkter i enskilda provkroppar där givarna, Vaisala HMP110, avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. Givarna monterades sju dygn efter borrhning. RBK-avläsning tillåts 12 timmar efter montering.

Figuren 21 och 22 nedan visar resultat från enskilda Testo-givare av modellerna 605, med tejp, samt 635 med teflonfilter. Givaren 605 visar låga RF-nivåer jämfört med 635 och ingen av givarna nådde jämvikt vid tidpunkten för RBK-avläsning. De båda givarna bedöms behöva vara monterade minst tre dygn för att uppnå ett tillfredsställande jämviktsläge.

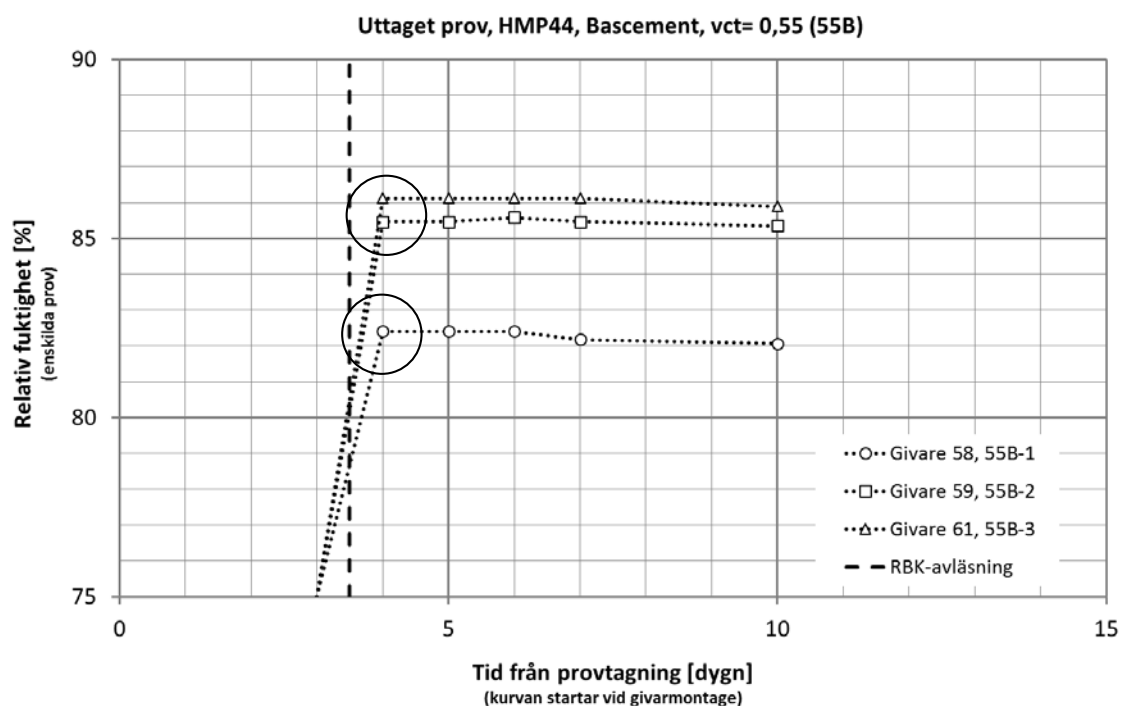
Resultat från individuell RF-mätning på uttagna prov visas i figur 23 och 24 för HMP44 och HMP110. Båda givarna nådde snabbt ett tillfredsställande jämviktsläge vilket inträffade cirka ett dygn efter montering. Vid jämförelsen mellan alla mätmetoder för detta vct visade uttagna proven lägst RF tillsammans med borrhålsmätning utförd med 605 och tejp.



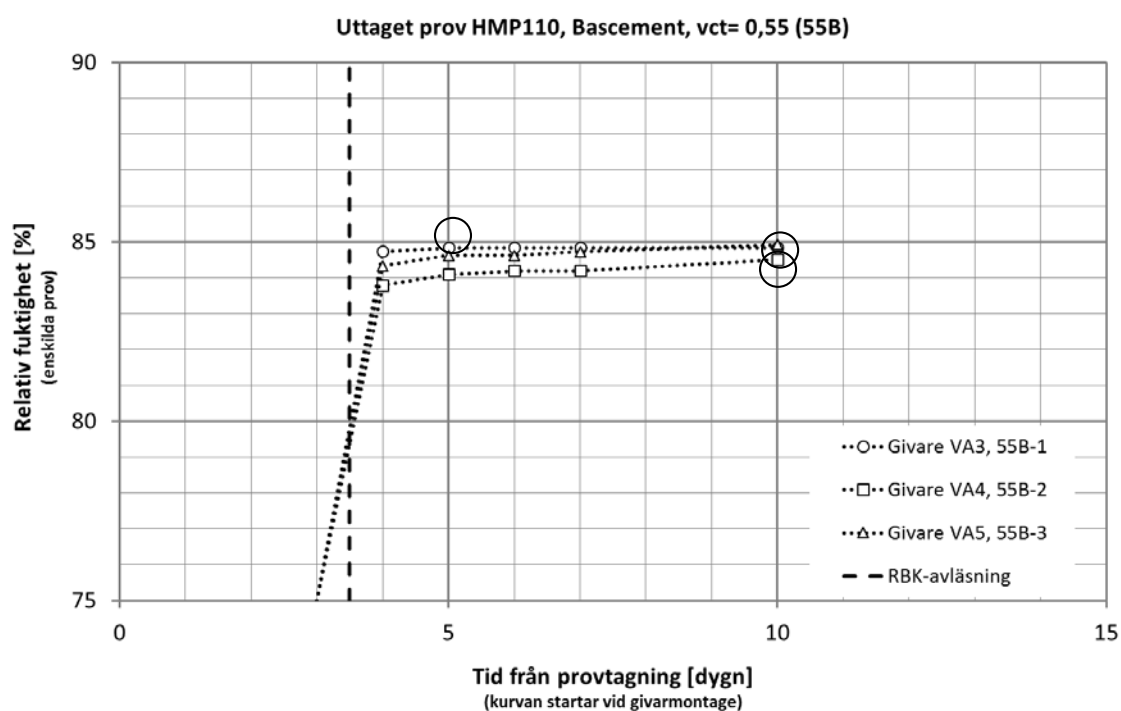
Figur 21 Relativ fuktighet från två mätpunkter i enskilda provkroppar där givarna, Testo 605 med Scanpor tejp, avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. Båda givare monterades sju dygn efter borring. RBK-avläsning tillåts 12 timmar efter montering.



Figur 22 Relativ fuktighet från en mätpunkt med givare Testo 635, med teflonfilter, som avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. Givaren monterades sju dygn efter borring. RBK-avläsning tillåts 12 timmar efter montering.



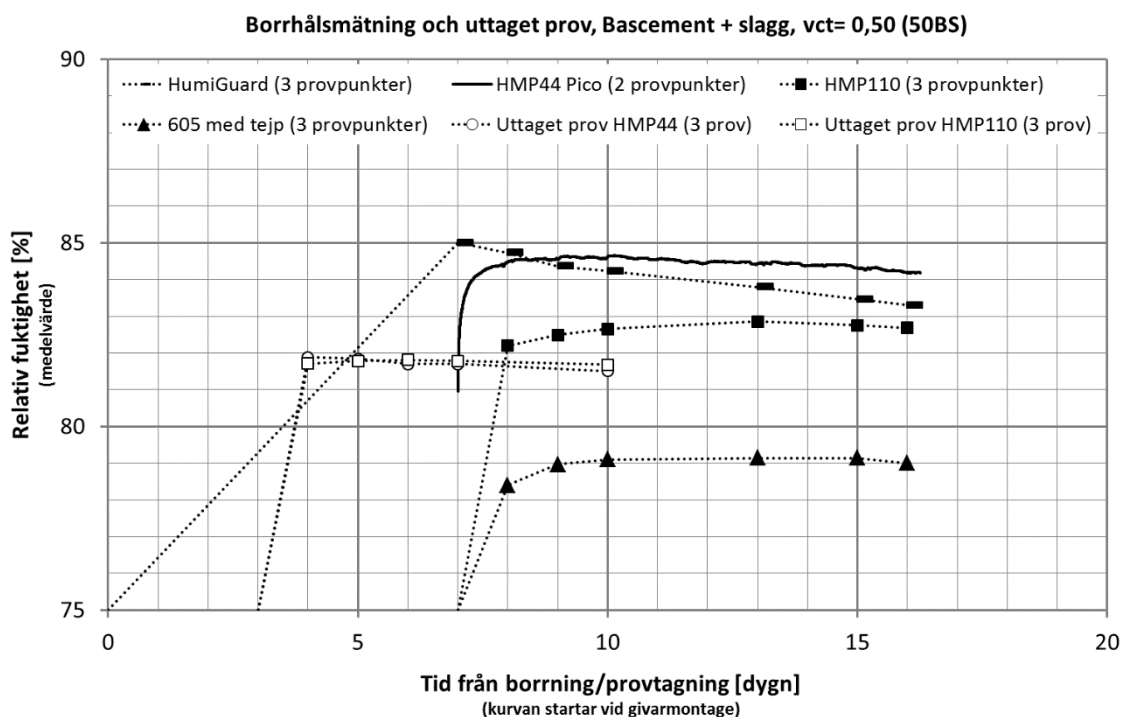
Figur 23 Relativ fuktighet på uttagna prov från tre enskilda provkroppar där givarna, Vaisala HMP44, avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. Givarna monterades tre dygn efter provtagning. RBK-avläsning tillåts 12 timmar efter montering.



Figur 24 Relativ fuktighet på uttagna prov från tre enskilda provkroppar där givarna, Vaisala HMP110, avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. Givarna monterades tre dygn efter provtagning. RBK-avläsning tillåts 12 timmar efter montering.

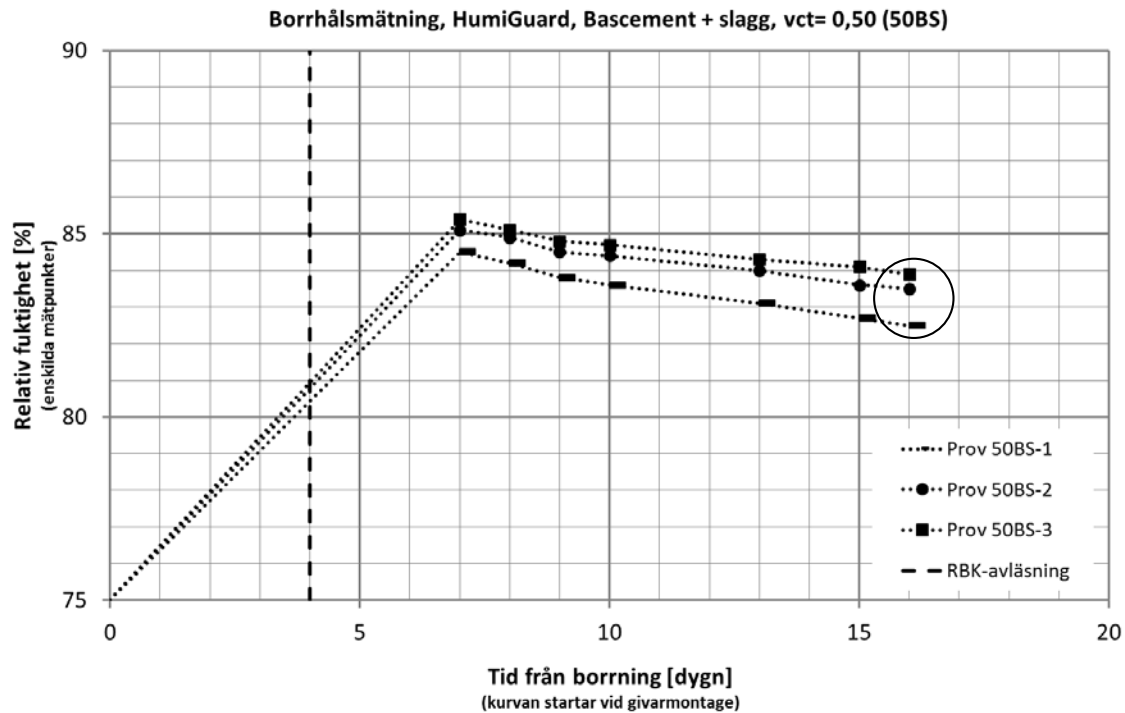
4. Mätning på betong vct 0,50 med slagg

I figur 25 visas jämförelse av kalibrerad RF för uttagna prov och från borrhålsmätning som funktion av tid från provtagning respektive borrhning. RF-nivåerna utgör medelvärde av tre prov eller provpunkter utom i ett fall vilket gäller HMP44 Pico som användes för mätning på två provpunkter. HMP44-givaren för borrhålsmätningarna var kopplad till datalogger och dess resultat visas därför kontinuerligt över mätperioden. Övriga givare, också HMP44 för de uttagna proven, avlästes manuellt och visas punktvis sammanbundna med streckade linjer. Vilka givare, och också deras individuella märkning, som monterades i respektive provkropp framgår enligt provplan i tabell 2.2 i rapporten. De uttagna proven visade generellt på lägre RF oavsett givare men lägst värde visade de borrhålsmonterade 605 med tejp.



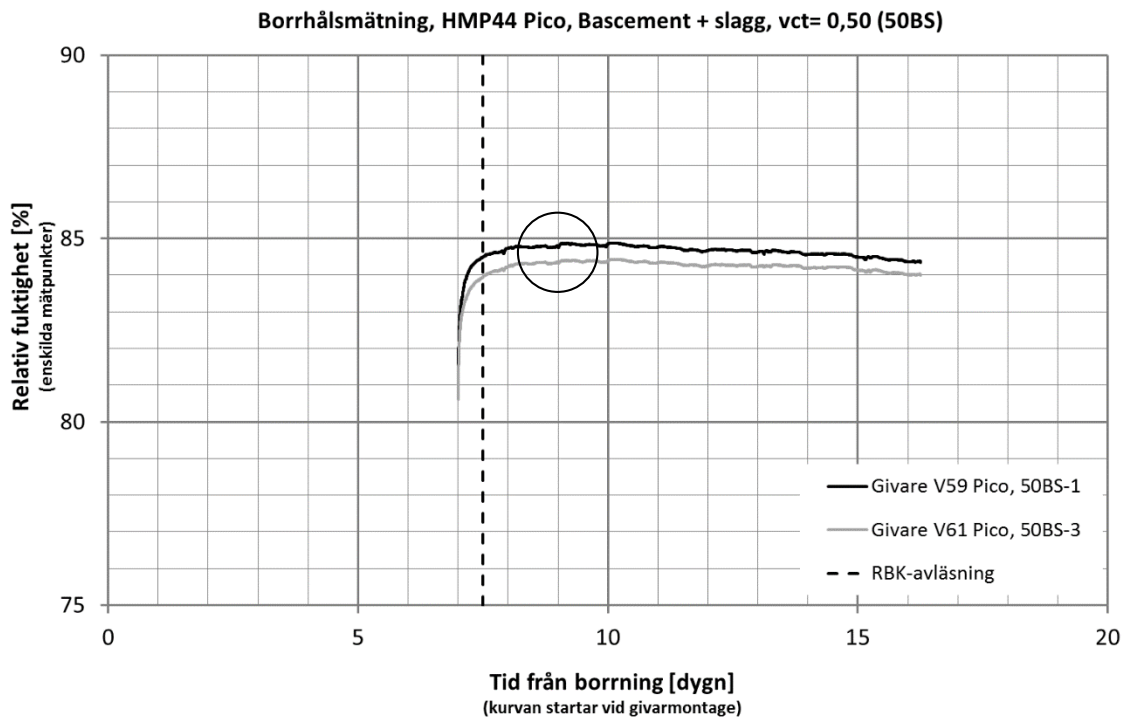
Figur 25 Relativ fuktighet mätt i borrhål och på uttagna prov redovisade som medelvärde. Vaisala HMP44 Pico för borrhålsmätning loggades medan övriga sensorer avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. HumiGuard monterades i samband med borrhning medan övriga givare för borrhålsmätning monterades efter sju dygns konditioneringstid. Mätning på uttagna prov startade tre dygn efter provtagning.

För HumiGuard enligt figur 26 saknas avläsningar de sex första dygnen efter montering varför det är omöjligt att bedöma huruvida tidpunkten för RBK-avläsning är lämplig. Det man emellertid kan notera är att RF-nivåerna för samtliga tre mätpunkter minskar som funktion av tiden.

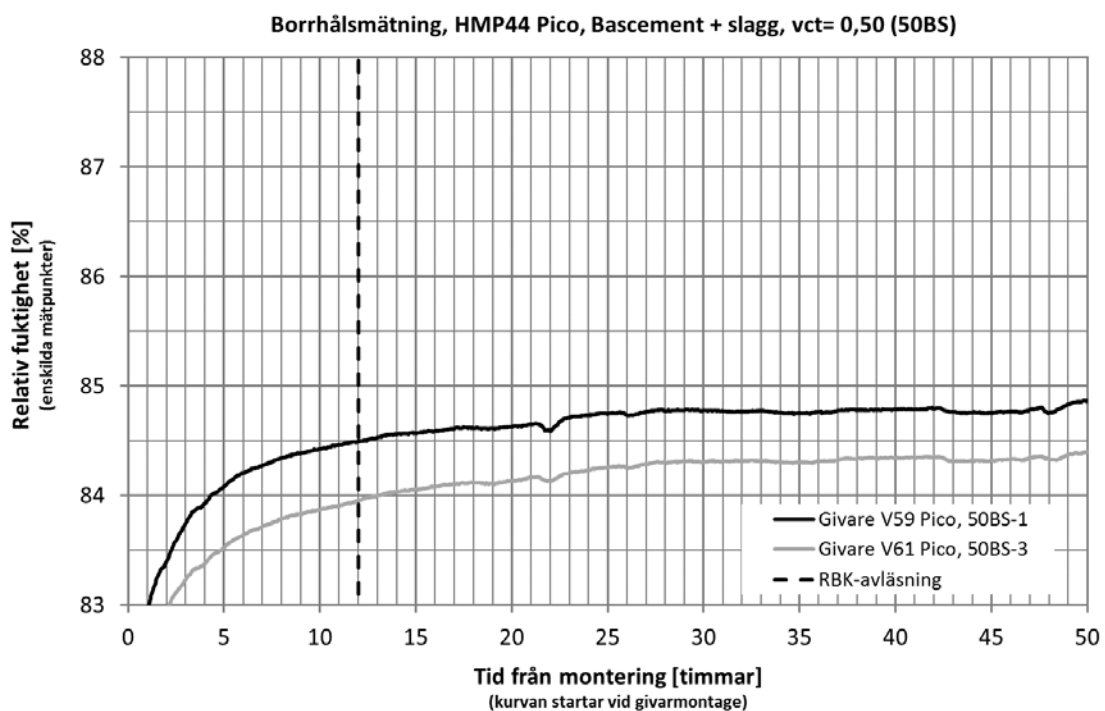


Figur 26 Relativ fuktighet från tre mätpunkter i enskilda provkroppar där givarna, HumiGuard, avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. Samtliga givare monterades i samband med borrning.

Figureerna 27 och 28 nedan visar resultat från de loggade borrhålsmätningarna som gjordes i två enskilda provkroppar. I figuren 28 är mätperioden från montering av givarna till avläsning enligt RBKs riktlinjer förstörad. Resultatet visar att HMP44 måste vara monterad cirka två dygn för att uppnå jämvikt vilket innebär att RBKs riktlinjer om tillåten avläsning efter 12 timmar inte fungerar. Anledningen till att det behövdes längre tid till jämvikt för denna mätning, jämfört med motsvarande mätning på vct 0,5 utan tillsats av slagg, kan vara ett resultat av att betongen sannolikt får en minskad fuktkapacitet med slaggtillsats. Eftersom betongen har lägre fuktkapacitet kommer fukten att hämtas från betong som befinner sig längre från borrhålets yta, vilket krävs för att fukta upp sensorn. Den ökade transportvägen innebär att tiden till jämvikt blir längre.

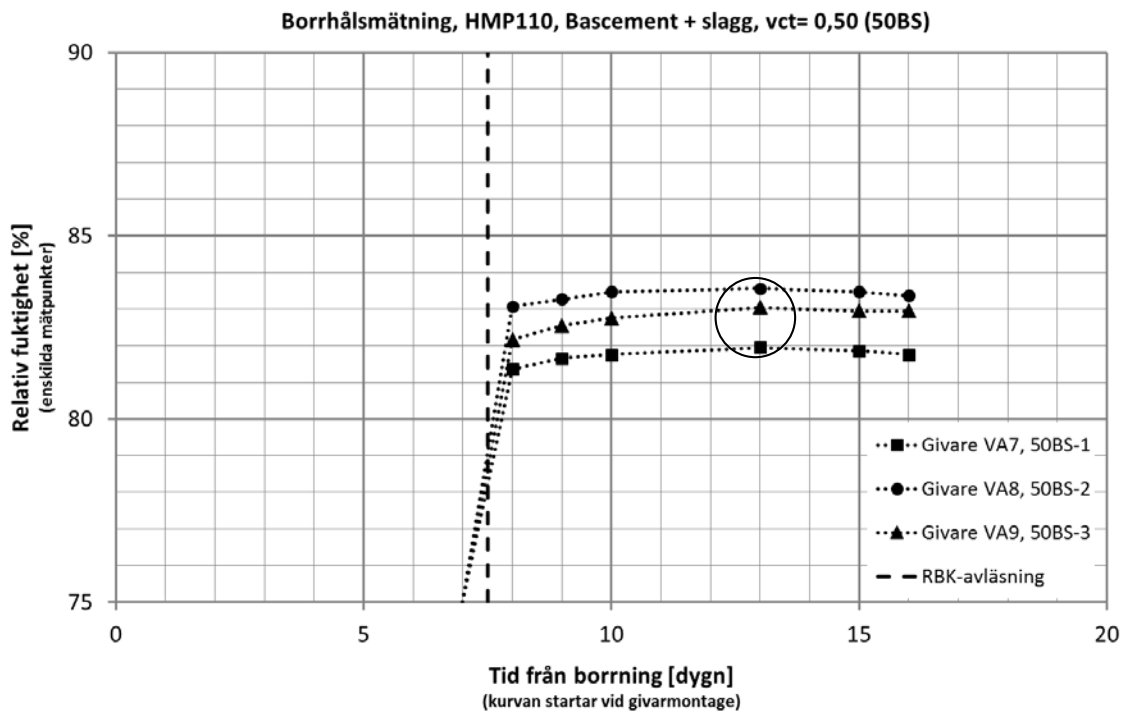


Figur 27 Relativ fuktighet från loggade Vaisala HMP44 i två provkroppar. Givarna monterades sju dygn efter borrhning och resultaten från Pico-loggern är justerade enligt avsnitt 9.



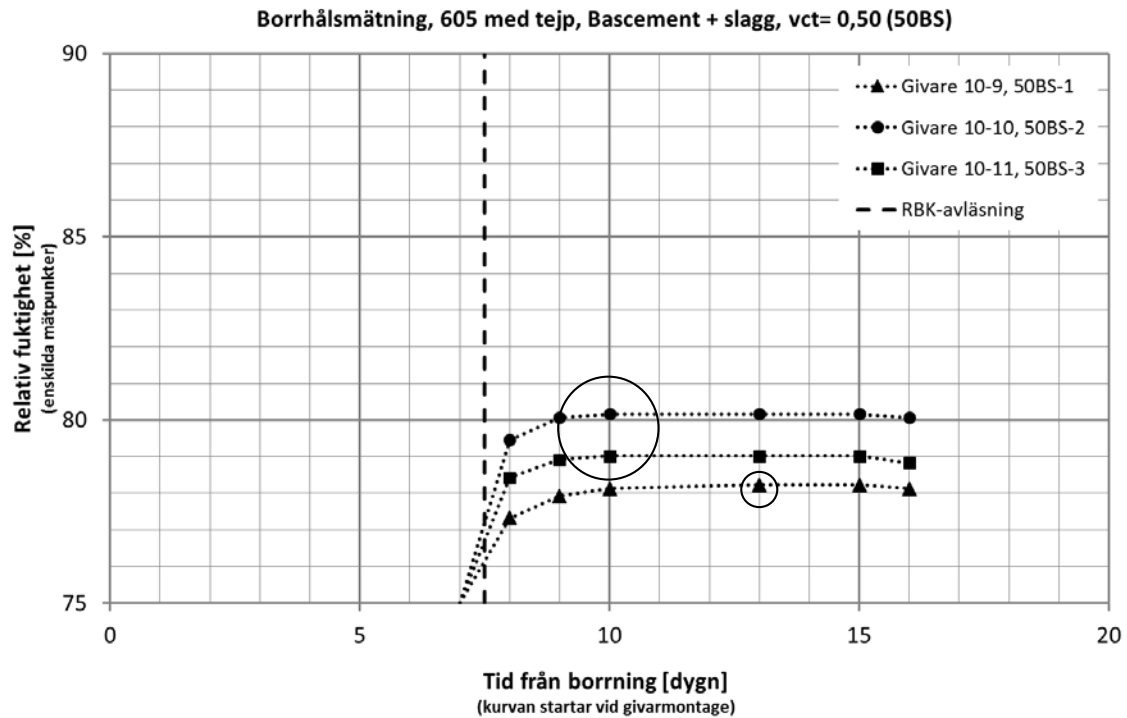
Figur 28 Insvägningsförloppet för två Pico-loggade HMP44-givare, från montering till avläsning enligt RBK. Resultaten är en uppförstorad del av de som visas i figur 27.

I figuren 29 visas resultat från tre individuella borrhålsmätningar med HMP110 varav alla mätpunkter behövde cirka tre dygn för att uppnå ett rimligt jämviktsläge. RBKs riktlinjer om tillåten avläsning efter 12 timmar är inte ett tillräckligt kriterium för att uppnå fuktjämvikt.



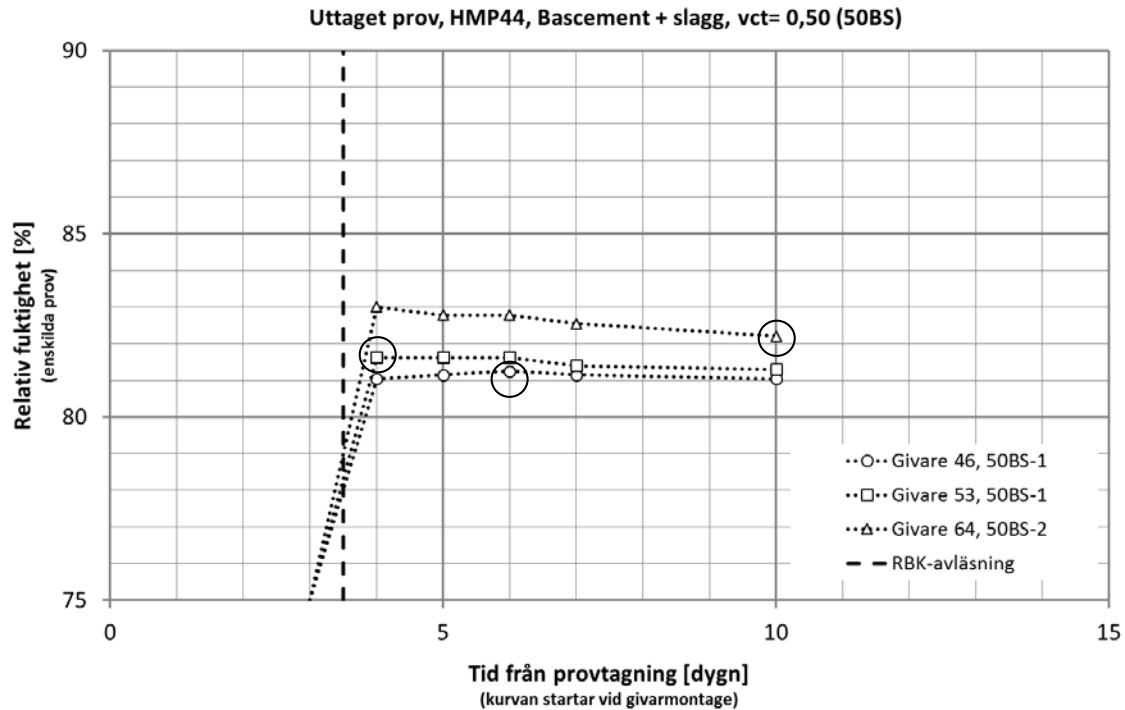
Figur 29 Relativ fuktighet från tre mätpunkter i enskilda provkroppar där givarna, Vaisala HMP110, avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. Givarna monterades sju dygn efter borrhning. RBK-avläsning tillåts 12 timmar efter montering.

I figur 30 visas resultat från tre 605 med tejp där alla givarna visade låga RF-nivåer jämfört med resultaten från övriga givare i samma betongkvalitet. Samtliga givare bedömdes nå jämvikt efter att de varit monterade minst tre dygn vilket innebär att RBKs krav på jämvikt är otillräckligt.

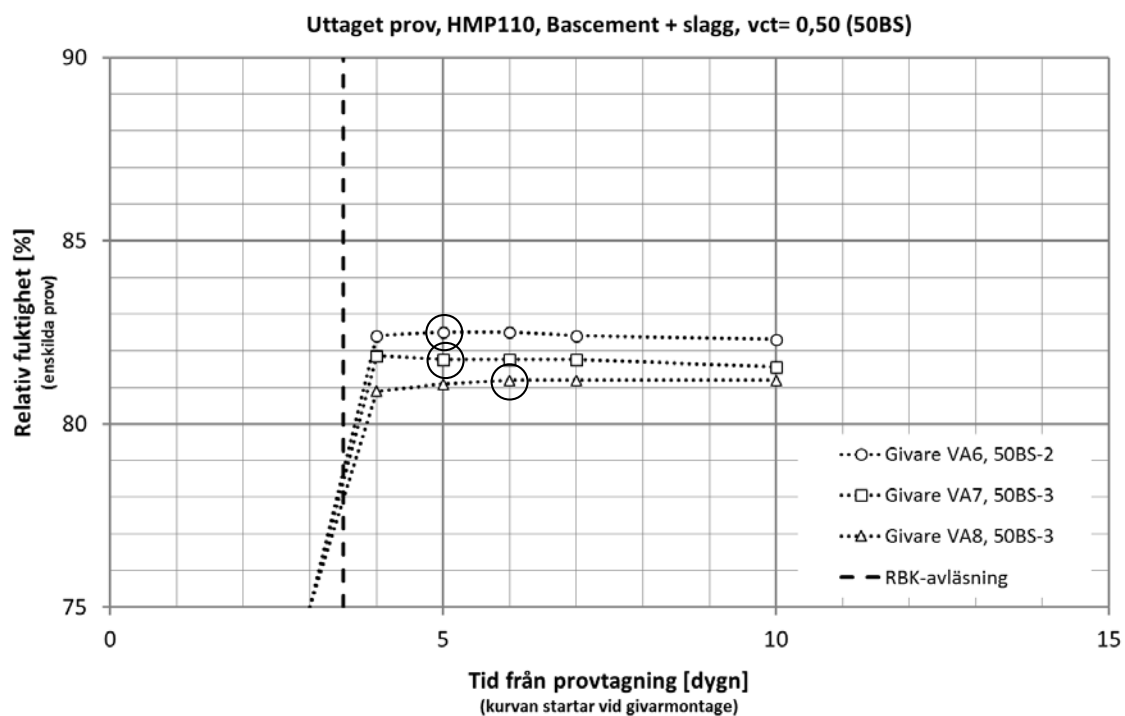


Figur 30 Relativ fuktighet från tre mätpunkter i enskilda provkroppar där givarna, Testo 605 med Scanpor tejp, avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. Samtliga givare monterades sju dygn efter borrhning. RBK-avläsning tillåts 12 timmar efter montering.

Resultat från individuell RF-mätning på uttagna prov visas i figur 31 och 32 för HMP44 och HMP110. Båda givarna nådde snabbt ett tillfredsställande jämviktsläge vilket inträffade cirka ett dygn efter montering. Vid jämförelse mellan alla mätningar för denna betongsammansättning visade uttagna proven och borrhålsmätning utförd med 605 och tejp lägst RF.



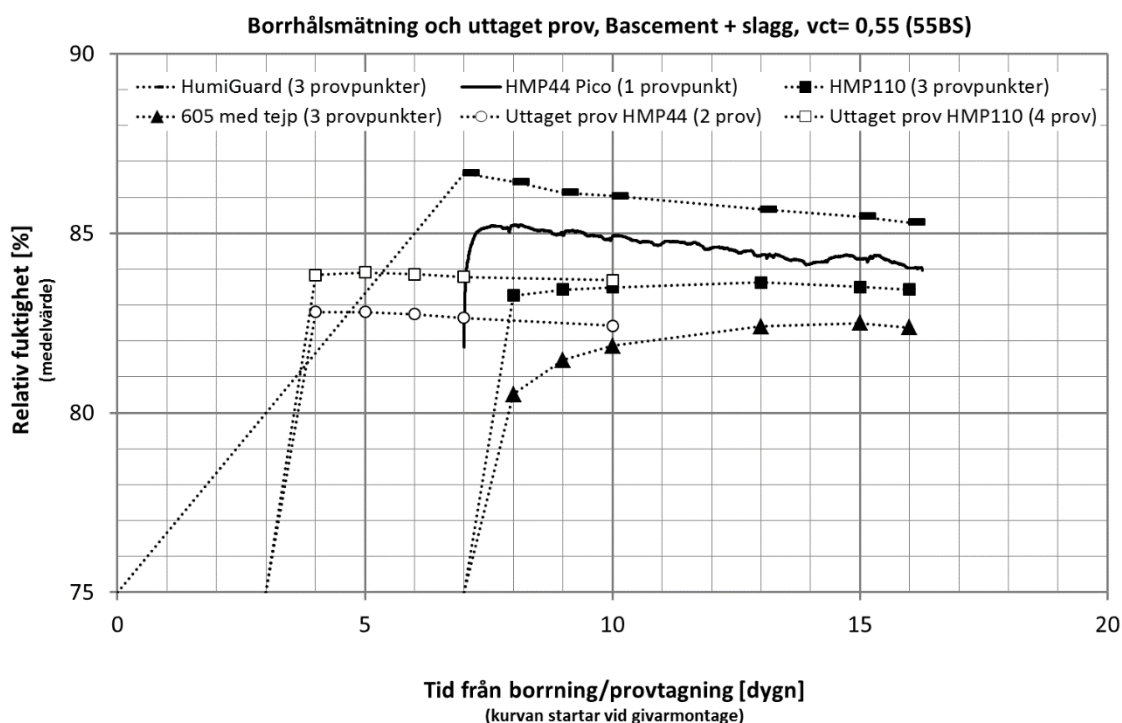
Figur 31 Relativ fuktighet på uttagna prov från två provkroppar där givarna, Vaisala HMP44, avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. Givarna monterades tre dygn efter provtagning. RBK-avläsning tillåts 12 timmar efter montering.



Figur 32 Relativ fuktighet på uttagna prov från två provkroppar där givarna, Vaisala HMP110, avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. Givarna monterades tre dygn efter provtagning. RBK-avläsning tillåts 12 timmar efter montering.

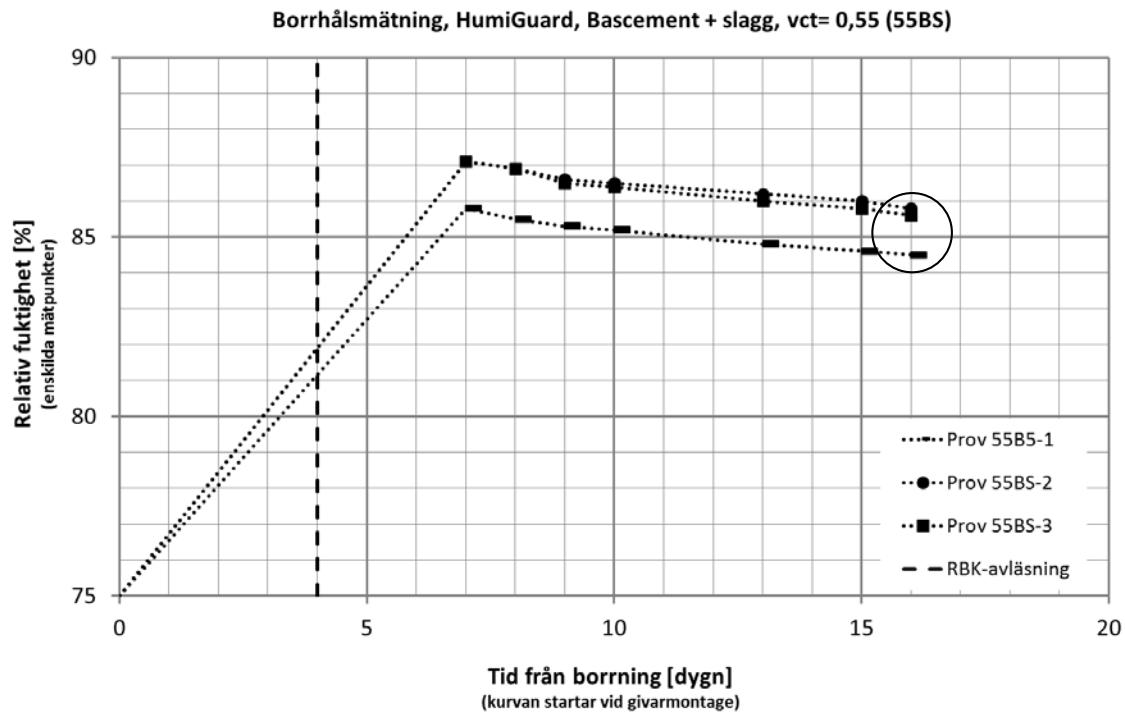
5. Mätning på betong vct 0,55 med slagg

I figur 33 visas jämförelse av kalibrerad RF för uttagna prov och från borrhålsmätning som funktion av tid från provtagning respektive borrhning. RF-nivåerna utgjorde medelvärde från två till fyra prov eller provpunkter utom i ett fall vilket gällde HMP44 Pico som användes för mätning i en provpunkt. HMP44 Pico för borrhålsmätningar var kopplad till en datalogger och dess resultat visas därför kontinuerligt över mätperioden. Den sjunkande trenden hos HMP44 Pico observerades endast för denna mätning, som gjordes med en provpunkt, medan samma mätning på andra vct visade stabil RF-nivå. Mätrörer undersöktes med avseende på luftläckage, vilket skulle kunna vara en möjlig orsak till beteendet, men inget läckage observerades. Sannolikt har den enskilda givaren utsatts för yttre påverkan alternativt har provpunkten olycklig placering med stort ballastkorn just under mätrörets öppning. Övriga givare avlästes manuellt och visas punktvis sammanbundna med streckade linjer. Vilka givare samt deras individuella märkning, som monterades i respektive provkropp framgår enligt provplan i tabell 2.2 i rapporten.



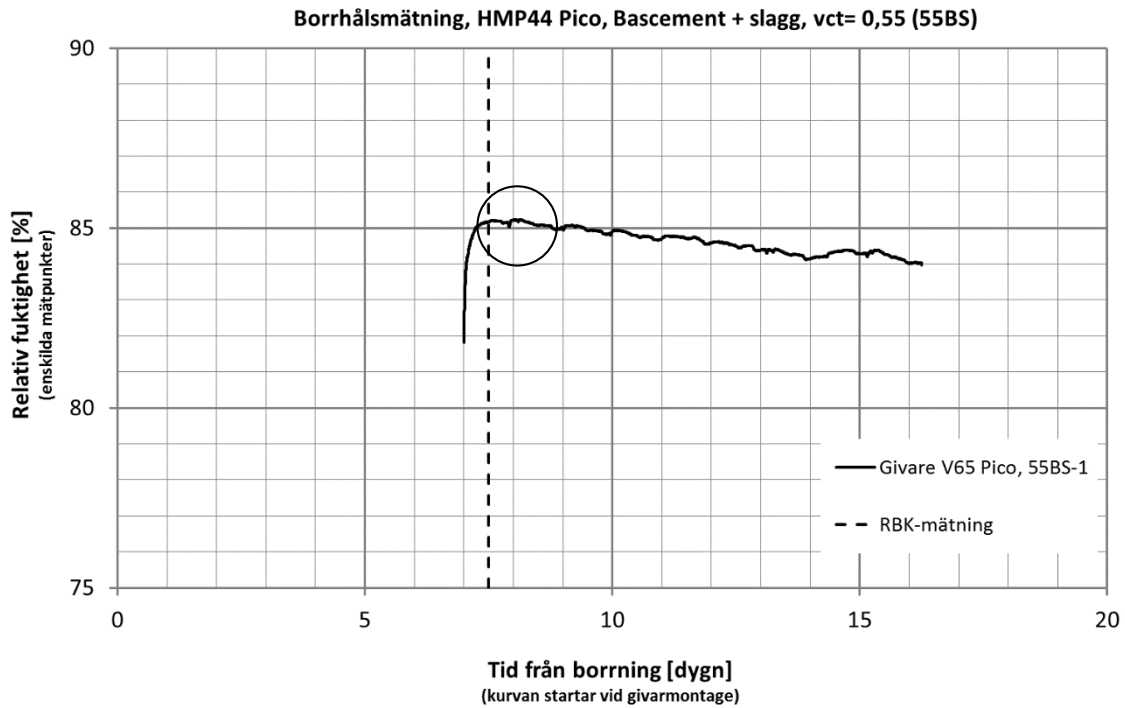
Figur 33 Relativ fuktighet mätt i borrhål och på uttagna prov redovisade som medelvärde utom för Vaisala HMP44 Pico i borrhål som utgör enskild mätpunkt. Vaisala HMP44 Pico loggades medan övriga givare avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. HumiGuard monterades i samband med borrhning medan övriga givare för borrhålsmätning monterades efter sju dygns konditioneringstid. Mätning på uttagna prov startade tre dygn efter provtagning.

För HumiGuard enligt figur 34 saknades avläsningar före sju dygn från montering varför det är omöjligt att bedöma huruvida tidpunkten för RBK-avläsning är lämplig. Det man emellertid kan notera är att RF-nivåerna för samtliga tre mätpunkter minskade som funktion av tiden.

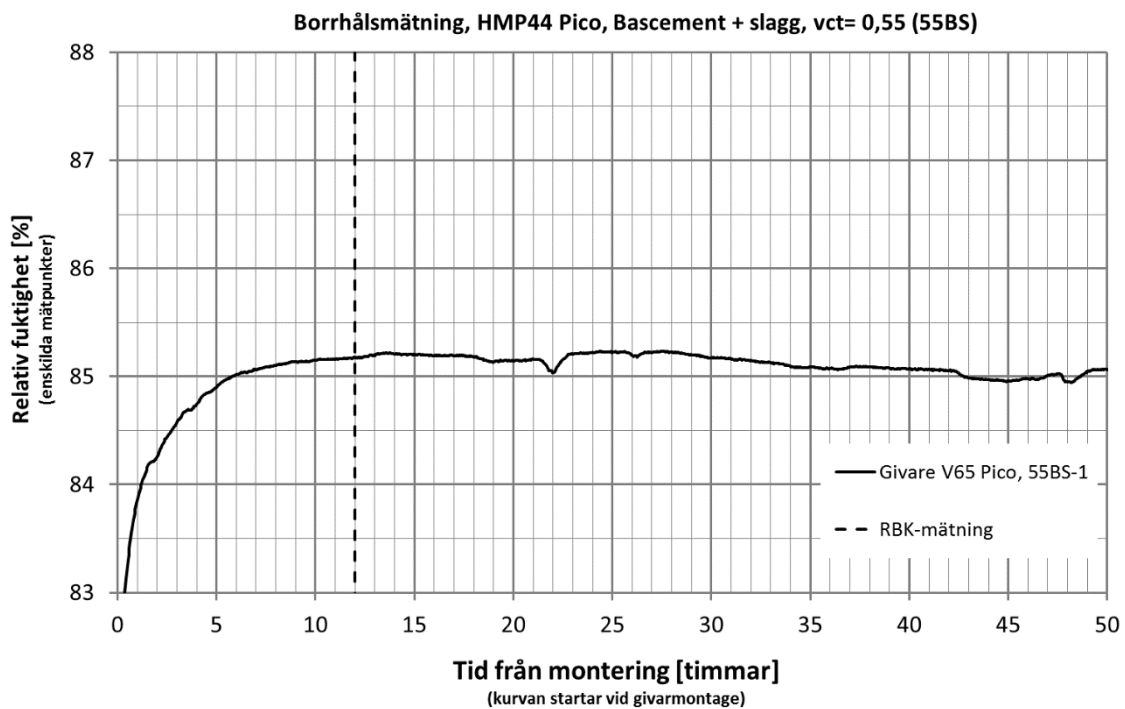


Figur 34 Relativ fuktighet från tre mätpunkter i enskilda provkroppar där givarna, HumiGuard, avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. Samtliga givare monterades i samband med borrhning.

Figureorna 35 och 36 visar resultat från den loggade borrhålsmätningen som gjordes i en enskild mätpunkt. I figuren 36 är mätperioden från montering av givarna till avläsning enligt RBKs riktlinjer förstörad. Utifrån resultatet är det svårt att bedöma tiden till jämvikt eftersom RF-nivån sjunker med tiden. Anledningen till den sjunkande RF-nivån är sannolikt att givaren är något varmare än betongen, på grund av loggningen, vilket innebär att betongen närmast givaren torkar något under mätperioden.

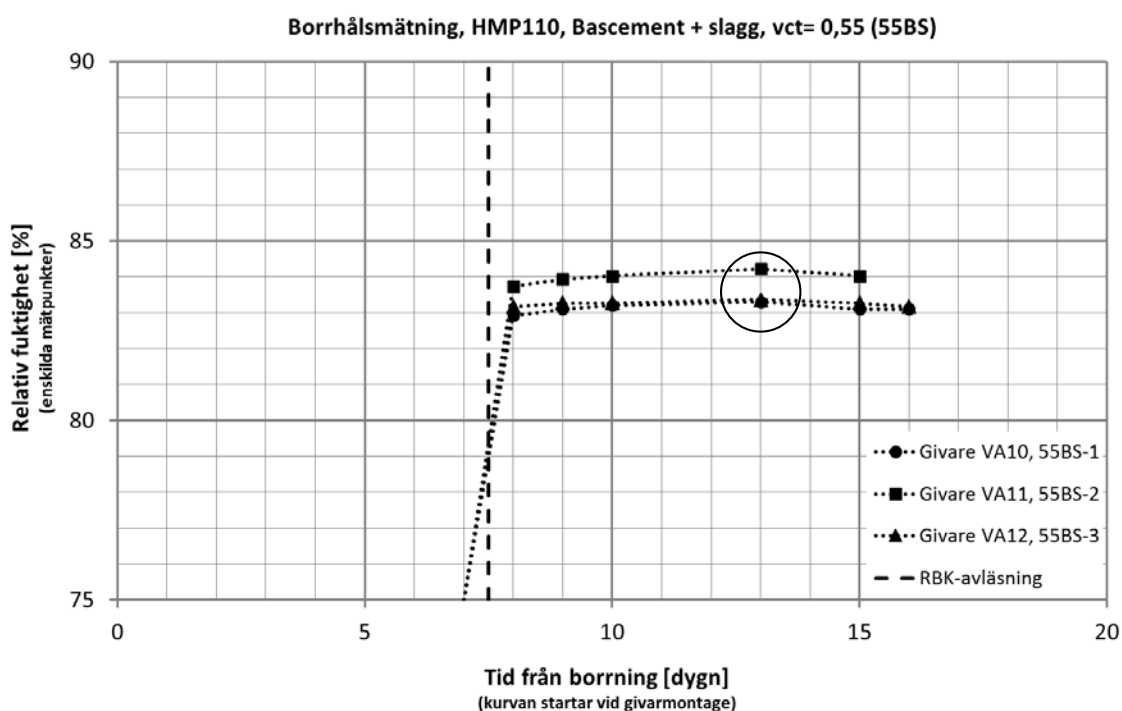


Figur 35 Relativ fuktighet från enskild loggad Vaisala HMP44. Givaren monterades sju dygn efter borrhning och resultatet från Pico-loggern är justerat enligt avsnitt 9.



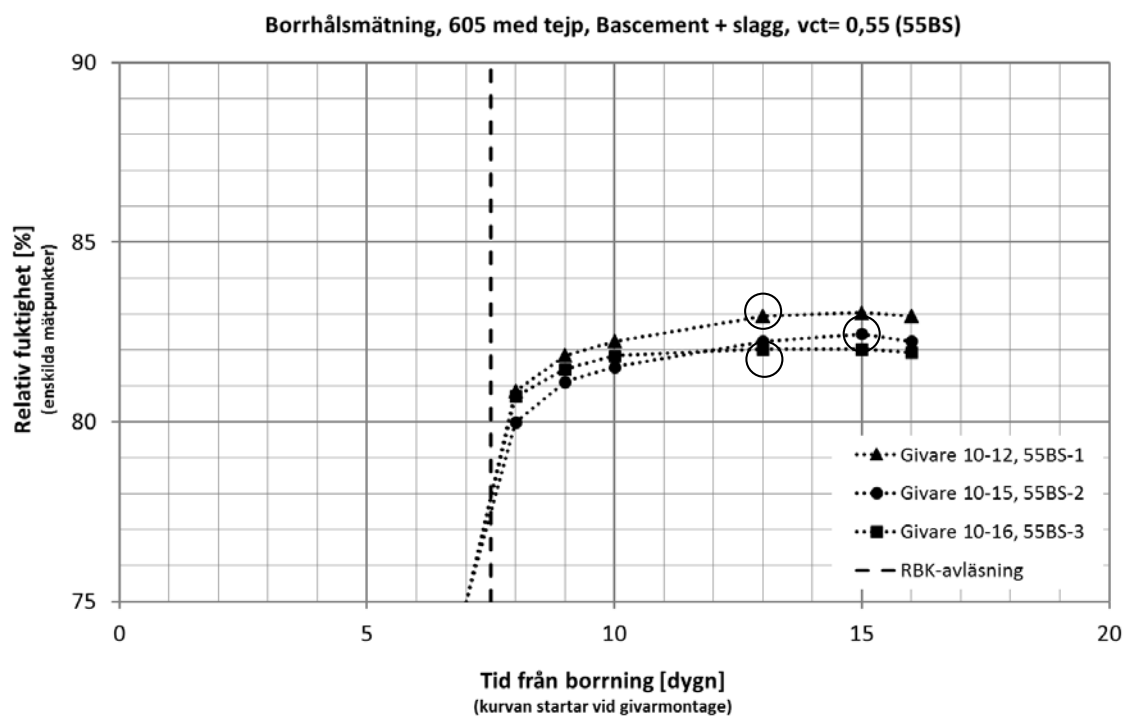
Figur 36 Insvängningsförloppet för enskild Pico-loggad HMP44-givare, från montering till avläsning enligt RBK. Resultatet är en uppförstorad del av det som visas i figur 35.

I figuren 37 visas resultat från tre individuella borrhålsmätningar med HMP110 varav alla mätpunkter nådde jämvikt efter cirka tre dygn. Således visar mätningarna på att RBKs kriterium om avläsning efter 12 timmar inte är tillräckligt för denna betongsammansättning.



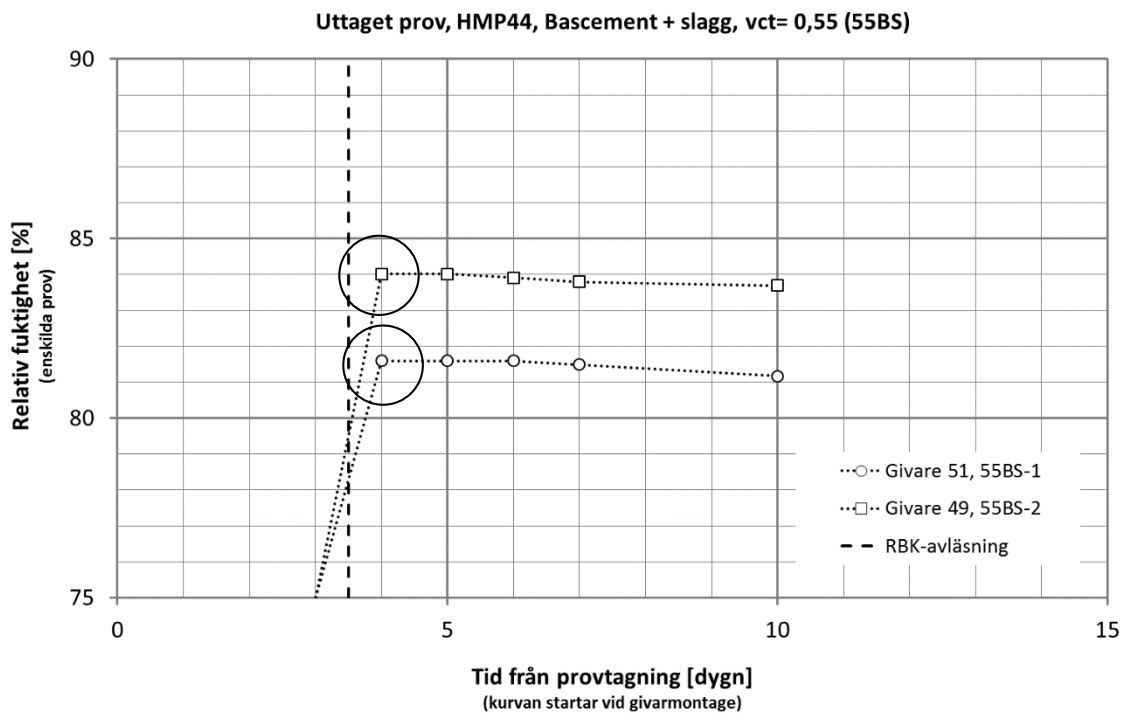
Figur 37 Relativ fuktighet från tre mätpunkter i enskilda provkroppar där givarna, Vaisala HMP110, avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. Givarna monterades sju dygn efter borrhning. RBK-avläsning tillåts 12 timmar efter montering.

I figur 38 visas resultat från tre 605 med tejp där alla givare visade låg RF jämfört med tre resterande mätningar på samma betongkvalitet. Samtliga givare behövde vara monterade i cirka sex dygn för att uppnå fuktjämvikt. Mätningarna visade att RBKs krav på jämvikt är otillräckliga.

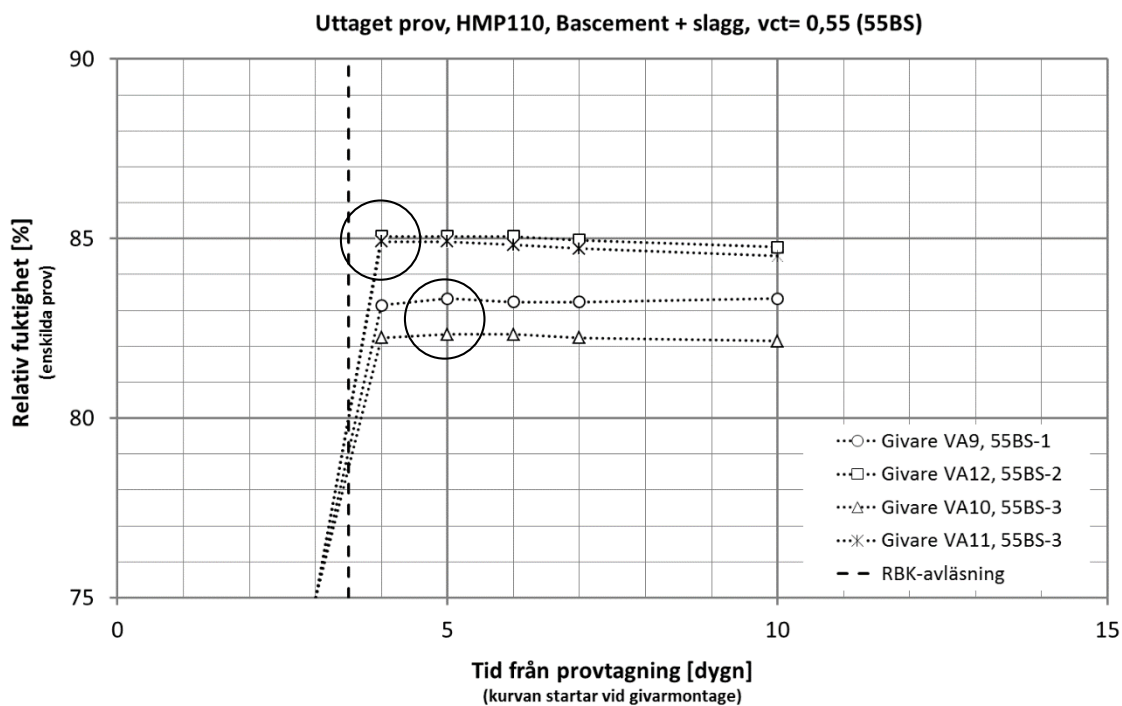


Figur 38 Relativ fuktighet från tre mätpunkter i enskilda provkroppar där givarna, Testo 605 med Scanpor tejp, avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. Båda givare monterades sju dygn efter borrhning. RBK-avläsning tillåts 12 timmar efter montering.

Resultat från individuell RF-mätning på uttagna prov visas i figur 39 och 40 för HMP44 och HMP110. Båda givarna nådde snabbt ett tillfredsställande jämviktsläge vilket inträffade cirka ett dygn efter montering. Vid jämförelsen av resultaten från alla mätmetoder, för denna betongsammansättning, visade uttagna proven och 605 med tejp lägst RF.



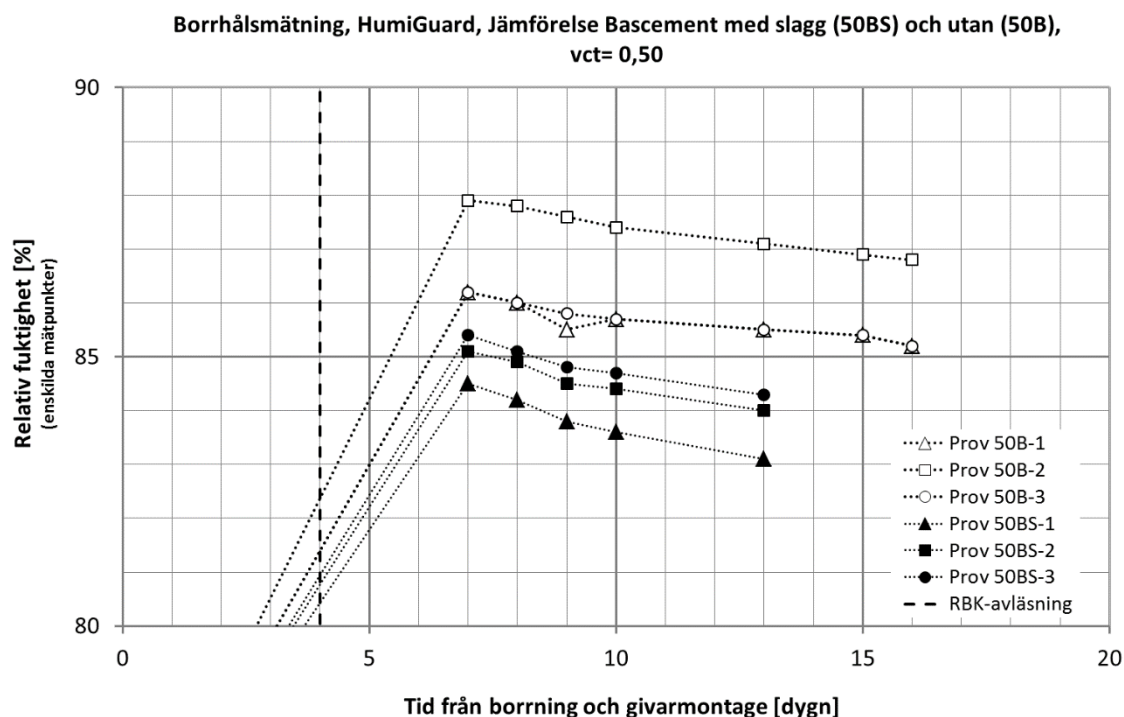
Figur 39 Relativ fuktighet på uttagna prov från två enskilda provkroppar där givarna, Vaisala HMP44, avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. Givarna monterades tre dygn efter provtagning. RBK-avläsning tillåts 12 timmar efter montering.



Figur 40 Relativ fuktighet på fyra uttagna prov från tre enskilda provkroppar där givarna, Vaisala HMP110, avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. Givarna monterades tre dygn efter provtagning. RBK-avläsning tillåts 12 timmar efter montering.

6. Jämförelse av RF för betong med och utan slagg

För att undersöka effekten av slagginblandning jämförs resultaten från individuella borrhålsmätningar med HumiGuard på betong med två månaders ålder som tillåts torka enkelsidigt. Givarna monterades enligt anvisningarna, det vill säga direkt i samband med borringen. RF-nivån för alla mätpunkter visar på samma sätt en sjunkande trend oavsett om betongen innehöll slagg eller inte enligt figur 41. Oavsett tidpunkt visade proven innehållande slagg lägre RF än de med enbart Bascement som bindemedel.

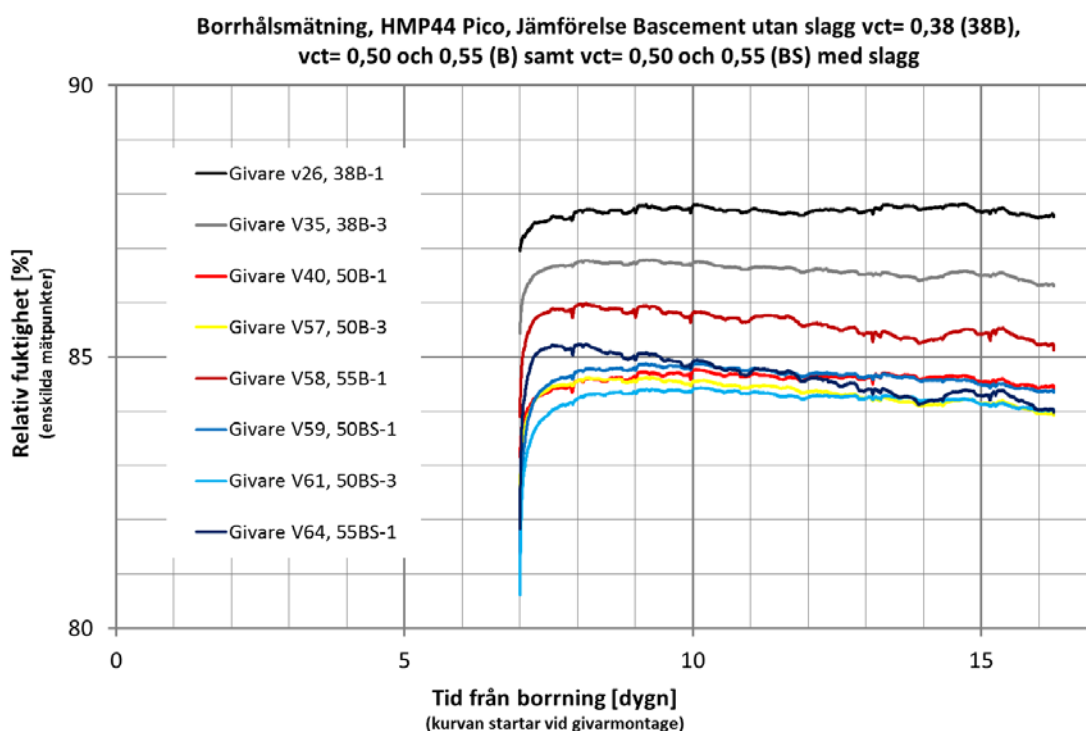


Figur 41 Jämförelse av resultat från mätning på betong med vct= 0,5 utan respektive med slagg. Resultaten redovisas som relativ fuktighet från tre mätpunkter i tre enskilda provkroppar från respektive betong. Givarna, HumiGuard, avlästes manuellt en gång per dygn under vardagar. Samtliga givare monterades i samband med borring.

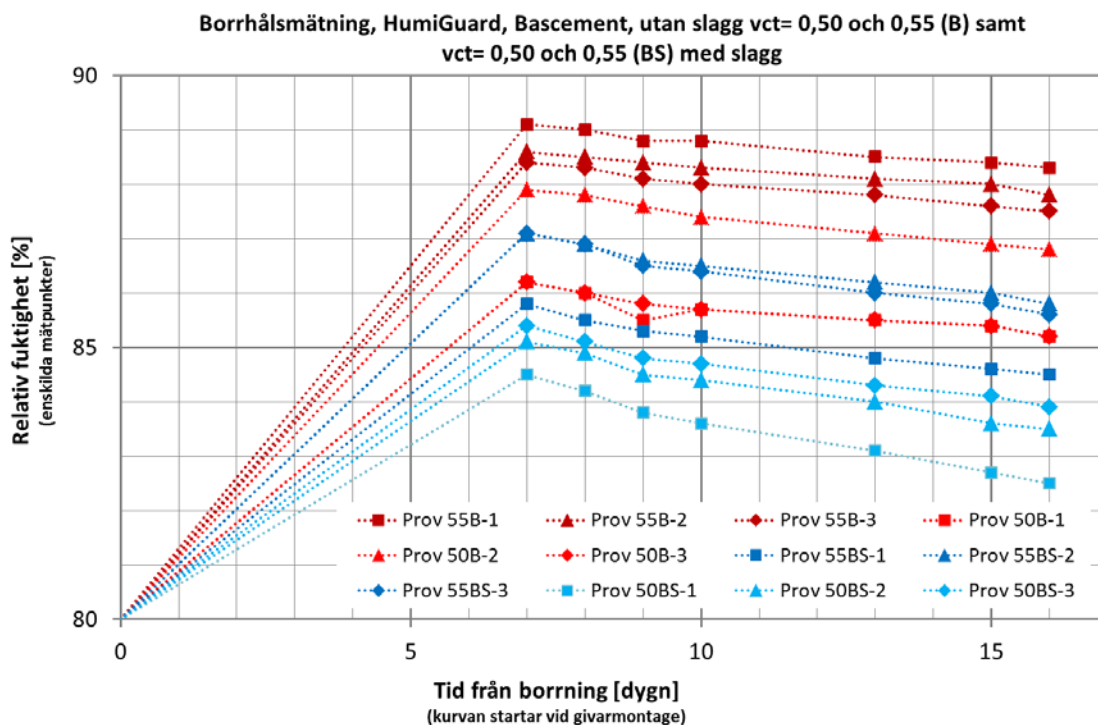
7. Tid till jämvikt för Vaisala HMP44 och HumiGuard monterade i borrhål

Tiden till jämvikt vid mätning i borrhål för samtliga betongsammansättningar redovisas i figurerna nedan. Figur 42 visar resultat från samtliga enskilda borrhålsmätningar med loggade HMP44 medan figur 43 visar motsvarande resultat mätta med HumiGuard. HMP44-givarna monterades sju dygn efter borring av mäthål medan HumiGuard-givarna monterades i samband med borring, helt enligt RBKs riktlinjer. Mätningarna med HumiGuard gjordes inte på vct 0,38.

Generellt stämmer RF-nivåerna från de båda mätmetoderna väl överrens och de visar på liknande spridning. En avgörande skillnad mellan de båda mätmetoderna är att HMP44 når ett jämviktsläge ett till tre dygn efter montering medan HumiGuard visar på sjunkande RF-nivåer.



Figur 42 Jämförelse av resultat från samtliga loggade borrhålsmätningar med Vaisala HMP44. Givarna monterades sju dygn efter borring och resultaten från Pico-loggern är justerade enligt avsnitt 9. RBK-avläsning tillåts från 12 timmar efter montering för alla prov märkta 50 eller 55 medan proven märkta 38 tidigast får avläsas två dygn efter montering.

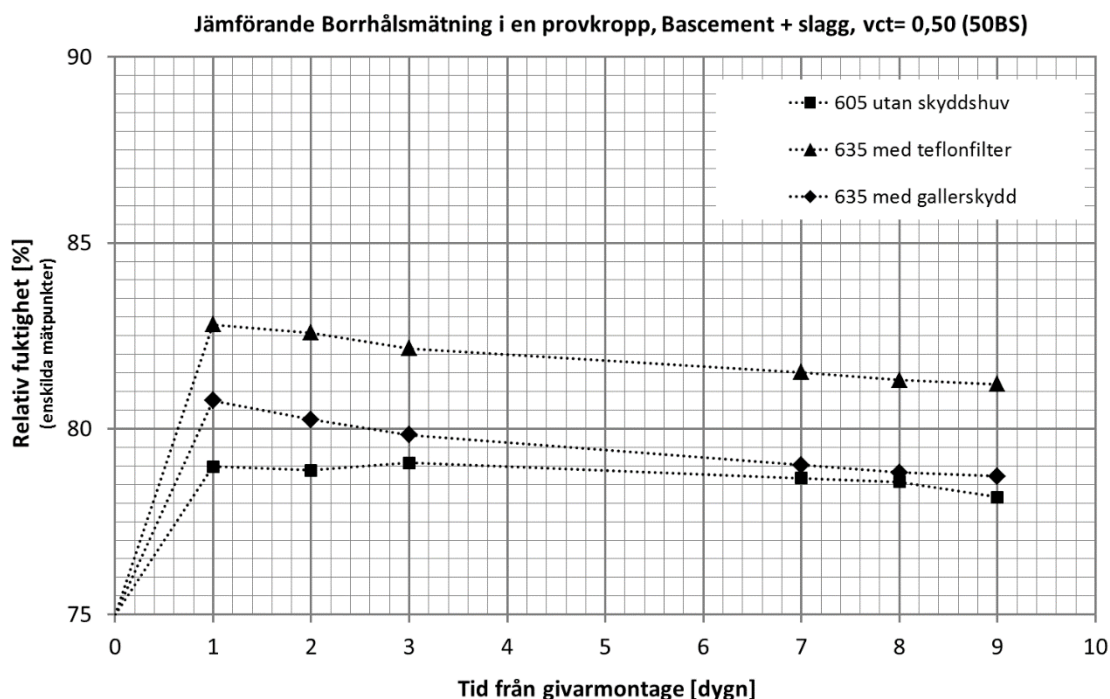


Figur 43 Jämförelse av resultat från samtliga borrhålsmätningar med HumiGuard. Givarna monterades i samband med borring.

8. Jämförande borrhålsmätning i en provkropp med olika Testo-givare

Jämförande mätningar gjordes med tre givare; 605 utan skyddshuv och tejp samt 635 med gallerskydd alternativt teflonfilter. Eftersom mätningarna gjordes i tre olika provpunkter, förvisso i en provkropp, förväntades en viss spridning. Givarna monterades i samband med borring på samma sätt som RBKs riktlinjer anger för HumiGuard. Resultatet visar att RF-nivån sjönk som funktion av tiden givarna var monterade. Under de nio dygn som givarna var monterade nåddes inte jämvikt utan konstant sjunkande RF-nivåer noterades hos de tre givarna. Eftersom RF sjönk under så pass lång tid utan att visa på jämvikt drogs en tidig slutsats att det hade uppstått otätheter mellan mät rör och betong. När givarna demonterades kontrollerades mätrörens täthet med hjälp av gummiblåsa enligt RBKs kontrollrutiner. Resultatet av täthetskontrollen var att gummiblåsan satt kvar under flera minuter vilket innebar att tätningarna fungerade. I försöken i avsnitt 3 tilläts borrhålen sju dygns konditionering innan givare av fabrikat Testo monterades, se resultat i avsnitt 3.1–3.6. Resultaten från merparten av Testo-givarna, då borrhålen tilläts konditionering före givarmontage, visade på stigande RF-nivåer efter monteringen och tillfredsställande jämvikt uppnåddes efter givarna varit monterade några dygn. För detta försök sjönk RF-nivåerna efter monteringen vilket sannolikt är en effekt av att givarna fuktas upp av borrhålet som direkt efter borringen har en något högre temperatur än givaren. När givaren ska lämna ifrån sig fukt är detta förlopp långsamt och resulterar i sjunkande RF-nivåer. Sammantaget visar försöket att borrhål måste konditioneras före givarmontage.

Vid denna jämförelse visade 635 med teflonfilter cirka två procent högre RF-nivå jämfört med 605 vilket på liknande sätt noterades vid huvudförsöken, se avsnitt 3.1–3.6. Mätningen med 635 försedd endast med gallerskydd, det vill säga utan teflonfiltret, visade emellertid på samma RF som 605. Enligt figur 3.50 framgår att gallerskyddet har betydande fuktkapacitet, vilken är jämförbar med sensorns fuktkapacitet. Gallerskyddets höga fuktkapacitet är orsak till att 635 med gallerskydd visar lägre RF än när den är försedd med teflonfilter.



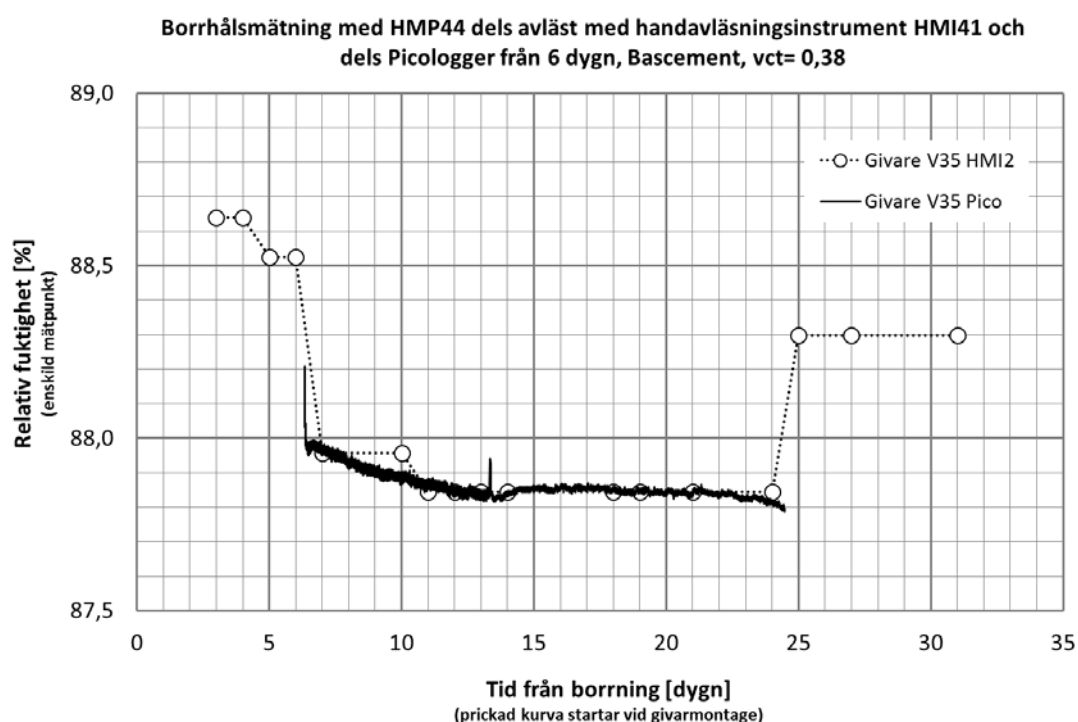
Figur 44 Jämförelse av resultat från mätning med tre olika Testo-givare i samma provkropp. Givarna monterades i samband med borring.

9. Inverkan på visad RF-nivå när Vaisala HMP44 loggas

Vid loggning av RF-givare kan sensorn vara belastad med elektrisk spänning, intervallvis eller kontinuerligt, beroende på loggningsutrustningens konfiguration. När sensorn är belastad med spänning kommer en svag ström att ledas genom dess aktiva del och orsaka värmeutveckling. Effekten av en eventuell värmeutveckling undersöktes eftersom ett stort antal HMP44-givare var kopplade till Picologger under huvudförsöken.

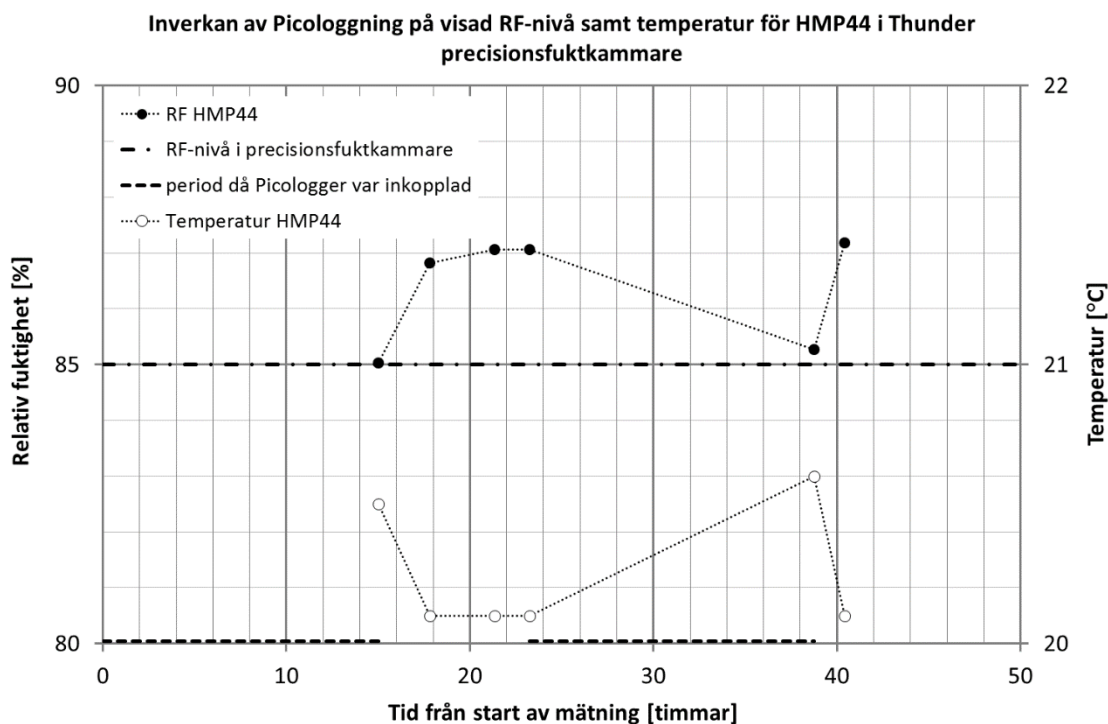
Undersökningen gjordes genom att en HMP44-givare monterades i borrhål tre dygn efter borrhning. Provet var förseglat och med lika utformning och betongsammansättning som proven märkta 38B vilket innebar vct 0,38 och Bascement. I samband med gjutning av provkroppar för huvudförsöken göts ett mindre antal prov med syfte att de skulle utgöra reserv. Detta försök på en av reservprovkropparna gjordes i projektets slutskede varför provkroppen fick avsevärt längre lagringstid, cirka 10 månader, jämfört med proven för huvudförsöken som lagrades två månader.

Resultaten från försöket visas i figur 45 som inleds med att HMP44 avläses med handavläsningsinstrument med start tre dygn efter borrhning och till och med 31 dygn från borrhning. Från cirka 6 dygn efter borrhning och fram till 24 dygn är HMP44-givaren ansluten till Picologger. När de manuella avläsningarna skedde kopplades Picologgern bort under några minuter för att sedan anslutas till givaren igen. Resultatet från de parallella avläsningarna visade tydligt att den registrerade RF-nivån sjönk cirka 0,65 %, vilket skedde under loppet av några dygn. När Picologgern kopplades bort återgick större delen av RF-sänkningen under cirka ett dygn.



Figur 45 Mätning med enskild Vaisala HMP44 i ett provhål. Från montering avlästes sensorn med handavläsningsinstrument HMI under sex dygn. Från sex dygn efter montering kopplades Pico-logger till sensorn och fram till 24 dygn efter montering skedde avläsning parallellt med Pico- och handavläsningsinstrumentet. Efter 24 dygn kopplades Pico-loggern bort.

RF-sänkningen som observerades vid Picologgning av HMP44 i figur 45 påverkar inte det kalibrerade mätresultatet ifall motsvarande sänkning av RF-nivån inträffar vid kalibreringsförfarandet. Under hela kalibreringsförfarandet, som genomfördes i precisionsfuktkammare, var givarna kopplade till loggningssystemet. För att undersöka effekten av detta gjordes försök i Thunder precisionsfuktkammare vid konstanta förhållanden, 85 % RF och 20°C. En HMP44 givare placerades i precisionsfuktkammaren och tilläts vara ansluten till Picologger under 15 timmar och därefter kopplades loggern bort under följande åtta timmar för att därefter åter anslutas till givaren. Under perioder när givaren inte var ansluten till loggern gjordes avläsningarna genom att givare och logger kopplades samman momentant. Resultaten i figur 46 visade att RF-nivån minskade 2 % samtidigt som sensorns temperatur ökade 0,5 °C när Picologgern var kopplad till sensorn. Temperaturökningen var sannolikt en effekt av att sensorn förses med spänning under tiden som loggern är inkopplad. Under förutsättning att sensorns uppvärmning inte inverkar på förhållandena i precisionsfuktkammaren borde RF-nivån sänkas cirka 2,9 % med hänsyn till att mätnadsånghalten ökar från 17,28 g/m³ till 17,79 g/m³ när temperaturen ökar från 20,0 till 20,5 °C.



Figur 46 Kontrollmätning med enskild Vaisala HMP44 i precisionsfuktkammare vid konstanta förhållanden, RF 85 % och temperatur 20°C. Under två perioder, markerade i diagrammet, var givaren kontinuerligt ansluten till Picologger medan mätningar utanför dessa perioder gjordes vid momentan inkoppling av Picologger.

Effekten av att HMP44-givaren kopplades till Picologger var olika då den var placerad i precisionsfuktkammare eller monterad i borrhål. I båda fallen noterades en sänkning av RF-nivån vilken var större i precisionsfuktkammaren, cirka 2 %. Eftersom kalibreringskurvorna för de Picologgade HMP44-givarna togs fram med loggern i kontinuerlig drift finns RF-sänkningen med i kalibreringskurvorna. Vid försöket då HMP44-givaren var monterad i borrhål noterades endast en mindre sänkning av RF-nivån, cirka 0,65 %, då loggern var i drift. Anledningen till att RF-nivån inte sjönk lika mycket när givaren var monterad i borrhål är

sannolikt att betongen närmast sensorn värmdes något. Eftersom sorptionsisotermen hos porösa material är temperaturberoende och sjunker med ökande temperatur kommer en temperaturhöjning hos betongen, om än endast ytlig i borrhålet, resultera i en höjning av RF-nivån hos luften i borrhålet. Sannolikt är det denna effekt som medförde att RF-sänkningen i borrhålet inte blev lika stor som den i precisionsfuktkammaren.

Sammanfattningsvis resulterar denna delundersökning i att RF-nivån överskattas med cirka 1,35 %, det vill säga skillnaden mellan RF-sänkning i precisionsfuktkammare respektive borrhål, om kalibreringskurvorna inte korrigeras för de loggade givarnas uppvärmningseffekt. Eftersom alla loggade borrhålmätningar vid huvudförsöken utfördes enligt samma princip som dessa är det ett rimligt antagande kalibreringskurvorna kan justeras ner med 1,35 % RF. Det är osäkert om samma korrektion gäller för de loggade mätningarna på uttagna prov eftersom detta inte undersöktes genom mätning men sannolikt värms också de uttagna proven närmast RF-sensorn på liknande sätt som betongen i borrhålet. Med hänsyn till resultateten från figurerna 45 och 46 samt ovanstående resonemang justerades samtliga kalibreringskurvor för Picologgade HMP44-givare ner med 1,35 % RF.

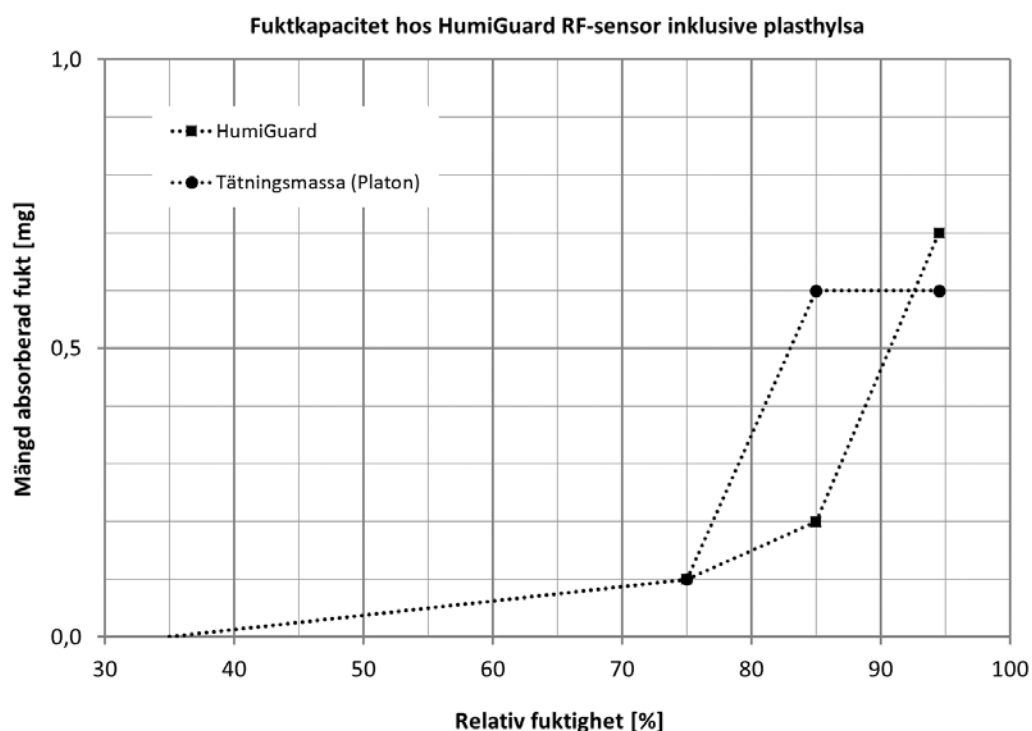
10. Fuktkapacitet samt läckage hos de provade RF-givarna

Fuktkapaciteten, det vill säga förmågan att absorbera fukt, hos RF-givarna som ingick i huvudförsöken undersöktes genom mätningar och presenteras i detta avsnitt. Bakgrunden till försöken var att under projektets första steg skilde den visade RF-nivån väsentligt mellan olika varianter av givare när betongen tilläts längre härdningstid jämfört med mätning på yngre betong, se Johansson [2014]. En viktig slutsats från den tidigare studien var att fuktutbytet mellan betong och givare kan vara en avgörande faktor bakom skillnader i visad RF-nivå mellan olika givare. Detta eftersom en betong med längre härdningstid får flackare sorptionsisoterm, det vill säga lägre fuktkapacitet, i fuktområdet som är aktuellt vid RBK-mätningar. Betongen i provhålen blir således lättare påverkad av givarens fuktkapacitet och en hög fuktkapacitet ger en lägre RF-nivå.

Utvecklingen inom betongområdet under de senaste åren indikerar att Portlandcementet i allt högre grad kommer att ersättas med mineraliska tillsatser såsom slagg och/eller flygaska. Studier som gjorts under senare år på betonger med mineraliska tillsatser indikerar att dessa får flackare sorptionsisoterm, det vill säga lägre fuktkapacitet, i fuktområdet som är av intresse för denna typ av mätningar, se Saeidpour [2015]. Med hänsyn till den förväntade betongutvecklingen är det också avgörande att känna givarnas fuktkapacitet så att varianter med låg fuktkapacitet kan vidareutvecklas av den aktuella instrumenttillverkaren.

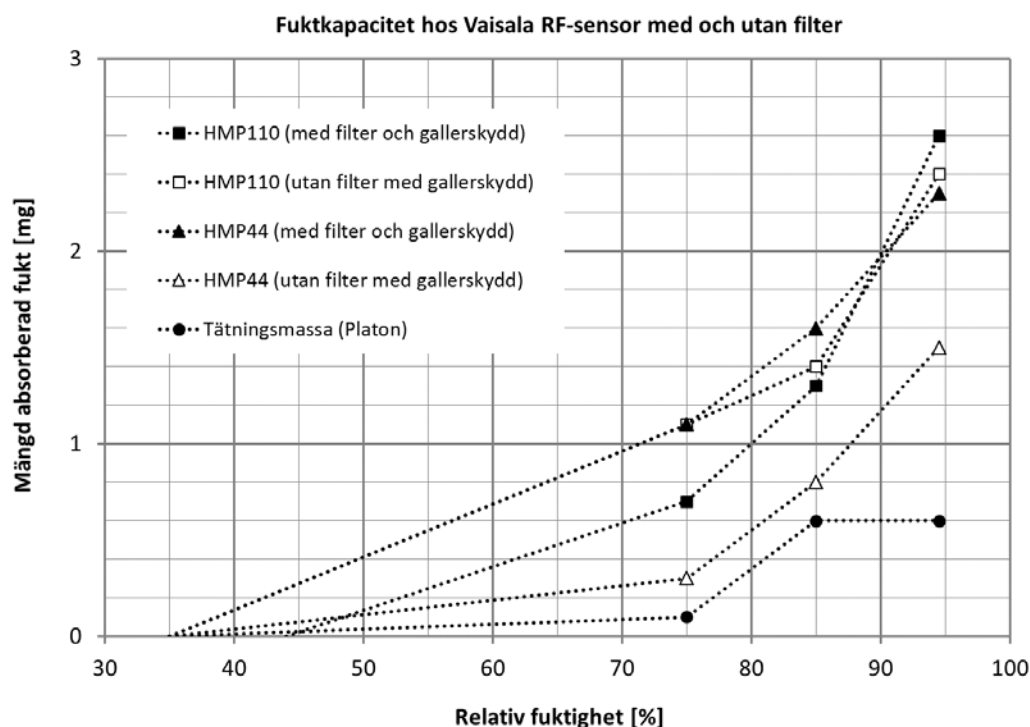
I figurerna 47–50 nedan redovisas fuktkapaciteterna under stegvis absorption med start vid 35 % RF. Figurerna är uppdelade efter givarnas fabrikat och/eller modell och samtliga varianter av givare visas i respektive figur tillsammans med den tätningssmassa som användes för försegling av bakstycket på kapade givare. För givare med tillhörande filter och gallerskydd alternativt tejp redovisas dessa fuktkapaciteter också i respektive figur.

Fuktkapacitet för HumiGuard samt tätningssmassa visas i figur 47 och båda fuktkapaciteterna är låga jämfört med de som registrerades för övriga givare.



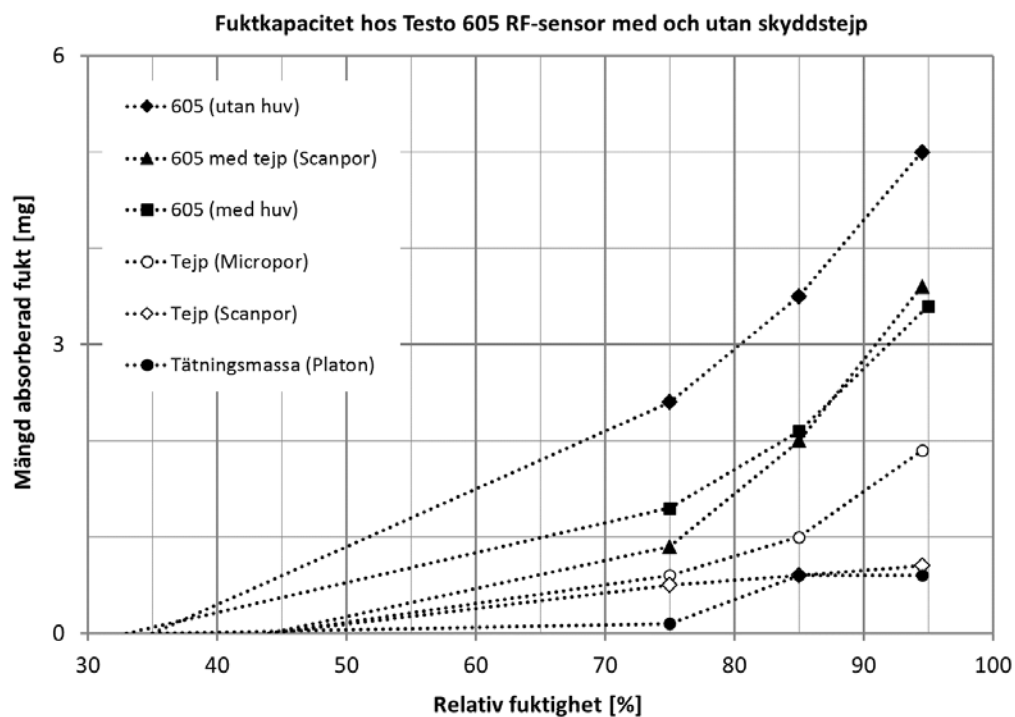
Figur 47 Fuktkapacitet under absorption för HumiGuard-sensor samt tätningssmassa från 35 % relativ fuktighet.

Fuktkapacitet för olika varianter av Vaisala-givare visas som jämförelse i figur 48. Det är tydligt att HMP110 har något högre fuktkapacitet jämfört med HMP44 och båda givarnas filter bidrar till fuktkapaciteten. Att båda givarna försedda med filter visade högre fuktkapacitet jämfört utan filter var förväntat.



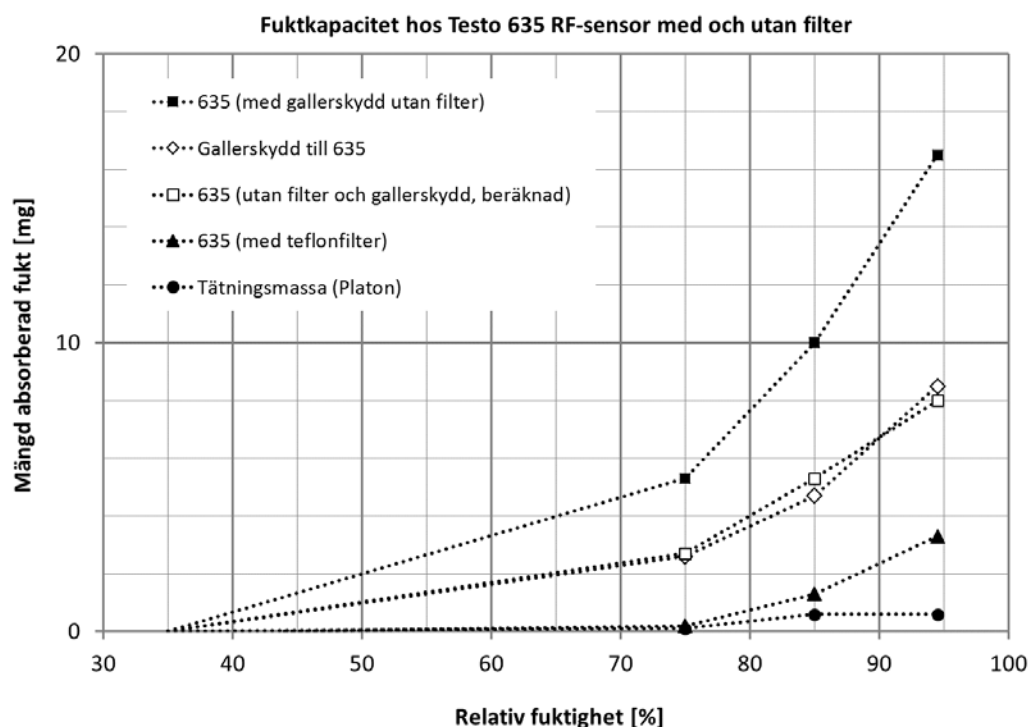
Figur 48 Fuktkapacitet under absorption för Vaisala HMP44 samt HMP110 med och utan filter från 35 % relativ fuktighet. Fuktkapacitet för tätningssmassan visas också i diagrammet.

Resultat från Testo 605 visas i figur 49 där mätningar på givare med olika skydd såsom kirurgisk tejp (Scanpor och Micropor) eller tillhörande vridbar huv i öppet läge, se figur 2.3 i rapporten. Som jämförelse provades givaren också med helt öppen sensor utan huv eller tejp och denna version gav oväntat den högsta fuktkapaciteten. Sensor försedd med huv eller med Scanpor-tejp visade något lägre fuktkapacitet. Jämförelsen av de två tejperna Scanpor, vilken är godkänd vid RBK-mätning, samt Micropor visade att den senare har cirka dubbelt så hög fuktkapacitet och bör därför undvikas.



Figur 49 Fuktkapacitet under absorption för Testo 605 med och utan tejp respektive skyddshuv från 35 % relativ fuktighet. Fuktkapacitet för tejp samt tätningssmassan visas också i diagrammet.

Figur 50 visar Testo 635 med teflonfilter samt med öppet gallerskydd. Eftersom gallerskyddet mättes separat och anses vara helt öppet beräknades sensorns egen fuktkapacitet. Den oskyddade sensorn, utan gallerskydd eller teflonfilter, verkar ha markant högre fuktkapacitet jämfört med när den är försedd med teflonfilter vilket var mycket förvånande.



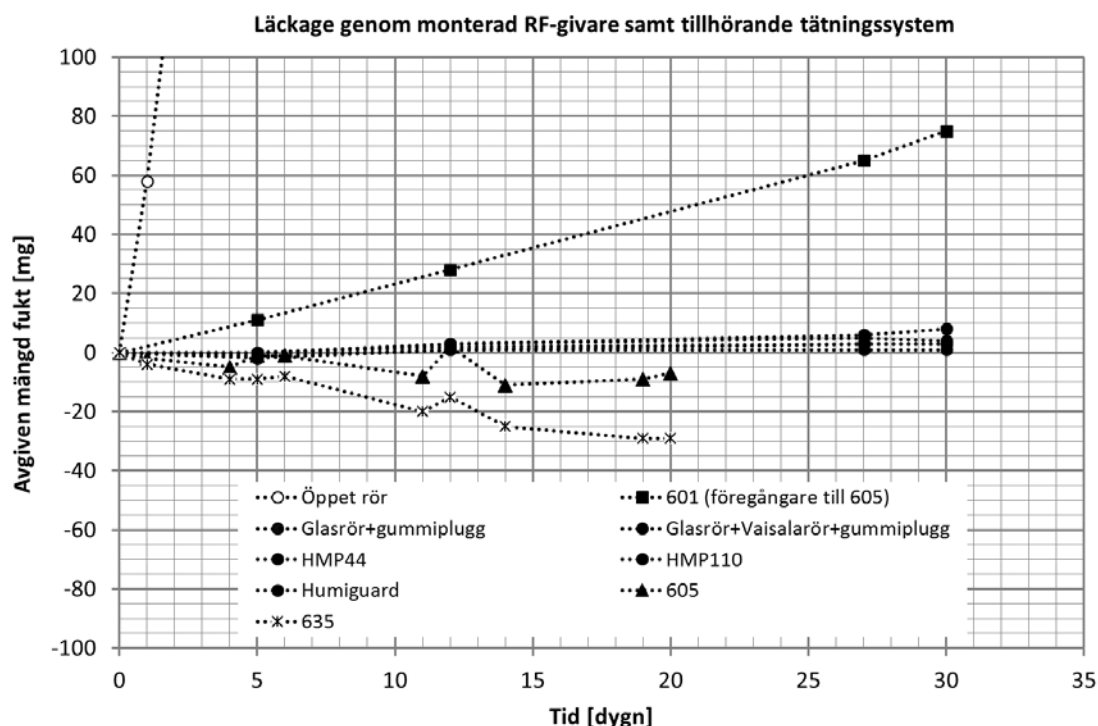
Figur 50 Fuktkapacitet under absorption för Testo 635 med teflonfilter samt med gallerskydd utan filter från 35 % relativ fuktighet. Fuktkapacitet för gallerskyddet samt för tätningssmassan visas också i diagrammet samt beräknad fuktkapacitet för Testo 635 utan filter eller gallerskydd. Fuktkapaciteten för den oskyddade sensorn beräknades genom att subtrahera fuktkapaciteten hos sensorn inklusive gallerskydd med fuktkapaciteten hos gallerskyddet.

En annan faktor som kan påverka den registrerade RF-nivån är ett eventuellt läckage av fukt från mätsystemet. Med hänsyn till den förväntade utveckling inom betongområdet med en minskad fuktkapacitet samt ångpermeabilitet kommer en viss förlust av fukt resultera i en större sänkning av RF-nivån jämfört konventionell betong. Som en direkt jämförelse observerades att den öppna Testo 605 också hade högst fuktkapacitet.

För Testo, oavsett modell 605 eller 635, verkar således filtren ha en "fuktskyddande" effekt och utgör barriär mellan den aktiva delen av sensorn och omgivand luft. Sannolikt har filtren förhållandevis stort ånggenomgångsmotstånd i kombination med en hög fuktkapacitet hos sensorernas aktiva del. Kombinationen av dessa två egenskaper skulle kunna resultera i att givarna behöver lång tid att nå ett jämviktsläge och samtidigt riskera att underskatta RF-nivån hos betongen. RF-nivån underskattas förmodligen eftersom allt tyder på att filtren har stort ånggenomgångsmotstånd vilket gör att en ånghaltsgradient kan råda mellan sensor och prov under lång tid vilket kan tolkas som ett ställföreträdande jämviktsläge.

I figuren 51 visas resultat från läckagetestet av de olika givarna och tillhörande tätningssystem. Två av givarna Testo 605 och 635 visade svängningar och orimliga resultat, det vill säga ett periodvist negativt fuktläckage. De orimliga resultaten orsakades sannolikt av att luftrörelser från rummets klimatanläggning påverkade just dessa två givare mer eftersom tillhörande anslutningskablar inte kunde kopplas bort, se figur 2.29 i rapporten. Läckage som skulle kunna inverka på resultatet vid RF-mätning i betong uppmättes endast för en tidigare variant av Testo 605. Eftersom den inte längre används för RBK-mätningar anses inte

resultatet vara av relevans för RBK-systemet. Flera av provuppställningarna gav näst intill likvärdiga resultat, det vill säga ett mycket litet fuktläckage, och de redovisas lika som fyllda cirklar i figuren. Bland dessa fanns förutom givarna HMP44, HMP110 och HumiGuard också två glaströr utan givare. Ett av glaströren var förseglat med gummikork medan i det andra var plaströr för Vaisalagivare monterat och plaströr förseglat med gummiplugg. Genom denna uppställning provades inte enbart givarna med avseende på läckage genom respektive givarhus utan också tillhörande förseglingssystem.



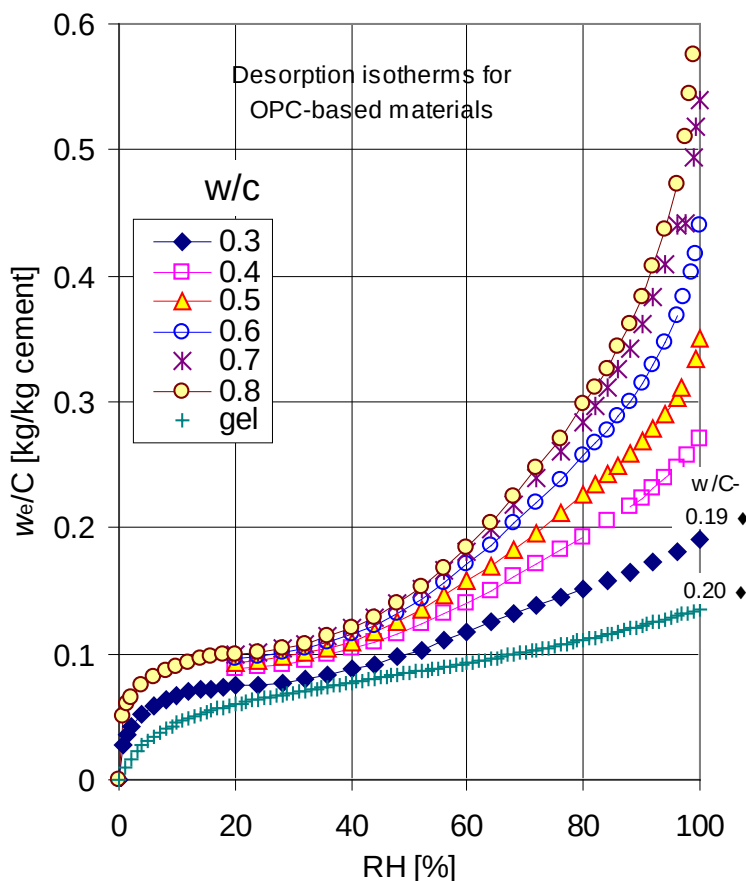
Figur 51 Avgiven mängd fukt (positiva värden) för givare med tillhörande tätningssystem monterade i glaströr med vatten. Som referens visas viktavgången från ett öppet provrör som ofyllda cirklar. Läckage påträffades endast hos Testo 601 som är en föregångare till 605. Testo 605 och 635 visade under perioder negativt läckage, dvs. viktuppgång, vilket eventuellt kan förklaras av att luftströmmar i klimatrummet påverkade den uppskjutande kabeln (635) och displayhuset (605). Övriga givare visade försumbar viktförändring.

Sammanfattningsvis resulterade läckagetestet i att det som mest avgick cirka 10 mg vatten under 30 dygn. Hur detta påverkar RF-nivån i provhålet är mycket komplicerat att avgöra utan omfattande datorsimulering. Resultatet från en datorsimulering kommer emellertid också att bjuda på osäkerheter eftersom en rad antagande måste göras. Ett alternativ är att göra bedömningen hur den förlorade fuktmängden påverkar RF-nivån hos ett uttaget prov vilket innebär att endast en begränsad provmängd kan bidra med fukt. Vid borrhålmätning finns det i praktiken en avsevärt större mängd fukt att tillgå för sensorn vilket innebär att en bedömning av RF-sänkning hos en begränsad provmängd borde vara på säkra sidan.

Enligt mätningar i Åhs [2014] är en representativ provtagningsvolym cirka 22 cm^3 när prov tas ut för RF-mätning i glaströr givet att glaströrets totala volym var 71 cm^3 . Uppskattningsvis är betongens torra densitet cirka 2200 kg/m^3 och given provtagningsvolym $22 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ vilket ger att provets torra massa är $0,0484 \text{ kg}$ (48,5 g). Om vi antar att det uttagna provet lagras i

provrör med givare monterad under maximalt 30 dygn indikerar resultaten i figur 3.51 att 10 mg (0,01 g) vatten kan avgå från provet genom otätheter hos givaren samt dess försegling. Läckaget resulterar i att provets fuktkvot sjunker med cirka 0,02 % under 30 dagar.

För att kunna bedöma hur stor inverkan en viss förändring av fuktkvot har på provets RF krävs kunskap om materialets desorptionsisotermer. I Nilsson (1980) finns desorptionsisotermer redovisade för väl härdade betonger med varierande vct. Provad betong enligt nuvarande studie härdades förseglad i 20 °C under flera månader vilket, med hänsyn till det låga vattencementtalet, innebär att största andelen av möjlig hydratation uppnåddes. Det är därför en rimlig approximation att använda desorptionsisotermer enligt figur 3.51 för beräkning av förändring i RF orsakat av förändring i fuktkvot. I figuren avser kvoten, W_e/C , mängden fysikaliskt bundet vatten (kg/m^3) dividerat med mängden cement (kg/m^3). Vid betraktande av desorptionsisotermer för vct 0,4 i RF-området 80-85 %, vilket var aktuellt vid uttagning av prov, kan lutningen uppskattas till cirka 0,005 $\text{kg}/(\text{kg}\cdot\%)$ (kg förångningsbart vatten per kg cement/ procentuell förändring i RF). Med hänsyn till cementmängden 450 kg/m^3 , enligt tabell 2.1, kan mängden förångningsbart vatten per volymenhet och procentuell förändring i RF beräknas till 2,25 $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\%)$. Med hjälp av betongens torra densitet vilken uppskattades till 2200 kg/m^3 beräknades förändringen i fuktkvot till 0,1 % per procentuell förändring i RF.



Figur 52 Desorptionsisotermer för väl härdad betong med olika vct. Data från Nilsson (1980). Kvoten W/C anger vct och förkortningen OPC anger att bindemedlet är Portlandcement. Benämningen gel anges för ett av materialen som består av cementgel.

Uppskattningsvis resulterar det ackumulerade läckaget under 30 dagar i en sänkning av RF-nivån om cirka 0,2 %. Detta förutsätter att effekten av förlorad fukt är likvärdig både för uttaget prov och borrhålsmätning.

11. Referenser

Johansson, P (2014) “Fuktmätning i betong med lågt vct, steg 1”, Rapport TVBM-3178, Avd Byggnadsmaterial, LTH.

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

RBK (2015), “ Fuktmättningsmanual – betong”, version 5.3, Rådet för ByggKompetens, Sveriges Byggindustrier.

Saeidpour, M (2015) “Experimental studies of sorption and transport of moisture in cement based materials with supplementary cementitious materials”, doktorsavhandling TVBM-1033, Avd Byggnadsmaterial, LTH.

Åhs, M (2014) “*Simulering av fuktmätning i betong med lågt vct*”, Rapport TVBM-3177, Avd Byggnadsmaterial, LTH.