



LUND UNIVERSITY

Uttorkningstider och kritiska fuktillstånd: kemisk fuktbindning och alkalitransport

Åhs, Magnus; Nilsson, Lars-Olof

2010

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Åhs, M., & Nilsson, L.-O. (2010). *Uttorkningstider och kritiska fuktillstånd: kemisk fuktbindning och alkalitransport*. (Rapport TVBM (intern 7000-rapport); Vol. 7203). Avd Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola.

Total number of authors:

2

General rights

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

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

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

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

Take down policy

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

LUND UNIVERSITY

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

Uttorkningstider och kritiska fukttillstånd -

Kemisk fuktbindning och
alkalitransport

Magnus Åhs
Lars-Olof Nilsson

**Lunds tekniska högskola
Byggnadsmaterial
Box 118
221 00 Lund**

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

Innehåll

Förord	5
Sammanfattning	7
1 Bakgrund	9
2 Kritiskt fuktillstånd	11
3 Kemisk bindning av omfördelat vatten	13
3.1 Uttorkningsprocessen	13
3.2 Inverkan av tidig uttorkning	13
3.3 Hypotes.....	14
3.4 Simulering i KFX	14
3.5 Försök.....	16
3.5.1 Material	17
3.5.2 Metod	18
3.5.3 Resultat.....	20
3.5.4 Hypotesprövning	27
3.5.5 Diskussion	28
3.6 Slutsatser	30
4 Jontransport i det hygrokopiska området	31
4.1 Metodutveckling försegling och fuktmätning	31
4.1.1 Material och Metod	32
4.1.2 Resultat.....	34
4.1.3 Diskussion	36
4.2 Tillverkning och fuktconditionering av provkroppar.....	36
4.2.1 Material	37
4.2.2 Metod	37
4.2.3 Resultat.....	40
4.2.4 Diskussion	40
4.3 Bestämning av jonfördelning	41
4.3.1 Material	41
4.3.2 Metod	41
4.3.3 Resultat från tre analysmetoder.....	43
4.3.4 Diskussion	48
4.4 Slutsatser	50
4.5 Karakterisering av material	50
4.6 Fortsättning.....	52
5 Referenser	53

Förord

SBUF-projektet 11885/06 Kritiska fuktillstånd för byggnadsmaterial – bättre kunskap för kortare torktider syftar till att förkorta torktiderna för byggfukt i betonggolv. I den första etappen har två helt olika alternativa möjligheter undersökts.

Projektets första etapp har genomförts som en del av ett doktorandprojekt av teknologie licentiat Magnus Åhs, med professor Lars-Olof Nilsson som handledare.

Projektet har i huvudsak finansierats av SBUF, med mindre bidrag av Skanska och LTH.

Denna rapport utgör en lägesredovisning efter projektets första etapp och skall ses som ett underlag för beslut om en eventuell fortsättning och inriktningen hos en andra etapp.

Sammanfattning

Två helt olika alternativa möjligheter att förkorta torktiderna för byggfukt i betonggolv har undersökts.

Den ena möjligheten var att försöka utnyttja de resultat som erhållits i ett antal tidigare projekt där det visat sig att fuktbelastningen på ett mer eller mindre tätt ytskikt under vissa förhållanden varit mycket lägre efter omfördelning av kvarvarande byggfukt än vad man kunde förvänta sig. Hypotesen har varit att tidig uttorkning skapade en mängd kvarvarande ohydratiserat cement som under omfördelningen, när dessa delar blir fuktiga igen, skulle fortsätta att binda vatten kemiskt och därigenom sänka fuktnivån. Erforderlig torktid skulle därmed bli kortare.

Detta har studerats genom att jämföra två fall, med tidig respektive sen uttorkning, till samma nivå. Särskild omsorg har ägnats åt att genomföra experimenten utan att något som helst läckage uppstått. Ett sådant hade annars kunnat ge liknande resultat. RF-profilerna efter omfördelning har sedan uppmätts. Det visade sig att det finns en liten effekt av den typ som hypotesen säger men att denna är så liten att den inte är signifikant. Det har alltså inte gått att förklara de tidigare, positiva resultaten. Andra förklaringar måste sökas.

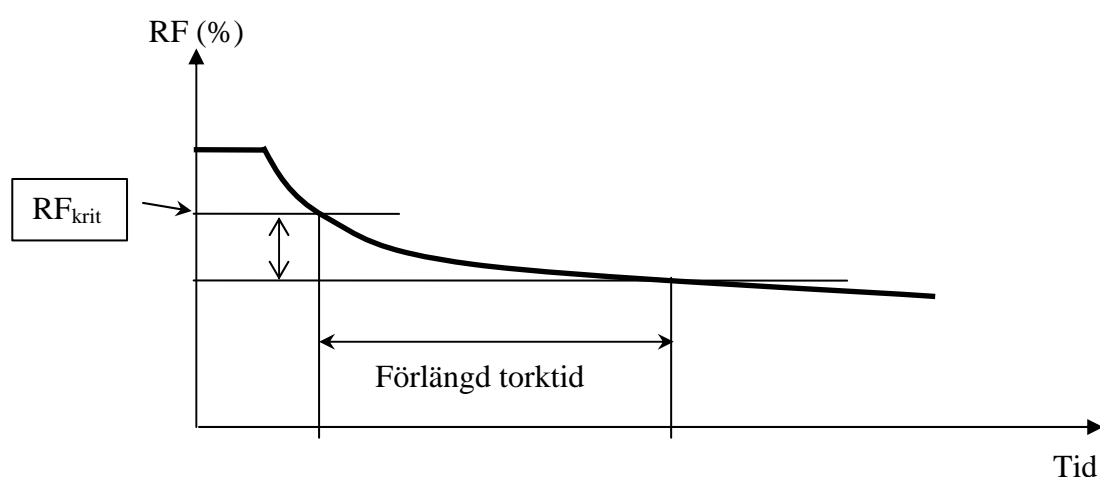
Den andra möjligheten var att klargöra var de verkliga kritiska fukttillstånden ligger för vandring av alkali mot ett tätt ytskikt och förhoppningsvis kunna visa att de är högre än vad som motsvarar dagens kritiska fukttillstånd. Det skulle i så fall kunna innebära att man inte skulle behöva torka betong lika långt som idag, varvid erforderliga torktider skulle bli kortare.

Dessa kritiska fukttillstånd har undersökts på ett helt nytt sätt som aldrig tidigare prövats. Provkroppar har torkats ensidigt till olika fuktnivåer och förseglats. Efter omfördelning av kvarvarande fukt har andra sidan öppnats för uttorkning. Om den initiala fuktnivån då hade varit över den kritiska för alkalivandring skulle detta visa sig genom att alkali ansamlats vid, eller på något djup under, den torkande ytan. Alkaliprofiler har mätts upp med ett antal olika metoder. Tyvärr har dessa inte gett så klara resultat som fordras. Alkalivandring har därför hittills inte kunnat tydligt påvisas. Dessa försök fortsätter med andra metoder.

1 Bakgrund

Under senare år har många insatser gjorts för att säkrare kunna förutsäga erforderliga uttorkningstider för olika material och konstruktioner, för att säkrare kunna mäta hur långt uttorkningen fortskridit, för att åstadkomma kortare torktider och för att utgå från lägre startfukthalter.

Allt detta baseras på att torka ut material och konstruktioner till en fuktnivå under de kritiska fukttillstånden, med viss säkerhetsmarginal. Uttorkningsförloppet är som regel mycket långsamt vid dessa fuktnivåer och osäkerheten i prognoser, mätningar och åtgärder ger en kraftig förlängning av erforderliga torktider, se figur 1.



Figur 1. Principiellt exempel på vad man skulle vinna i torktid på att höja den kritiska fuktnivån eller minska osäkerheten hos den.

Ett helt annat angreppssätt är att istället höja den kritiska fuktnivån. Dagens kritiska fuktnivåer, som regel 85 % RF för betonggolv och 75 % RF för trä, är tillkomna på ett tveksamt sätt där 85 och 75 är en "lagom" jämn siffra och 75 % RF gäller vid mycket långvarig fuktbelastning. Eftersom varje procentenhet betyder veckor eller månader i extra torktid, är det mycket att vinna på att kunna höja de kritiska och acceptabla fuktnivåerna, där det är motiverat.

De kritiska fukttillstånd som används idag har på sätt och viss "levt kvar" från 1970-talet, men sänktes under 1990-talet, då en extra säkerhetsmarginal drogs ifrån. Gamla värden på kritiska fukttillstånd fanns i HusAMA fram till 1983, uttryckta som "CM-%" (CM=karbidmätare). Lars-Olof Nilsson gjorde en "översättning" av dessa CM-% till Relativ Fuktighet RF till Råd och Anvisningar till HusAMA RA78. Denna "översättning" hade mycket liten vetenskaplig grund och var mer baserad på vad som var rimligt och acceptabelt för materialleverantörerna respektive byggnadsentreprenörerna. Översättningen utmynnade i "jämba siffror" som 95, 90 och 85 % RF. På den tiden kunde man inte mäta RF särskilt noggrant så det fanns ingen anledning att nyansera värdena mer än så.

1983 föreslog Lars-Olof Nilsson i en BFR-rapport att gränserna för limmade PVC-golv på fuktigt betongunderlag skulle vara 90 % RF för byggfukt som kommer att torka ut ytterligare och 85 % RF för markfukt och för instängd byggfukt. Detta baserades då på en del

laboratoriemätningar och erfarenheter från skadefall. I samband med revidering av HusAMA 1998 och införandet av auktoriserade fuktkontrollanter sänktes gränserna till 85 % RF för mer eller mindre alla fall. Man såg nog detta som ytterligare en säkerhetsmarginal.

I valet av de kritiska gränserna ligger en svår avvägning. Å ena sidan skall gränserna vara så låga att risken för fuktskador blir liten. Materialleverantörerna eftersträvar gärna extra låga värden för att "skydda" sitt material och undvika reklamationer. Det finns naturligtvis en gräns för hur långt man kan gå här, när materialen inte längre blir intressant att använda därför att kraven på torrhet är för stora. Å andra sidan skall gränserna vara så höga att byggtiderna inte påverkas orimligt mycket. I brist på vetenskapligt underbyggd kunskap, blir detta val mycket ett tyckande.

Med säkrare kännedom om de kritiska gränserna, och hur osäkra de är, kan valet av acceptabel torrhet bestämmas på ett mycket mera ekonomiskt sätt, där bl. a. konsekvenserna av en fuktskada kan vägas in. Den beställare som riskerar att få ett stillestånd i sin verksamhet är säkert beredd att betala för längre torktider, dyrare lösningar eller säkrare torkinsatser, dvs större säkerhetsmarginal. För att det skall vara meningsfullt med ett sådant krav, måste naturligtvis den kritiska gränsen vara känd med en rimlig noggrannhet.

Alldeles nyligen har nuvarande kännedom om kritiska fuktnivåer, för en mängd olika materialtyper och ett stort antal olika typer av förändringar på grund av fuktbelastning, sammanställts i en informationsskrift, (Nilsson 2006). I denna skrift framgår också var gränsen går för vår kunskap och vad vi inte känner till ordentligt idag.

Den här studien angriper två olika sätt att minska torktiden för en betongplatta. En undersökning syftar till att utreda möjligheten att utnyttja cementets återstående förmåga att binda fukt för att minska fuktbelastningen. Ytterligare en undersökning har utförts i syfte att bestämma ett gränsvärde för när jontransport är möjlig i cementbundna material i det hygroskopiska området.

2 Kritiskt fukttillstånd

Fukt kan genom sin närvaro ge upphov till förändringar i materialegenskaper. Förändringen innebär ibland att den önskade funktionen försämras men den kan också innebära att materialets estetiska uttryck förändras. En oönskad egenskapsförändring benämns vanligtvis som en skada. Om förändringen är oacceptabel innebär det att skadan måste åtgärdas. Dessa åtgärder blir ofta kostsamma och därför är det viktigt att försöka undvika att skador uppstår.

Egenskapsförändringen eller skadan uppstår när fuktigheten överstiger en viss gräns. Ett vanligt begrepp som används för att definiera den gränsen är kritiskt fukttillstånd. Det kritiska fukttillståndet är den fuktnivå som råder då materialegenskaperna förändras, Nilsson (2006), definitionen är hämtad från SBUF-skriften Fuktpåverkan på material. Om fuktigheten överskrider det kritiska fukttillståndet kan funktionen hos materialet helt försvinna eller också sker förändringen gradvis ju mer fuktigheten ökar. Det kan också vara så att förändringen först ökar för att sedan minska med stigande fuktighet.

En vanlig skada orsakad av fukt är nedbrytning av lim under en tät golvbeläggning på ett betonggolv (Sjöberg 2001; Björk et al. 2003; Wilke et al. 2004; Anderberg and Wadsö 2007). Fukten är en viktig förutsättning för att limnedbrytning ska uppstå, men fukten ensam räcker inte. Det måste också finnas eller tillföras pH-höjande joner, så som OH^- eller K^+ och Na^+ . Alla dessa joner finns i betong. Nedbrytningen av limmet gör att dess egenskaper förändras genom en kemisk reaktion. Limmet mister eller försämrar sin förmåga att fixera golvbeläggningen mot underlaget. Det kan innebära att beläggningen släpper från underlaget och ligger löst, ibland uppstår även blåsor. En annan skada är emissioner som avges från produkter som bildas vid nedbrytningen av limmet. Dessa emissioner bidrar till att skapa en ohälsosam vistelsemiljö för människor i skadedrabbade byggnader.

Fukttillståndet som föranleder skadan uppstår på grund av två samverkande fuktkällor, den otillräckligt uttorkade betongen och limfukten. Betonggolvet innehåller mycket överskottsvatten som behövs för gjutningen. En del av det vattnet måste torkas bort för att minska fuktbelastningen under golvbeläggningen. Limmet är vattenbaserat och innehåller olika polymerer som binder samman när det vattnet torkar bort. Det vattnet ger också ett bidrag till fuktbelastningen.

Tätheten hos betongen och beläggningen är också en faktor som gör att fukttillståndet riskerar att bli för högt. Tätheten hos betongen innebär att det tar lång tid att torka bort överskottsvattnet. Tätheten innebär också att ytan torkar medan de inre delarna fortfarande är fuktiga. Tätheten hos beläggningen innebär att fukten som diffunderar upp från de inre delarna till ytan ökar fuktigheten i ytan. En tätare beläggning innebär att fukttillståndet höjs mer än en öppnare beläggning.

Genom att låta den täta betongen torka tillräckligt innan mattläggning minskar risken för att fukttillståndet överskrider det kritiska. För en PVC-matta på betong anges det kritiska fukttillståndet i relativ fuktighet och är satt till 85 % RF. Torktiden kan i viss mån förutsägas med hjälp av datorprogram och kontrollmätningar är ett bra verktyg för att följa upp uttorkningsförloppet. Dessvärre är båda dessa hjälpmedel förknippade med osäkerheter. Osäkerheten innebär att den bedömda återstående torktiden blir onödigt lång. Genom att minska osäkerheten med en procentenhet i RF kan tiden förkortas med veckor eller till och med månader.

Torktiden kan också reduceras om det går att höja gränsen för den kritiska fuktnivån. Höjningen av det kritiska fukttillståndet får samma effekt som att minska osäkerheten. Om det är möjligt att höja det kritiska fukttillståndet med en procentenhet till 86 % RF innebär det att torktiden kan minskas betydligt. Det kritiska fukttillståndet har bestämts på ett ovetenskapligt sätt och grundar sig mycket på vad som ansetts rimligt att uppnå av materialleverantörer och byggentreprenörer. Det finns ingen koppling mellan det fukttillstånd som faktiskt orsakar en skada och det gränsvärde som gäller för PVC-mattor på betonggolv idag.

Mycket talar för att det kritiska fukttillståndet för limnedbrytning är kopplat till joners rörlighet. Därför är det intressant att undersöka vid vilka RF som joner kan röra sig i tillräcklig omfattning för att underhålla en nedbrytningsprocess. Är det möjligt att bestämma ett fukttillstånd uttryckt i RF när joner har begränsad rörlighet alternativt inte kan röra sig alls skulle det indikera ett möjligt gränsvärde.

3 Kemisk bindning av omfördelat vatten

3.1 Uttorkningsprocessen

Uttorkningen i ett betongbjälklag kan indelas i fem huvudprocesser kemisk och fysikalisk bindning, ytavdunstning, kapillärtransport och diffusion. Den *kemiska bindningen* påbörjas så fort cementet kommer i kontakt med vatten och fortgår under lång tid. *Ytavdunstningen* från betongen sker direkt när betongbjälklaget är färdiggjutet och ånghalten i omgivande luft understiger mätnadsånghalten, dvs relativa fuktigheten <100 % RF.

En kort tid efter gjutning när ytvattnet har avdunstat ställer sig ytan snart i jämvikt med omgivande luftfuktighet. *Kapillärtransporten* är stor i detta skede då mycket fritt vatten fortfarande finns i bjälklaget. Den börjar avta redan då fuktigheten i betongen är < 98 % RF. Kapillärtransporten sjunker och ersätts gradvis av *diffusion* när fuktigheten i bjälklagets ytskikt sjunker ytterligare.

Redan efter en relativt kort tid, veckor, har fuktigheten i de översta delarna, 10-20 mm, sänkts till under 80 % RF. Fuktigheten i de inre delarna sjunker sedan allteftersom uttorkningen fortlöper. Betongkvalitet, omgivande klimat och avståndet till ytan är avgörande för hur lång tid som krävs för att sänka RF så mycket.

Torrheten i ytan och uppfuktningens storlek och avgör om det kritiska fuktillståndet uppnås. Om ytan är torr skapas en buffert att ta emot fuktighet som blir större ju torrare ytan är. Det är positivt ur ett fukttekniskt perspektiv, å andra sidan riskeras andra oönskade händelser inträffa som sprickbildning och en försämrade hydratation av ytan. Med en lagom torr yta kan sprickbildningen undvikas men den försämrade härdningen undviks inte om luftfuktigheten är under 80 % RF under uttorkningsskedet.

3.2 Inverkan av tidig uttorkning

Luftfuktigheten i omgivningen påverkar uttorkningsförloppet påtagligt. En torr miljö ökar uttorkningshastigheten medan en fuktig miljö reducerar, stoppar eller till och med reverserar uttorkningsprocessen. En fuktig miljö är positiv för betongens härdning medan en torr miljö är positiv för uttorkningen.

Fuktigheten i luften har också betydelse för cementets hydratation. Cementet reagerar med fukten i luften som det omges av, vilket medför att hydratationsgraden ökar. Om härdningen sker i en torr inomhusmiljö kommer hydratationen avklinga i ytskiktet. Enligt nuvarande teorier sjunker cementshydratationen med omgivande RF. Hydratationen blir starkt begränsad om RF i cementgelen är under 80 % RF. En intressant förklaringsmodell till varför hydratationen avstannar vid 80 % har formulerats av Powers (1947). Hydratationsgraden påverkar betongens förmåga att binda vatten fysikaliskt vilket också påverkar uttorkningsförloppet.

När ett tätskikt läggs på ytan kommer ytan att fuktas upp av limmet. Dessutom kommer fukt från mer centrala delar att transporteras upp när omfördelningen sker. Frågan är vad som sker med den fukten som tillförs ytskiktet. Kommer fukten att bindas av cementpartiklar som ännu inte har hydratiserat? Är det så att den binds fysikaliskt i porstrukturen i sådan omfattning att RF sjunker? Är mängden fukt som binds på något sätt av sådan storlek att det möjligt att registrera genom att mäta relativ fuktighet i ytskiktet efter omfördelning?

Det finns ett antal tidigare studier där man fått resultat som tyder på att sådana effekter skulle finnas och vara relativt stora. Den första sådan studie gjorde Nilsson och Aavik (1993) på vakuumbehandlad betong där man mätte fuktprofiler efter mer än ett års omfördelning under ett tätskikt. I ett nyligen avslutat SBUF-projekt fick Sjöberg och Nilsson (2008) liknande resultat då man undersökte uttorkning av betonggolvet med golvvärme. Tidig uttorkning gav lägre fuktbelastning än förväntat, efter omfördelning.

3.3 Hypotes

Det teoretiska resonemanget om det ofullständigt hydratiserade cementet i ytskiktet har en gynnsam inverkan på fuktbelastningen kan uttryckas som ett antagande, en hypotes:

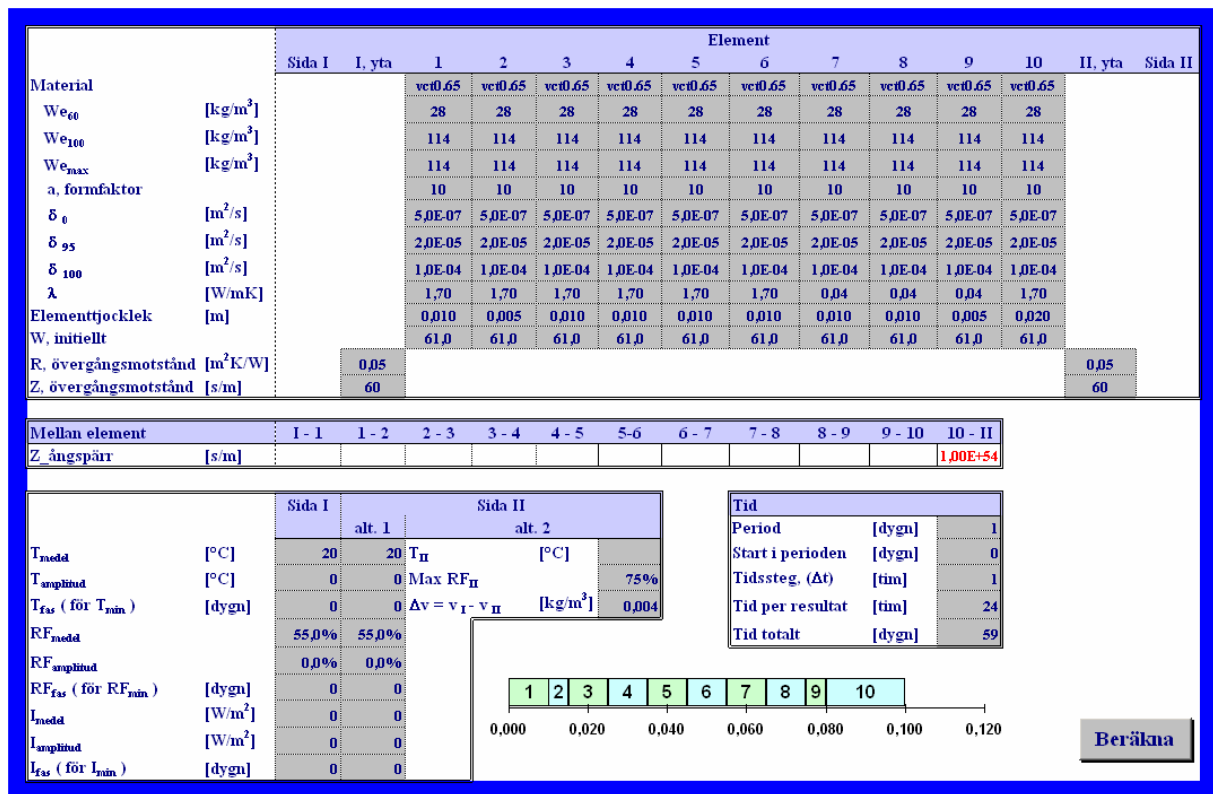
Fuktbelastningen under ett tätskikt är oberoende av om härdning sker under samtidig uttorkning eller om den sker förseglat.

Hypotesen kan prövas genom ett försök som syftar till att visa om fuktigheten under ett tätskikt påverkas av härdningsbetingelserna. Genom att härda två satser betongplattor dels förseglat under lång tid och dels i en uttorkande situation är det möjligt att undersöka detta. Fuktprofiler mäts upp med RF-sensorer dels direkt innan försegling och dels när fukten har omfördelats. Sedan jämförs medelvärdet för RF under tätskiktet för båda satserna när fukten är omfördelad för att avgöra om härdningsförloppet har haft betydelse för fuktbelastningen under tätskiktet. Hypotesprövningen sker med ett t-test, där förutsättningen är att mätvärdena är normalfördelade.

3.4 Simulering i KFX

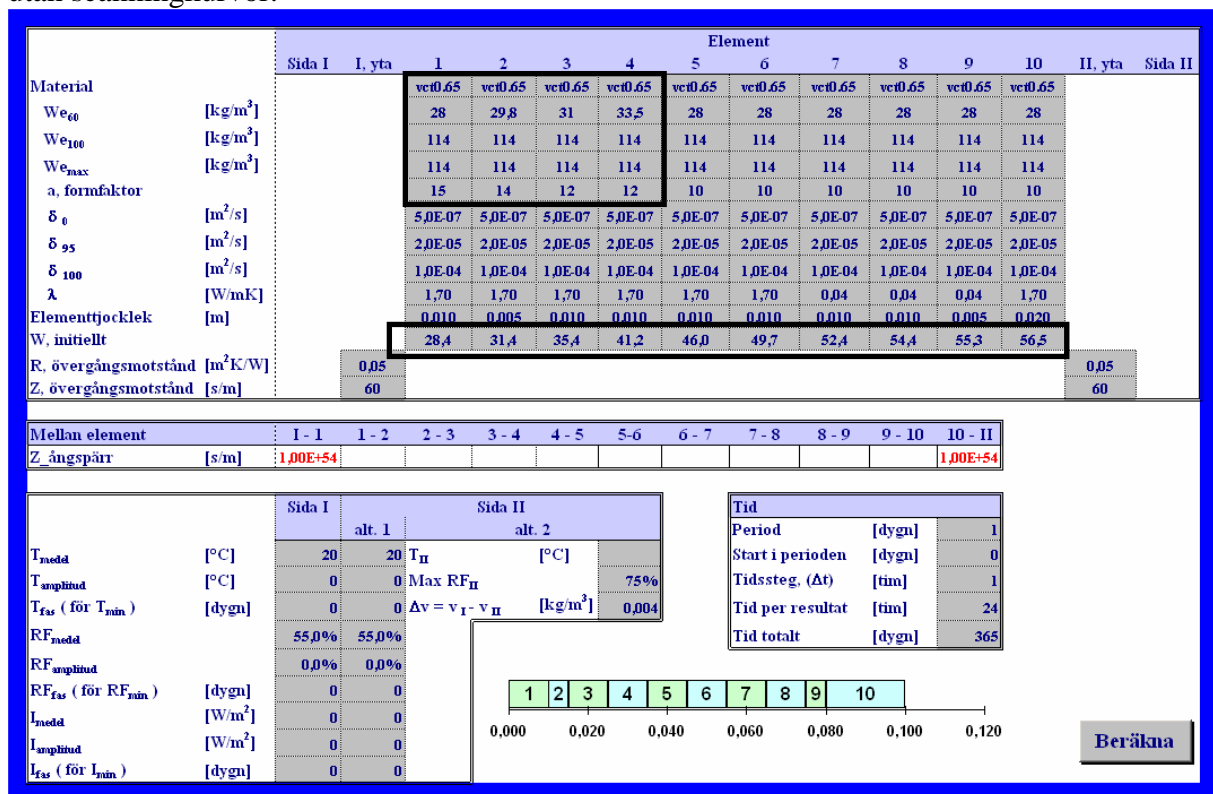
Som en jämförelse till mätningarna har en simulering av omfördelning utförts med KFX. KFX är ett Excelbaserat kalkylblad med tillhörande beräkningsslinga programmerad i Visual Basic. KFX är utvecklat på Chalmers och lämpar sig väl att beräkna uttorkning på betong som är välhydratiserad (välhärdad), där fuktegenskaperna är oförändrade med tiden. I KFX anges indata som temperatur, fukthalt vid beräkningsstart, jämvikt-fuktkurvor och fuktberoende fukttransportegenskaper. En jämvikt-fuktkurva definierar fuktinnehållet i kg/m^3 beroende på relativ fuktighet i omgivande luft. Fukttransporten beror på fuktinnehållet i materialet; ett fuktigt material medger en större fukttransport än ett torrt. Det beror på att fukttransporten huvudsakligen beror på vätskeflöde i materialporerna vid höga fuktnivåer och ångdiffusion vid låga fuktnivåer.

Ett uttorknings- samt omfördelningsfall simulerades där utgångsläget är en vct 0.65 som antas torka kemiskt ner till 91% RF. Erfarenheter från tidigare gjutningar (jontransport-försöken) med SH cement och vct 0.65 har visat att den kemiska torkningen gör att RF sjunker till 91 % RF. Indata till modellen finns i figur 2.



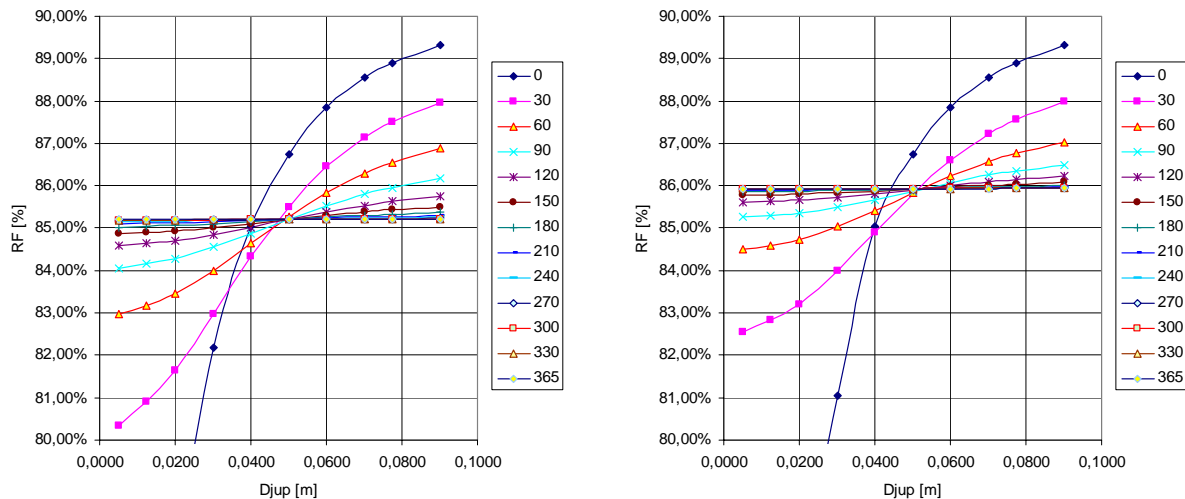
Figur 2. Indata till KFX beräkning för vct 0.65 betong, där tjockleken är 100 mm. Uttorkningen pågår under 59 dygn.

När sedan omfördelning simulerades sattes resultatet (W i kg/m³) från beräkningen in som startvillkor på raden, W, initieellt, se figur 3. Notera att beräkningen har utförts både med och utan scanningkurvor.



Figur 3. Indata till omfördelning av fukt i en vct 0.65 platta som torkat 59 dygn i 55 % RF och 20 °C. Notera speciellt att sorptionskurvor har formen av scanningkurvor i ytskiktet.

I figur 4 återfinns två diagram som visar resultatet från de två omfördelningsberäkningarna. I figuren representerar x-axeln djupet i betongen där 0 motsvarar den uttorkande ytan och 0,1 m motsvarar en punkt 100 mm ner från ytan. Y-axeln representerar RF i varje punkt, endast det intressanta området mellan 80 % RF och 90 % RF visas. De olika kurvorna i diagrammet motsvarar RF-fördelningen en viss tid efter beräkningsstart. I teckenförklaringen anges 0 för RF-fördelningen vid beräkningsstart och 30 motsvarar 30 dygns omfördelning efter försegling. Efter 365 dygns simulerad omfördelning ansågs RF vara jämn i provkroppen. Resultatet från beräkningen användes till att styra uttorkningstiden men också för att jämföra mot mätresultat från försöket.

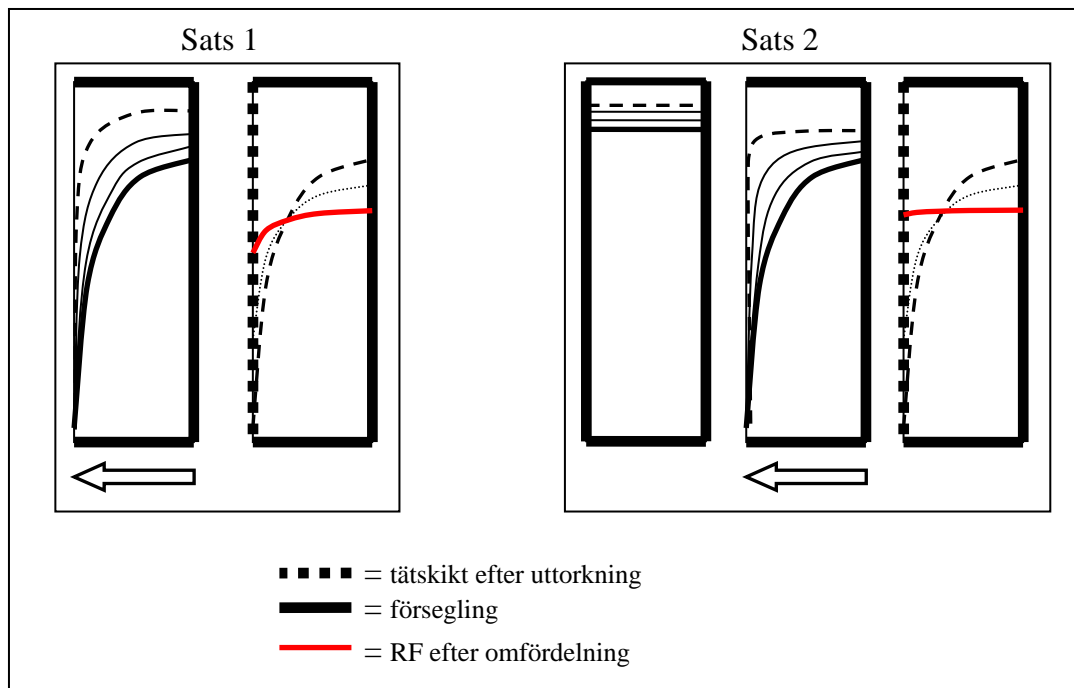


Figur 4. Detalj från resultatet av KFX beräkningen. Diagrammet till vänster motsvarar en beräkning utförd utan hänsyn till skanningkurvor och till höger med hänsyn till skanningkurvor.

Uttorkningen och efterföljande omfördelning ger att RF blir **85,1 % RF** genom hela plattan när all fukt har omfördelats utan hänsyn tagen till skanningkrivor. Motsvarande RF återfinns 40 mm ner i betongplattan innan omfördelning sker. Däremot blir RF **85,9 % RF** genom hela plattan om skanningkrivor ingår i beräkningen. En alternativ beräkningsmodell för omfördelning av fukt i betonggolv med hänsyn till skanningkurvor finns beskriven i Åhs (2007; 2008). Motsvarande RF-nivå återfinns på djupet 44 mm. Beräkningen visar att mätdjupet ökar med 4 mm i det här fallet. Det innebär att en mätning som utförs på 40 mm djup ger ett resultat som är cirka 1 %-enhet RF lägre än vad som kan förväntas om tätskiktet är helt tät. Det innebär samtidigt att mätdjupet är för ytligt.

3.5 Försök

Härdningssättets inverkan på fuktbelastningen under ett tätskikt undersöktes genom att härda provkroppar av betong, vct 0.65, på olika sätt. I ena fallet, sats 1, härdades provkroppar ett dygn före enkelsidig uttorkning i 55 % RF och 20 °C och i det andra fallet härdades provkroppar förseglat under 56 dygn i 20 °C, sats 2, före uttorkning i 55 % RF och 20 °C, se figur 5.



Figur 5. Härdnings- och uttorkningsförlopp för sats 1 till vänster och sats 2 till höger. Provkroppar står på högkant och torkar endimensionellt med en öppen yta till vänster i bild. Linjer inuti figurerna motsvarar RF-fördelningen vid olika tidpunkter. Röd heldragen linje markerar RF-fördelningen efter omfördelning.

I det första fallet borde den tidiga uttorkningen medföra att cementet inte hinner reagera så mycket innan det blivit för torrt på respektive djup för fortsatta cementreaktioner. Detta borde ske snabbast närmast ytan och sedan ske efter olika lång tid för olika djup. När ytan sedan förseglas och omfördelning sker av kvarvarande fukt på större djup, blir den delen som torkat nu återuppfuktad. Då borde det kvarvarande, ohydratiserade cementet kunna fortsätta att reagera med en del av fukten. Den härdningen binder då vatten, d.v.s. det blir en typ av självuttorkning i den delen, se den röda kurvan i figur 5. Den kvarvarande byggfukten blir alltså inte bara omfördelad utan fuktnivån borde också sjunka.

Sats 2 utsattes efter härdning för enkelsidig uttorkning i samma klimat som sats 1, men då har det mesta av cementreaktionerna redan skett. Förseglingen av sats 2 skedde när fuktfördelningen motsvarade fördelningen för sats 1 i förseglingsögonblicket. Därefter omfördelades fukten i provkropparna varefter fuktfördelningen uppmättes på nytt.

3.5.1 Material

Materialet till de 8 provkropparna var betong med vct 0.65. För recept se tabell 1.

Tabell 1. Recept för tillverkning av betong vct 0.65

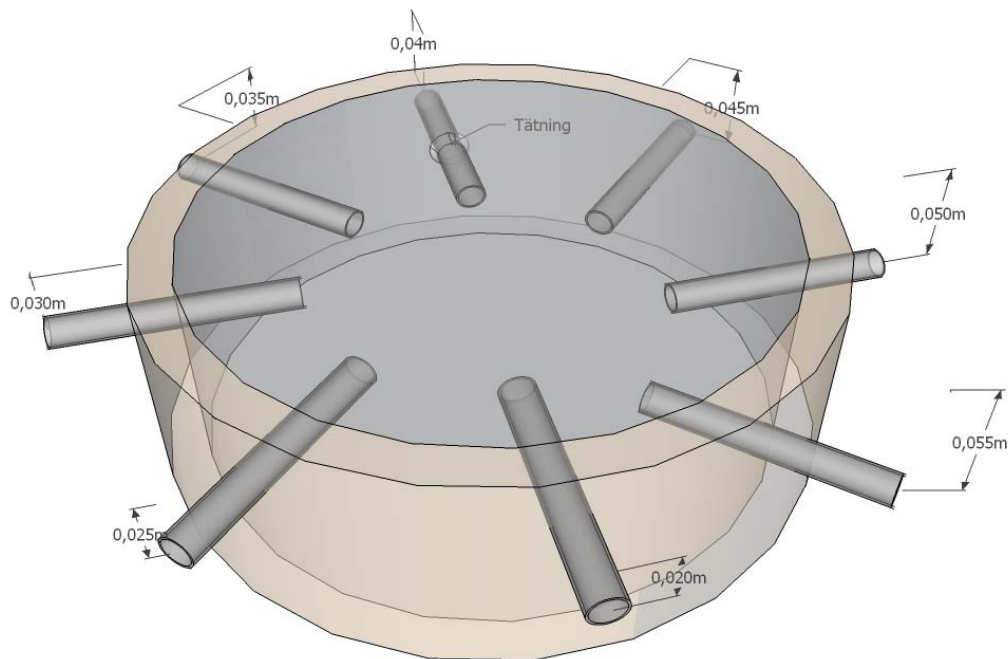
Material	kg/m ³
Cement SH, CEM I 52.5 R	250
Vatten	162,5
0-8 natursand	976,4
8-12 grus	976,4

Betong med vct 0.65 används för att begränsa effekten av självuttorkning. Självuttorkningen är den uttorkning som sker i betong när vattnet binder till cementpartiklarna, hydratationen, och den fysikaliska bindningen i porstrukturen. Receptet innehåller SH cement som är ett rent portland cement, där cementet är det enda som binder vatten frånsett den fysikaliska

bindningen. Betongen är också öppnare än en betong med lågt vct vilket är gynnsamt ur ett uttorkningsperspektiv. Uttorkning genom diffusion tar därför mindre tid än för en betong med lägre vct. Fuktfördelningen är också mer markerad än för en betong med lågt vct.

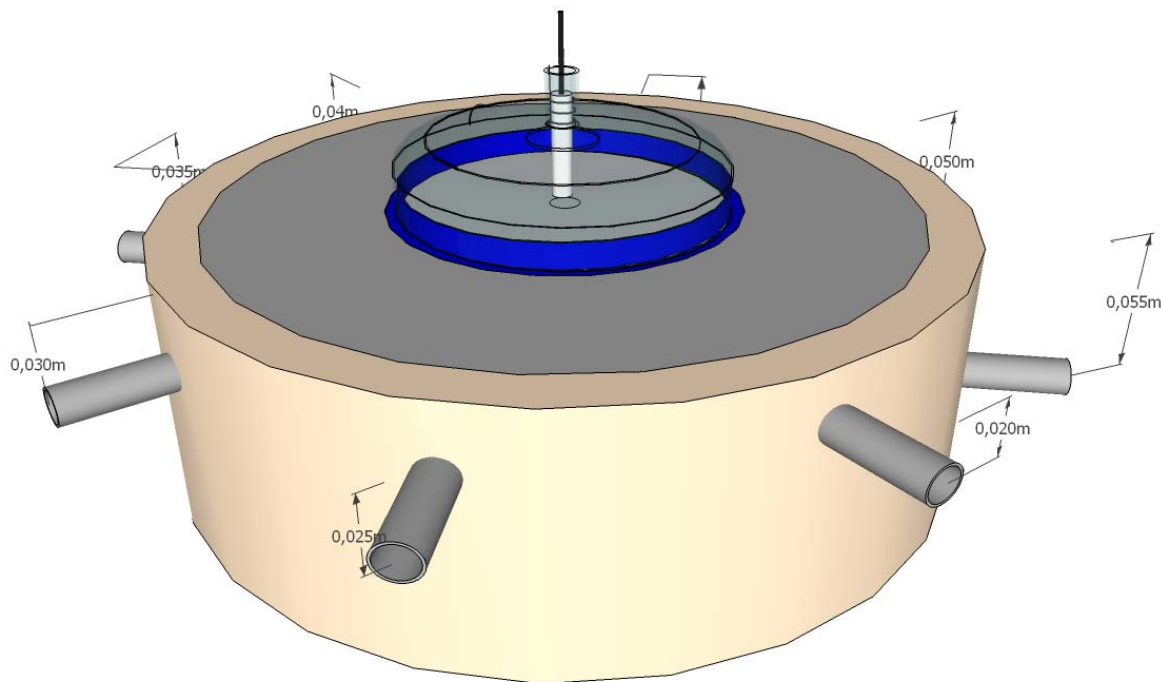
3.5.2 Metod

En provserie bestående av två satsar á fyra betongcylindrar, sats 1 och sats 2, tillverkades för att efterlikna ett betonggolvs med enkelsidig uttorkning. Polypropylenrör, pp-rör, med godstjocklek 20 mm, diametern 310 mm och längden 100 mm, fylldes med betong, vct 0.65. Innan gjutning installerades 8 st vaisalarör i respektive pp-rör, vilka monterades in från sidan genom ett horisontellt hål i rörväggen, se figur 6. Vaisalaröret monterades så att mynningen befann sig cirka 80 mm in i betongcylindern. Vaisalarören monterades med centrum 20-55 mm från uttorkande yta med 5 mm intervall. Rörmynningen mot betongen täcktes med kirurgtejp. För att förhindra fuktläckage i glipan mellan hålet i pp-röret och vaisalaröret anbringades en tätmassa på pp-rörets insida omkring vaisalaröret vid rör som sitter 40 mm från ytan, se figur 6. Gummikorkar användes för att försluta vaisalarören när sensorn inte satt i mätposition. Efter en viss tid av omfördelning borrades ett 20 mm långt hål in i betongen genom kirurgtejpen på varje nivå. Varefter RF fördelningen mättes upp på nytt.



Figur 6. Illustration av placering av mätrör på provkropp, notera tätning markerad vid 40 mm mätdjup.

RF mättes också direkt under tätskiktet efter förseglingen av överytan. Först stansades ett hål ut i förseglingen, 12 mm i diameter. Direkt därpå fixerades en glaskupa med vaisalasensor fast på aluminiumfolien med butylgummi, se figur 7. Därefter avlästes RF-sensorn upprepade gånger fram till slutavläsningen som skedde tidigast 2 dygn efter installationen.



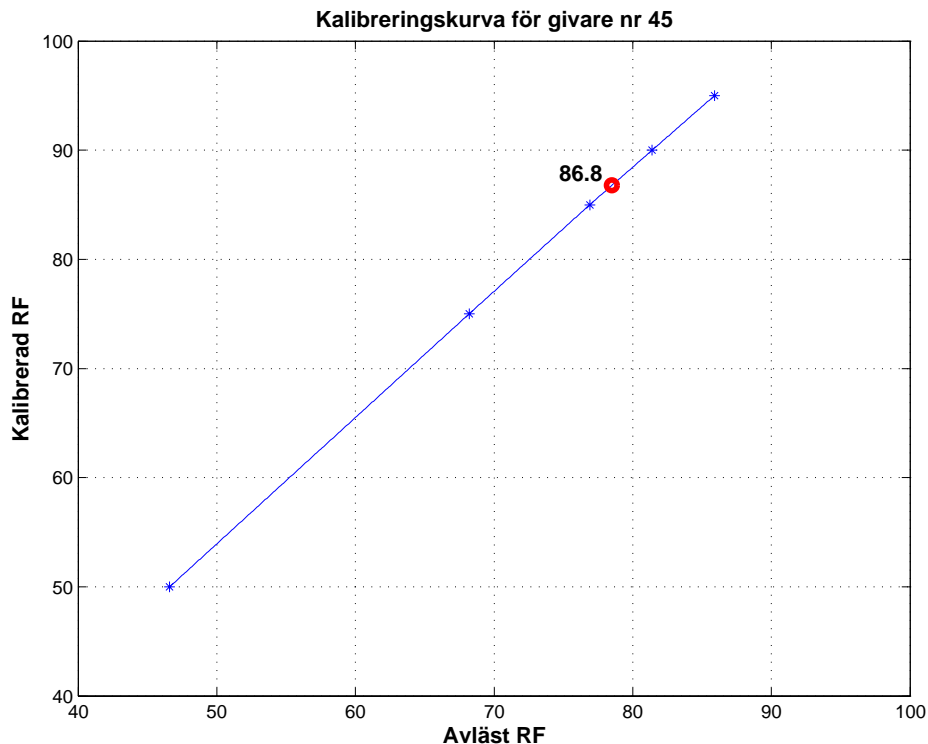
Figur 7. Provkropp med glaskupa och vaisalasensor monterad ovanför aluminiumfolie.

Vid försegling av toppen respektive botten användes två lager 0.2 mm plastfolie samt ett lager med självhäftande bitumenförsedd aluminiumfolie. Under samtliga åtta pp-rör anbringades förseglingen innan gjutning och fungerade därmed som botten. Efter gjutning härdades provkropparna i ett dygn under plastfolie varefter sats 1 exponerades för uttorkning i ett klimatrums med 55 % RF 20 °C medan toppen på sats 2 förseglades.

Sats 1 torkades i 59 dygn i klimatrums för att erhålla ett tydligt utgångsläge i fuktprofil. Innan förseglingen anbringades uppmättes relativa fuktigheten i samtliga monterade vaisalarör. Givarna installerades minst 72 timmar innan avläsning. Därefter förseglades Sats 1 och direkt därpå följde omfördelning. Fuktprofilen vid omfördelning uppmättes med samma sensor som vid utgångsläget för att erhålla jämförbara resultat. Under hela försöket kontrollvägdes varje provkropp för att upptäcka eventuellt läckage.

Sats 2 öppnades efter 56 dygn och exponerades därefter för samma klimat som sats 1. Uttorkningen fortsatte tills fuktprofilen i sats 2 i möjligaste mån liknade utgångsläget i sats 1 och förseglades sedan. Det visade sig ta cirka 30 dygn från det att förseglingen bröts för att nå ett liknande utgångsläge för omfördelning.

RF bestämdes med kalibrerade vaisalasensorer vid ett flertal tillfällen, varav sista mättillfället innan försegling och efter en viss tid av omfördelning redovisas. Dessutom redovisas RF-fördelningen efter ytterligare en tid av omfördelning när mätning skedde i uppborrade hål utan kirurgtejp. Sensorerna avlästes upprepade gånger från installation till slutavläsning och satt i mätposition minst 72 timmar innan slutavläsning. Kalibreringen av samtliga sensorer utfördes med hjälp av en fuktgenerator, Thunder 2500, vid RF nivåerna 50, 75, 85, 90, 95 % RF vid 20 °C. Kalibreringen skedde cirka 7 dagar innan RF fördelningen innan försegling uppmättes för sats 1. Kalibrerad RF är beräknad genom att interpolera linjärt mellan de två närmaste kalibreringsnivåerna och är angiven med en upplösning på 0.1 % RF, se figur 8.



Figur 8. Kalibreringskurva för vaisalaser HMP44 nr 45, avläst värde är 78.5 % RF, kalibrerad RF blir 86.8 % RF, markerad med en liten ring.

Varje nivå har tilldelats en unik sensor för att minska osäkerheten som kan uppstå om två sensorer reagerar olika på en viss given fuktighet. Eftersom givarna är tillskrivna en viss mätposition innebär det att mätvärdena blir jämförbara på respektive nivå utan att öka mätosäkerheten.

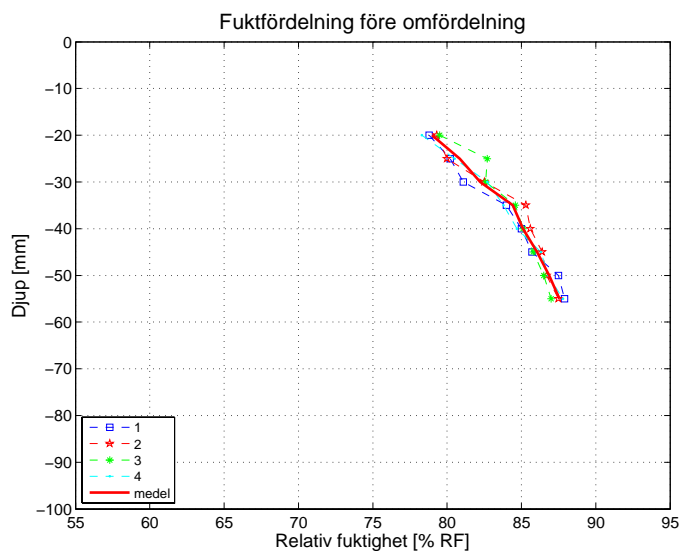
Provkropparnas viktförändringar kontrollerades med en våg av märket Sartorius med beteckningen LE34001S, med maxkapaciteten 34 kg och 0,1 grams upplösning.

3.5.3 Resultat

I figur 9 - figur 20 redovisas RF-fördelningen för samtliga provkroppar före försegling och efter en viss tid av omfördelning uppmätta genom kirurgtejp och i uppborrade hål. För sats 2 redovisas också RF-fördelningen innan start av uttorkning. X-axeln representerar relativ fuktighet i % RF och y-axeln representerar positionen för vaisalarörets centrum längs en tänkt vertikal linje i förhållande till övre basytan där 0 motsvarar den övre basytan på betongcylindern. Det innebär att RF-värdet som markeras på punkten -20 mm, har uppmäts i vaisalaröret vars centrum är 20 mm under uttorkande yta.

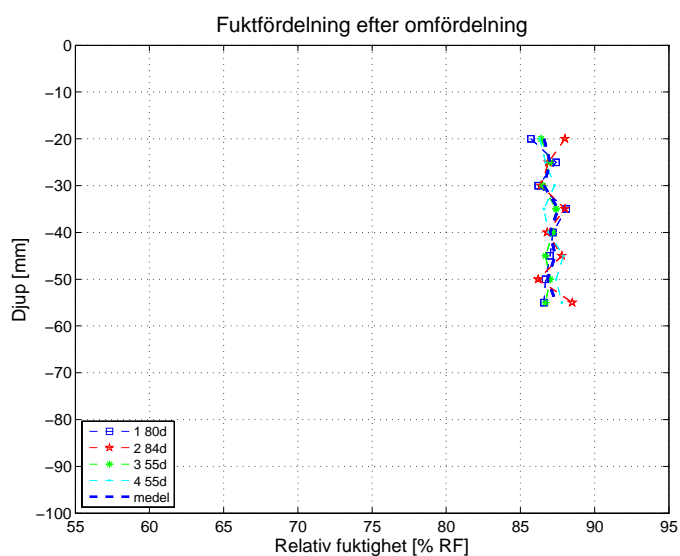
Notera att RF på 0 mm nivån, i samtliga figurer är uppmätt med vaisalaser direkt på betongyta, utan en hindrande kirurgtejp mellan sensor och betongyta.

Fuktprofilen för sats 1 för uttorkningsfasen visas i figur 9. Före försegling ligger mätningresultaten väl samlade kring medelvärdet med en största enskild avvikelse 1.9 %-enheter RF. Medelvärdet i RF för de fyra provkropparna är på nivå -20 mm är cirka 79 % RF och på nivå -55 mm cirka 87.6 % RF.



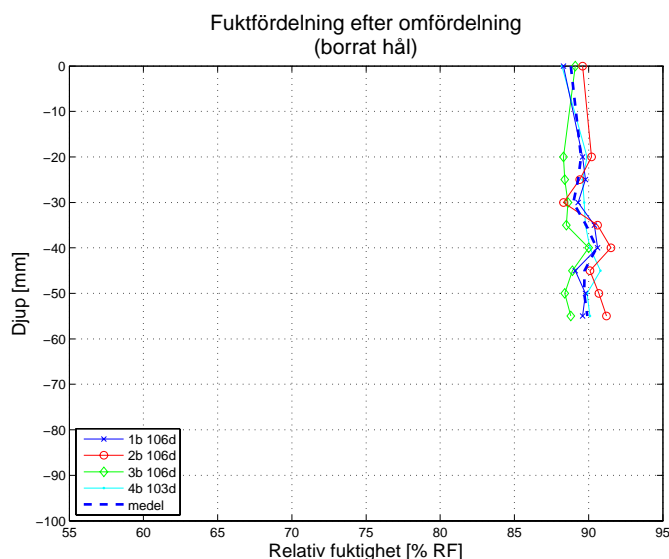
Figur 9. Fuktfördelningen efter 59 dygns torkning för sats 1.

I figur 10 visas fuktfördelningen för sats 1 efter en viss tid av omfördelning för samtliga provkroppar 1 till 4 inklusive medelvärden för respektive nivå. Fuktprofilen efter fuktomfördelning är för samtliga provkroppar också nära medelvärden. Medelvärden i RF för de fyra provkropparna är på nivå -20 mm är 86.6 % RF och på nivå -55 mm 87.4 % RF. Största enskilda avvikelser från medelvärden 1.0 %-enheter RF återfinns på nivån -20 mm i provkropp 2.



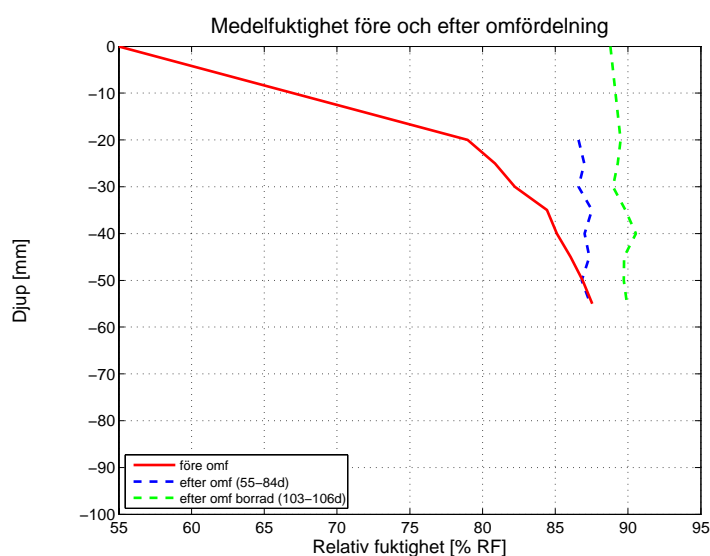
Figur 10. Fuktfördelningen efter 55-84 dygns omfördelning för sats 1.

Fuktfördelningen för sats 1 efter 103-106 dygns omfördelning uppmätt i borrhål visas i figur 11. Medelvärden i RF för de fyra provkropparna är på nivå 0 mm 88.8 % RF, -20 mm 89.5 % RF och på nivå -55 mm 89.9 % RF. Den största skillnaden från medelvärden finns i provkropp 3 på djupet 35 mm och är 1.3 %-enheter RF lägre.



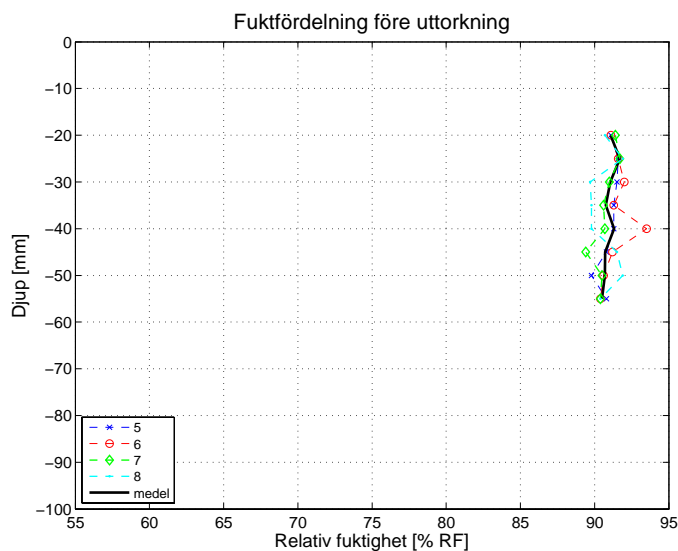
Figur 11. Fuktfordelningen för sats 1 efter 103-106 dygns omfordelning, uppmätt i borrhål.

I figur 12 visas en jämförelse mellan medelvärdet på fuktfordelningen av sats 1 före försegling samt efter 55-84 dygn samt 103-106 dygns (borrade hål) omfordelning. Huvuddelen av omfordelningen är klar men beräknas fortgå fram till minst 2010-03-01. Uppmätta värden visar att skärningspunkten mellan dessa båda kurvor inträffar vid cirka 50.5 mm vid tidpunkten för denna publikations tryckning. Då är relativa fuktigheten i medel 86.9 % RF. Största individuella avvikelse från en nivå till medelvärdet på motsvarande nivå är 1 % RF.



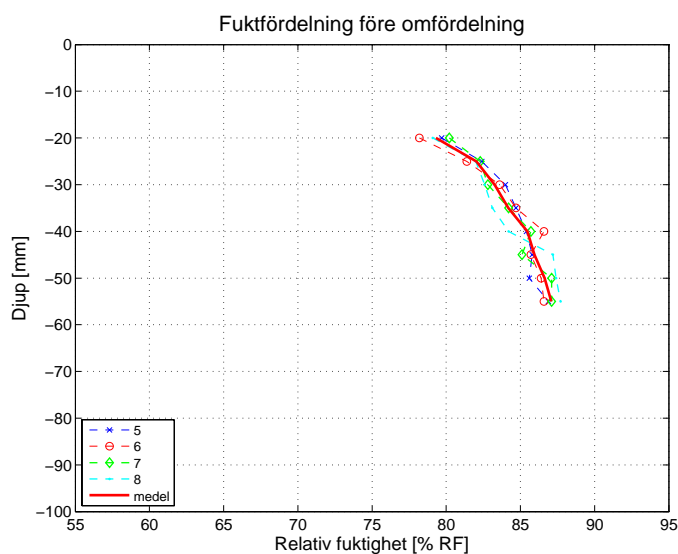
Figur 12. Medelfuktigheten för sats 1 före och efter 55-84 dygns samt 103-106 dygns (borrade hål) omfordelning.

Fuktfordelningen för sats 2 efter 56 dygns förseglad härdning innan uttorkning påbörjas visas i figur 13. Profilen för provkropp 6 skiljer sig markant från de övriga på nivån - 40 mm. Där är avvikelsen från medelvärdet 2.2 %-enheter RF. Detta kan förklaras av att lite vatten påträffades i röret när RF sensorn monterades bort. Det vattnet påverkar RF i mätröret och höjer utslaget hos sensorn och det fuktas också upp betongen som finns innanför kirurgtejpen.



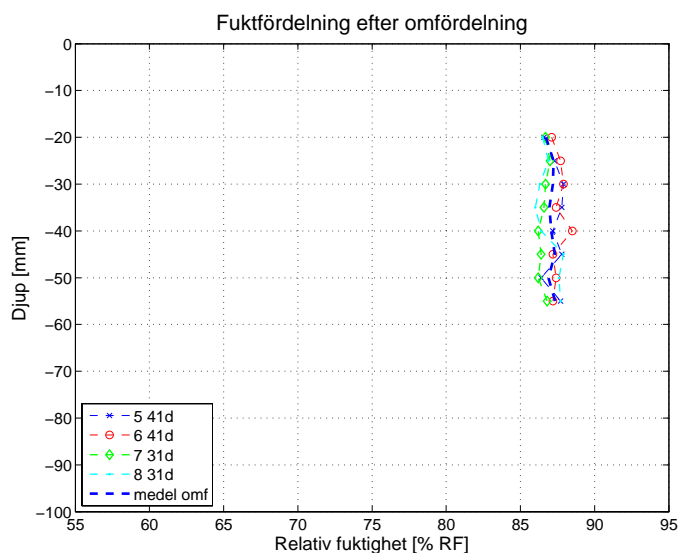
Figur 13. Fuktfördelning efter 56 dygns förseglad härdning för sats2.

Fuktprofilerna för sats 2 ligger väl samlade kring medelvärdet före omfördelning, se figur 14. Medelvärdet i RF för sats 2 är på nivå -20 mm är 79.3 % RF och på nivå -55 mm 87.1 % RF. Provkropp 8 har den största individuella avvikelser från medelvärdet på nivån -45 mm och är 1.3 %-enheter RF.



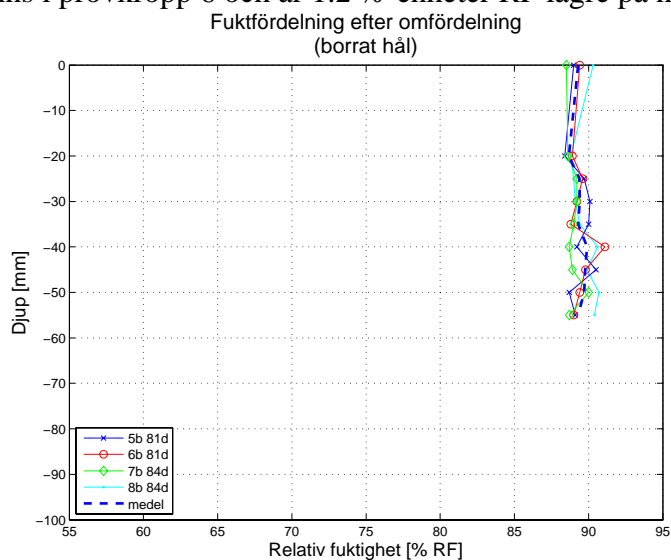
Figur 14. Fuktfördelning efter 32 dygns uttorkning för sats 2.

Efter att fukten har omfördelats 34-41 dygn i sats 2 ligger återigen profilerna väl samlade kring medelvärdet, se figur 15. Medelvärdet i RF för de fyra provkropparna är på nivå -20 mm är 86.7 % RF och på nivå -55 mm 87.4 % RF. Den största skillnaden från medelvärdet finns i provkropp 6 och är 1.4 %-enheter RF högre på djupet 40 mm.



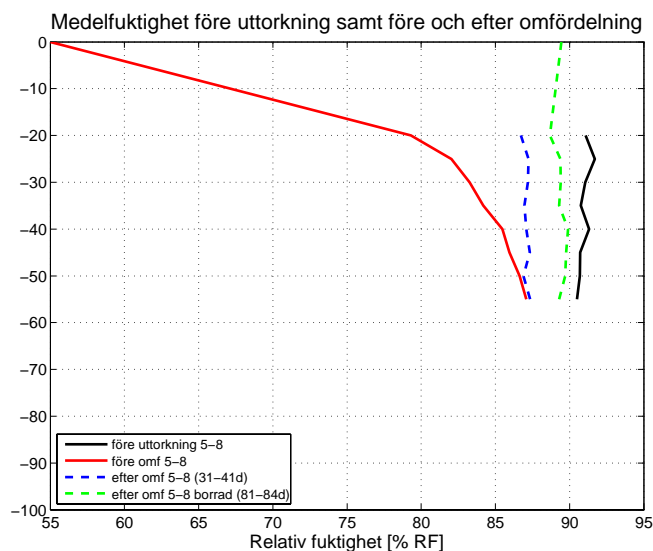
Figur 15. Fuktfördelning för enskilda plattor samt medelvärde efter 31-41 dygn omfördelning för sats 2.

Fuktfördelningen, uppmätt i borrarde hål, för samtliga provkroppar i sats 2 samt medelvärdet ses i figur 16. Medelvärdet i RF för de fyra provkropparna är på nivå 0 mm 89.5% RF, -20 mm är 88.7 % RF och på nivå -55 mm 89.3 % RF. Den största skillnaden från medelvärdet finns i provkropp 6 och är 1.2 %-enheter RF lägre på nivå -40 mm.



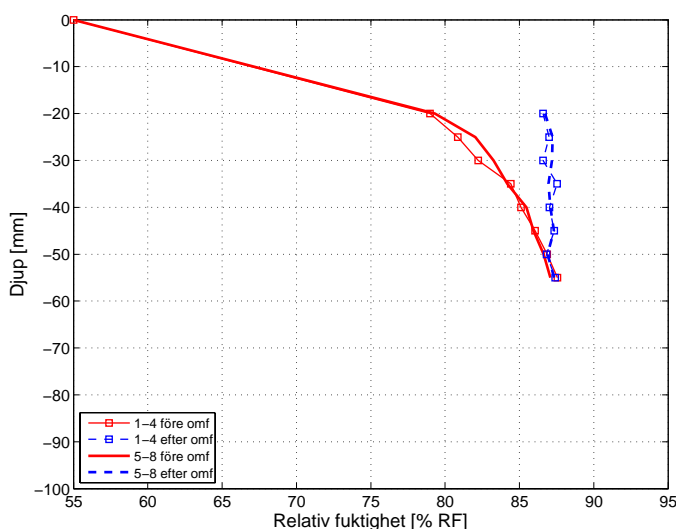
Figur 16. Fuktfördelning för enskilda plattor samt medelvärde efter 81-41dygns omfördelning för sats 2, uppmätt i borrarde hål.

I figur 17 visas en jämförelse mellan medelvärdet på fuktfördelningen i sats 2 före uttorkning, före och efter 31-41 respektive 81-84 dygns omfördelning. Huvuddelen av omfördelningen är klar men beräknas fortgå fram till minst 2010-03-01. Uppmätta värden visar att skärningspunkten mellan fuktfördelningen före och efter omfördelning inträffar vid cirka 55 mm vid tidpunkten för denna publikations tryckning. Då är relativa fuktigheten i medel 87.1 % RF.



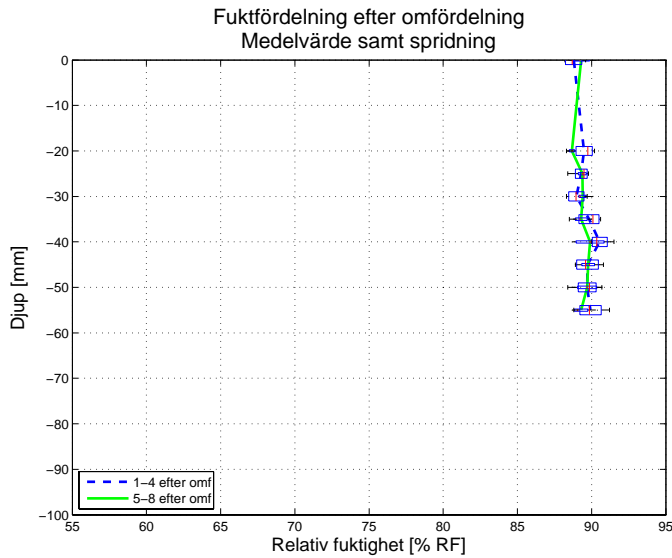
Figur 17. Medelfuktighet för sats 2 före uttorkning (svart heldragen linje), före (röd heldragen) och efter 31-41 dygns (blå streckad) samt 81-84 dygns omfördelning, borrarde hål (grön streckad)

I figur 18 visas skillnaden mellan fuktfördelningen före och efter omfördelning i sats 1 och sats 2. Den största skillnaden före omfördelning återfinns 25 mm ner i plattan och motsvarar 1 % RF. De provkroppar som har härdat förseglat, sats 2, har den högsta relativa fuktigheten på den nivån. Relativa fuktigheten för sats 2 är konsekvent högre på nivå 20-30 mm. Efter omfördelning är skillnaden max 0.6 %-enheter RF på nivåer mellan 20 och 35 mm. Nedanför 40 mm nivå är medelvärdet för båda kurvorna i princip lika. Medelvärdet för de två satserna före och efter omfördelning är mer lika från nivå -35 mm och neråt. Där är största skillnaden i medelvärde 0.4 %-enheter RF för respektive fall. Det aritmetiska medelvärdet för samtliga nivåer är 87.0 % RF för sats 1 och 87.2 % RF för sats 2.

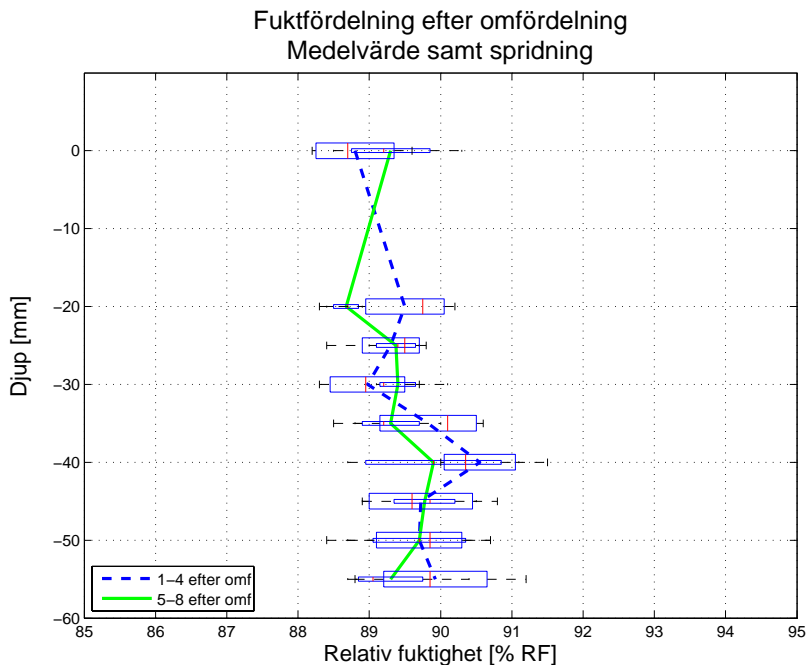


Figur 18. Jämförelse av medelvärdet mellan plattor med olika härdningsförhållanden före och efter omfördelning.

I figur 19 visas medelvärdet i borrarde hål för fuktfördelningen efter omfördelning för sats 1 samt sats 2, som streckad respektive heldragen linje. Spridningen i form av 25 %- och 75 %-fraktilen för varje nivå, är markerad med liggande staplar i samma figur där breda staplar representerar sats 1 och smala representerar sats 2. I figur 20 visas en förstoring av figur 19.



Figur 19. Jämförelse av fuktfördelning mellan sats 1 och sats 2.



Figur 20. Detalj av jämförelse mellan fuktfördelningen efter omfördelning i sats 1 och sats 2, där de breda staplarna anger 25 % respektive 75 %-fraktilen för sats 1 och de tunna staplarna anger fraktiler för sats 2.

Vikten på provkropparna har ändrats med mellan -0.8 gram och 0.2 gram under omfördelningen, se Tabell 2. Det innebär att provkropparna i de flesta fall har tappat i vikt men i två fall har vikten ökat. Ökningen är dock inte signifikant.

Tabell 2. Viktförändring hos respektive provkropp från försöksstart till försöksslut

provkropp	1	2	3	4	5	6	7	8
Startvikt [g]	15852.3	15853	16110.2	16076.8	15920.2	15899.4	16058.5	15826,8
Slutvikt [g]	15851.5	15852.7	16109.4	16076.4	15920.4	15899.5	16058.2	15826.7
Skillnad [g]	-0.8	-0.3	-0.8	-0.4	0.2	0.1	-0.3	-0.1

Vid antagandet att viktförändringen enbart beror på fuktläckage innebär det att fuktkvoten i provkroppen har minskat vilket påverkar RF i det omfördelade läget. Vattenmängden är cirka 560 gram vatten per provkropp, med antagandet att fuktkvoten är cirka 3.5 % vid 87 % RF. En förändring med 0.3 gram vatten per provkropp medför då en sänkning med 0.002 % i fuktkvot vilket innebär en försumbar sänkning av RF, cirka 0.05 %-enheter RF.

3.5.4 Hypotesprövning

Prövningen av hypotesen att medelvärdet för RF-fördelningen för båda satserna är lika oberoende av härdningssätt sker genom en statistisk utvärdering, med stickprov. Utvärderingen sker för nivå 0 som är den nivå som säkert har utsatts för fuktigheter under 80 % RF. Mätresultatet för sats 1 vid 0-nivån, precis under tätskiktet är [88.3 89.6 89.1 88.2] % RF. För sats 2 är mätresultatet [89.0 89.4 88.5 90.3] % RF. Det ger att medelvärdet för de två satserna är:

$$\bar{X}_{sats1} = 88.8 \text{ respektive } \bar{X}_{sats2} = 89.3$$

Standardavvikelsen för de två mätserierna räknas ut i Tabell 3 och Tabell 4.

Tabell 3. Utvärdering av standardavvikelsen för RF under tätskikt för sats 1

Mätresultat [% RF]	\bar{X}_{sats1}	$X_i - \bar{X}_{sats1}$	$(X_i - \bar{X}_{sats1})^2$	$S_{X_{sats1}} = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X}_{sats1})^2}{n-1}}$
88.3	88.8	-0.5	0.25	0.6683
89.6		0.8	0.64	
89.1		0.3	0.09	
88.2		-0.6	0.36	
Σ			1.34	

Tabell 4. Utvärdering av standardavvikelsen för RF under tätskikt för sats 2.

Mätresultat [% RF]	\bar{X}_{sats2}	$X_i - \bar{X}_{sats2}$	$(X_i - \bar{X}_{sats2})^2$	$S_{X_{sats2}} = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X}_{sats2})^2}{n-1}}$
89.0	89.3	-0.3	0.09	0.7616
89.4		0.1	0.01	
88.5		-0.8	0.64	
90.3		1	1	
Σ			1.74	

Den sammanvägda standardavvikelsen beräknas genom att göra en punktskattning med följande ekvation:

$$\sigma_{obs}^* = S_{X_{sats1}X_{sats2}} = \sqrt{\frac{S_{X_{sats1}}^2 + S_{X_{sats2}}^2}{2}} \quad (1)$$

med värden från tabellen ger ekvation (1) följande värde på den sammanvägda standardavvikelsen:

$$\sigma_{obs}^* = \sqrt{\frac{0.6683^2 + 0.7616^2}{2}} = 0.7165$$

Pröva att bilda ett 80 % konfidensintervall med $t_{0,1}(4+4-2) = 0.906$.

Den undre gränsen i konfidensintervallet räknas ut med uttryck (2) och den övre med uttryck (3):

$$\left[\bar{X}_{sats1} - \bar{X}_{sats2} - t_{\alpha/2}(n_1 - n_2 - 2)\sigma_{obs}^* \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \right] \quad (2)$$

$$\left[\bar{X}_{sats1} - \bar{X}_{sats2} + t_{\alpha/2}(n_1 - n_2 - 2)\sigma_{obs}^* \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \right] \quad (3)$$

Med de två satsernas respektive medelvärde och sammanvägda standardavvikelse insatt i uttryck (2) och (3) ges följande konfidensintervall.

$$\left[88.8 - 89.3 - 0.906 \cdot 0.7165 \cdot \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{1}{4}}, 88.8 - 89.3 + 0.906 \cdot 0.7165 \cdot \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{1}{4}} \right]$$

$$[-0.9590, -0.0410]$$

Eftersom konfidensintervallet inte innehåller 0 så skiljer sig medelvärdet mellan sats 1 och sats 2 åt med 80 % säkerhet. Med 80 % säkerhet blir fuktbelastningen under tätskiktet mellan 0 och 1 % RF lägre genom att härda under samtidig uttorkning än om härdning sker förseglat. Det innebär att skillnaden inte är slumpmässig med 80 % säkerhet.

3.5.5 Diskussion

Härdningsförfarandets påverkan på fuktbelastningen under ett tätskikt har undersökts genom att härda provkroppar på två olika sätt. Sats 1 har härdats förseglat i 1 dygn och sedan exponerats för 55 % RF medan sats 2 har härdats förseglat under 56 dygn och sedan exponerats för 55 % RF.

Studien visar att fuktbelastningen under ett tätskikt är 0.5 %-enheter RF högre om betongen härdras förseglat jämfört med om den härdras under samtidig uttorkning i 55 % RF och 20 °C. Hypotesprövningen visade att medelvärdet för de två olika satserna skiljer sig med 80 % sannolikhet. Medelvärdet för fuktigheten under tätskiktet för sats 1 är 88.8 % RF och 89.3 % RF för sats 2. Skillnaden är för liten för att vara signifikant, den kan lika gärna ha uppkommit genom en tillfällighet. Det krävs att sannolikheten är minst 95 % för att skillnaden ska anses vara signifikant.

Fuktfördelningen före och efter omfördelning har bestämts för vct 0.65 betong, med SH-cement. Spridningen för fuktfördelningen i sats 1 är låg vilket innebär att utgångsläget för fortsatt omfördelning i respektive provkropp kan anses vara likartat. Likaså är spridningen för sats 2 låg innan förseglingen.

Fuktfördelningen för sats 2 innan uttorkning visar att RF i den övre delen av provkroppen är högre än i den undre; skillnaden är cirka 1 % RF. Samtliga fuktfördelningar i sats 2 visar den tendensen. En möjlig förklaring kan vara att betongen är inhomogen i höjddled som ett resultat av gjutningen; en form av separation. Ett högre vct innebär att cementpastan har en lägre grad av självuttorkning. Det högre fukttillståndet högre upp i provkroppen skulle kunna innebära att vct är något högre i det området. Självuttorkningen innebär att RF sänks ner till 90,5 % RF. Eftersom sats 1 har gjutits på samma sätt kan en sådan möjlig separation inte uteslutas.

Huvuddelen av omfördelningsprocessen är klar för båda satserna. För sats 1 hamnar skärningspunkten mellan fuktfördelningen före och efter omfördelning vid nivån 50,5 mm och 87 % RF, för sats 2 hamnar den under nivån 55 mm och 87,2 % RF. Datorberäkningen med skanningkurvor visade att skärningspunkten hamnade på nivån -44 mm och 85,9 % RF. Det innebär att fuktbelastningen under ett tätskikt i verkligheten blir högre än vad simuleringen visar. Underskattningen av fuktbelastningen kan få till följd att den kritiska fuktnivån överskrids.

Viktförändringen för respektive provkropp är låg, mellan -0,8 och 0,2 g. Viktminskningen kan bero på flera faktorer, dels kan det finnas ett läckage i förseglingen, dels kan fukt diffundera ut genom pp-rören och dels kan fukt torka bort när sensor sätts fast i mätposition för att nämna några. Viktökningen kan bero på att vågen har rubbats från sin position eller att vågen inte har varit nivellerad.

Resultatet från undersökningen visar att mätdjupet borde justeras neråt från dagens 40 % av tjockleken ner till 50 % eller till och med 55 %. Genom att mäta på 50,5 respektive 55 mm djup innan omfördelning så kan fuktbelastningen på ett helt tätt tätskikt efter omfördelning bedömas. Det resonemanget gäller vid enkelsidig uttorkning och att tätskiktet är helt tätt. Dock skiljer sig sättet att mäta på i en viktig detalj. I den här studien mäts RF från sidan i provkroppen och i en verklig situation sker mätningen ofta i ett borrhål uppifrån.

Skillnaden i mätdjup mellan beräkning och försök är 6 mm respektive 11 mm vilket är en stor skillnad. Om en mätning utförs 11 mm högre upp innebär det att RF underskattas med uppskattningsvis 1 % RF i det undersökta fallet. Utförs mätningen enligt anvisningar från RBK på 40 % av plattjockleken det vill säga mellan 11 och 15 mm högre upp underskattas RF med cirka 1,5 % RF.

Fuktprofilen i djupled är uppmätt både med i ingjutna vaisalarör från sidan där en kirurgtejp finns mellan betongen och luften i röret och där tejpens borrhål borrar bort. Det aritmetiska medelvärdet för samtliga nivåer i sats 1 RF var i genomsnitt 2,6 %-enheter RF högre när tejpens borrhål borrar bort. För sats två var motsvarande höjning 2,3 %-enheter RF. Det är rimligt att anta att kirurgtejpen har påverkat fuktflödet mellan betong och luft så att motståndet är högre. Om fuktflödet är lågt genom tejpens borrhål samtidigt som ett visst läckage förekommer ut genom rörpluggen kan RF i mätörret reduceras så att det märks på utslaget från RF-sensorn.

Genom att mäta RF från sidan påverkas fuktflödet sannolikt mindre än genom att mäta uppifrån i ett borrhål. Vid en mätning uppifrån hindras fuktflödet av den monterade utrustningen vilket innebär att RF sannolikt blir högre än om mätningen utförs från sidan. Ju större utbredning mätörret har desto större blir påverkan. Det inses lätt att all uttorkning skulle upphöra om mätörrets utbredning skulle uppta hela provkroppens yta. Istället skulle en omfördelning starta. Genom att mäta från sidan påverkas betongen som ligger över och under

mätstället mindre av mätutrustningen. Fuktflödet störs nu endast i mätrörets omedelbara närhet.

Betongytan som exponeras mot vaisalaserorna har en utbredning av 16 mm i diameter. Fuktfördelningen på dessa 16 mm varierar beroende på hur ytligt sensorn sitter monterad i provkroppen. En ytlig sensor sitter monterad där fuktfördelningen varierar mycket i höjddled, medan fuktfördelningen djupare ner är betydligt jämnare. Sensorn mäter relativa fuktigheten i luften i röret. Eftersom luften står i förbindelse med betongen kommer fukt från djupare liggande delar att omfördelas upp till torrare delar i den exponerade ytan. Omfördelningen sker genom kirurgtejpen och luften i röret. Det innebär att fuktigheten i luften antar ett värde som ligger någonstans mellan fuktigheten i betongen vid rörets botten och toppen. Det innebär också att en ytligt monterad en sensor kommer att visa en högre RF än vad som verkligen är fallet på den redovisade nivån.

En golvbeläggning som läggs direkt på ett betonggolv är normalt sett inte helt tät vilket innebär att uttorkningen fortsätter något efter montage. Om beläggningen limmas fast tillförs fukt via limmet vilket innebär en viss uppfuktning av betongen. Dessa båda faktorer påverkar även hur hög fuktbelastningen blir under tätskiktet och hur långvarig den blir. Oavsett mätdjup kommer den mindre täta golvbeläggningen innebära att RF-belastningen under tätskiktet blir mindre än beräknat medan fukten från limningen innebär att den blir högre än beräknat.

3.6 Slutsatser

Undersökningen bekräftar hypotesen att fuktbelastningen under en tät beläggning är oberoende av härdningsförfarandet. Sannolikheten att medelvärdet i RF under tätskiktet skiljer sig beroende på härdningsförfarande är till 80 % säkerställd enligt ett stickprovstest med t-fördelningen. Resultatet från studien kan tolkas som att ofullständigt hydratiserat cement i ytskiktet inte har potential att sänka fuktbelastningen under ett tätskikt.

Studien visar också att skärningspunkten mellan fuktfördelningen före och efter omfördelning hamnar på 50-55 % av djupet för enkelsidigt uttorkade betongplattor. Dagens riktlinjer för enkelsidigt uttorkade betongplattor säger att mätningen ska ske på 40 % av plattjockleken. För det här fallet skulle en mätning på 40 % av plattjockleken ge en för låg uppskattning av maximal fuktbelastning.

Kirurgtejpen som klistrats fast på vaisalaröret innan gjutning påverkar resultatet för RF-mätningen. När tejpen borrades bort efter att huvuddelen av fukten omfördelats uppmättes RF i de borrade hålen. RF ökade då konsekvent med cirka 2.5 % -enheter RF.

De tidigare resultat som indikerat att det skulle finnas en stor effekt av tidig uttorkning, se avsnitt 3.2, har därför andra förklaringar. Dessa måste sökas på ett annat sätt.

4 Jontransport i det hygroskopiska området

Fukttillståndet har betydelse för jontransport i betong (Xu and Hooton 1993; Climent et al. 2000). I vattenmättad betong kan joner transporteras om det finns en drivkraft eftersom porstrukturen är fylld med vatten. När betong inte är vattenmättad är delar av porsystemet delvis tömda och det borde innebära en begränsning av jontransporten. Vid hög relativ fuktighet är huvuddelen av porstrukturen fortfarande vattenfylld, men en viss del av den är luftfylld. På ytan i de luftfyllda porerna finns också ett tunt lager adsorberat vatten. Hur påverkar den delvis vattenfyllda porstrukturen möjligheten till jontransport? Innebär det reducerade fukttillståndet att jontransporten hämmas eller stoppas helt?

Nedbrytning av lim sker under en tät beläggning som ligger på ett underlag av betong som inte är vattenmättad. Limnedbrytningen är kopplad till jontransport (Sjöberg 2001) och det innebär att frågan om vilket fukttillstånd som gynnar eller gör jontransport möjlig blir viktig. Därför är det intressant att ta reda på om och hur mycket den delvis vattenfyllda porstrukturen påverkar transporten av joner. Det är också viktigt att veta om det finns ett fukttillstånd som innebär att joner inte kan förflyttas/omfördelas? Svaret på dessa frågor kan kanske också besvara frågan om vilket fukttillstånd som utlöser eller gynnar limnedbrytning. Om det är möjligt att påvisa att jontransport inte är möjlig vid ett visst fukttillstånd är det en indikation på ett kritiskt fukttillstånd.

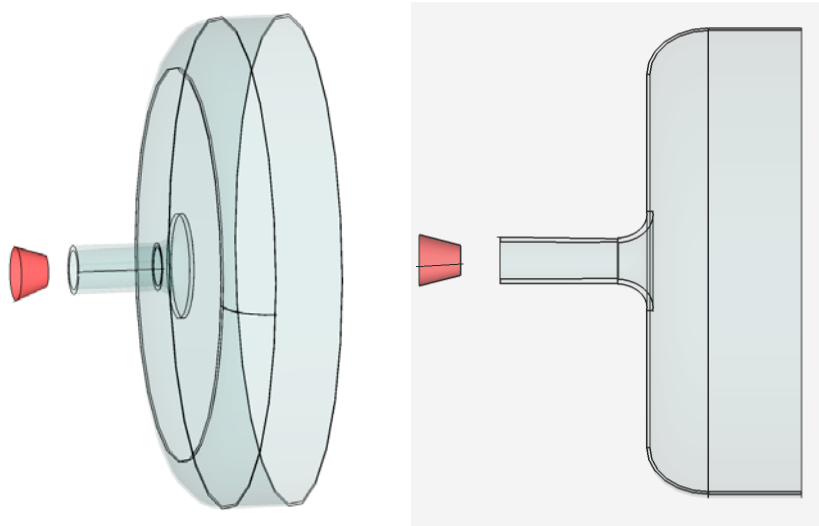
Försök har tidigare gjorts för att mäta den kritiska fuktnivån med avseende på vandring av joner. Nilsson (1984) mätte profiler av kalium och sulfat efter uttorkning i olika klimat, men det blev ingen större effekt av torkklimatet. Alkali vandrade vid alla torkklimat, eftersom det naturligtvis var tillräckligt fuktigt i början av uttorkningsförloppet. Wengholt Johnsson (1995) mätte kaliumprofiler i betong och lågalkalisk avjämningsmassa efter uttorkning till olika fuktnivåer med SEM-EDX. Francy (1998) mätte diffusionskoefficienter för klorider vid olika RF med en impedansmetod och visade en relativt stor konduktivitet även vid relativt låga RF. Climent et al (2000) utsatte betongytor som konditionerats till jämvikt med olika RF för klorid så att kloriden löste sig i porvattnet och diffunderade vidare om RF var tillräckligt högt. 75 % RF gav tydlig kloridjonvandring men inte 54 % RF.

I nästa avsnitt beskrivs en metod att konditionera cylindriska provkroppar av cementbruk/betong till ett visst fukttillstånd utan att riskera läckage. För att kunna konditionera dessa provkroppar på ett kontrollerat sätt och samtidigt kvantifiera fukttillståndet med RF-sensorer har en glaskupa specialtillverkats för ändamålet. I följande avsnitt följer en detaljerad beskrivning av tillverkning och konditionering av provkroppar till olika fukttillstånd med den utvecklade metoden. Därefter följer en redovisning av tre olika analyser att bestämma jonfördelningen i provkroppar av betong och resultatet av dessa metoder. Slutligen följer en diskussion och utvärdering av resultatet från dessa tre metoder.

4.1 Metodutveckling förseglning och fuktmätning

Det är komplicerat att mäta relativ fuktighet på en förseglad provkropp utan att fukt försvinner från provkroppen under mätningen. Eftersom det tar upp till 2-3 dygn innan fukt- och temperaturjämvikt råder mellan sensor, luft och betong, är läckage ett stort problem. Om fukten i provkropparna är under omfördelning kan mättiden förlängas väsentligt vilket gör att även ett litet läckage får stor påverkan på fukttillståndet. Därför har en metod utvecklats för att minimera risken för fuktläckage.

Provkroppen består av en cylinder av cementbruk med plana ändytor vilkas RF ska bestämmas. Cylindern är 100 mm i diameter och cirka 30 mm lång och den plana ändytan är förseglad med aluminiumtejp och plast. Relativa fuktigheten på ytan ska bestämmas för att kontrollera fuktillståndet för ytan utan att förlora fukt genom läckage. En glaskupa med samma diameter som provkroppen har specialtillverkats för att kunna fästas på en provkropp, se figur 21. Då glaskupan fästs på provkroppen fungerar den tillsammans med en vaisalasektor som en försegling. I glaskupans botten finns ett glasrör som fixerats med smält glas.



Figur 21. Till vänster ses en glaskupa med gummikork och till höger en tvärsektion av glaskupan.

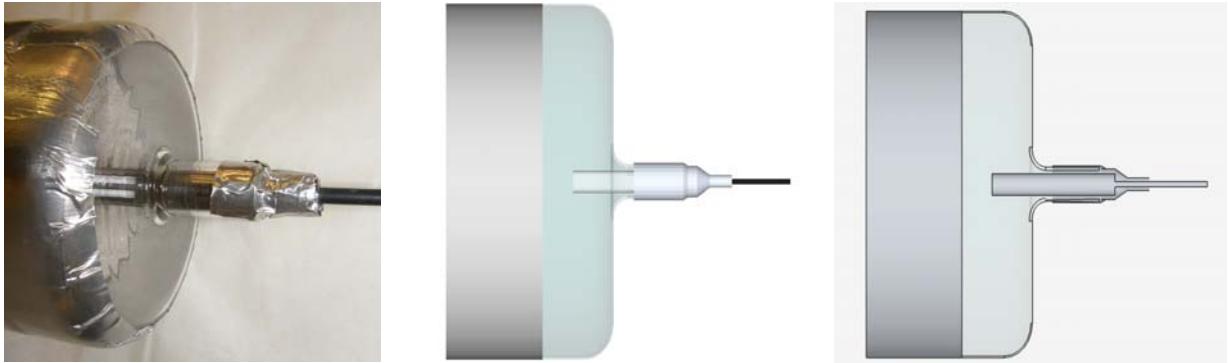
Två metoder att tät anslutningen mellan en vaisalasektor och glaskupa har utvärderats med tre olika försök. En metod är att tät anslutningen genom att noggrant tejpa fast en vaisalasektor HMP44 mot hålet i glaskupan. En annan metod är att fixera vaisalasektorn med tre o-ringar i hålet på glaskupan. Dessa försök har till syfte att undersöka tätheten hos förseglingen. Två mätmetoder används för att kontrollera om läckage förekommer, dels genom att väga provkropp med glaskropp och vaisalasektor och dels genom att mäta RF i glaskupan. Dessutom kontrolleras om RF-mätningar i glaskupan är känslig för temperaturförändringar.

4.1.1 Material och Metod

Cylindrar av cementbruk, vct 0.4, tillverkades och våthärdades sedan under 2 månader i ett vattenbad. Därefter togs de upp och torkades av med en fuktig wettexduk. Mantelytan på alla provkroppar förseglades därefter med självhäftande bitumenbestruken aluminiumfolie. Cylindrarna av cementbruk sågades därefter i provkroppar med längden 30 mm. Efter avtorkning förseglades provkroppens båda basytor med två plastfoliecirklar samt tre sammanfogade aluminiumtejpremsor. Efter 109 dygn skars basytans försegling bort och glaskupan med sensorn monterades mot ändytan en aluminiumtejp. Efter detta påbörjades mätningen av RF på de plana ändytorna och vägning av provkroppen. Försöket genomfördes i ett klimatrums med 55 % RF och 20 °C.

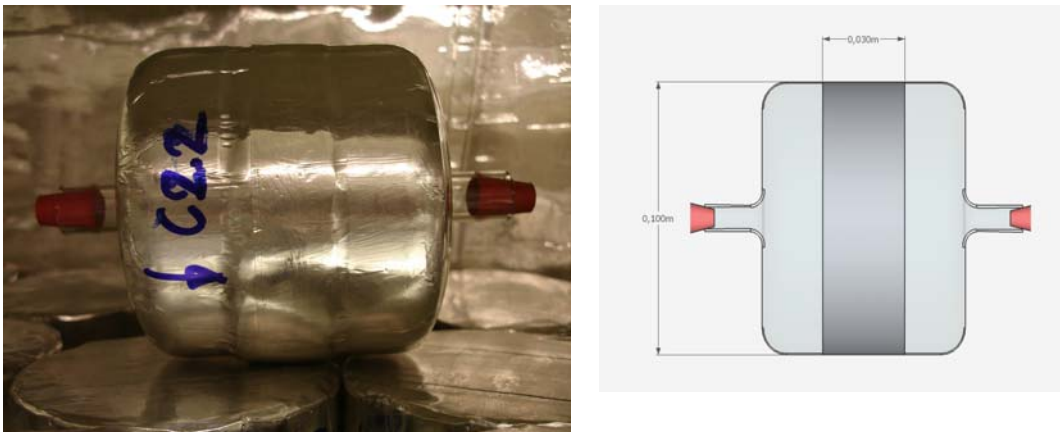
Provkropp 1 förseglades genom att fästa en glaskupa på ena sidan av provkroppen med aluminiumtejp, se figur 22. I glaskupans hål fixerades en vaisalasektor, HMP44, med aluminiumtejp. Aluminiumtejpen klistrades utanpå sensor och glaskupa. Ytterdiametern är olika för sensor (12.1 mm) och röret på glaskupan (18 mm) och det innebär att

aluminiumtejpens veckades något. Vecken på aluminiumtejpens slätades ut med en trä- eller plastpinne och ströks fast mot underlaget för att minimera läckaget.



Figur 22. Till vänster fotografi av provkropp 1 där vaisalaseror är fixerad till glaskupa med aluminiumtejp, i mitten principfigur, till höger i genomskärning.

Den andra provkroppen, 2, förseglades genom att två glaskupor fästes på vardera basyta med aluminiumtejp. Därefter monterades en gummikork i respektive glaskupa för att försluta provkroppen, se figur 23. Efter två månader monterades två vaisalaseror som fixerades med enbart aluminiumtejp, på samma sätt som den enda sensorn i provkropp 1.



Figur 23. Till vänster fotografi av provkropp 2 förseglad med två glaskupor och gummikorkar, till höger principfigur i genomskärning.

Slutligen förseglades en tredje provkropp, 3, på motsvarande sätt som provkropp 1 men vaisalaserorn fixerades i hålet på glaskupan med tre o-ringar istället för med aluminiumtejp, se figur 24. Sensorn sköts in så långt att den vidrörde basytan på provkroppen.



Figur 24. Till vänster fotografi av provkropp med vaisalaseror fixerad till glaskupa med tre o-ringar, till höger principfigur i genomskärning.

På provkropp 3 droppades vatten på ytan för att temporärt höja RF på ytan, innan glaskupan tejpades fast. Efter detta vägdes provkroppen med en gummikork monterad i glaskupan. Sedan sattes en vaisalasensor fast med tre o-ringar i glaskupan. RF lästes av i en och en halv månads tid för att se om RF och vikten hos provkroppen förändrades.

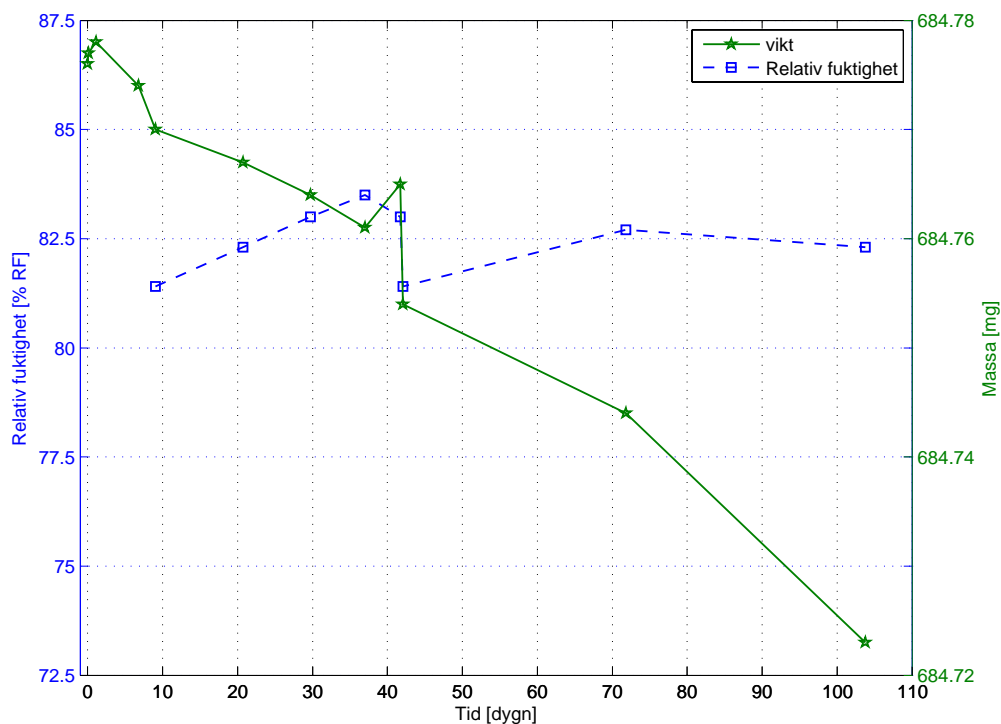
Vikten kontrollerades på en våg av märket Sartorius LE1003S, vid samtliga RF avläsningar. Vågen har en maxkapacitet av 1000 gram och en upplösning på 1 milligram. Innan varje vägning utfördes en valideringsvägning med en referensvikt som vägde 200,002 gram. Den relativa viktförändringen är spårbar mot referensvikten men inte absolutvikten.

Varje RF-värde motsvarar det avlästa värdet och inte det kalibrerade RF. Det innebär att det enbart går att säga något om den relativa fuktighetsförändringen om en sådan finns. Samma RF-sensor satt i mätposition genom hela försöket så ett eventuellt läckage inte skulle bero på luftombyte vid dit- och avmontering av sensor. Avläsning skedde med ett unikt instrument under hela försöket.

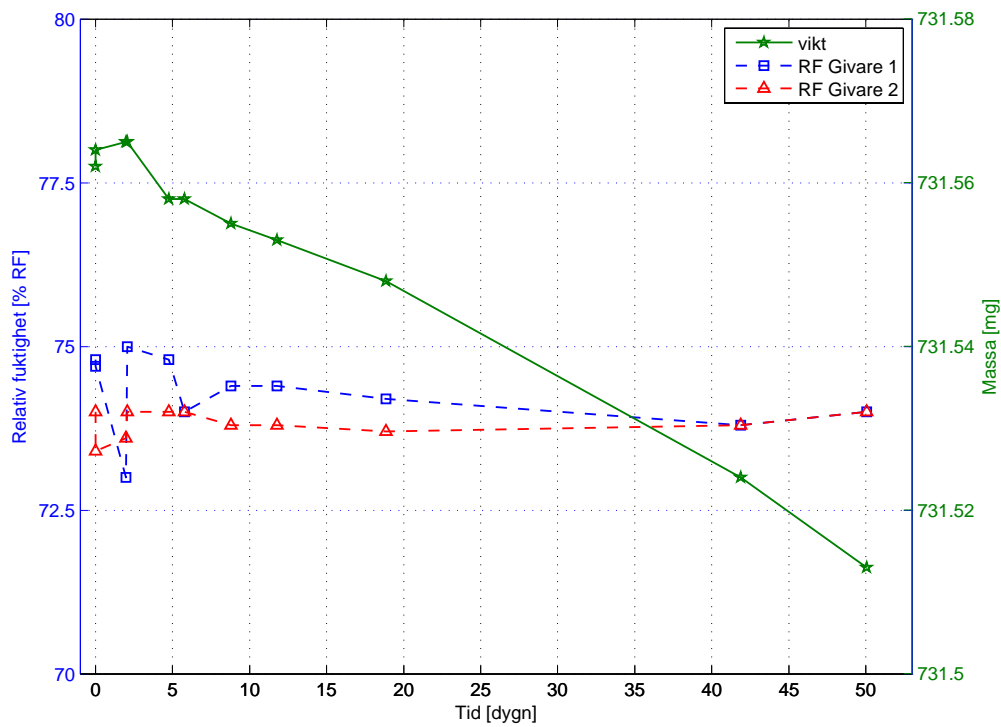
Försöket ägde rum i ett temperaturstabil klimatrum.

4.1.2 Resultat

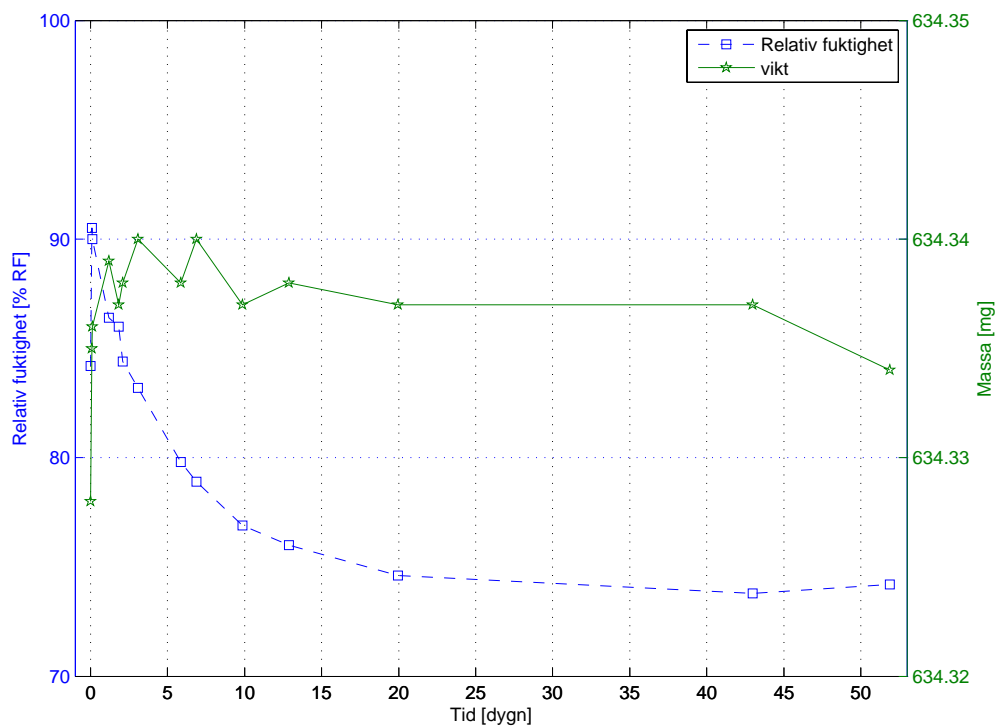
Vikt- samt RF-förändringar för provkroppar 1, 2 och 3 redovisas i nedanstående figurer 25-27. X-axeln representerar tid i dygn, vänster y-axel representerar relativ fuktighet i % RF och höger y-axel representerar vikt i gram. Streckade linjer motsvarar avläst RF för respektive vaisalasensor där fyrkanter markerar ett visst mättillfälle. Helt dragna linjer motsvarar vikten för respektive provkropp där stjärnor markerar mättillfället. RF för provkropp 3 sjunker kontinuerligt för att sedan plana ut. Det beror på att ytan vars RF mättes beströks med vatten innan glaskupa med vaisalasensor monterades.



Figur 25. RF (streckad) och vikt (heldragen) på provkropp 1 med glaskupa och vaisalasensor monterad med aluminiumtejp



Figur 26. RF (streckad) och vikt (heldragen) för provkropp 2 med två glaskupor och två vaisalaseror fixerade med aluminiumtejp.



Figur 27. RF (streckad) och vikt (heldragen) på provkropp 3 med glaskupa och en vaisalaseror monterad med tre o-ringar.

4.1.3 Diskussion

Det första försöket visar att RF håller sig på en väl definierad nivå och är i stor sett konstant över hela mätperioden på 104 dygn. Den hastiga sänkningen av RF vid cirka 40 dygn kan bero på en hastig temperatursänkning vilket kan påverka RF. Provkroppsvikten sjunker med 53 mg under hela mätperioden vilket innebär att monteringen av sensorn uppenbart inte är tät nog. Det syns inga tecken på att viktminskningen ska upphöra med tiden utan den ökar snarare. Den tillgängliga mängden vatten i provkroppen är cirka 19 g vid cirka 80 % RF. Bruket i provkroppen väger cirka 550 gram. Fuktkvoten blir då 3.5 %. En viktminskning av 53 mg innebär en sänkning av fuktkvoten med 0.01 %-enheter. En sänkning av fuktkvoten med 0.01 %-enheter minskar RF med cirka 0.15 %-enhet RF vilket inte är försumbart i sammanhanget.

Under försökets genomförande upptäcktes att om glaskupan berördes med en hand påverkades temperaturen hos RF-sensorn. Temperaturhöjningen av glaskupan höjde temperaturen i luften i glaskupan. Det innebär att luftens mätnadsånghalt förändras, vilket i sin tur innebär att RF sjunker. Fortsättningsvis skedde därför RF-avläsning utan att beröra vare sig provkropp eller glaskupa. Vägningen skedde efter avläsning av RF, för att undvika uppvärmning av provkroppen.

Det andra försöket visar att RF på båda sidor om provkroppen är nära nog konstant under hela mätperioden. Här var RF-sensorer fixerade med aluminiumtejp. Några få variationer i RF vid början av mätningen kan bero på temperaturinstabilitet i klimatrummet. Viktförändringen är däremot 51 mg på cirka 50 dagars mätperiod, vilket innebär att förseglingen är otät.

Resultatet från försök 3 visar att RF sakta sjunker för att i mätperiodens slut stabilisera sig. Det förloppet är som förväntat eftersom den från början torra ytan fuktades upp med vatten innan försegling. Sänkningen av RF är en följd av att ytfukten omfördelas ner i provkroppen. Vaisalasesorn är enbart fixerad med tre o-ringar. Tätheten hos förseglingen är inte möjlig att utvärdera med enbart RF mätningar i det här fallet. Viktförändringen är i princip noll under hela försöksperioden; från periodens första registrerade vikt till sista har provkroppen stigit i vikt med 0.006 g. Den här tätningen uppfyller de krav som ställs på förseglingen.

Den lilla stegringen av vikt precis i början för varje mätserie kan bero på temperaturinstabilitet. Provkroppar vägdes första gången direkt efter att glaskupa och sensor monterats vilket har höjt temperaturen av provkroppen med någon grad. Den varma kroppen kan eventuellt ge upphov till att luften i det stängda vågutrymmet börjar cirkulera. En uppåtgående luftström skulle kunna lyfta provkroppen och en lägre vikt registreras.

Sammantaget innebär resultatet från förstudien att det inte räcker med att mäta RF för att vara säker på att förseglingen är tät. Vikten måste också loggas under omfördelningsfasen på en våg med tillräcklig noggrannhet. Dessutom är det viktigt att kontrollera att tätningen mellan RF-sensorer och glaskupa fungerar. Undersökningen visar att tre o-ringar både fixerar vaisalasesorn i glaskupan och tätar bra mot läckage. Det är också viktigt att inte störa temperaturstabiliteten innan vägning och RF-mätning. Därför ska dessa moment ske med så kortvarig provkroppshantering som möjligt. Vägning ska också ske mot en referensvikt för att upptäcka om vågen driver, referensvikten ökar eller minskar i vikt, med tiden.

4.2 Tillverkning och fuktkonditionering av provkroppar

Ett större antal provkroppar tillverkades av två cementbruk med vct 0.4 och vct 0.65. Materialsammansättningen är beskriven i detalj i avsnitt 4.2.1. Dessa tillverkades och

konditionerades till olika fukttillstånd genom att använde en metod beskriven i avsnitt 4.2.2. Genom den beskrivna konditioneringsprocessen är syftet att generera ett visst bestämt fukttillstånd genom uttorkning. När fukttillståndet är bestämt kommer provkroppar att exponeras för en torr miljö vilket innebär att fukt kommer att transporteras ut från provkroppen. Efter detta ska jonfördelningen bestämmas för de genererade fukttillstånden både från en referens och från en provkropp som torkat. Om en jontransport kan detekteras innebär det att joner kan omfördelas vid det aktuella fukttillståndet.

4.2.1 Material

Jontransport av Kalium, K^+ , och Sulfatjoner, SO_4^{2-} , vid olika relativa fuktighet har undersökts på två olika cementbruk vct 0.65, H och vct 0.4, L, för tillverkningsrecept se tabell 5.

Tabell 5. Recept för tillverkning av cementbrukscylindrar

Material [kg/m³]	L	H
Cement SH, CEM I 52.5 R	702	333
Vatten	281	217
CEN-Standardsand EN 196-1 0-2 mm	1199	1602

Cementet användes för att erhålla provkroppar som innehåller ren portland cement som bindemedel och inte kalkfiller. Dessutom är sulfathalten för SH cement, som SO_4^{2-} , mellan 3.3 - 4.0 vikt-% och kaliumhalten, 1,3 vikt-% K^+ . En hög halt av sulfater innebär att det är lättare att detektera dessa med tillgänglig mätutrustning. Standardsand är en kvalitetskontrollerad kvartssand som innehåller mycket låga halter av humusämnen och kalkföroreningar. Sådana ämnen kan påverka analysresultaten. Kornkurvan är också väldefinierad och innehåller enbart små fraktioner, $d_{max}=2$ mm, vilket innebär att bruksblandningen har goda förutsättningar att bli homogen.

4.2.2 Metod

Brukscylindrar framställdes genom att gjuta i plåt-cylindrar med längden 200 mm och diametern 100 mm. Efter cirka ett dygns härdning i plåtformen och under plastfolie förseglades H med aluminiumfolie försedd med bitumen. L-cylindrar härdades på två olika sätt, där ett större antal härdades i vattenbad under 56 dygn och ett mindre antal härdades intäckta med plastfolie i ett dygn. L-cylindrarna som härdades i vattenbad torkades av med en urkramad fuktig wettexduk innan de förslöts med en bitumenbestruken aluminiumfolie, medan H förslöts utan avtorkning.

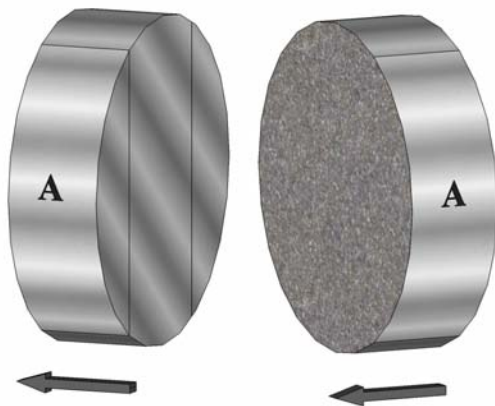
Inom någon timme efter avslutad härdning våtsågades H-cylindrarna upp i fyra delar, 30 mm långa. De vattenhärdade L-cylindrarna sågades upp vid två tillfällen dels 1 dygn efter gjutning och dels 56 dygn efter gjutning.

Våtsågningen kan påverka jontransporten genom att ett torrt material suger vatten vilket kan resultera i att joner följer med det insugna vattnet. Detta påverkar främst basytorna på cylindern eftersom mantelytan är förseglad. Efter ett dygn är RF i ett bruk med vct 0.65 fortfarande högt med hög andel vattenfyllda porer vilket innebar att störningar från våtsågningen minimerades. Våtsågningen bedömdes påverka provkroppar med högt vct i störst utsträckning. Därför sågades H kort tid efter gjutning när de fortfarande var fuktiga.

L-cylindrarna tilläts härda länge i vatten innan våtsågningen. Påverkan av våtsågningen bedömdes vara mindre för L-cylindrarna på grund av att materialet är tätare än H-materialet. Genom att härda bruket med fri tillgång på vatten ökar tätheten och bruket blir mer välhärdat.

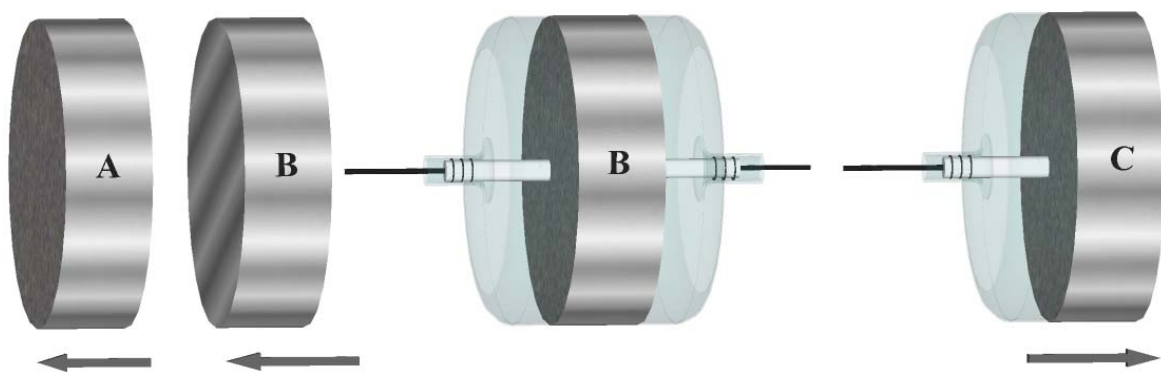
Är bruket välhärdat minskar störningen från våtsågningen. Självuttorkningen som sker när cementet reagerar med vattnet innebär att RF sänks fort i dessa cylindrar.

Randeffekter av gjutningen minimerades genom att såga bort mer än 10 mm från vardera basyta av cylindern. Efter sågning av provkroppar förseglades dessa enkelsidigt, inom ett dygn. Förseglingen skedde genom att lägga två plastfoliecirklar på tre överlappande aluminiumtejprensor och fästa detta på provkroppens ena basyta, se figur 28. Alla provkroppar kontrollvägdes under hela försöket.



Figur 28. Provkroppen, som ses ur två vinklar, är här förseglad med aluminiumtejp och plastfoliecirklar på en basyta (vänster) och öppen på den andra (höger).

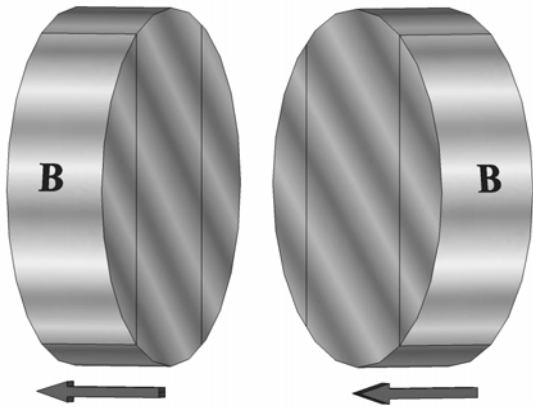
Provkropparna fuktconditionerades enligt en förutbestämd sekvens, etapp A-C, så att ett specifikt fukttillstånd genererades. Fem provkroppar per önskat fukttillstånd conditionerades varav två utgjorde referens och stannade vid etapp B och tre fullföljde hela sekvensen. Genom att följa denna sekvens till olika stadier, kunde jontransporten vid olika fukttillstånd i ett material som enbart torkat ut analyseras. Fuktkvoten, vilken skulle kunna påverka jontransporten, är som störst i ett material som enbart har torkat ut. Hela conditioneringsprocessen skedde under kontrollerade förhållanden i ett klimatrum med 55 % RF och 20 °C, se figur 29.



Figur 29. Hela conditioneringssekvensen, A enkelsidig uttorkning, B omfördelning och C omvänd fukttransportriktning med möjlig jontransport, där pilar indikerar fukttransportriktning.

Etapp A innebär att provkropparna torkades enkelsidigt under olika lång tid innan försegling, se figur 30. Det innebär att både RF och fuktkvoten sjunker i provkroppen med tiden och en viss fuktfördelning genereras. Den uttorkande basytan står i jämvikt med 55 % RF och RF på den motstående förseglade basytan sjunker sakta med tiden. Ju längre torkningen pågår desto större blir sänkningen av fukttillståndet.

Därefter vidtog Etapp B, vilket innebar att den öppna basytan förseglades på samma sätt som motstående basyta. Därefter vägdes provkroppen för att kunna bestämma ett eventuellt fuktläckage. Fukttransporten fortsätter i samma riktning, markerad i figur 30, tills RF fördelningen är utjämnad.



Figur 30. Provkroppen, som ses ur två vinklar, är här förseglad med aluminiumtejp och plastfoliecirklar på båda basytorna.

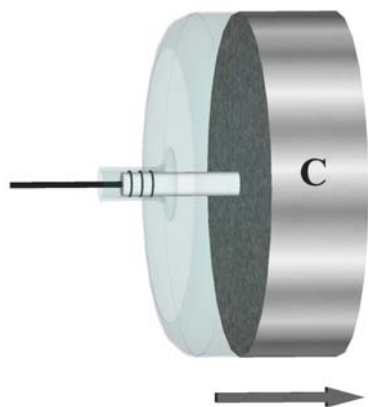
Det uppnådda fuktillståndet kontrollerades genom att skära bort förseglingen på den basyta som hade torkat. Omedelbart därefter fixerades en glaskupa med vaisalasektor på samma yta med en aluminiumtejprensa längs cylinderns mantelyta. Därefter skars förseglingen bort från motstående basyta som varit förseglad fram till nu. Utan fördröjning monterades en ny glaskupa med vaisalasektor på den basytan med en aluminiumtejprensa, se figur 31.



Figur 31. Provkropp med två glaskupor fixerade på basytorna. En vaisalasektor är fixerad med tre o-ringar i vardera glaskupa.

Denna procedur innebär att provkroppen tillåts torka ut i ungefär 30 sekunder från det att förseglingen bryts och glaskupa är färdigmonterad. Den uttorkningen har bedömts störa försöket i begränsad omfattning. Störningen bedöms vara högre vid en stor skillnad mellan rummets RF och provkroppens RF. Störningen bedöms också vara högre för provkroppar med högt vct jämfört med lågt vct.

Direkt därpå vägdes provkroppen med mätutrustningen för att kvantifiera ett eventuellt läckage. RF på båda sidor bestämdes ett flertal gånger till det att båda sidor visade ungefär samma. Vid mätning av RF i glaskupan är det mycket viktigt att inte beröra glaskupan eller sensorn med handen utan att bara ta i sladden. Glaskupan kan värmas upp av handen vilket kan påverka RF i glaskupan med flera %-enheter RF. Om RF på båda sidor befanns vara inom cirka 1 % RF monterades den sist monterade glaskupan bort. I och med detta förfarande vändes fukttransportriktningen, se figur 32.



Figur 32. Provkropp med en basyta öppen och en förseglad med en glaskupa och vaisaläsensorn.

Etapp C, fortsatte fram till utvärderingen av jonprofilen i respektive provkropp.

4.2.3 Resultat

Resultatet av fuktkonditioneringen som genomförts finns i tabell 6. Cementbruk H, som användes i undersökningen torkade genom självuttorkning ner till cirka 92 % RF. Det innebär att jontransporten utvärderades vid fukttillstånd under den nivån. Cementbruk L, torkade genom självuttorkning ner till 81.5 % RF. Jontransporten under 81.5 % RF påverkas inte av samtidig självuttorkning. För cementbruk L är därför fukttillstånden i försök vid 90 % RF samt 87 % RF inte stabila under etapp C.

Tabell 6. Fuktnivå för respektive material, *instabilt fukttillstånd

RF-nivå [% RF]	H	L
92 %	X	
90 %		X*
87 %	X	X*
85 %	X	
83 %	X	
81.5 %	X	X
78 %	X	X
76 %	X	X
74 %	X	X

4.2.4 Diskussion

Genom att använda den här konditioneringsmetoden är det möjligt att generera flera olika väldefinierade fukttillstånd provkroppar av varierande vct. Vct påverkar dock fukttillståndet i betydande grad. Ett högt vct innebär att det går att generera ett högt fukttillstånd.

Självuttorkningseffekten innebär att L provkropparna sänktes till cirka 82 % RF, medan fuktigheten i H endast sänktes till 92 % RF. Dessutom har vct påverkan på hur lång tid det tar att uppnå ett visst givet fukttillstånd. Det går att öka fukttillståndet genom att härda bruket i vatten. Förändringen av fukttillståndet genom att härda bruket i vatten avtar dock med lägre vct.

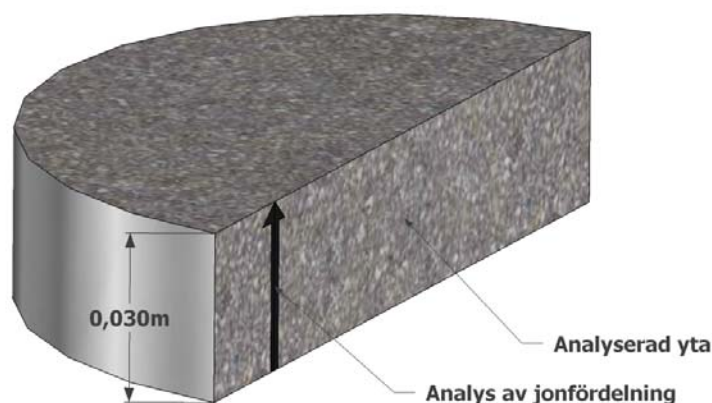
Bestämningen av RF skedde genom att fästa glaskupor med vaisaläsensorn/gummikork med aluminiumtejp. Det innebär att sensorn exponerades mot en stor betongyta vilket är gynnsamt

ur ett tidsmässigt perspektiv. Mängden fukt som kan avges ökar proportionellt med ytan. Mätmetoden visade sig vara känslig mot temperaturstörningar. Detta innebär att endast sensorsladden vidrördes för att undvika att glaskupan värmdes, innan slutavläsning av RF.

4.3 Bestämning av jonfördelning

Fördelningen av ett antal joner har analyserats med tre olika metoder. Samtliga undersökta provkroppar har torkat enkelsidigt. Detta innebär att fukttransporten endast har gått i en riktning.

Innan analys har provkroppen delats i två lika delar vinkelrät mot de plana ytorna med slägghammare och en bila tillverkad av hårdmetall se figur 33.



Figur 33. Halverad provkropp med pil som visar i vilken riktning jonfördelning är analyserad.

Det innebär att analyserna har utförts på en brottyta som är vinkelrät mot den plana ytan. Brottytan bör vara så jämn som möjligt. Provstorleken är cirka 30 mm lång, 20 mm bred och 10-15 mm hög. Beroende på analysmetod har provkroppar sedan sönderdelats ytterligare för att få plats i analysutrustning.

4.3.1 Material

Samtliga provkroppar som har analyserats har tillverkats av samma material och fuktconditionerats med samma metod som har beskrivits i avsnitt 4.2.1 och 4.2.2. För tillverkningsrecept se tabell 7.

Tabell 7. Recept för tillverkning av cementbrukscylindrar

Material [kg/m ³]	L	H
Cement SH, CEM I 52.5 R	702	333
Vatten	281	217
CEN-Standardsand EN 196-1 0-2 mm	1199	1602

4.3.2 Metod

Två prover har analyserats med hjälp av svepelektronmikroskop (SEM) utrustat med energidispersiv röntgenspektroskop (EDS) eller SEM-EDAX. Med den metoden kan den kemiska sammansättningen hos provet bestämmas. SEM-EDAX-analysen omfattar grundämnen från och med atomnummer 11, dvs natrium eller tyngre. Analysen har tidigare använts för betong och resultatet finns i en rapport av Hedenblad och Nilsson, (1987). Resultaten från EDS-analyserna är omräknade till oxider och normaliserade till 100 vikts-%.

Kvantifiering av halterna från EDS-spektra gjordes med användning av SEC-faktorer som kalibrerades mot ett standardpreparat gjort av Portlandcement. Uppskattade mätosäkerheter: oxidhalter kring 0,2 vikts-% är 50 % av mätvärdet, oxidhalter kring 5 vikts-% är 10 % av mätvärdet, oxidhalter > 20 vikts-% är 5 % av mätvärdet. Det betyder att en låg halt av ett ämne är förenad med en hög mätosäkerhet.

I ett prov har den kemiska sammansättningen analyserats med en metod vars namn förkortas LA-ICP-MS. LA-ICP-MS står för Laser Ablation - Inductively Coupled Plasma - Mass Spectroscopy. Analysen går till så att instrumentet eroderar bort material från brottytan med en tunn laserstråle, 100 µm i diameter. Laserstrålen förs sakta över materialytan, med en hastighet av 100 µm/s. Materialet som eroderas bort samlas in under en tidsperiod av 1.06 sekunder per datapunkt och förbränns i en plasmabrännare. Det betyder att varje punkt motsvaras av material insamlat från en sträcka av 0.106 mm. En plasmabrännare hettar upp materialet och generera joner som sedan separeras och detekteras i en masspektrometer som är väldigt känslig.

Resultatet från analysen ges i koncentration för respektive grundämne. Dessa data kommer från punkter som innehåller ren sand (kisel-dioxid), ren cementpasta och en blandning av dessa båda. Genom att vikta koncentrationen av kalcium och kisel mot varandra erhålls de punkter som motsvarar ren cementpasta. Cementpasta innehåller mellan 58 och 64 vikt-% CaO och mellan 18 och 23 vikt-% SiO₂. Genom att i varje datapunkt jämföra viktandelen kalcium mot kisel är det möjligt att hitta datapunkter som motsvarar ren cementpasta.

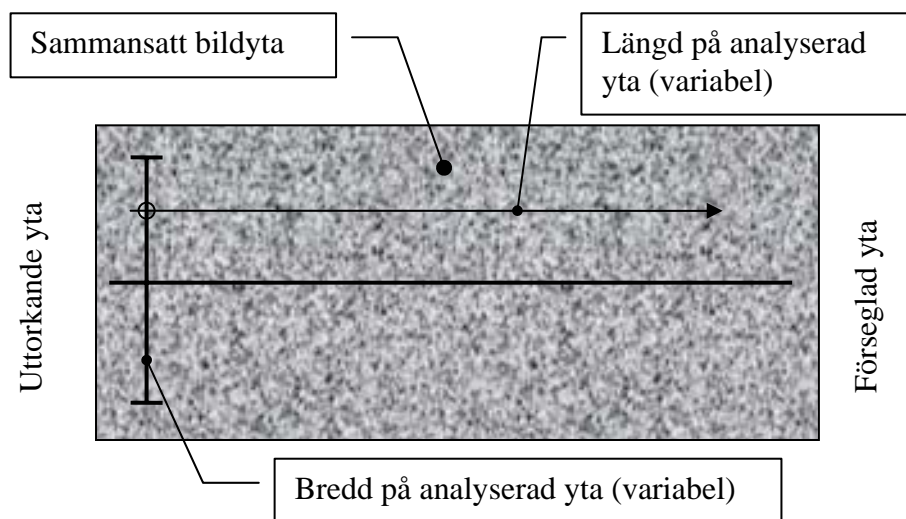
Detta innebär att viktförhållandet, m_{ratio} , kan beräknas med ekvation (4):

$$m_{ratio} = \frac{\frac{M_{Ca}}{M_{CaO}} \cdot m_{CaO}}{\frac{M_{Si}}{M_{SiO_2}} \cdot m_{SiO_2}} \Rightarrow \frac{40.078}{56.077} \cdot m_{CaO} \quad (4)$$

$$\frac{28.086}{60.084} \cdot m_{SiO_2}$$

där M_{Ca} representerar molvikten för kalcium, M_{CaO} , representerar molvikten för kalciumoxid, m_{Ca} , representerar viktandelen kalcium, M_{Si} , representerar molvikten för kisel, M_{SiO_2} , representerar molvikten för kisel-dioxid och m_{SiO_2} , viktandelen kisel. Viktförhållandet mellan kalcium och kisel i cementpasta ska därför ligga mellan 3.86 och 5.44.

Slutligen har ytterligare ett prov analyserats med en SEM-EDAX där analysen utfördes som en linescan, se figur 34. Det innebär att provet placeras i ett svepelektronmikroskop som analyserar provytan och visar utvalda grundämnen på olika bilder. Genom att använda linescan visas variationen/fördelningen av respektive grundämne i ett diagram utefter en linje som markeras på den sammansatta bilden. Bredden på linjen kan ställas in så att i princip hela den analyserade ytan analyseras. Rådata från linescan har analyserats på samma sätt som för LA-ICP-MS-analysen genom att kontrollera viktförhållandet Ca/Si enligt ekvation (4).



Figur 34. Skiss på hur SEM-EDAX bilder har analyserats med linescan.

4.3.3 Resultat från tre analysmetoder

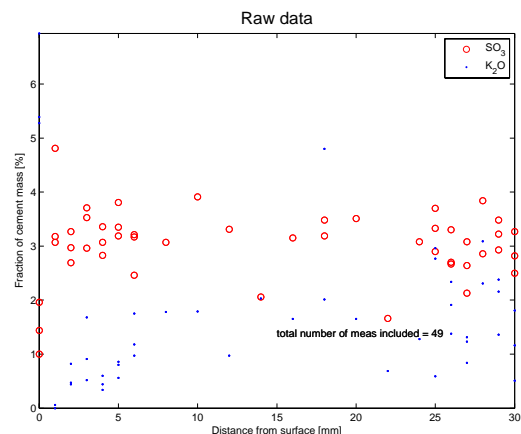
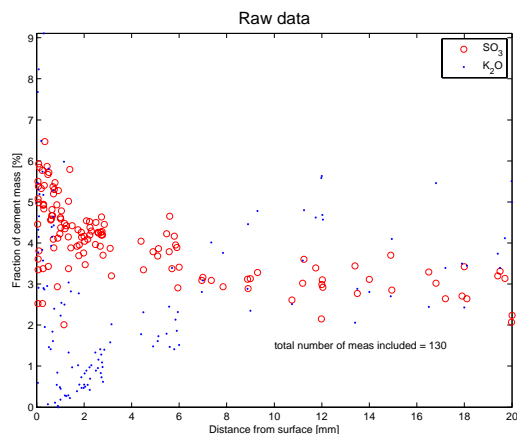
Resultatet från analyserna presenteras i följande tre avsnitt. Samtliga resultat kommer från provkroppar av cementbruk med vct 0.65, H. Dessa har utsatts för enkelsidig uttorkning i en riktning, etapp A. Två dygn efter gjuttillfället startades uttorkningen vilket innebär att relativa fuktigheten vid torkstart var över 95 % RF.

4.3.3.1 SEM-EDAX-analys

Jonprofilen för kalium (potassium ion) och sulfat (sulphate ion) har analyserats för två provkroppar och visas i figur 35. På y-axeln visas viktförhållandet mellan sulfat- respektive kaliumjoninnehåll och cementinnehåll i vikts-% för varje punkt. X-axeln representerar avståndet från uttorkande yta, där 0 innebär uttorkande yta och 15 innebär en punkt 15 mm in i provkroppen från den uttorkande ytan. Diagrammet till vänster i samtliga figurer nedan representerar 20 mm av total tjocklek för provkropp 1, diagrammet till höger representerar hela provkroppens tjocklek, 30 mm för provkropp 2.

I figur 35 visas rådata för båda provkropparna, det vill säga alla kvantifierade punkter. Dessa punkter kan representera cementpasta, en ballastpartikel eller i ett gränsområde mellan dessa. Figur 35 till vänster visar att koncentrationen av sulfatjoner ökar med ett minskat avstånd till den torkande ytan. Koncentrationen från 6-20 mm är cirka 3 vikt-% av cementvikten och spridningen är relativt låg. Sulfatjonkoncentrationen i det yttersta skiktet från 0-6 mm är ungefär 5 vikt-% till 3 vikt-%, men spridningen är högre. Kaliumjonkoncentrationen i skiktet 0-1 mm är hög, cirka 5 vikt-%, men spridningen är samtidigt stor. Koncentrationen i skiktet 1-6 mm är lägre cirka 2 vikt-% och spridningen är samtidigt mindre. Längre in i provkroppen är koncentrationen ungefär lika hög som i ytskiktet men spridningen är större. Totalt analyserades 130 mätpunkter fördelade på 20 mm med högre punkttäthet i ytskiktet.

Figur 35 till höger visar att sulfatjonkoncentrationen är jämnhögt över hela tjockleken och är cirka 3 vikt-% av cementvikten. Spridningen är relativt jämn över hela profilen. Kaliumjonkoncentrationen visar på två toppvärden i ytskiktet cirka 6 vikt-%. Längre in i provkroppen sjunker koncentrationen till cirka 2 vikt-%. Antalet analyserade mätpunkter är 49 stycken och dessa har fördelats jämnt på hela provkroppens tjocklek.

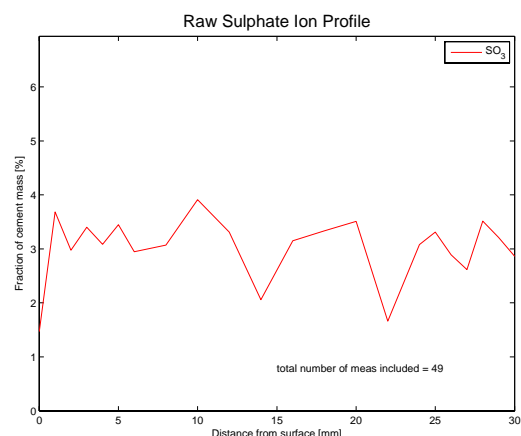
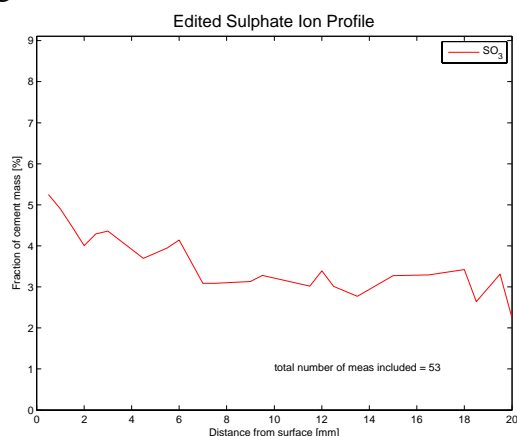


Figur 35. Diagrammen visar rådata från samtliga analyserade mätpunkter för två olika provkroppar, provkropp 1 till vänster och provkropp 2 till höger.

Figur 36 visar ett diagram för sulfatjonfördelningen i respektive provkropp. Den kemiska sammansättningen i varje punkt har analyserats för att endast redovisa de punkter där förhållandet mellan kalcium (Ca) och kisel (Si) har varit tillfredsställande. Kalciumhalten i dessa punkter är mellan 58 och 64 vikt-% samtidigt som kiselhalten är mellan 18 och 23 vikt-%. Dessa punkter har indelats i grupper à 0.5 mm, där första gruppen motsvarar punkter inom intervallet 0-0.5 mm avstånd från ytan. Fördelningen av joner visas som medelvärdet av sulfatjonhalten för respektive grupp.

Vänster diagram i figur 36 visar att sulfatjonkoncentrationen ökar från 20 mm in i provkroppen fram till den uttorkande ytan. Koncentrationen stiger från knappa 3 vikt-% upp till drygt 5 vikt-%. Här redovisas enbart mätresultat från punkter som bedöms vara cementpasta.

Höger diagram i figur 36 visar att sulfatjonkoncentrationen är relativt jämn genom hela provkroppens tjocklek, cirka 3 vikt-%. Här bör noteras att samtliga mätpunkter är redovisade och att alla dessa inte kan sägas representera cementpasta vilket kan påverka utseendet på diagrammet.

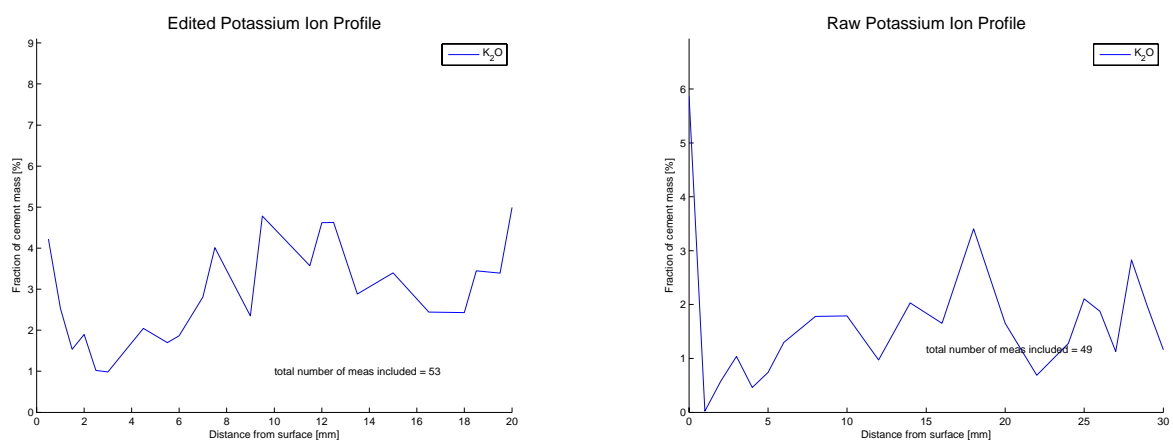


Figur 36. Sulfatjonfördelning för två provkroppar, provkropp 1 till vänster provkropp 2 till höger. I det vänstra diagrammet visas endast de punkter som motsvaras av cementpasta, i det högra är samtliga punkter inkluderade.

Figur 37 visar ett diagram för kaliumjonfördelningen i respektive provkropp. Den kemiska sammansättningen i varje punkt har analyserats på samma sätt som för sulfatjonkoncentrationen. Resultatet redovisas som en kurva.

I figur 37 till vänster ses att kaliumkoncentrationen är högre vid ytskiktet än cirka 3 mm in i provkroppen. Skillnaden är ungefär 3 vikt-%-enheter mellan dessa båda positioner. 10 mm in från den torkande ytan är koncentrationen lika hög som för ytan men varierar förhållandevis mycket från mätpunkt till mätpunkt.

Höger diagram i figur 37 visar att ytan har en väldigt hög kaliumjonkoncentration, 6 vikt-%, men lite längre in är den lägre, 1 vikt-%. Från 5-30 mm är koncentrationen ungefär 2 vikt-% med relativt stor variation mellan närliggande mätpunkter. Notera att i detta fall har samtliga mätpunkter inkluderats i diagrammet, det vill säga även punkter som sannolikt inte motsvaras av cementpasta.



Figur 37. Kaliumjonfördelningen för två provkroppar, provkropp 1 till vänster provkropp 2 till höger. I det vänstra diagrammet visas endast de punkter som motsvaras av cementpasta, i det högra är samtliga punkter inkluderade.

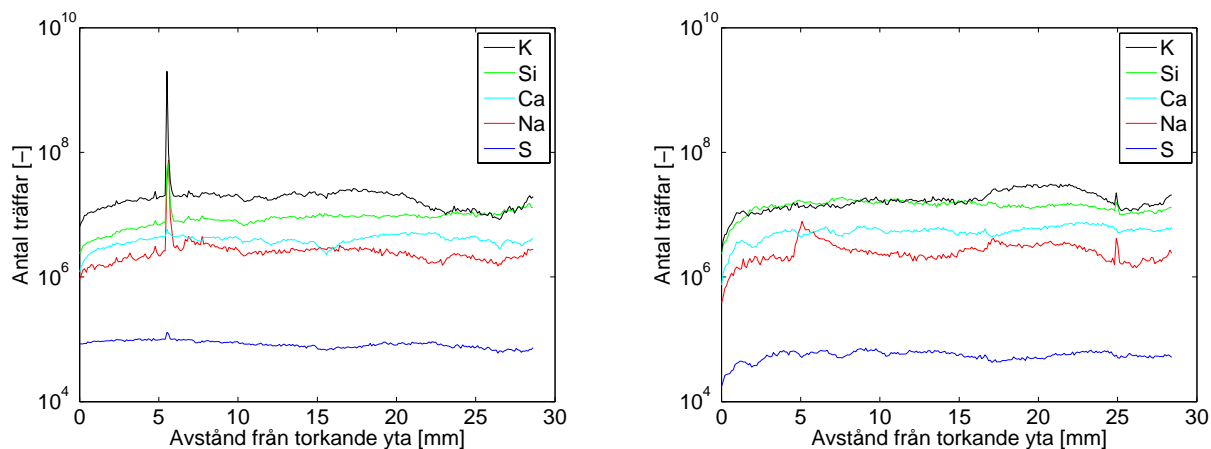
4.3.3.2 LA-ICP-MS analys

Jonprofilen i en provkropp har analyserats utefter två linjer med LA-ICP-MS. Analysen har utförts med avseenden på grundämnena kalium (K), kisel (Si), kalcium (Ca), natrium (Na) och sulfat (S). X-axeln representerar avståndet från uttorkande yta, där 0 innebär uttorkande yta och 15 innebär en punkt 15 mm in i provkroppen från den uttorkande ytan. På y-axeln visas antal träffar för varje grundämne i varje punkt, skalan är logaritmisk i figur 38 och 39 och linjär i figur 40. Redovisade resultat visar endast på ett kvalitativt sätt skillnader i koncentration och är inte relaterade till andel av cementvikt.

I figur 38 visas rådata som visar alla kvantifierade punkter längs en linje som löper längs hela tjockleken på provkroppen. Resultaten visar inte om laserstrålen har träffat en ballastpartikel eller cementpasta.

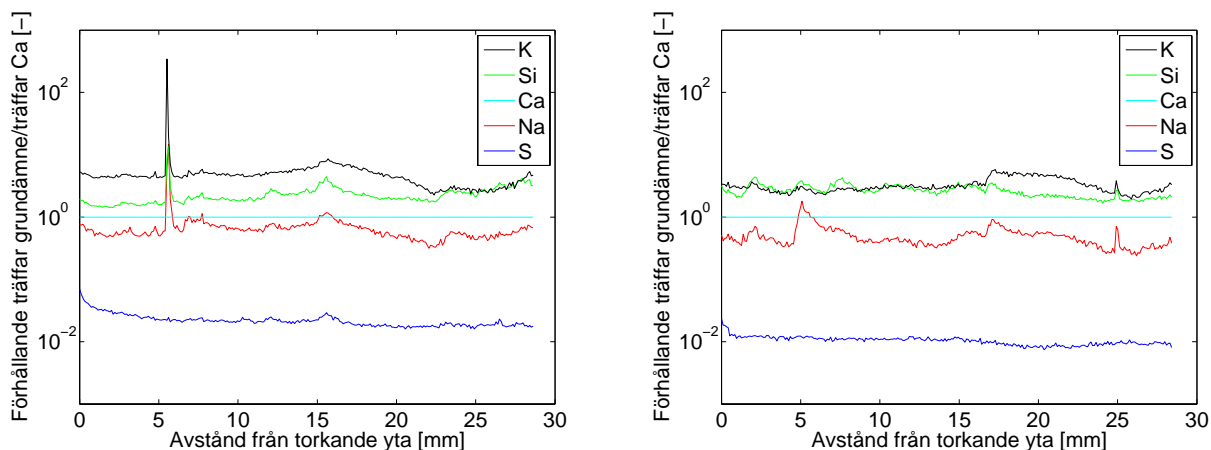
De två diagrammen i figur 38 visar på skillnader i fördelning av grundämnena. I det vänstra diagrammet ser vi att kalium har ett betydligt högre antal träffar mellan 0 och 20 mm än resterande grundämnena. Antalet träffar för kalcium motsvarar cirka en tiondel av antalet träffar för kalium. Antalet träffar för kisel är också högre än för kalcium. Antalet träffar för svavel är lågt rakt igenom provkroppen. Det högra diagrammet visar att kalium och kisel har

ungefär samma antal träffar längs hela provets tjocklek. Även längs denna analyserade linje är antalet kalciumträffar lägre än för kisel.



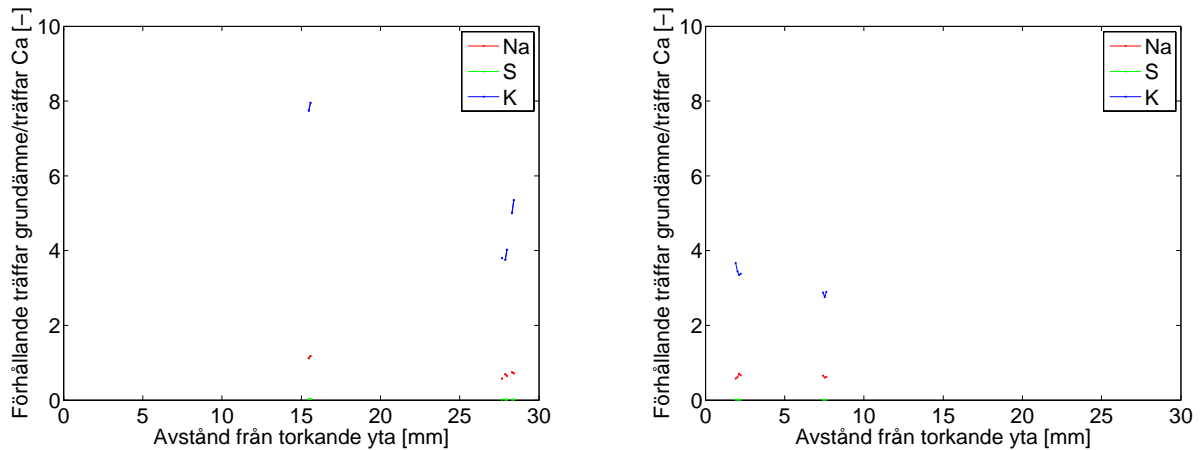
Figur 38. Fördelning av grundämnen för en provkropp analyserad längs efter två linjer orienterade vinkelrät från uttorkande yta.

Figur 39 redovisar fördelningen av grundämnen i förhållande till kalciumhalten genom provkroppen utvärderad för två linjer vinkelrät mot basytan. Vänster diagram i figur 39, visar en linje och höger diagram en linje parallellt med den första i en annan del av provkroppen.



Figur 39. Fördelning av antal träffar per respektive grundämne i förhållande till antal kalciumträffar för motsvarande mätpunkt.

Figur 40 visar de datapunkter för natrium (röd linje), svavel (grön linje) och kalium (blå linje) där förhållandet mellan kalcium och kisel är mellan 3.86 och 5.44. Dessa punkter antas motsvara träffar i ren cementpasta. Det är endast ett fåtal datapunkter där förhållandet motsvarar dessa kriterier. I diagrammet till vänster redovisas resultatet från den första linjen och till höger resultatet för den andra linjen.

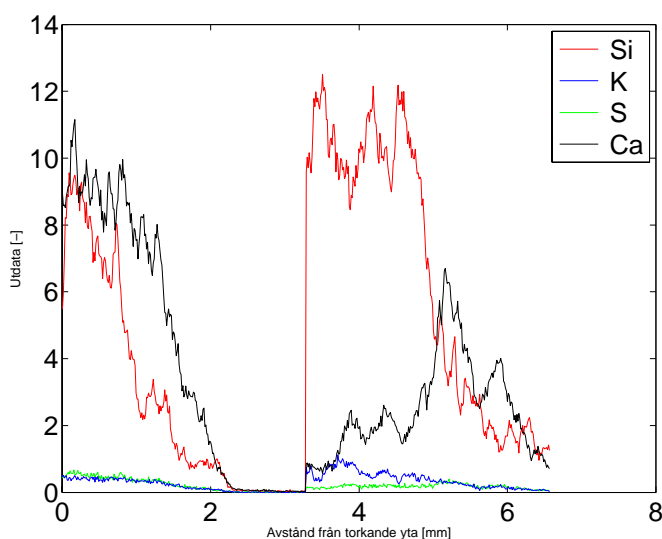


Figur 40. Fördelning av Natrium-, Svavel- och Kaliumjoner där förhållandet mellan kalcium och kisel är mellan 3.86 och 5.44.

4.3.3.3 SEM-EDAX Linescan-analys

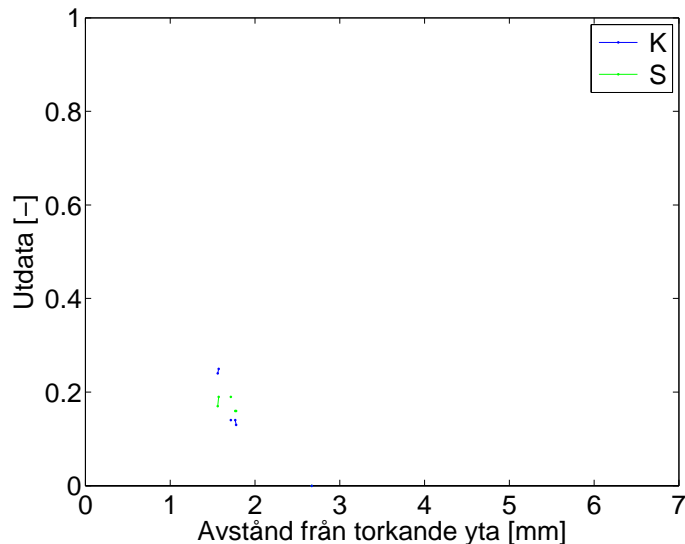
Jonprofilen för kalium (K), kisel (Si), kalcium (Ca) och Sulfat (S) visas för en analyserad provkropp. Provkroppen har analyserats utefter en linje med en SEM-EDAX Linescan-analys. Resultatet presenteras i figur 41 och 42 där y-axeln representerar utdata för varje grundämne i varje punkt. Dessa utdata motsvarar en procentuell mängdfördelning i varje analyserad punkt utefter en angiven bildbredd, se figur 34, och är inte relaterade till andel av cementvikt. Det betyder att punkter som ligger precis bredvid varandra i princip inte är jämförbara med varandra. X-axeln representerar avståndet från uttorkande yta, där 0 innebär uttorkande yta och 6 innebär en punkt 6 mm in i provkroppen från den uttorkande ytan. Diagrammen i figur 41 och 42 består av rådata från två bilder som tagits med SEM-EDAX. Resultatet från dessa två bilder har sedan analyserats med funktionen Linescan och fogats samman till ett diagram.

Figur 41 visar rådata från analysen för grundämnena kisel, kalium svavel och kalcium. Utdata för samtliga analyserade grundämnen är vid ytan hög och sjunker ner mot cirka 3.5 mm. Från 3.5 mm och inåt är andelen kisel och kalium först hög och sjunker sedan från 5 mm till 6.5 mm. Kalcium och svavel stiger från 3.5 mm till ungefär 5 mm från uttorkande yta för att sedan sjunka från 5 mm till 6.5 mm från ytan.



Figur 41. Grundämnen för analyserad yta, från 0-6.5 mm in torkande yta.

Figur 42 visar de datapunkter för kalium (blå linje) och svavel (grön linje) där förhållandet i utdata mellan kalcium och kisel är mellan 3.86 och 5.44. Det innebär att utdata har tolkats som viktförhållande mellan grundämnen i en viss punkt. Dessa punkter har antagits motsvara träffar i ren cementpasta. Det är endast ett fåtal datapunkter där förhållandet motsvarar dessa kriterier.



Figur 42. Fördelning av grundämnena, kalium och svavel där förhållandet mellan kalcium och kisel är mellan 3.86 och 5.44.

4.3.4 Diskussion

Tre olika metoder att analysera jonfördelningen i provkroppar av cementbruk som torkat enkelsidigt har utvärderats. Samtliga metoder har analyserat jonfördelningen utifrån en brottyta av provkroppen.

Jonfördelningen för sulfat och kaliumjoner har bestämts med SEM-EDAX i två olika provkroppar som har konditionerats på samma sätt. Resultatet i varje punkt är viktat mot cementvikten. Det innebär att resultatet från flera mätningar blir jämförbara mot varandra.

Sulfatjonkoncentrationen stiger mot den uttorkande ytan i provkropp 1, se figur 36 vänster bild. Koncentrationen ökar gradvis och når sitt maximum vid den uttorkande ytan. Den höga koncentrationen i ytan kan tolkas som att joner har flyttats från centrala delar av provkroppen till den ytliga. Koncentrationen av sulfatjoner i provkropp 2 är i princip konstant oavsett avstånd från den uttorkande ytan, se figur 36 höger bild. Spridningen är stor mellan intilliggande punkter vilket sannolikt beror på att endast ett fåtal av analyserade punkter består av cementpasta. Den uppmätta sulfathalten är cirka 3 vikt-% i båda provkropparna vilket stämmer väl överens med sulfathalten i SH-cement som är ungefär 3.4 - 4 vikt-% av cementet.

Kaliumjonkoncentrationen är hög i ytskiktet jämfört med ett område från cirka 2-10 mm in i respektive provkropp, se figur 37. Det kan vara så att joner har flyttats från området 2-10 mm från ytan och ut till ytskiktet. Halterna av kalium är högre än förväntat både i provkropp 1 och 2. Den uppmätta koncentrationen är i huvuddelen av båda provkropparna >1.3 vikt-% vilket är högre än kaliumhalten i SH-cement som är cirka 1.3 vikt-%.

Många punkter som inte motsvarar cementpasta har analyserats. Endast 40 % (53 av 130 st) av de analyserade punkterna i provkropp 1 motsvarade cementpasta. I provkropp 2 motsvarade endast 22 % (11 av 49 st) av de analyserade punkterna cementpasta. Den låga träffsäkerheten innebär att många punkter måste analyseras för att få tillräckligt underlag för att analysera förändringar av jonfördelningen.

Resultatet från SEM-EDAX analysen visar att det krävs en stor mängd datapunkter för att generera ett tillräckligt bra underlag för att generera en trovärdig jonprofil. Ju fler punkter som analyseras desto tillförlitligare blir jonfördelningen. De låga koncentrationerna av svavel och kalium innebär att mätosäkerheten är stor för varje enskild datapunkt. Den mätosäkerheten går inte att förbättra med ett ökat antal mätpunkter. Däremot är det möjligt att minska osäkerheten för utvärderingen av jonfördelningen genom att utvärdera flera mätpunkter. Eftersom de analyserade punkterna väljs ut manuellt är kostnadsökningen proportionell mot antalet mätpunkter.

Jonfördelningen i provkropparna kan också bero på någon okänd faktor. Eftersom det inte finns någon referens att jämföra med är det svårt att avgöra om joner verkligen har rört på sig eller om de fanns där från början innan uttorkningen påbörjades.

Två LA-ICP-MS-analyser har genomförts för att bestämma jonfördelningen i en provkropp. Vid omvandling från antal träffar, rådata, till datapunkter med ett specifikt förhållande mellan kalcium och kisel (3.86 - 5.44) förloras huvuddelen av rådata. Utvärderingen av jonfördelningen blir därför mycket osäker.

Antalet träffar av sulfat i förhållande till kalcium för linje 1 bestämdes till cirka 2.8 % och 2.0 % på 16 mm respektive 28 mm avstånd från ytan. För den andra linjen bestäms förhållandet till 1.2 % respektive 1 % på 2 mm respektive 8 mm avstånd från uttorkande yta. Båda dessa ligger i underkant på vad som kan förväntas jämfört med halten sulfater i SH-cement, som är 3.3 - 4.0 vikt-%.

Antalet kaliumträffar i förhållande till kalciumträffar är för linje 1 cirka 800 % respektive 500 % på 16 mm respektive 28 mm avstånd från ytan. För linje två är antalet kaliumträffar cirka 400 % och 300 % högre än antalet kalciumträffar på 2 mm respektive 8 mm avstånd från uttorkande yta. Det är inte rimligt att anta att andelen kalium i cementpasta med SH-cement generellt sett är så stor. Det kan vara tecken på att en anhopning av kalium har påträffats.

Undersökningen med LA-ICP-MS-analys och den använda metoden ger inte stöd för att uttala sig om jonfördelningen för den undersökta provkroppen. Antalet punkter där förhållandet mellan kalcium och kisel stämmer överens med cementpasta är för få. Det innebär att det inte går att jämföra två olika jonprofiler mot varandra.

En SEM-EDAX-linescan-analys har genomförts på en provkropp. Rådata i form av ett mängdförhållande mellan de ingående grundämnena har analyserats från 0 till 6.5 mm djup från den uttorkande ytan på en bredd av cirka 2 mm. Resultatet i form av utdata är ett slags medelvärde för de grundämnen som analyserats utefter hela den undersökta bredden på bilden. Ur rådata separerades de punkter som har ett förhållande i utdata mellan kalcium och kisel som är mellan 3.86 och 5.44. Endast ett fåtal punkter uppfyllde det kriteriet.

Förhållandet i utdata mellan kalium och kalcium var cirka 0.22 vilket innebär 22 % på avståndet 2 mm från ytan. Mellan sulfater och kalcium var förhållandet i utdata cirka 0.20

vilket innebär 22 %. Det är inte rimligt att anta att varken andelen kalium eller sulfater i cementpasta med SH-cement är så stora generellt sett. Det kan vara tecken på att en anhopning av kalium/sulfater har detekterats utefter den undersökta linjen. Jonprofilen för kalium och sulfat är inte möjlig att bedöma med de få mätpunkter som separerades ut.

4.4 Slutsatser

Undersökningen visar att den bästa metoden att bestämma jonfördelningen är med SEM-EDAX. Den metoden är dock den mest arbetskrävande och innebär en stor del manuellt arbete. SEM-EDAX är beroende av operatören som utför analysen vilket innebär att den är svår att utföra på ett neutralt och objektivt sätt. Det är problematiskt ur ett forskningsetiskt perspektiv.

Det har inte varit möjligt att bestämma jonprofilen genom att använda metoden med LA-ICP-MS-analys. Med den använda metoden för att hitta representativa mätpunkter blir resultatet inte tillräckligt bra. Undersökningen har visat att det inte går att jämföra resultatet för två olika linjer och hittat signifikanta skillnader eller likheter. Det blir stora luckor i den undersökta jonprofilen.

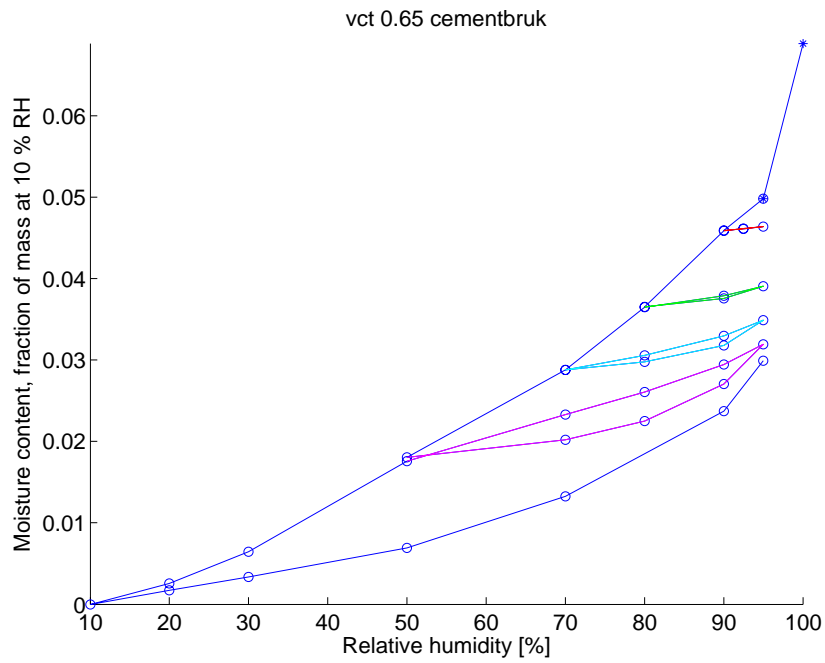
Metoden att använda funktionen linescan i SEM-EDAX visade sig inte fungera tillfredsställande. Den största svagheten är att utdata inte går att omarbota till jonkoncentration i förhållande till cementvikten. Resultatet blir ett slags medelvärde av viktandelen för respektive grundämne över hela ytan vilket innebär ett problem när representativa punkter ska väljas ut. Med den här metoden blir det också stora luckor i den undersökta jonprofilen.

4.5 Karakterisering av material

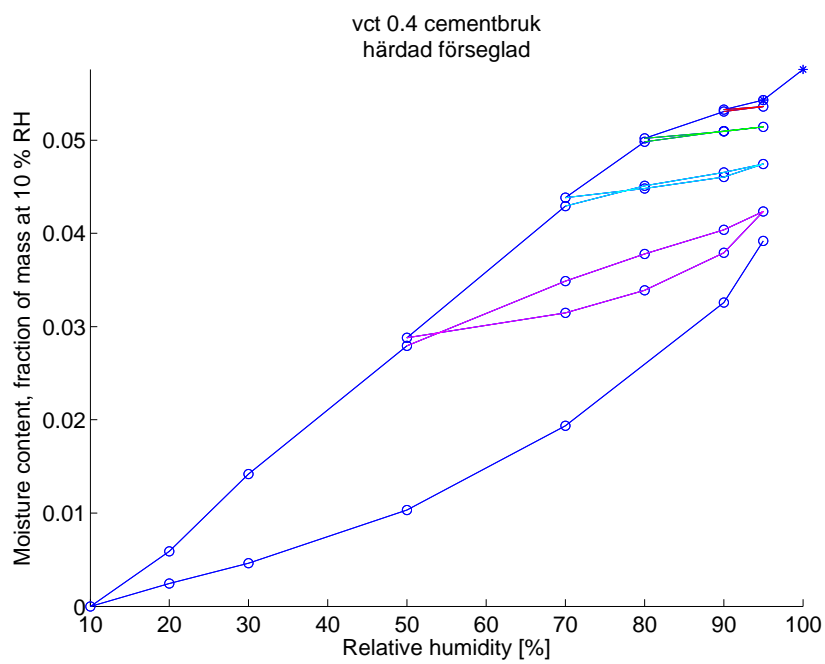
Jämviktsfuktkurvor och skanningkurvor har bestämts för cementbruk H och L i en sorptionsvåg. Samtliga bestämda skanningkurvor börjar från uttorkningskruvan, desorptionsisotermen, för att sedan ansluta till startpunkten på desorptionsisotermen. Skanning startar vid nivåer 90, 80, 70, och 50 % RF. För cementbruk L analyserades dels en provkropp från en vattenhärdad L-cylinder och dels en provkropp från en L-cylinder som härdat förseglad.

En detaljerad beskrivning på hur sorptionsvågen fungerar och metoden för att ta fram sorptionskurvor för cementbaserade material finns i Johannesson och Janz (2002), Åhs (2005; 2007; 2008) och Anderberg och Wadsö (2004).

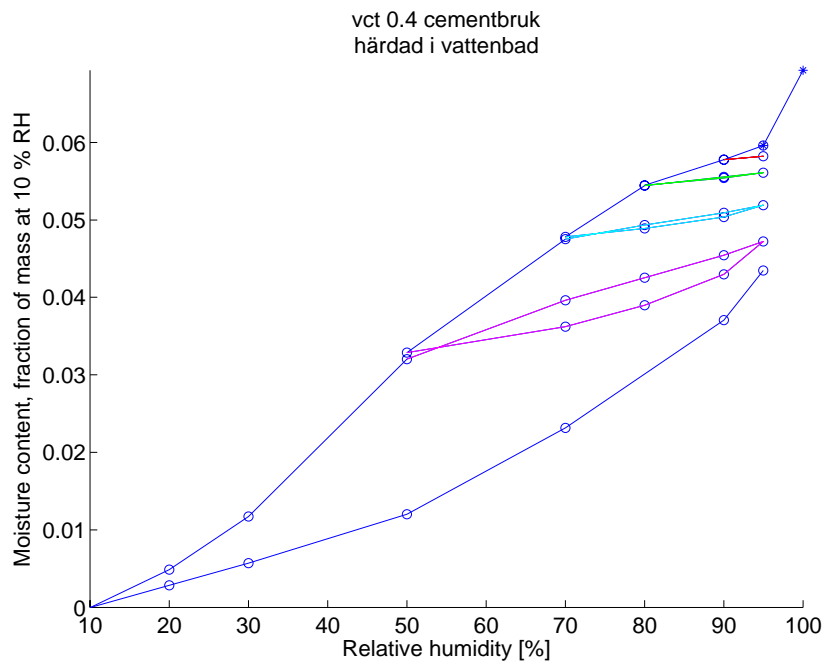
I figur 43 till figur 45 representerar y-axeln fuktkvot i kg/(kg vid 10 % RF) och x-axeln representerar relativ fuktighet i % RF.



Figur 43. Sorptionsisoterm och skanningkurvor för cementbruk vct 0.65.



Figur 44. Sorptionsisoterm och skanningkurvor för cementbruk vct 0.4 som härdat förseglad.



Figur 45. Sorptionsisoterm och skanningkurvor för cementbruk vct 0.4 som härdad i vattenbad.

4.6 Fortsättning

Ytterligare analyser av jontransport på provkroppar pågår vid EMPA i Zürich. Jonfördelningen ska bestämmas med NMR som tidigare har använts för cementbruk i Nguyen et al. (2008). Beroende på utfallet kommer större analysserier att genomföras.

5 Referenser

- Anderberg A. and L. Wadsö (2004). "Moisture in self-levelling flooring compounds. Part II. Sorption isotherms." Nordic concrete research 32(2): 16-30.
- Anderberg A. and L. Wadsö (2007). "Degradation of floor adhesives as a function of pH." Polymer Degradation and Stability 93: 329-334.
- Björk F., C. A. Eriksson, S. Karlsson and F. Khabbaz (2003). "Degradation of components in flooring systems in humid and alkaline environments." Construction and Building Materials 17(3): 213-221.
- Climent M. A., G. de Vera, J. López, C. García and C. Andrade (2000). Transport of chlorides through non-saturated concrete after an initial limited chloride supply. 2nd International RILEM Workshop on testing and Modelling the Chloride Ingress into Concrete. Paris, France.
- Francy O. (1998). Modélisation de la pénétration des ions chlorures dans les mortier partiellement saturés en eau. LMDC. Toulouse, Université Paul Abatier. **These du doctorat**.
- Hedenblad G. and L.-O. Nilsson. (1987). Kritiska fuktillstånd för några byggnadsmaterial- Preliminär undersökning (in Swedish). TVBM-3028. Avd Byggnadsmaterial.
- Johannesson B. and M. Janz (2002). "Test of four different experimental methods to determine sorption isotherms." Journal of Materials in Civil Engineering 14(6): 471-477.
- Nguyen T. Q., J. Petkovic, P. Dangla and V. Baroghel-Bouny (2008). "Modelling of coupled ion and moisture transport in porous building materials." Construction and building materials 22(11): 2185-2195.
- Nilsson L.-O. (1984). Fuktkriterier för byggnadsmaterial. Fuktgruppen informerar 1/1984. Fuktgruppen, LTH.
- Nilsson L.-O. (2006). Fuktpåverkan på material - Kritiska fuktnivåer. Fuktsäkerhet i byggnader. SBUF.
- Nilsson L.-O. and J. Aavik. (1993). Uttorkning av byggfukt i vakuumbehandlat betonggolv på mark med underliggande värmeisolering av cellplast. Del C: Uttorkning av byggfukt. Verifiering i laboratorium. Del D: Uttorkning av byggfukt. Fältnätning. P-93:13.
- Powers T. C. (1947). A discussion of cement hydration in relation to the curing of concrete. Proceedings 27, Washington, D.C., Highway Research Board.
- Sjöberg A. (2001). Secondary emissions from concrete floors with bonded flooring materials - effects of alkaline hydrolysis and stored decomposition products. Department of building materials. Gothenburg, Chalmers University of Technology. **Doctoral Dissertation**.
- Sjöberg A. and L.-O. Nilsson. (2008). Fuktmätning i betonggolv med golvvärme. Etapp II: Täta golvbeläggningar. TVBM-3140. Avd Byggnadsmaterial, LTH.
- Wengholt-Johnsson H. (1995). Kemisk emission från betong och avjämningsmassor. P-95:6. Institutionen för byggnadsmaterial, Chalmers tekniska högskola.
- Wilke O., O. Jann and D. Brodner (2004). "VOC- and SVOC-emissions from adhesives, floor coverings and complete floor structures." Indoor Air 14(s8): 98-107.
- Xu Z. and R. D. Hooton (1993). "Migration of alkali ions in mortar due to several mechanisms." Cement and Concrete Research 23(4): 951-961.
- Åhs M. (2007). Moisture Redistribution in Screeded Concrete Slabs. Div. of Building Materials Lund, Lund University, Lund Institute of Technology. **Licentiate in Engineering**: 54.

- Åhs M. (2008). A quantitative model of moisture redistribution in dual layer concrete slabs with regards to hysteresis. Proceedings of the 8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, Copenhagen, Dept. of Civil engineering, Technical University of Denmark.
- Åhs M. (2008). "Sorption scanning curves for hardened cementitious materials." Construction and building materials 22(11): 2228-2234.
- Åhs M., A. Sjöberg and A. Anderberg (2005). A method for study sorption phenomena. Proceedings of the 10:th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Beijing, China.