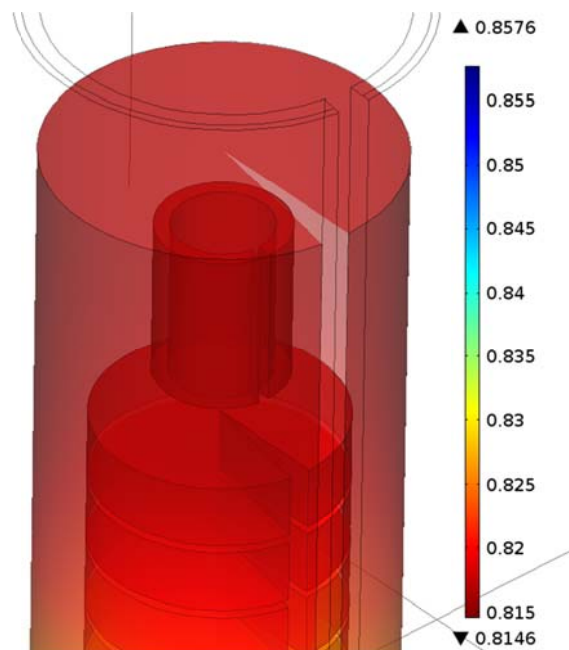


SIMULERING AV FUKTMÄTNING I BETONG MED LÅGT VCT



Magnus Åhs

2014-11-17

Simulering av fuktmätning i betong med lågt vct

Magnus Åhs



LUND UNIVERSITY

ISRN LUTVDG/TVBM—13/3177-SE(1-49)

ISSN 0348-7911 TVBM

Lunds universitet

Avd. Byggnadsmaterial

Box 118

221 00 Lund

Telefon:+46 46 222 74 15

www.byggnadsmaterial.lth.se

Förord

Rapporten, som du just nu läser, redovisar resultatet av SBUF projekt ”Fuktmätning i betong med lågt vct-steg 2”, projektnummer 12706. Projektet är en fortsättning på SBUF projekt ”Fuktmätning i betong med lågt vct”, projektnummer 12656. Båda projekten har utförts på avdelning Byggnadsmaterial vid Lunds tekniska högskola under tiden april 2013 till april 2014.

Den här rapporten redovisar en omfattande serie beräkningar/simuleringar av fukttransport och omfördelning av fukt mellan fuktsensor, luft och betong med lågt vct (0,38). Magnus Åhs har utvecklat den matematiska modellen i samarbete med Lars-Olof Nilsson. Simuleringar för omfördelning av fukt har utförts för två olika provtagningsmetoder enligt RBK-systemet. De två undersökta metoderna är fuktmätning i betong med uttaget prov och mätning i borrhål.

Fuktkapaciteten för tre olika fuktsensorer, Vaisala HMP44, Testo 605-H1 och HumiGuard, har utvärderats av Magnus Åhs och resultatet från dem ingår som indata i modellen. Storleken på provmängden för uttaget prov har utvärderats med praktiska försök och resultatet från dessa har använts som indata till den geometriska modellen av fuktmätning på uttaget prov.

Simuleringar har också utförts för att utvärdera skillnader i uttorkningshastighet beroende på provbitarnas geometriska form. Detta har betydelse för hur lång tid som provet kan hanteras innan det placeras i en förseglad provbehållare utan att förlora för mycket fukt.

Samtliga simuleringar har utförts i COMSOL Multiphysics, en programvara som till exempel kan beräkna komplexa fysikaliska transportfenomen. Resultatet från de simuleringar/beräkningar som genomförts har visat sig stämma väl med de mätningar som har utförts i projekt 12656.

Projektgruppen bestod av följande representanter:

Projektledare

Ted Rapp, Sveriges Byggindustrier

Arbetsgrupp

Stefan Backe, Avd. Byggnadsmaterial, LTH

Peter Johansson, Avd. Byggnadsmaterial, LTH

Magnus Åhs, Avd. Byggnadsmaterial, LTH

Styrgrupp

Lars-Olof Nilsson, Avd. Byggnadsmaterial, LTH

Ted Rapp, Sveriges Byggindustrier

Referensgrupp

Fredrik Gränne, NCC

Nicklas Sahlén, FuktCom

Mattias Gunnarsson, PEAB, RBK-auktoriserad

Ingrid Johansson, AK-Konsult Indoor Air

Kajsa Söderberg, Byggnadsmiljö Mellansverige

Hans Hedlund, Skanska Teknik/SBUF

Lund, november 2014

Magnus Åhs

Innehåll

1	Introduktion.....	1
2	Modell.....	3
2.1	Matematisk formulering	3
2.2	Elementindelning/Mesh.....	5
2.3	Fuktegenskaper	5
2.3.1	Diffusionskoefficient	6
2.3.2	Fuktkapacitet.....	7
3	Simulering av enbart sensorer	13
4	Simuleringar av borrhålsmätning	15
4.1	HumiGuard.....	15
4.1.1	Beskrivning av geometri och egenskaper	15
4.1.2	Resultat	16
4.2	Vaisala och Testo	17
4.2.1	Beskrivning av geometri och egenskaper	17
4.2.2	Resultat Vaisala	18
4.2.3	Resultat Testo med och utan tejp	19
5	Simuleringar av uttaget prov.....	21
5.1	Beskrivning av geometri och egenskaper	21
5.1.1	Resultat Vaisala	23
5.1.2	Resultat Testo med tejp	24
5.1.3	Resultat Testo utan tejp.....	26
6	Uttorkning av uttaget prov	29
6.1	Beskrivning av geometri och egenskaper	29
6.2	Resultat sfär	33
6.3	Resultat cylinder	34
6.4	Resultat diskus	35
7	Mätning av provmängd och läckage från behållare för uttaget prov	37
7.1	Mätning av provmängd.....	38
7.2	Mätning av läckage	38

8	Diskussion och slutsatser	43
8.1	Simulering av borrhålsmätning	43
8.2	Simulering av uttaget prov	44
8.3	Uttorkning av uttaget prov.....	45
8.4	Bestämning av provmängd i provrör och läckage från provtagningsbehållare.....	45
8.5	Läckage från provtagningsbehållare	45
8.6	Rekommenderad mätmetod utifrån simuleringar	46
9	Förslag på framtida forskning	47
10	Referenser.....	49

1 Introduktion

Fuktmätning i betong med lågt vattencementtal, vct, innebär att en fuktsensor placeras i kontakt med betong via luft. För att förhindra uttorkning, önskade fuktförluster, isoleras dessa tre komponenter från omgivningen i en begränsad luftvolym. Mätningen sker antingen på ett uttaget prov i ett provrör av glas eller hårdplast, eller i ett borrhål där ett foderrör av plast och en gummikork förhindrar utbyte av fukt med omgivningen. I betong med lågt vct <0,4 är fuktmängden starkt begränsad vilket ökar kraven på att minimera fuktavgivning. En utmaning består i att använda en sensor som tar upp fukt och är känslig men som inte torkar ut betongprovet och att metoden ger tillförlitliga och repeterbara resultat. En annan utmaning är att försöka minimera temperaturväxlingar, för sådana påverkar också fuktmätningen. I SBUF-projekt 12656 har resultatet från en rad olika försök av fuktmätning i betong med vct 0,38 presenterats och utvärderats. I det här projektet, SBUF-projekt 12706, har en serie simuleringar av fuktmätningar i betong med vct 0,38 genomförts utan kännedom om resultaten från SBUF-projekt 12656.

Simuleringar av till exempel fukttransport mellan sensor, luft och betong är intressanta för att jämföra vad olika fuktkapaciteter hos fuktsensorer har för påverkan på fuktmätningar. Genom att ändra fuktkapaciteten ser vi hur mycket resultatet från en fuktmätning påverkas. Beräkningar av det här slaget innebär att vi måste beskriva verkligheten med hjälp av matematiska samband. Om det går att beskriva den verkliga fysikaliska processen med matematik tillräckligt väl, så är det också möjligt att utvärdera vad en förändring av en parameter skulle innebära i verkligheten. I idealfallet ger den matematiska modellen och den verkliga processen helt identiska resultat. Den skapade modellen måste jämföras mot mätdata genom en validering för att bekräfta att modellen ger en god beskrivning av en verklig fysikalisk process.

Simuleringsmodellen som är utvecklad har bearbetats i ett beräkningsverktyg som heter COMSOL Multiphysics version 4.3b och version 4.4. COMSOL löser partiella differentialekvationer för komplicerade geometrier, materialegenskaper och randvillkor. Dessutom klarar COMSOL att lösa multifysikproblem vilket innebär att den kan lösa värmetransport och fukttransport parallellt, där till exempel temperaturen påverkar fuktegenskaperna och fuktinnehållet påverkar värmeledningsegenskaper.

Simuleringen kan användas för att bedöma vilka parametrar som är avgörande och påverkar fuktmätningen och vad som är mindre viktigt. Till exempel har materialegenskaper för betong, den geometriska avbildningen av mättingsförfarandet, fuktegenskaper för sensorn, mättingsförfarandet eller att omgivande förhållanden förändras en direkt påverkan på fuktmätningen.

Osäkerheter är naturligtvis alltid närvarande och påverkar både den matematiska modellen, i form av uppmätta fuktegenskaper och förändringar av dessa i tid, samt mätosäkerheter i den verkliga mätningen. Simuleringar kan tillsammans med praktiska mätningar ge stöd till beslut som

innebär förändringar i fuktmätningssmetoder och att vissa fuktmätningssmetoder rekommenderas framför andra.

Mätningssförfarandet påverkar resultatet av fuktmätningen på olika sätt. Några olika parametrar som påverkar resultatet på uttaget prov är provtagningssmetod, mängd uttaget prov, provbitarnas storlek och mätsensornas fuktegenskaper. Borrhålmätningen påverkas också av mätsensornas fuktegenskaper men också av helt andra parametrar så som uttorkning av betong vid installation av mätutrustning och temperaturfluktuationer under mätning. En del av dessa olika parametrars påverkan på fuktmätningen har kvantifierats med simuleringarna.

2 Modell

Den modell av fuktmätning som har utvecklats består av flera olika delar. De fysikaliska och kemiska processer som förekommer vid fukttransport beskrivs med partiella differentialekvationer och den matematiska formuleringen beskrivs i avsnitt 2.1. Elementindelningen som är används för modellen beskrivs endast principiellt i avsnitt 2.2. Fuktegenskaperna presenteras i avsnitt 2.3.

2.1 Matematisk formulering

Den matematiska modellen som ligger till grund för simuleringarna bygger på en partiell differentialekvation, den så kallade massbalansekvationen, där relativ fuktighet är den drivande potentialen. Massbalansekvationen för fukt kan då beskrivas med följande matematiska uttryck,

$$\frac{\partial W_e}{\partial RF} \frac{\partial RF}{\partial t} = \nabla(\delta_{RF} \nabla RF) + Q(\alpha)$$

där $\frac{\partial W_e}{\partial RF}$ är fuktkapaciteten, RF, relativ fuktighet, t, tiden, δ_{RF} , diffusionskoefficienten med RF som drivande potential. Den sista termen, $Q(\alpha)$, är en källterm som beskriver fuktbindning i den kemiska reaktionen mellan betong och vatten under härdningsförloppet, självuttorkningen.

Tecknet ∇ är en matematisk operator som står för $\frac{\partial}{\partial x, \partial y, \partial z}$, och betecknar en partiell derivata i tre dimensioner. $Q(\alpha)$ motsvaras av den kemiska fuktbindningen, och är beroende av hydratationsgraden, α . En ofta använd ekvation för den kemiska bindningen av vatten definieras som,

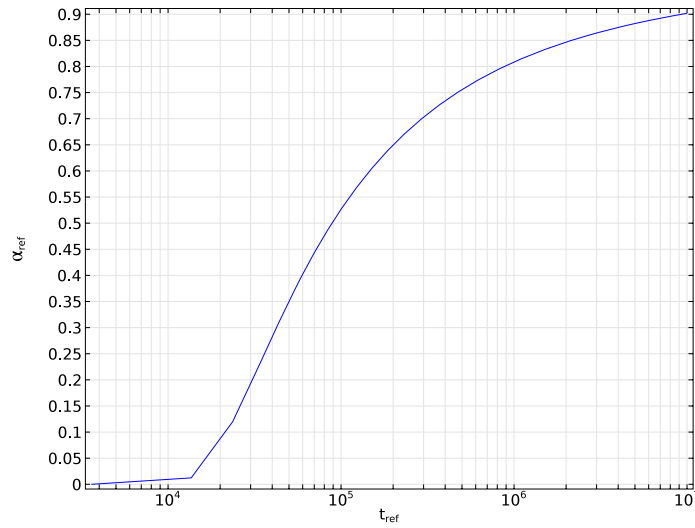
$$Q(\alpha) = -0,25 \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial t} \cdot C$$

där -0,25 är en konstant, $\frac{\partial \alpha}{\partial t}$, är hydratationshastigheten i $[s^{-1}]$, och C är cementmängden i kg/m^3 (Nilsson, 1994).

Eftersom fuktegenskaperna för betong är beroende av hydratationsgraden inkluderas även den i formuleringen. Hydratationsgraden har beskrivits med hjälp av följande ekvation (Byfors, 1980),

$$\alpha_{ref} = e^{-8 \cdot (\log(\frac{t}{3600}))^{-2.1}}$$

där t, är tiden i sekunder vid ett referensklimate (100% RF och konstant temperatur 20 °C), -8 och -2.1 är konstanter för att anpassa hydratationsutvecklingen till en verklig uppmätt utveckling. Figur 1, visar ett diagram för modellen av hydratationsgraden vid referensklimatet.



Figur 1. Hydratationsgrad vid referensförhållanden där x-axelns skala är angiven i sekunder.

Hydratationsgraden, α , visas på y-axeln och ekvivalent härdningstid i sekunder visas med logaritmisk skala på x-axeln.

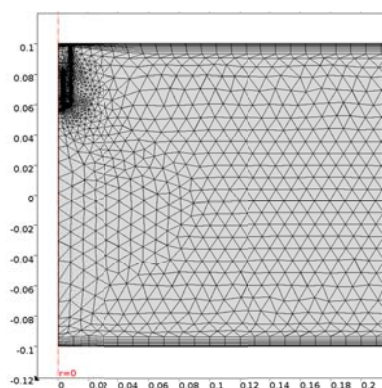
Hydratationshastigheten korrigeras sedan med följande ekvation (Norling Mjörnell, 1997),

$$Q\left(\alpha, RF, \frac{W}{C}\right) = \beta_{RF} \beta_{w/c} \frac{\partial \alpha}{\partial t}$$

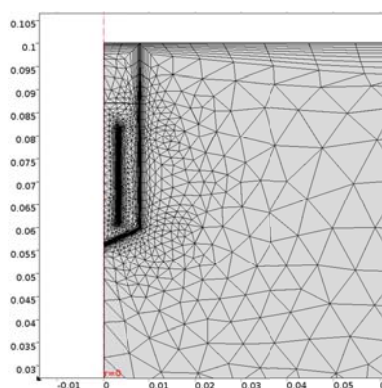
där β_{RF} och $\beta_{w/c}$ är korrektionsfaktorer för relativ fuktighet och w/c.

2.2 Elementindelning/Mesh

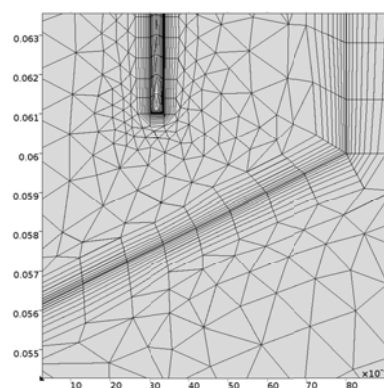
Elementindelningen eller ”meshet” som krävs för en viss modell beror på många olika faktorer. Till exempel har startvillkor, randvillkoren, materialparametrar och ekvationssystemets komplexitet stor betydelse. En annan faktor som har betydelse är skillnaden mellan den minsta geometrin och den största. En liten geometri måste ibland behandlas separat och i en annan upplösning än en större vilket kan innebära problem längs en rand där de båda möts. I Figur 2-Figur 4 visas ett exempel på mesh för en borrhålmätning, endast ena halvan, där symmetrilinjen går längs y-axeln till vänster i varje bild ($r=0$).



Figur 2. Mesh för simulering av borrhålmätning sett från sidan. Borrhålet är det mörka området i vänstra övre hörnet.



Figur 3. Detalj av mesh. Borrhål och fuktsensor (mörk rektangel i mitten av borrhålet).



Figur 4. Botten av borrhål (det lutande planet i nedkant) och del av sensor (mörkare rektangel i ovkant).

Elementindelningen påverkar också beräkningstiden i hög grad och har också betydelse för möjligheten att genomföra en beräkning över huvud taget. Ibland är det helt enkelt inte möjligt att beräkna en viss modell om elementindelningen görs för grov. I modellerna som beskrivs i den här rapporten har särskilt stor vikt lagts vid att förfinas elementindelningen vid ränderna. Detta krävs ofta när det förekommer stora diskreta steg till exempel i randen, gränsskiktet, mellan omgivning och material. I simuleringarna har betongen en relativ fuktighet av 86% RF och luften 55% RF vilket innebär att steget är 31 % RF. Den fina elementindelningen vid ränderna underlättar för beräkningsalgoritmen att hitta en lösning som satisfierar startvillkoren.

2.3 Fuktegenskaper

Modellens viktigaste indata är materialens fuktegenskaper. Fukttransportmodellen bygger på transport av fukt genom diffusion. Fukttransport genom konvektion och kapillärsugning/vätsketransport är inte medtaget i modellen. Det innebär till exempel att det inte är meningsfullt eller för den delen möjligt att använda den redovisade modellen för att beräkna uppsugning från en vattenyta eller att försöka simulera att vatten kondenserar mot en yta som är kall. Det innebär också att modellen inte tillåter flytande vatten som indata.

De två fuktegenskaperna som modellen kräver är diffusionskoefficienten och fuktkapaciteten. Diffusionskoefficienten har bestämts genom att använda en referens, i vissa fall beräknad med en modell och i andra fall antagen. Fuktkapaciteten för sensorerna har bestämts genom att först mäta sorptionsisotermen för respektive material/komponent och därefter beräkna tangenten på sorptionsisotermen vid aktuellt RF. Fuktkapaciteten för betongen har bestämts genom att beräkna lutningen för en beräknad sorptionsisoterm vid aktuellt RF. Diffusionskoefficienterna för respektive material är redovisade i avsnitt 2.3.1 och fuktkapaciteten är redovisad i avsnitt 2.3.2.

2.3.1 Diffusionskoefficient

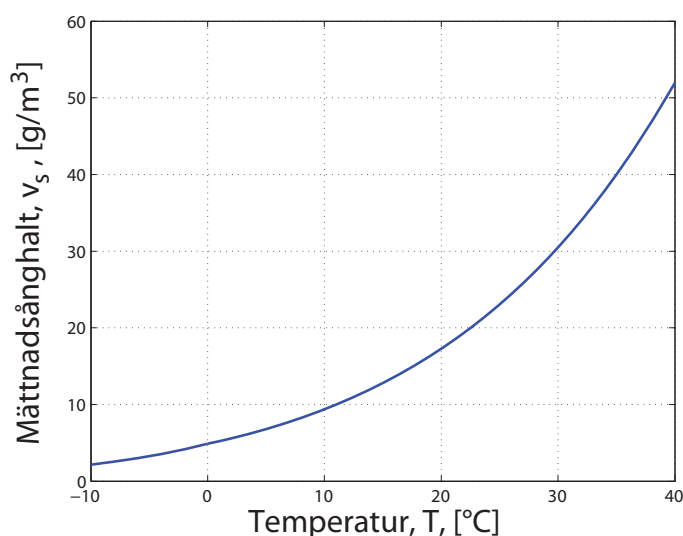
Diffusionskoefficienten för samtliga material anges som δ_{RF} , vilket innebär att den drivande potentialen är relativ fuktighet. I Sverige brukar diffusionskoefficienten anges med ånghalt som drivande potential. Det är enkelt att omvandla δ_{RF} till δ_v , eller vice versa. Omvandlingen sker genom att använda följande ekvation,

$$\delta_{RF} = \delta_v \cdot v_s$$

där v_s är mättnadsånghalten. Mättnadsånghalten kan approximeras med följande ekvation,

$$v_s = 1 \cdot 10^{-3} \cdot e^{a - \frac{b}{T}}$$

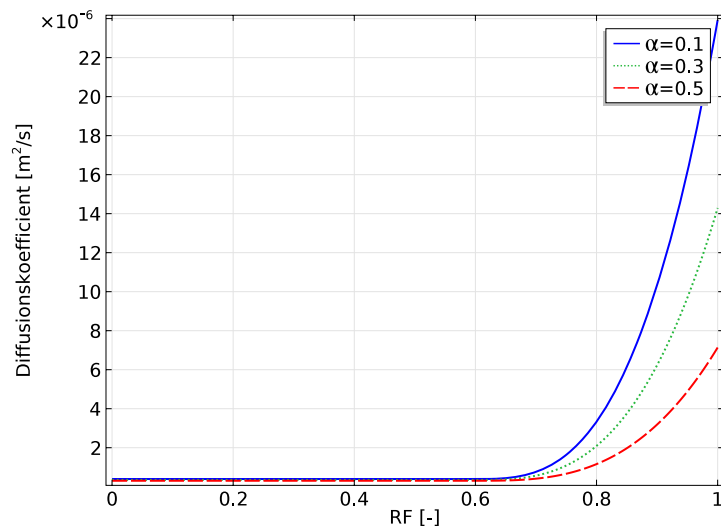
där, $a=20,11$ (23.08 för $T < 273$ K) och $b=5061$ (5872 för $T < 273$ K) och T är temperaturen i uttryckt i Kelvin (K) (Nilsson, 1994). Figur 5, visar ett diagram för mättnadsånghalten i g/m^3 som funktion av temperaturen i $^{\circ}\text{C}$, mellan -10°C och 40°C .



Figur 5. Mättnadsånghalten, v_s , som funktion av temperaturen i $^{\circ}\text{C}$.

2.3.1.1 Betong

Diffusionskoefficienten, δ_v , för betong har bestämts genom att använda Norling-Mjörnell's modell (Norling Mjörnell, 1997). I Figur 6, visas några exempel på beräknade diffusionskoefficienter för en betong med vct 0,38 vid olika hydratationsgrad.



Figur 6. Diffusionskoefficienten för vct 0,38 vid olika hydratationsgrad, $\alpha = 0,1; 0,3$ och $0,5$

Diffusionskoefficienten förändras när betongen härdar, hydratiserar; det sker en förtätning av materialet. Denna process ingår i simuleringsmodellen.

2.3.1.2 Luft

Diffusionskoefficienten för luft med RF som drivande potential är antagen till $25 \cdot 10^{-6} \cdot v_s$ kg/(m·s). Temperaturberoendet för diffusionskoefficienten ingår därmed i termen för mättnadsånghalt som är temperaturberoende.

2.3.1.3 Sensorer

Samtliga sensorer har antagits ha en diffusionskoefficient av 10^{-4} kg/(m·s). Det låga fukttransportmotståndet innebär att sensorerna är reaktionssnabba, vilket innebär att sensorn snabbt ställer in sig med rådande fuktighet.

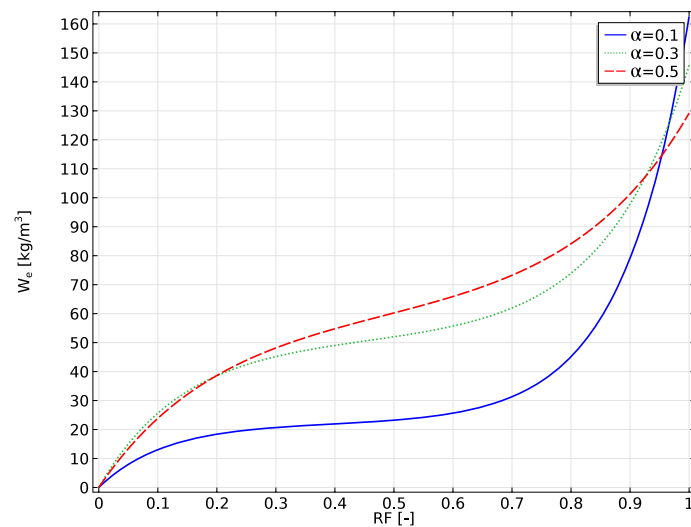
2.3.2 Fuktkapacitet

Fuktkapaciteten är bestämd genom att utvärdera lutningen på sorptionsisotermen vid aktuell relativ fuktighet. Sorptionsisotermerna har dels beräknats (för betong) och dels utvärderats från mätningar (fuktsensorer) i avdelning Byggnadsmaterials klimatrums vid temperaturen 20 °C. HumiGuard-sensors sorptionsisoterm utvärderades med en sorptionsvåg.

2.3.2.1 Betong

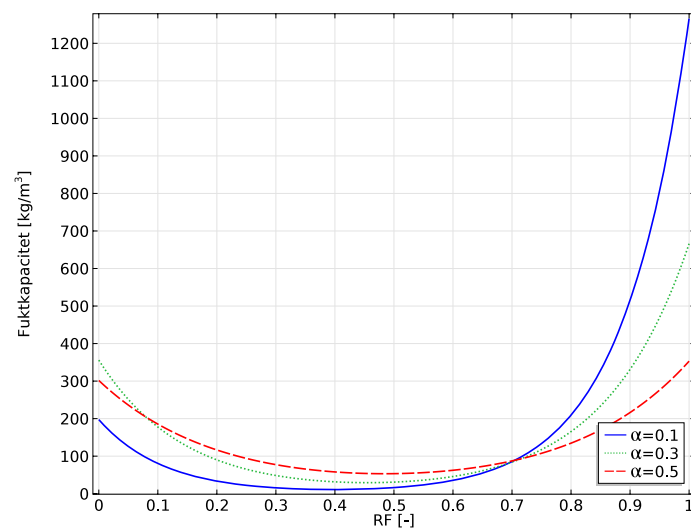
Fuktkapaciteten för betongen har bestämts genom att beräkna lutningen på sorptionsisotermen för aktuellt RF. Sorptionsisotermen har i sin tur beräknats med Norling Mjörnell's modell (Norling Mjörnell, 1997) för en betong som har 450 kg/m³ cement och 171 kg/m³ vatten. Sorptionsisotermen påverkas liksom diffusionskoefficienten också av hydratationsgraden. När cementet reagerar med vatten binds en del av detta vatten in i materialstrukturen, cementgelen. När detta sker förändras sorptionsisotermen. Det sker också en självuttorkning, en sänkning av RF genom en kemisk uttorkning; även detta ingår i simuleringsmodellen.

I Figur 7, redovisas sorptionsisotermen $W_e(RF)$ uttryckt i kg/m^3 för tre olika hydratationsgrader, $\alpha=0,1$; $0,3$ och $0,5$.



Figur 7. Sorptionsisoterm för betong vct 0,38 med olika $\alpha=0,1$; $0,3$ och $0,5$

Fuktkapaciteten utvärderas ur sorptionsisotermen som derivatan med avseende på RF, det vill säga lutningen hos kurvan, Figur 8. I Figur 8, redovisas fuktkapaciteten i hela fuktområdet för tre olika alfa, $\alpha=0,1$; $0,3$ och $0,5$.



Figur 8. Fuktkapacitet för betong vct 0,38 med olika $\alpha=0,1$; $0,3$ och $0,5$

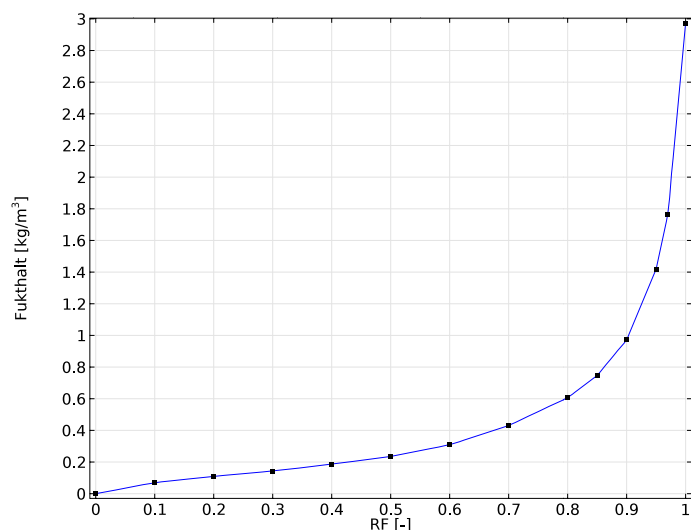
2.3.2.2 Luft

Fuktkapaciteten för luft är satt till mätnadsånghalten, v_s , i kg/m^3 , se avsnitt 2.3.1.

2.3.2.3 HumiGuard

Fuktkapaciteten för HumiGuard-sensorn (hela sensorn inklusive plasthölje) bestämdes genom att mäta upp HumiGuard-sensorns sorptionsisoterm och beräkna lutningen på den vid aktuellt RF.

Sorptionsisotermen bestämdes genom att använda en sorptionsvåg (Åhs, 2011). Sorptionsvågen väger ett materialprov med hög precision när det exponeras för olika relativ fuktighet. Fuktigheten genereras genom att blanda fuktmättad luft och helt torr luft i olika proportioner. Hela HumiGuard-sensorn placerades i sorptionsvågen som exponerades för en sekvens av olika konstanta nivåer RF från 97% RF ner till 0% RF och sedan upp till 97% RF vid en konstant temperatur av 20 °C. Sorptionsisotermen i Figur 9, är omräknad till en viss volym, $5,044 \times 10^{-7} \text{ m}^3$, vilket direkt motsvaras av volymen i den fuktupptagenade delen i den matematiska modellen av HumiGuard-sensorn.



Figur 9. Sorptionsisoterm för HumiGuard omräknad till en viss volym.

2.3.2.4 Vaisala och Testo

Sorptionsisotermen för Vaisala- och Testosensorn bestämdes med burkmetoden. Med den här metoden blir sorptionsisotermen uttryckt i vikt [mg] per sensor. Den yttersta delen av respektive sensor sågades av, Figur 10, och hängdes i burkar med olika mättade saltlösningar, Figur 11. Saltlösningarna genererade RF för nivåerna 33%, 75%, 85%, 95% och 97,6% vid 20 °C. Punkten vid 100 % RF är en gissning/uppskattning. En komplikation rörande den matematiska formuleringen är att sorptionsisotermen måste anges i kg/m^3 . Det innebär att sensorns volym måste beräknas eller antas så att den stämmer med det totala fuktupptaget i kilogram.



Figur 10. Närbild på avsågad del av Vaisala-sensor (till vänster) och Testo-sensor (till höger).

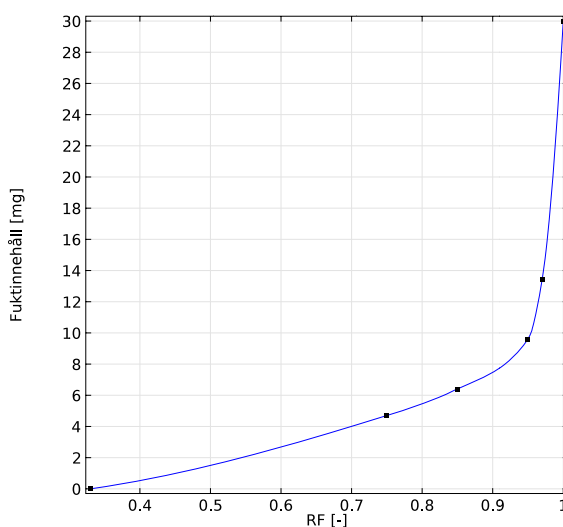
Vaisalasensorn hängdes in i burken med filter och Testo-sensorn hängdes in i burken utan att ta bort det svarta sensorskyddet av plast. Det svarta sensorskyddet av plast bedöms ha en liten påverkan på sorptionsisotermen. Därmed var tejpens som ska skydda Testo-sensorn från föroreningar, till exempel betongdamm, inte med i sorptionsbestämningen med burkmetoden. Sorptionsisotermen bestämdes separat för tejpens och redovisas i avsnitt 2.3.2.5.

I Figur 11, visas en Vaisala-sensor som hänger i en förseglad glasburk med koksaltlösning som genererar 75,5 % RF vid 20 °C. Dessutom finns det en extratyngd, i form av ett antal rostfria muttrar, med i burken för att kunna utföra vägningen på ett korrekt sätt. Vid varje vägning måste burken pendlas försiktigt fram och tillbaka för att säkerställa att tråden som sensorn inte ligger emot hålet i burklocket. Mutrarna bör användas för att få pendlingen att avstanna inom en rimlig tid. Extratyngden binder ingen fukt.

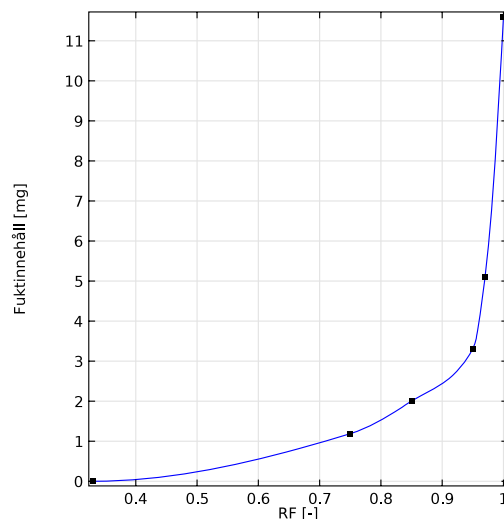


Figur 11. Vaisalasensor samt extratyngd som hänger i en glasburk med mättad saltlösning, NaCl.

Sorptionsisotermen för Vaisala inklusive filter visas i Figur 12 och för Testo exklusive tejp/filter i Figur 13.



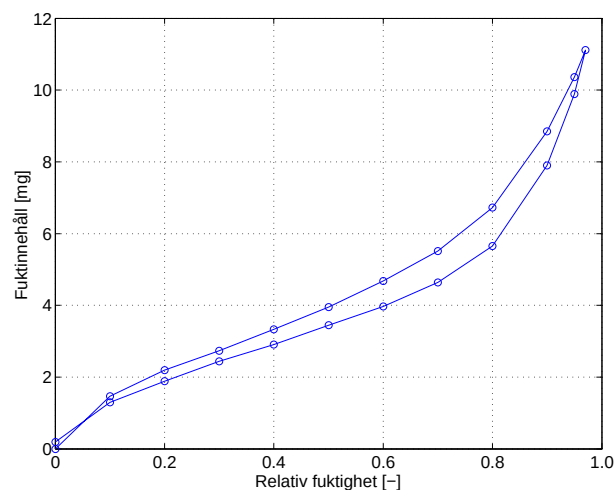
Figur 12. Sorptionsisoterm för Vaisalasensorn inklusive filter.



Figur 13. Sorptionsisoterm för Testo-sensorn inklusive sensorskydd men exklusive tejp/filter.

2.3.2.5 Tejp till testo

Sorptionsisotermen för tejp som skyddar Testosensorn bestämdes genom att använda en sorptionsvåg. Tejpen har fabrikatet 3M Micropore. En liten bit av tejpen placerades i vågen och exponerades för en sekvens av konstanta RF-nivåer 0-97% RF. Sorptionsisotermen som visas i Figur 14, är beräknad för en tejp-mängd som motsvarar en längd av 50 mm och en bredd av 25 mm. Normalt används en tejp-mängd som motsvarar en längd av 50 mm och bredden är 25 mm. Används en annan tejp-mängd så minskar eller ökar tejpens fuktupptagning proportionellt med arean.

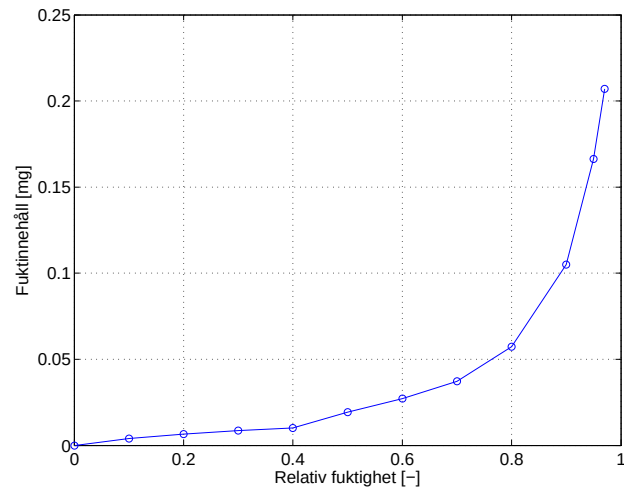


Figur 14. Sorptionsisoterm för ett Testofilter, Micropore tejp 3M, motsvarande en area av 25*50 mm. En sådan mängd filter väger 0,1 gram.

Sorptionsisotermen visar att fuktmängden ökar med cirka 8 mg, mellan 30% RF och 97% RF. Resultatet visar också att sorptionsisotermen för tejp har en tydlig hysteres.

2.3.2.6 Vaisalafilter

Sorptionsisotermen för Vaisalafiltret uppmättes också separat i sorptionsvåg. En liten bit filter från en HMP44 stoppades i instrumentet och exponerades för RF mellan 0-97% RF. Därefter skalades resultatet upp så att sorptionsisotermen i Figur 15, gäller för ett helt filter.

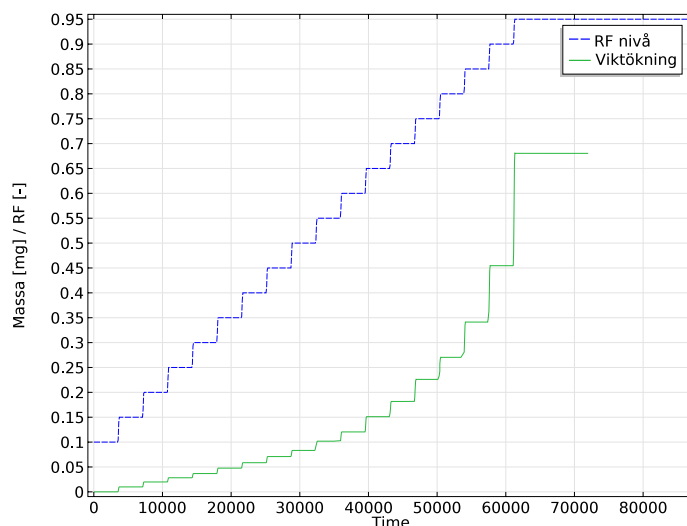


Figur 15. Fukttinnehåll i ett Vaisalafilter HMP44 uppmätt i fuktintervallet 0-97%RF.

Sorptionsisotermen för Vaisalas filter visar att fukttinnehållet ökar väldigt lite, endast en bråkdel av ett milligram mellan 30% RF och 97% RF. Sorptionsisotermen för Vaisala-filtret har inte mätts upp både i uttorkning och uppfuktning; alltså kan inget sägas rörande hysteres.

3 Simulering av enbart sensorer

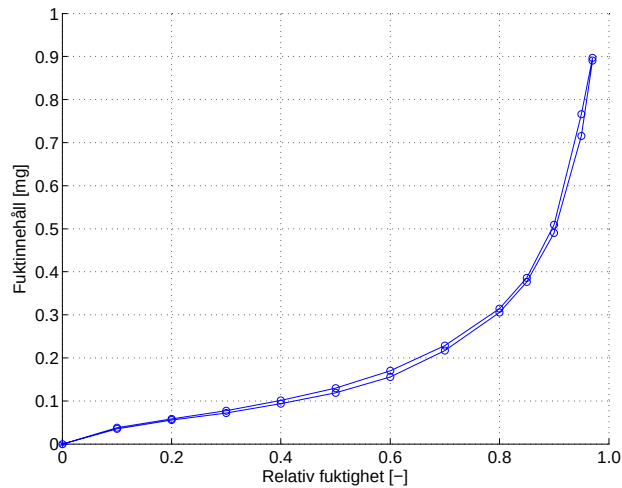
En simulering med respektive fuktsensor utfördes med den utvecklade modellen. Sensorn exponerades för samma sekvens relativa fuktighet som i sorptionsvågen. Viktökningen för den beräknades med stöd av simuleringen med sensorernas respektive fuktegenskaper. Den beräknade viktökningen på grund av fuktupptagning för HumiGuard-sensorn för den simulerade sekvensen med konstanta RF nivåer visas i Figur 16.



Figur 16. Viktökning av en HumiGuard-sensor som utsätts för RF från 10-95% RF i steg om 5% RF, tidsskala i sekunder.

Viktökningen från 10% RF upp till 95% RF är 0,68 mg. Detta ska jämföras med den uppmätta viktökningen på 0,6804 mg. Beräkningen stämmer med den uppmätta vilket styrker att omvandlingen av mätdata till en sorptionsisoterm stämmer. Det innebär att resultaten från beräkningarna där HumiGuard-sensorn används är trovärdiga.

I Figur 17, visas den uppmätta sorptionsisotermen för HumiGuard-sensorn uttryckt i mg i intervallet 0-97% RF; både desorption- och adsorptionsisotermen är redovisade.



Figur 17. Sorptionsisoterm för HumiGuard, desorption- och adsorptionsisoterm.

Sorptionsisotermen för HumiGuard-sensorn visar att fukttinnehållet ökar väldigt lite, mellan 30% RF och 97% RF, endast 0,8 mg. Sorptionsisotermen visar att skillnaden mellan fukttinnehåll i uttorkning och uppfuktning är väldigt liten vilket innebär att den inte har någon uttalad hysteres.

4 Simuleringar av borrhålsmätning

Den utvecklade temperatur- och fuktberäkningsmodellen beskriven i kapitel 2, har utnyttjats för att simulera upprepade mätningar i samma borrhål med tre olika fuktsensorer, HumiGuard, Vaisala HMP44 och Testo 605-H1 med tejp. Den geometriska utformningen i modellen är förenklad. Detta bedöms inte påverka resultatet av utförda beräkningar.

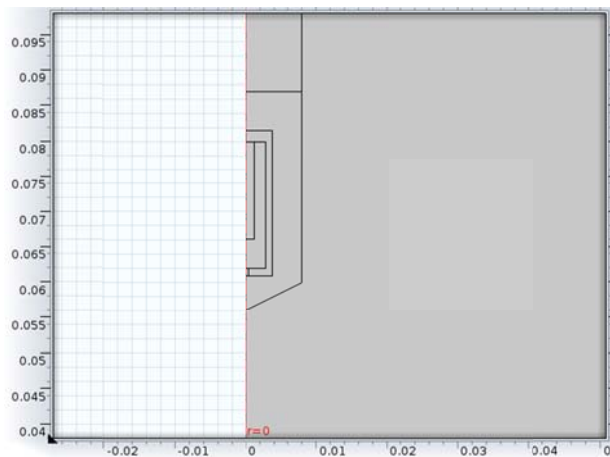
Förutsättningar för beräkningarna som genomförts är att betongen håller 86% RF och att fuktigheten i omgivande miljö är 55% RF. Temperaturjämvikt råder och temperaturen är 20 °C. Vid montage har fullständigt luftombyte antagits ske i mätområdet. Det innebär att RF i luften i mätområdet har antagits vara 55% RF efter montage. Sensorerna har behandlats på två olika sätt, HumiGuard-sensorn har antagits ha en relativ fuktighet av 85% RF vid montage medan Vaisala och Testo har antagits vara i jämvikt med 55% RF. Upprepade mätningar har skett 2 och 4 dagar efter första mätning. Samtliga dessa simuleringar har modellerats som axialsymmetriska. Det innebär att både modelluppställningen och beräkningstiden reduceras betydligt och fukttransporten sker i tre dimensioner.

4.1 HumiGuard

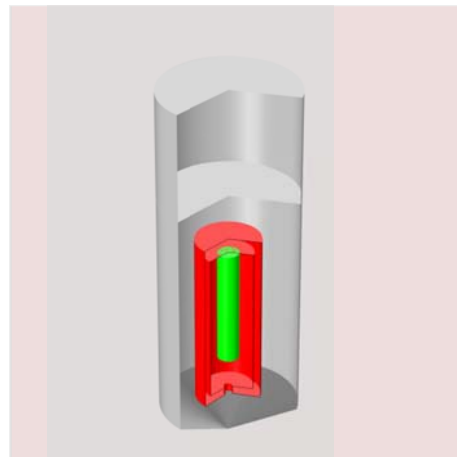
HumiGuard-sensors aktiva del består av en icke-hygroskopisk fiberväv som impregnerats med en hygroskopisk elektrolyt. HumiGuard-sensors aktiva del har utformats geometriskt som en solid cylinder, med en viss volym. Denna fuktupptagande del är placerad i en icke-hygroskopisk behållare där en liten öppning medger fuktutbyte med omgivningen. Volymen av den solida cylindern har bestämts så att mängden upptagen fukt som tas upp stämmer överens med viktökningen som har registrerats i motsvarande fuktintervall i sorpstionsvägen, se Kapitel 3.

4.1.1 Beskrivning av geometri och egenskaper

Betongvolymen har utformats som en förseglad provkropp utan möjlighet till fuktutbyte med omgivningen. Modellen inkluderar självuttorkning som beror av den kemiska bindningen av vatten. Borrhålet har utformats som en polygon, en cylinder med en spetsig botten. Hålets vertikala ytor modellerades som ett ohygroskopiskt tunt skikt med ett väldigt högt fuktmotstånd, i princip ogenomträngligt, för att efterlikna foderröret. HumiGuard-sensorn modellerades som en inre hygroskopisk del (cylinder) och omgivande yttre ohygroskopiskt skal, se Figur 18. Volymen på den inre cylindern har beräknats och anpassats till jämviktsfuktkurvan så att viktökningen för sensorn vid en ökande RF stämmer med viktökningen för det absorberade vattnet i den lilla sensorn. Fuktutbyte mellan betong och den inre delen sker genom ett lufthål i det omgivande skalet. Det horisontella strecket i Figur 18, motsvaras av nedre botten på givarkontakten som används i HumiGuard-systemet. Figur 19 visar en visualisering av en HumiGuard-sensor monterad i ett borrhål.



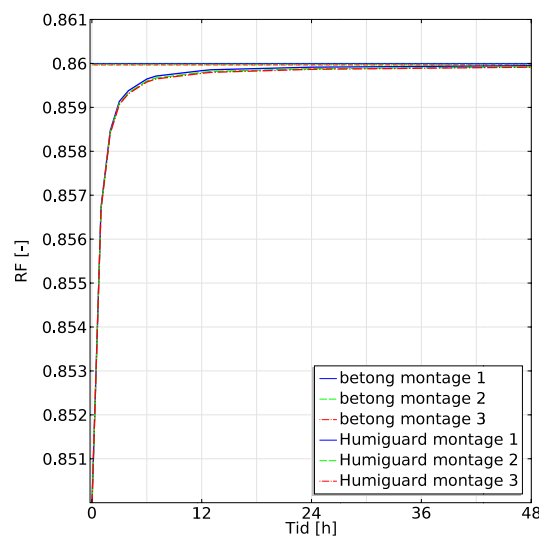
Figur 18. Detalj av en geometrisk avbildning av borrhålsmätning med HumiGuard-sensor, betong, rörvägg och innesluten luftvolym.



Figur 19. 3D-visualisering av borrhålsmätning med HumiGuard-sensor, betong, sensor (plasthölje röd, aktiv del grön) och innesluten luftvolym.

4.1.2 Resultat

De tre kurvorna i Figur 20 visar medelvärden av RF i Humi-Guard-sensorn vid de tre montage tillfällena under de 48 första timmarna.



Figur 20. Beräknad fuktighet i HumiGuard-sensor och betong efter första, andra och tredje montage i ett och samma borrhål.

På x-axeln visas förfluten tid i timmar, på y-axeln visas relativ fuktighet angiven i decimaltal, 0,86 motsvaras av 86%. Graferna visar respektive medelvärde av RF i mätsensorn för de tre montagen. Den beräknade fuktigheten i HumiGuard-sensorn är 86,0% RF efter tre genomförda mätningar. Den mängden fukt som behövs för att fukta upp sensorn tas från betongen och påverkar inte mätningen. Avläst värde är 86,0% 48 timmar efter det tredje montage tillfället. Eftersom sensorn

redan har en fuktighet på 85% RF och fuktkapaciteten väldigt låg så påverkas inte fuktigheten i betongen nämnvärt.

4.2 Vaisala och Testo

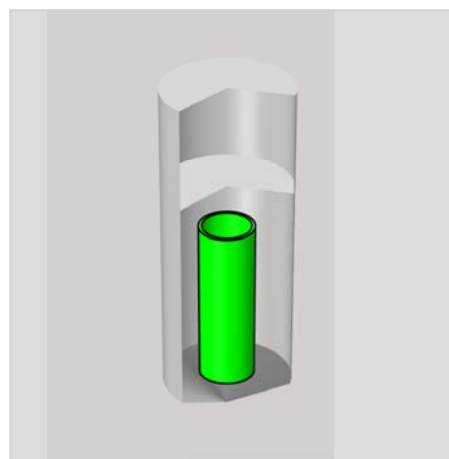
Modellerna av borrhålsmätning med Vaisala HMP44 och Testo 605-H1 har modellerats med samma metodik. Fuktsensorns aktiva del för respektive sensor är en polymerfilm som i realiteten är rektangulär. Sensorns aktiva del har omvandlats till ett tunt rör för att göra geometrin axialsymmetrisk. En axialsymmetrisk geometri reducerar beräkningstiden utan att försämra precisionen. Den förändrade geometrin hos sensorn har en försumbar betydelse.

4.2.1 Beskrivning av geometri och egenskaper

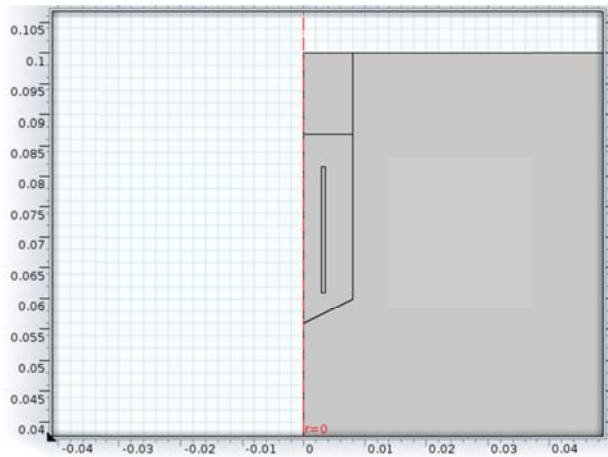
Betongvolymen modellerades som en förseglad provkropp utan möjlighet till fuktutbyte med omgivningen. Modellen inkluderar självuttorkning som beror av den kemiska bindningen av vatten. Hålets vertikala ytor modellerades som ett icke-hygrokopiskt tunt skikt med ett väldigt högt fuktmotstånd, i princip ogenomträngligt, för att efterlikna ett foderrör. Sensorerna modellerades som ett hygrokopiskt rör med en viss tjocklek. Fukt från luft och betongen i borrhålsbotten har fritt tillträde till sensorns fuktkänsliga material. Volymen på respektive sensor har beräknats och anpassats till jämviktsfuktkurvan så att viktökningen för sensorn vid en ökande RF stämmer med viktökningen för det absorberade vattnet. Det horisontella strecket i Figur 21 och Figur 23, motsvaras av en antagen begränsning på den inneslutna luftvolymen för Vaisala- respektive Testosystemet och är helt tät. Figur 22 och Figur 24 visar en visualisering av en Vaisala- respektive Testosensor monterad i ett borrhål.



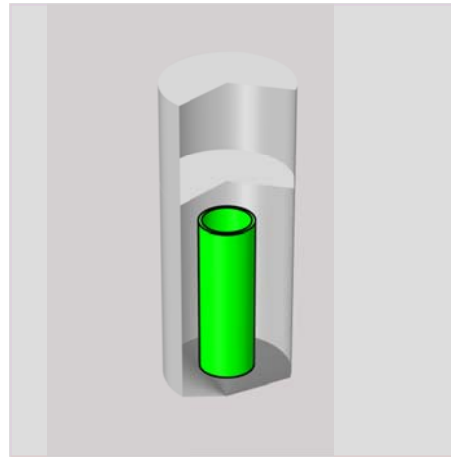
Figur 21. Geometrisk avbildning av borrhålsmätning med aktiv del av Vaisala-sensor, betong, rörvägg och innesluten luftvolym.



Figur 22. 3D-visualisering av borrhålsmätning med aktiv del (grön) av Vaisala, betong, rörvägg och innesluten luftvolym.



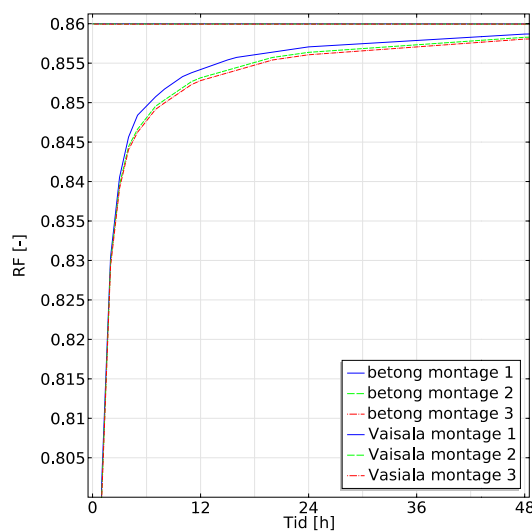
Figur 23. Geometrisk avbildning av borrhålsmätning med aktiv del av Testo-sensor, betong, rörvägg och innesluten luftvolym.



Figur 24. 3D-visualisering av borrhålsmätning med aktiv del (grön) av Testo-sensor, betong, rörvägg och innesluten luftvolym.

4.2.2 Resultat Vaisala

De tre kurvorna i Figur 25, visar medelvärdet av RF i Vaisala-sensorn vid de tre montage tillfällena under de 48 första timmarna.



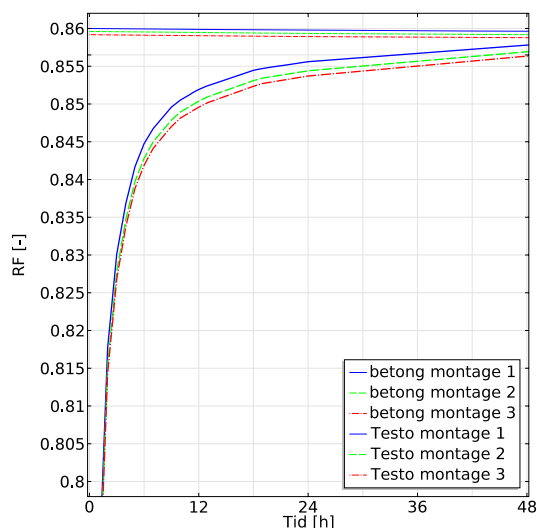
Figur 25. Beräknad fuktighet i Vaisala-sensor och betong efter första, andra och tredje montage i ett och samma borrhål.

På x-axeln visas tiden i timmar [h] och på y-axeln RF i decimaltal, [-], 0,85 motsvaras av 85% RF. Observera att y-axeln startar vid 80% RF, delen mellan 55% RF och 80% RF har utelämnats för att kunna särskilja de tre kurvorna. Montaget har skett i samma borrhål efter att sensorn har acklimatiserats vid 55% RF vilket innebär att sensorn torkar ut betongen. Beräkningen visar att RF i sensorn är 85,8%, efter 48 timmar i mätposition, vid det tredje montage tillfället. Fuktigheten i betongen är 86% RF. Detta resultat beror på att fuktkapaciteten är väldigt låg hos fuktsensorn. Om sensorn är torrare än 55% RF vid montage tillfället blir mätresultatet lägre

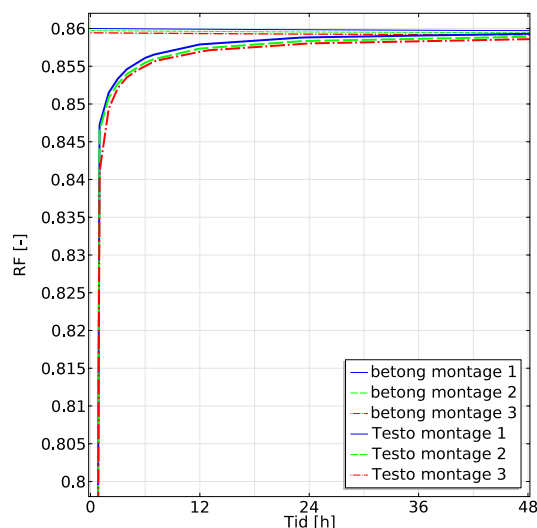
än vad som visas i diagrammet. Det syns att fuktigheten sjunker successivt med antalet mätningar men att effekten är relativt liten och minskar i storlek för varje upprepad mätning. Vaisala-sensorn är reaktionssnabb men inte alls lika snabb som HumiGuard-sensorn, se Figur 20.

4.2.3 Resultat Testo med och utan tejp

Figur 26 visar resultatet från beräkningen med en Testo-sensor med tejp och Figur 27 visar resultatet från beräkningen utan tejp.



Figur 26. Beräknad fuktighet i Testo-sensor med tejp efter första, andra och tredje montaget i ett och samma borrhål och fuktighet i betong.



Figur 27. Beräknad fuktighet i Testo-sensor utan tejp efter första, andra och tredje montaget i ett och samma borrhål och fuktighet i betong.

På x-axeln visas tiden i timmar [h] och på y-axeln RF i decimaltal, [-], 0,85 motsvaras av 85% RF. Observera att y-axeln startar vid 80% RF, delen mellan 55% RF och 80% RF har utelämnats för att kunna särskilja de tre kurvorna. Montaget har skett i samma borrhål efter att sensorn har acklimatiserats vid 55% RF vilket innebär att sensorn torkar ut betongen. Beräkningen visar att RF i sensorn är 85,7%, efter 48 timmar i mätposition, vid det tredje montagetillfället om sensorn är skyddad med tejp. Om sensorn inte skyddas med tejp är RF i sensorn 85,8%. Skillnaden med och utan tejp är cirka 0,1%-enheter RF. Om sensorn är torrare än 55% RF vid montagetillfället blir beräkningsresultatet lägre än vad som visas i diagrammet. Om sensorn och tejp är fuktigare än betongen i borrhålet avges istället fukt från sensorn och RF skulle bli över 86%. Den simulerade sensorn är reaktionssnabb, redan efter någon timme har fuktigheten stigit till 80% RF.

5 Simuleringar av uttaget prov

Temperatur och fukttransportmodellen beskriven i kapitel 2, har också utnyttjats för att simulera upprepad mätning i provrör på uttaget prov med två olika fuktsensorer, Vaisala HMP44 och Testo605-H1 med och utan tejp. Den geometriska utformningen i modellen är förenklad, detta bedöms inte påverka resultatet av utförda beräkningar.

Förutsättningar för beräkningarna som genomförts är att det uttagna provet fyller röret till 31%, håller 86% RF och att fuktigheten i omgivande miljö är 55% RF. Volymen av provmängd som får plats i ett provrör är utvärderat separat och resultatet redovisas i Kapitel 07.

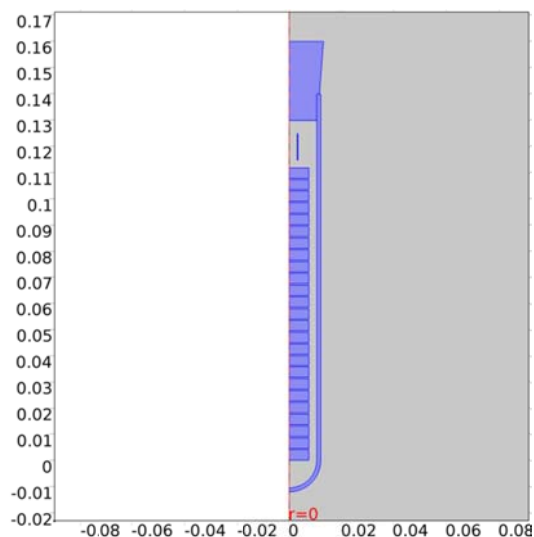
Temperaturjämvikt råder och temperaturen är 20 °C. Vid montage har i princip inget luftombyte skett i provröret vid montage andra och tredje montaget. Det innebär att RF i luften i mätröret har antagits vara det RF som blivit efter första montaget det vill säga cirka 85% RF. Sensorerna har behandlats på två olika sätt, HumiGuard-sensorn har antagits ha en relativ fuktighet av 85% RF vid montage. Vaisala- och Testo-sensorerna har antagits vara i jämvikt med 55% RF vid montage. Demontage och återmontage av sensorer har skett 2 och 4 dagar efter första montage. Samtliga dessa simuleringar har modellerats som axialsymmetriska. Det innebär att både tiden för modelluppställningen och beräkning reduceras betydligt. Trots detta gäller beräkningsresultatet för en tredimensionell geometri.

5.1 Beskrivning av geometri och egenskaper

Betongvolymen modellerades som tjugofem cylindrar som placerats i ett förslutet glasprovrör. Förslutningen sker med en gummikork som antas vara helt tät. Modellen inkluderar självuttorkning som beror av den kemiska bindningen av vatten. Glasröret som omsluter betongcylindrar och sensor modellerades som ett icke-hygroskopiskt helt tätt material samma gäller för gummikorken. Vaisalasensorn och Testo-sensorn modellerades båda som ett hygroskopiskt rör med en viss tjocklek. Fukt från luft och betongen har fritt tillträde till sensorns fuktkänsliga material. Volymen på respektive sensor har beräknats och anpassats till jämviktsfuktkurvan så att viktökningen för sensorn vid en ökande RF stämmer med viktökningen för det absorberade vattnet. Beräkningar har även utförts på halv provmängd. Vid simuleringarna för halv provmängd har betongvolymen modellerats som tolv cylindrar med samma tjocklek som för hel provmängd.

I Figur 28 visas en geometrisk avbildning av ett uttagetprov med hel provmängd uttaget prov och Testo/Vaisalasensor. Avbildningen visar en genomskärning av halva provröret med uttaget prov och fuktsensor. I Figur 30 visas en geometrisk avbildning av ett uttagetprov med halv provmängd och Testo/Vaisala-sensor.

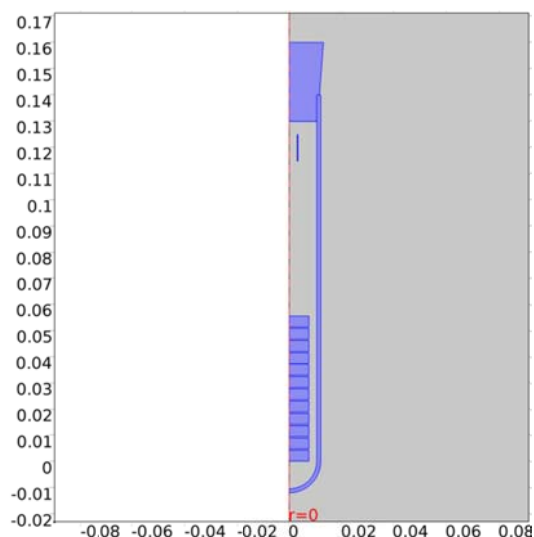
Det är inte lätt att bedöma betongvolymen utifrån de geometriska avbildningarna i två dimensioner i Figur 28 och Figur 30. Det ser ut som om provmängden i Figur 28 är mycket större än 30% av provrörsvolymen. En yta som befinner sig nära rotationsaxeln på en axialsymmetrisk modell har en mindre volym än en motsvarande yta som befinner sig långt från rotationsaxeln. En noggrann kontroll av provvolymen i förhållanden till provrörsvolymen har utförts.



Figur 28. Geometrisk avbildning av uttaget prov i provrör, hel provmängd. Provrör, betong, Testo/Vaisala-sensor, luft och gummiplugg.



Figur 29. 3D-visualisering av provrör, hel provmängd betong, Testo/Vaisala-sensor och gummiplugg.



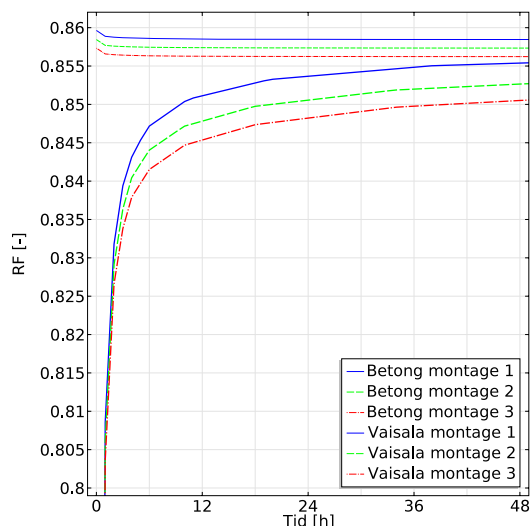
Figur 30. Geometrisk avbildning av uttaget prov i provrör, halv provmängd. Provrör, betong, Testo/Vaisala-sensor, luft och gummiplugg.



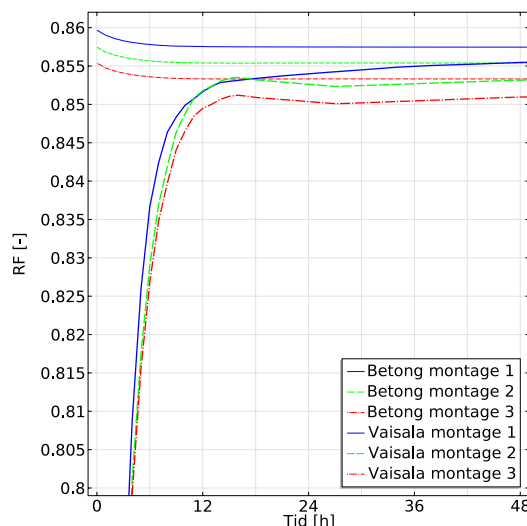
Figur 31. 3D-visualisering av provrör, halv provmängd betong, sensor och gummiplugg.

5.1.1 Resultat Vaisala

De tre kurvorna i Figur 32 visar medelvärden i RF för fuktsensorn, Vaisala HMP44, och betongprov vid hel provmängd och i Figur 33 visas resultatet för fuktsensorn vid halv provmängd vid de tre montage tillfällena



Figur 32. Hel provmängd. Beräknad fuktighet i Vaisala-sensor efter första, andra och tredje montage i ett och samma provrör och fuktighet i betongprov.



Figur 33. Halv provmängd. Beräknad fuktighet i Vaisala-sensor efter första, andra och tredje montage i ett och samma provrör och fuktighet i betongprov.

På x-axeln i Figur 32 och Figur 33 visas tiden i timmar [h] och på y-axeln RF i decimaltal, [-], 0,85 motsvaras av 85% RF. Observera att y-axeln startar vid 80% RF, delen mellan 55% RF och 80% RF har utelämnats för att kunna särskilja de tre kurvorna. Montaget har skett i samma uttagna prov efter att sensorn har acklimatiserats vid 55% RF vilket innebär att sensorn torkar ut betongen. Beräkningen visar att RF sjunker från 86% RF till 85,1%, efter 48 timmar i mätposition, vid det tredje montage tillfället om provmängden är hel. Jämvikt råder inte vid mättillfället utan sensorn kommer att fortsätta att ta upp fukt. Jämvikt kommer att råda efter cirka 192 timmar cirka 8 dygn och då är fuktigheten 85,7% RF. Om avläsningen sker efter 48 timmar blir avläst värde ungefär 0,6 % RF lägre än det aktuella.

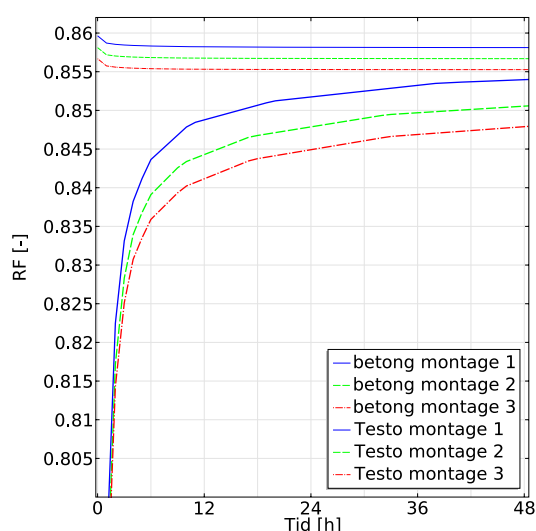
När provmängden minskas till hälften är RF vid avläsningstillfället, 48 timmar efter montage, också 85,1%RF, se Figur 33. Jämvikt råder inte vid mättillfället utan sensorn kommer att fortsätta att ta upp fukt. Jämvikt kommer att råda efter cirka 192 timmar cirka 8 dygn och då är fuktigheten 85,3% RF. Puckeln/knycken på den röda och gröna kurvan i Figur 33 är en följd av att sensorn först blir fuktig av luften runt omkring. Sedan lämnar fukten sensorn när luften blir torrare av betongen som torkar av självuttorkning. En annan sak som påverkar fuktbalansen är att avståndet mellan sensor och betong är större vid halv provmängd.

Om sensorn är torrare än 55% RF vid montage tillfället blir beräkningsresultatet lägre än vad som visas i diagrammet. Om sensorn är fuktigare än betongen i borrhålet avges istället fukt från

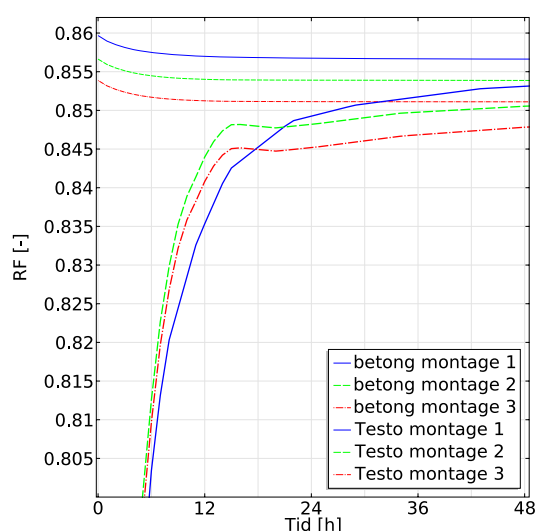
sensorn och RF skulle bli över 86%. Sensorn är reaktionssnabb. Redan efter någon timme efter montage har fuktigheten stigit från 55% RF till 80% RF.

5.1.2 Resultat Testo med tejp

I Figur 34 och Figur 35 visas medelvärden av RF i Testo-sensorn vid hel och halv provmängd uttaget prov och fuktkapacitet enligt uppmätta värden på Microporetejpen under de första 48 timmarna. Dessutom visas betongens fuktighet i centrum på en av de simulerade betongprobitarna som en tunnare linje.



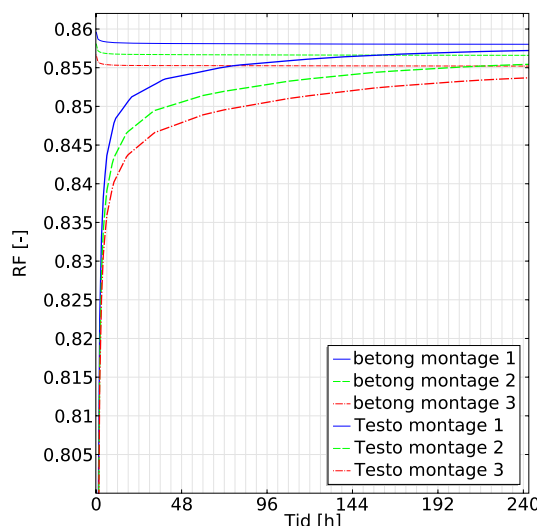
Figur 34. Hel provmängd. Beräknad fuktighet i Testo-sensor efter första, andra och tredje montaget i ett och samma provrör och fuktighet i betongprov.



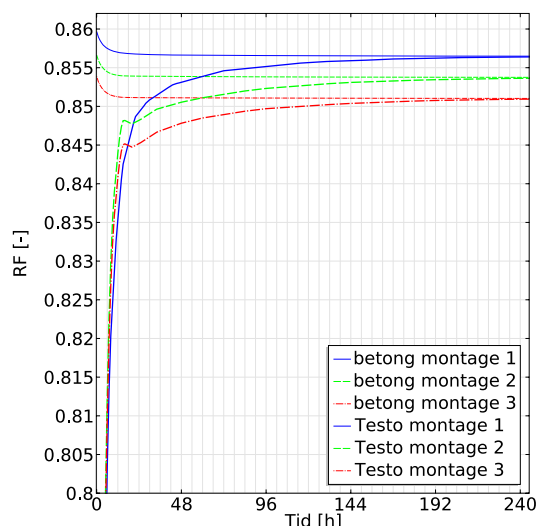
Figur 35. Halv provmängd. Beräknad fuktighet i Testo-sensor efter första, andra och tredje montaget i ett och samma provrör och fuktighet i betongprov.

Vid hel provmängd blir fuktigheten i sensorn 84,7% RF efter det tredje montaget vid 48 timmar, se Figur 34. Vid samma tidpunkt är RF i betongen cirka 85,5% RF. Det innebär att fukten i betong, sensor och luft inte är i jämvikt efter 48 timmar. Sensorn visar 0,7% RF lägre värde än betongen den aktuella fuktigheten efter 2 dygn. När provröret är halvfyllt blir fuktigheten i sensorn 84,6% RF, se Figur 35. Det tar cirka dubbelt så lång tid (6 timmar) innan fuktigheten i sensorn är 80% RF med halv provmängd. Puckeln/knycken på den röda och gröna kurvan är en följd av att sensorn först blir fuktig av luften runt omkring. Sedan lämnar fukten sensorn när luften blir torrare av betongen som torkar av självuttorkning. Att avståndet mellan sensor och betong är större vid halv provmängd påverkar också fuktbalansen. När andra montaget simuleras så antas RF i luften och betongen vara så fuktig som de är 48 timmar efter första montaget. Den begränsade fuktmängden vid halv provmängd innebär att RF vid jämvikt inte någonsin kommer att bli lika hög som i fallet med hel provmängd.

I Figur 36 och Figur 37 visas fuktighet i Testo-sensor och betong vid hel respektive halv provmängd under 10 dygn.



Figur 36. Hel provmängd. Beräknad fuktighet i Testo-sensor efter första, andra och tredje montaget i ett och samma provrör och fuktighet i betongprov under 10 dygn.

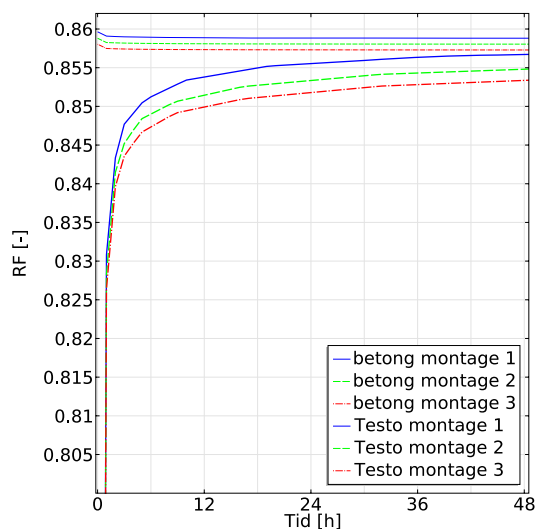


Figur 37. Halv provmängd. Beräknad fuktighet i Testo-sensor efter första, andra och tredje montaget i ett och samma provrör och fuktighet i betongprov under 10 dygn.

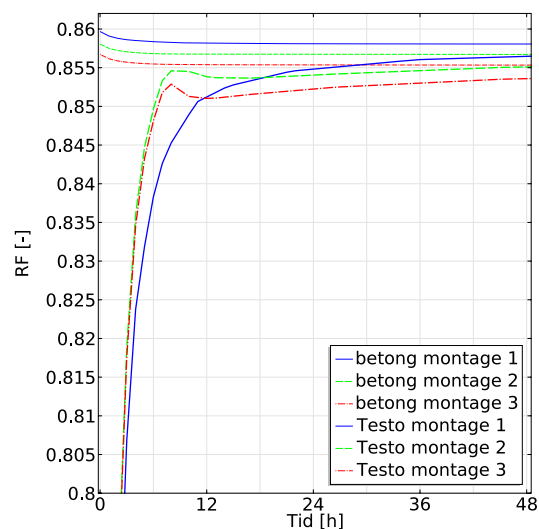
Fukttjämvikt råder då kurvor i respektive färg sammanfaller; det vill säga när blå heldragen tunn kurva (Betong) visar samma fuktighet som en blå tjock heldragen linje. I Figur 36 visas att fukten fortfarande inte är i jämvikt cirka 240 timmar, 10 dygn, efter tredje montaget. Simuleringen visade att det tar drygt 20 dygn efter tredje montaget för jämvikt och fuktigheten är då 85,5% RF vid hel provmängd. I Figur 37 visas att fukttjämvikt ställer in sig snabbare vid halv provmängd, efter 192 timmar, cirka 8 dygn. Vid halv provmängd blir 85,1% RF efter tredje montaget efter 8 dygn.

Tejpen, 3M Micropore, som användes i den här simuleringen har fuktkapaciteten 7 mg mellan 50% RF och 97% RF. Enligt uppgift från RBK används en tejp som heter Scanpor vid borrhålsmätning med Testo-sensorn. Fuktkapaciteten hos Scanpor-tejpen har mätts upp till cirka, 4 mg mellan 50% RF och 97% RF, (enligt en rapport av Anders Sjöberg tillhandahållen av Jens Åkervall, Nordtec, den 23/9 2014), vilket är lite drygt hälften av den tejp som användes i den här simuleringen. Därför har ytterligare två simuleringar utförts där fuktkapaciteten är 3,5 mg i det aktuella området.

Resultatet av dessa simuleringar med halv fuktkapacitet i tejpen, motsvarande den uppmätta Scanpor-tejpen, visas i Figur 38 och Figur 39.



Figur 38. Hel provmängd. Simuleringen är utförd med halva den beräknade fuktkapaciteten i Testo-sensorn efter första, andra och tredje montaget i ett och samma provrör.

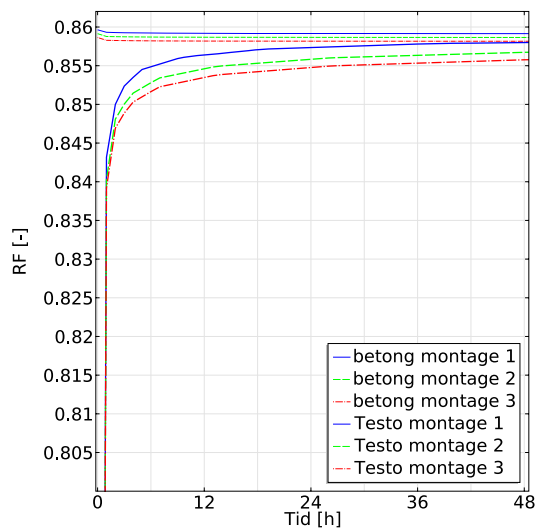


Figur 39. Halv provmängd. Simuleringen är utförd med halva den beräknade fuktkapaciteten i Testo-sensorn efter första, andra och tredje montaget i ett och samma provrör.

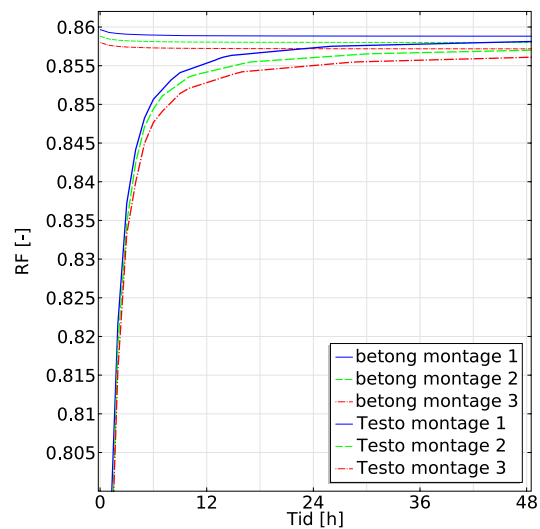
När en tejp med halva fuktkapaciteten används i simuleringen blir RF i sensorn 85,3% vid hel provmängd 48 timmar efter det tredje montaget. Motsvarande RF is sensorn där den skyddas med en tejp med dubbelt så hög fuktkapacitet är 84,7% RF, skillnaden blir 0,6% RF. För motsvarande mättingsförfarande med halva provmängden betong blir fuktigheten i sensorn 85,3 % RF. Skillnaden mellan de båda tejporna är 0,6% RF; så fuktkapaciteten för tejporna har betydelse. Vid fuktjämvikt blir fuktigheten med hel provmängd betong RF 85,7%RF och med halv provmängd betong 85,5% RF. Motsvarande fuktjämvikt för tejp med dubbel fuktkapacitet är 85,5% RF och 85,1% RF.

5.1.3 Resultat Testo utan tejp

Resultatet för simuleringar av uttaget prov med Testo-sensorn utan tejp för hel respektive halv provmängd visas i Figur 40 och Figur 41.



Figur 40. Hel provmängd. Beräknad fuktighet i Testo-sensor utan skyddstejp, första andra och tredje montaget i ett och samma uttagna prov och fuktigheten i betongprovet.



Figur 41. Halv provmängd. Beräknad fuktighet i Testo-sensor utan skyddstejp, första andra och tredje montaget i ett och samma uttagna prov och fuktigheten i betongprovet.

Vid hel provmängd blir fuktigheten i sensorn 85,6% RF efter det tredje montaget. När provröret är halvfullt blir fuktigheten i sensorn lite mindre cirka 85,5 % RF. Det tar cirka dubbelt så lång tid (2 timmar) innan fuktigheten i sensorn är 80% RF med halv provmängd. Den tidsskillnaden beror på att fukten har längre väg att transporteras från provet till sensorn vid halv provmängd. Slutvärdet visar att en mindre provmängd innebär en påtagligt lägre RF-avläsning, efter tredje montaget.

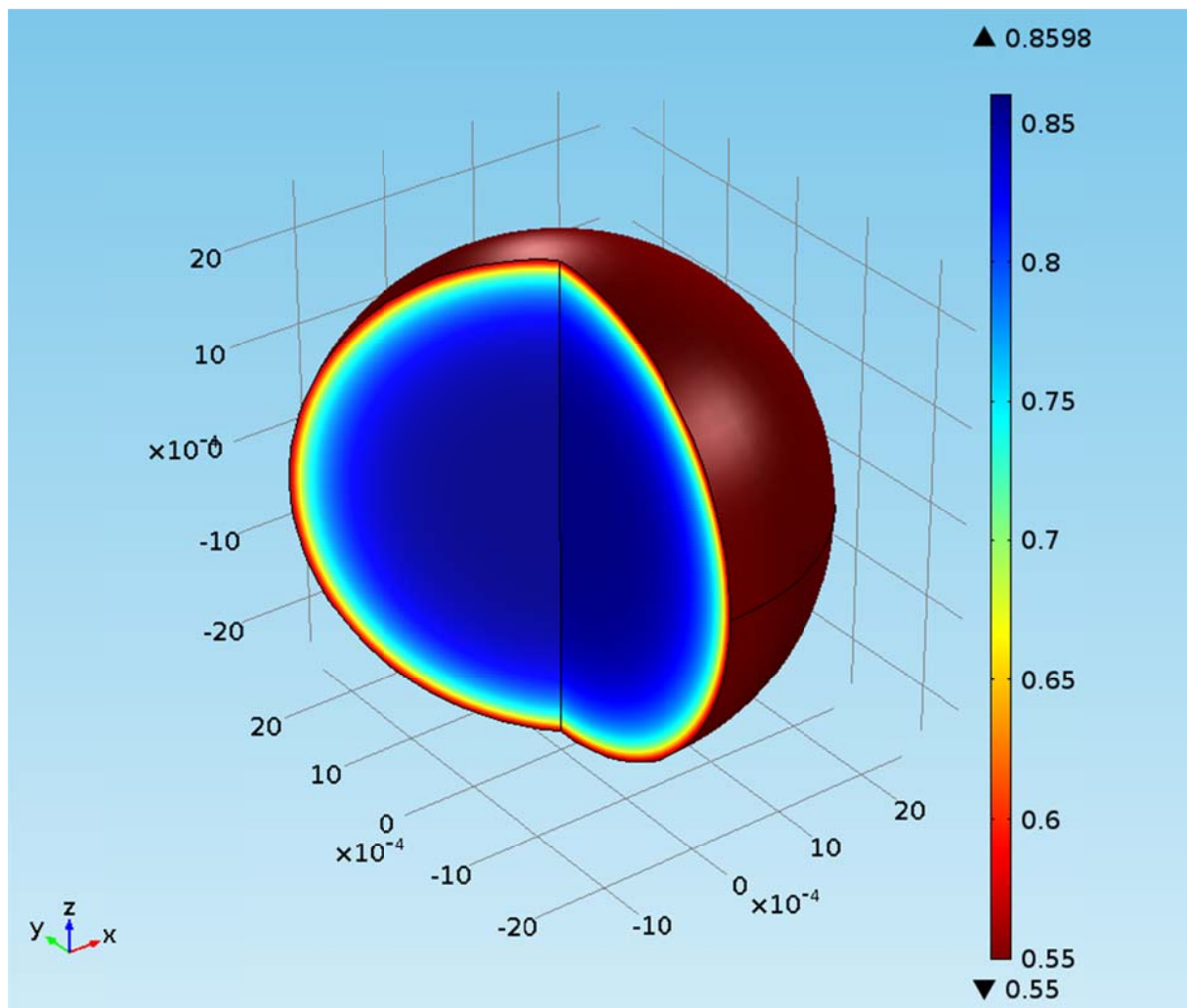
6 Uttorkning av uttaget prov

Temperatur- och fukttransportmodellen beskriven i kapitel 2, har också utnyttjats för att simulera uttorkning av ett uttaget prov med olika geometrisk utformning. Förutsättningarna för beräkningen är att övergångsmotstånd inte är inkluderat i modellen. Fukttransport sker genom ren diffusion; ingen konvektiv term. Startvillkor för provkroppen är 86% RF och randvillkoret är 55% RF respektive 1% RF i omgivande luft. Temperaturen är konstant 20 °C. Dessa båda randvillkor är satta för att efterlikna olika torkklimat och två olika drivkrafter. Det första randvillkoret, 55% RF, motsvarar en drivkraft med en ånghaltsskillnad av 5 g/m³ och det andra randvillkoret, 1% RF, motsvarar en drivkraft av 15 g/m³ i ånghaltsskillnad.

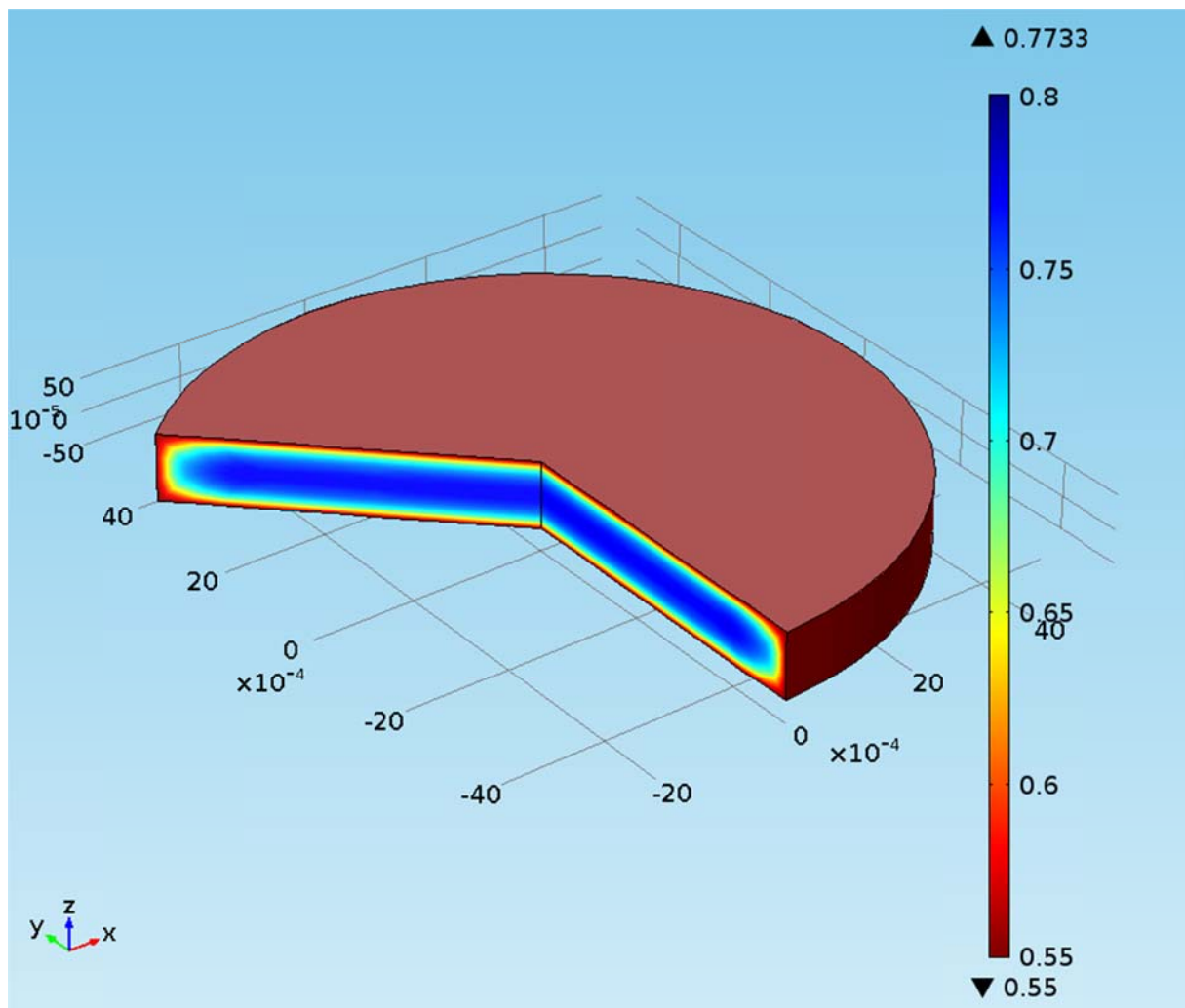
6.1 Beskrivning av geometri och egenskaper

Betongvolymen utformades som tre olika regelbundna geometriska former. Ett uttaget prov består av dels ballast (sten) och cementpasta och är väldigt oregelbundet i formen. Proverna som är simulerade är betraktade som homogena och innehåller därmed den mängd vatten som ska finnas i provkroppen teoretiskt. Ballastandelen i en uttagen provkropp kan variera mycket och är svår att kontrollera i provtagningsögonblicket. Därmed är det också svårt att veta om tillräcklig mängd cementpasta har kommit med.

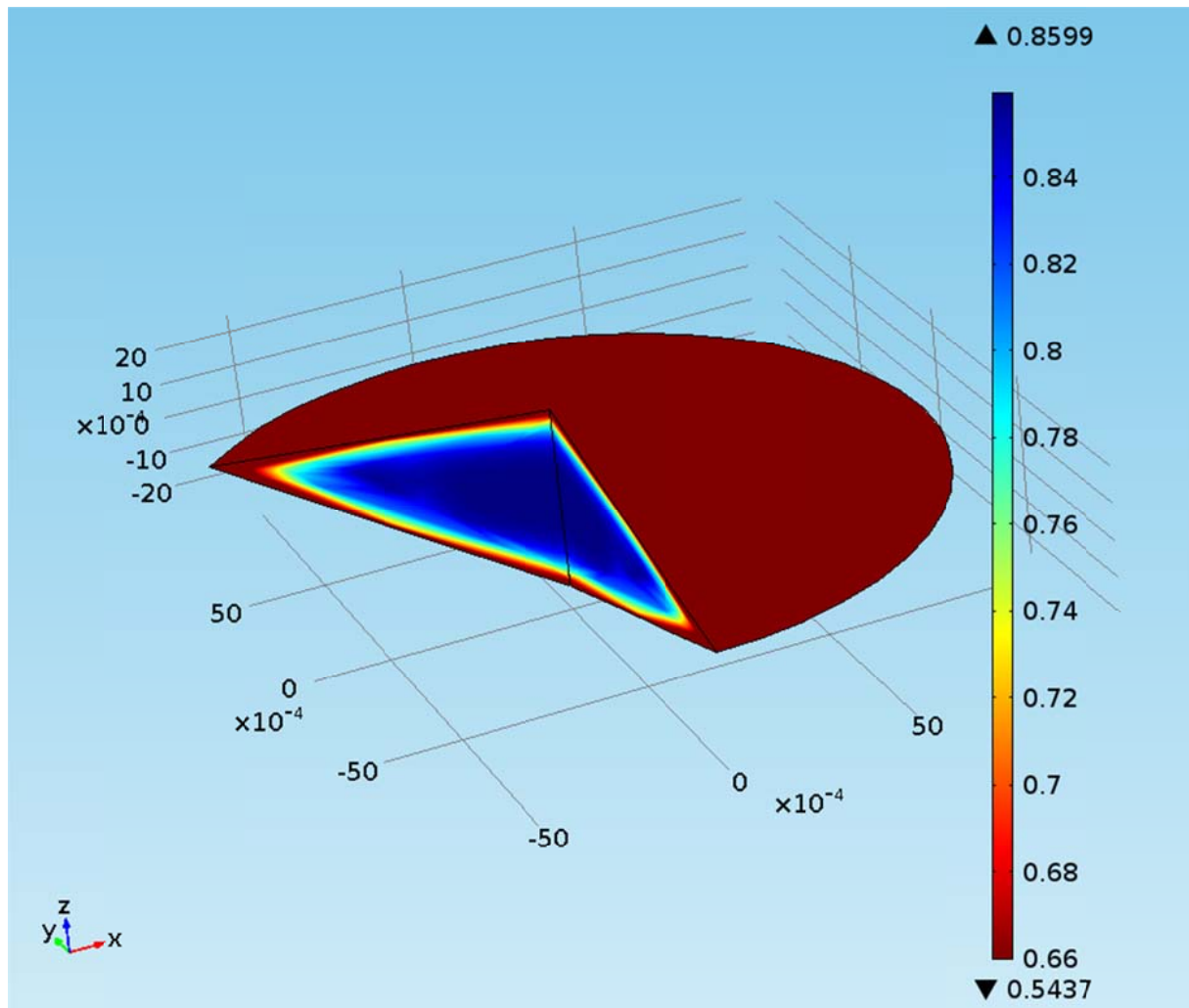
Genom att göra simuleringar för ett flertal regelbundna former är det möjligt att uppskatta storleksordningen på den uttorkning som sker innan provet hamnar i provröret. Simuleringar har utförts på tre olika geometriska former med olika geometrier; klot(sfär), cylinder och diskus, se Figur 42-Figur 44.



Figur 42. RF fördelning i sfärisk provkropp efter 600 sekunder.



Figur 43. RF fördelning i cylindrisk provkropp efter 600 sekunder.

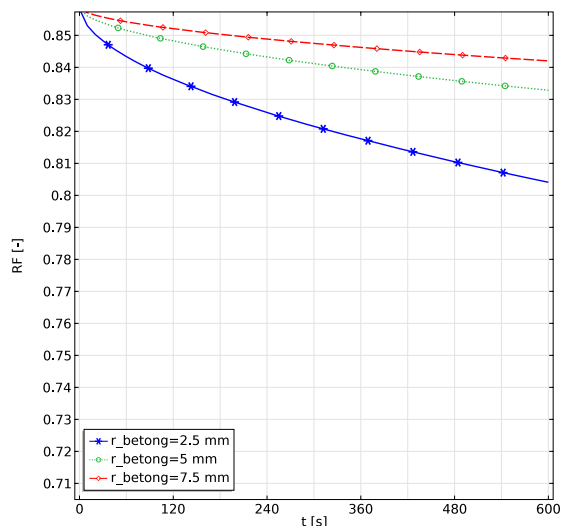


Figur 44. RF fördelning i diskusformad provkropp efter 600 sekunder.

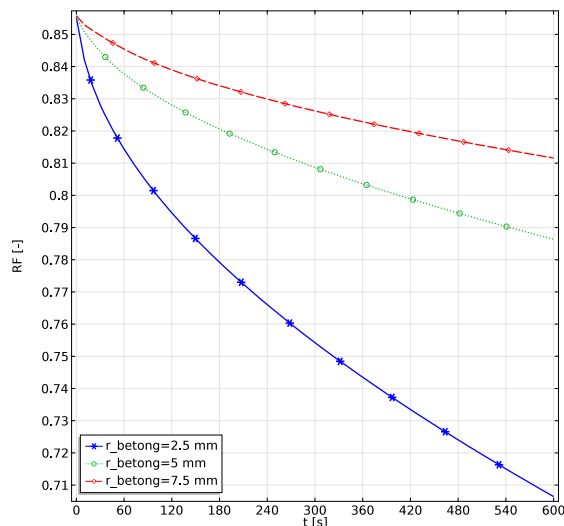
En parameterstudie har utförts på dessa geometriska utformningar av det uttagna provet genom att förändra radien på klotet respektive tjockleken på cylindern och tjockleken på centrum på diskusarna. Radien på cylindern har satts till 5 mm och radien på diskusen har satts till 10 mm

6.2 Resultat sfär

Simuleringsresultaten för klotet med olika radie och drivkraft visas i Figur 45 och Figur 46.



Figur 45. Medel RF i sfärisk, rund, provkropp, uttorkning i 55% RF motsvarar en drivkraft av cirka 5 g/m³ ånghaltsskillnad.



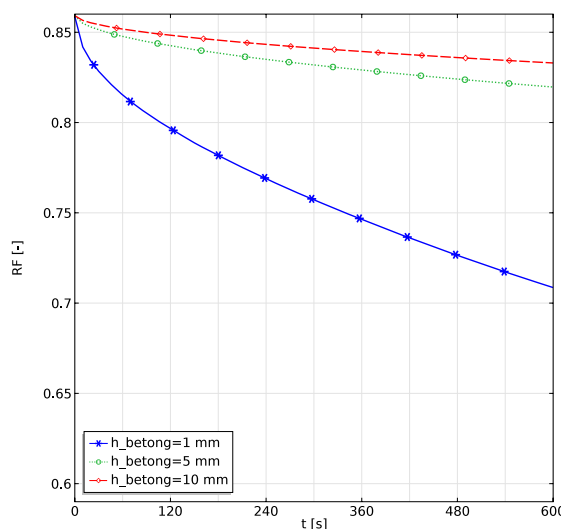
Figur 46. Medel RF i sfärisk, rund, provkropp, uttorkning i 1% RF motsvarar en drivkraft av cirka 15 g/m³ ånghaltsskillnad.

På x-axeln visas tiden i sekunder och på y-axeln visas fuktigheten i betongen i medel-RF [-] i decimaltal. De olika linjerna visar resultatet för olika radie; 2,5 mm, 5 mm och 7,5 mm.

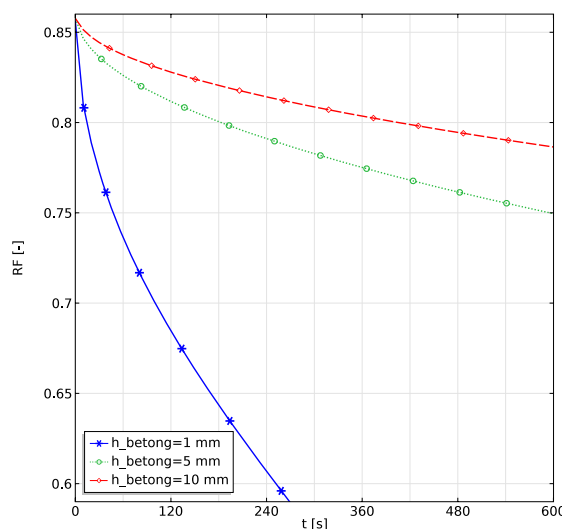
Kopplingen mellan uttorkning och radie är tydlig, där den största uttorkningen sker på små provbitar och effekten är väldigt tydlig då drivkraften ökar. En liten sfär med radien 2.5 mm torkar cirka 1%-enheter RF redan efter 30 sekunder med 55% RF i omgivande klimat. För en provkropp med en 3 gånger större radie, 7,5 mm, tar samma uttorkning 180 sekunder (3 minuter). För samma situation men med 1% RF i omgivningen torkar provet med 2.5 mm diameter 3%-enheter RF på 30 sekunder och för ett klot med 7,5 mm radie, cirka 240 sekunder (4minuter).

6.3 Resultat cylinder

Simuleringsresultaten för de cylindriska provkropparna med olika höjd och drivkraft visas i Figur 47 och Figur 48.



Figur 47. Medel RF i cylindrisk provkropp, radie 10 mm, uttorkning i 55% RF motsvarar en drivkraft av cirka 5 g/m³ ånghaltsskillnad.

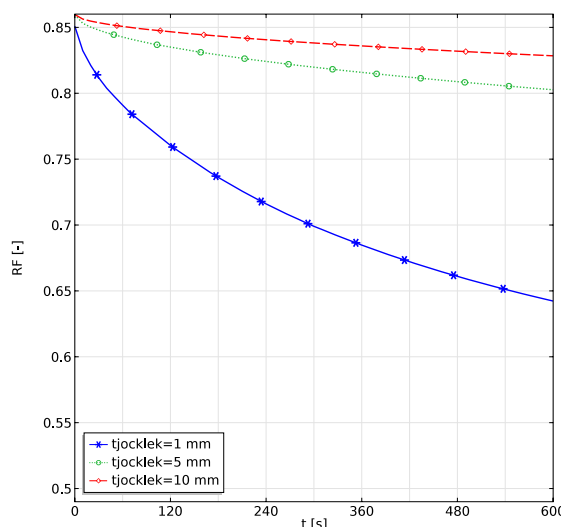


Figur 48. Medel RF i cylindrisk provkropp, radie 10 mm, uttorkning i 1% RF motsvarar en drivkraft av cirka 15 g/m³ ånghaltsskillnad.

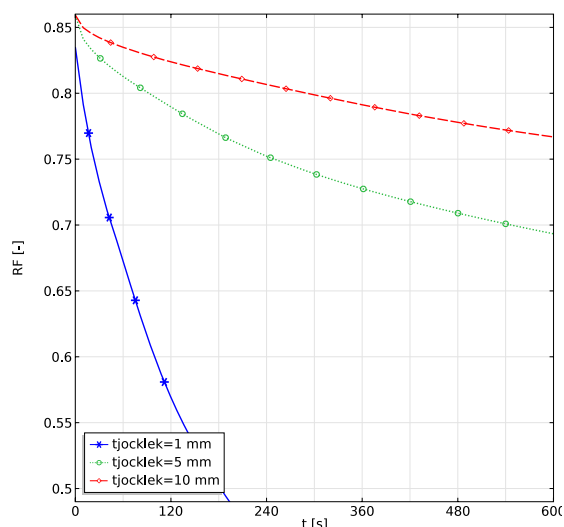
På x-axeln visas tiden i sekunder och på y-axeln visas fuktigheten i betongen i medel-RF [-] i decimaltal. De olika linjerna visar resultatet för olika höjder på cylindern; 1 mm, 5 mm och 10 mm. Kopplingen mellan uttorkning och höjden är tydlig, där den största uttorkningen sker på tunna provbitar med liten höjd och effekten är väldigt tydlig då drivkraften ökar. En cylinder med höjden 1 mm torkar cirka 3%-enheter RF redan efter 30 sekunder med 55% RF i omgivande klimat. För en provkropp med en 10 gånger tjockare provkropp, 10 mm, tar samma uttorkning drygt 600 sekunder (mer än 10 minuter). För samma situation men med 1% RF i omgivningen torkar provet med 1 mm höjd, till 78 % RF, d.v.s. 8%-enheter lägre RF på 30 sekunder. För en cylinder med 10 mm tjocklek tar samma uttorkning drygt 600 sekunder (>10 minuter).

6.4 Resultat diskus

Simuleringsresultaten för de diskusformade provkropparna med olika tjocklek och drivkraft visas i Figur 49 och Figur 50.



Figur 49. Medel RF i diskusformad provkropp, radie 10 mm, uttorkning i 55% RF motsvarar en drivkraft av cirka 5 g/m³ ånghaltsskillnad.



Figur 50. Medel RF i diskusformad provkropp, radie 10 mm, uttorkning i 1% RF motsvarar en drivkraft av cirka 15 g/m³ ånghaltsskillnad.

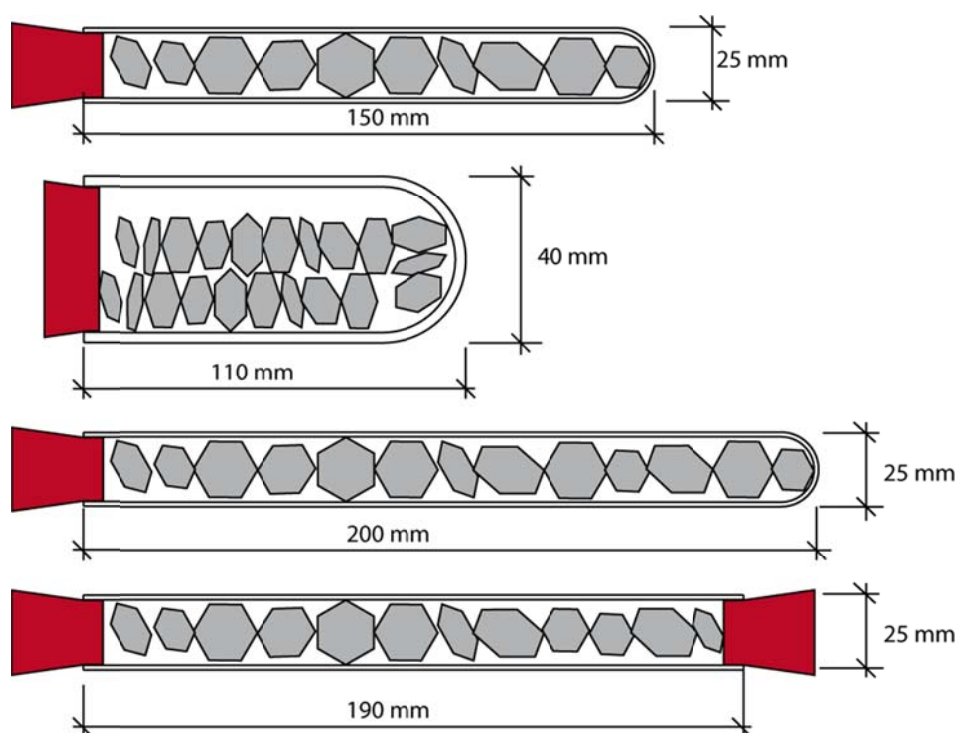
På x-axeln visas tiden i sekunder och på y-axeln visas fuktigheten i betongen i medel-RF [-] i decimaltal. De olika linjerna visar resultatet för olika tjocklek för den diskusformade provkroppen; 1 mm, 5 mm och 10 mm. Kopplingen mellan uttorkning och höjden är tydlig, där den största uttorkningen sker på tunna provbitar med liten tjocklek och effekten är väldigt tydlig då drivkraften ökar. En diskus med höjden 1 mm torkar drygt 4%-enheter RF redan efter 30 sekunder med 55% RF i omgivande klimat. För en provkropp som är 10 gånger tjockare, 10 mm, tar samma uttorkning drygt 600 sekunder (mer än 10 minuter). För samma situation men med 1% RF i omgivningen torkar provet med 1 mm höjd till 72% RF, 14%-enheter RF lägre än RF vid beräkningsstart, på 30 sekunder och för en cylinder med 10 mm tjocklek drygt 600 sekunder (>10 minuter).

7 Mätning av provmängd och läckage från behållare för uttaget prov

Mängden prov i ett rör har en avgörande betydelse för hur stor mängd fukt som finns att tillgå när mätningen ska ske. Om mängden fukt i provet är stort så minskar felet som uppstår då mätningen utförs. Felet beror på att fukt omfördelas mellan prov och fuktsensor. Om sensorn är torrare, har en lägre RF, än provet tas fukt från provet och då kommer sensorn att registrera en fuktighet som är lägre än vad som verkligen är fallet. Huvuddelen av fukt finns i provet, men mängden fukt för betong med $v_{ct} < 0,38$ är liten. Därför är det viktigt att fylla provröret så långt det är möjligt för att minimera felet.

Läckage kan naturligtvis också ha en stor inverkan på resultatet från en fuktmätning i ett uttaget prov. Läckaget kan bli stort om förslutningen, gummikorken, inte sluter tätt an mot provröret eller om ytan som gummikorken ansluter mot är rå, jämför täthet gummikork mot sandpapper med gummikork mot slät glasyta.

Provmängden och läckaget mättes genom praktiska försök i de provrör som används i fält, se Figur 51.



Figur 51. Fyra olika provrör som används i fält. De tre översta är gjorda av glas och den understa är gjort av plast.

Metoden för att bestämma provmängden redovisas i avsnitt 7.1. Metoden för att bestämma läckaget redovisas i avsnitt 7.2.

7.1 Mätning av provmängd

Mängden prov som ryms i en försluten behållare bestämmer till stor del den totala mängden fukt som finns tillgänglig för omfördelning mellan luft, material och RF sensor. Fukt finns också bunden i sensorn och i luften. Luftens bidrag är litet. Sensorns bidrag till fuktmängden är beroende av utformning, materialegenskaper och fuktighet vid montage och måste bestämmas för varje enskild sensor. Dessutom är fuktkapaciteten hos betong, sensor och luft av avgörande betydelse.

För att bestämma mängden prov som ryms i ett provrör, fylldes ett provrör upp med provbitar av betong så att den sista provbiten tangerade gummikorken, se Figur 51. Sedan fylldes utrymmet mellan betongbitar och provrör med vatten. Skillnaden i massa ger volymen luft. Volymen av det tomma provröret bestämdes genom att fylla det tomma provröret med vatten upp till samma nivå som gummikorken och bestämma volymen för vattnet. Till sist bestämdes volymandelen betong genom att dela betongvolymen med det tomma provrörets volym. Betongen vägdes för sig för att bestämma skrymdensiteten för varje prov.

7.2 Mätning av läckage

Läckaget bestämdes genom att placera samtliga provrör i 55% RF under 2 månaders tid, 61 dygn. Vägning skedde före och efter och massan, vikten, i gram noterades. RF mättes i samtliga provrör med betongprov, för att säkerställa att läckagebedömningen utfördes vid en rimlig RF nivå.

Fuktigheten i provrören bestämdes efter läckagetest till mellan 74% RF och 80% RF. Den aktuella relativa fuktigheten har betydelse för att bestämma läckagemängd vid en praktisk RF nivå, som kan anses ligga mellan 80% RF och 90% RF. RF i det aktuella faller ligger ungefär 10-15 % under en praktisk nivå. Detta innebär att praktiskt läckage är större än i det här testet. Aktuell RF har också betydelse för att bedöma fuktkapaciteten för betong och därmed den beräknade RF sänkningen.

I Tabell 1 redovisas mätresultat för provrör av glas med olika utformning förslutna med en gummikork. I Tabell 2 redovisas mätresultat för ett halvfullt och ett fullt provrör av plast förslutna med två gummikorkar.

Tabell 1. Resultat från mätning av fyllnadsgrad och läckage för provrör av glas med en förslutningskork, enheter anges längst till höger.

	Glas			Enhet
	Grovt provrör	Kort provrör	Långt provrör	
Innerdiameter	33	22	22	mm
Betong	63,395	31,456	54,304	g
Provrör+betong	199,423	72,847	102,834	g
Provrör+betong+vatten	253,463	108,376	151,486	g
provrör+vatten	215,533	89,804	119,418	g
Massa provrör	136,028	41,391	48,53	g
Massa vatten	79,505	48,413	70,888	g
Volym vatten i tomt provrör	0,000079505	0,000048413	0,000070888	m ³
Massa vatten i provrör inkl btg	54,04	35,529	48,652	g
Volym vatten (=luft) i provrör inkl btg	0,00005404	0,000035529	0,000048652	m ³
Volym betong	0,00002547	0,00001288	0,00002224	m ³
Densitet betong	2489,50	2441,48	2442,17	kg/m ³
Volymandel betong	0,32	0,27	0,31	-
Massa före uttorkning i 55% RF	199,429	73,028	102,671	g
Massa efter uttorkning i 55% RF	199,422	73,026	102,669	g
Viktförlust	0,007	0,002	0,002	g
Beräknad uttorkning i RF				
ΔW fukthaltsförlust(kg/m ³)	0,275	0,155	0,090	kg/m ³
Fuktkapacitet	300	300	300	kg/m ³
W/fuktkapacitet	0,00092	0,00052	0,00030	-
RF förlust i procentenheter	0,09	0,05	0,03	%

Resultatet av undersökningen visar att volymandelen betong är mellan 27 och 32 % av totalvolymen i provröret, oavsett provrörets utformning.

Viktförlusten vid läckagetestet är mellan 0,002 gram och 0,007 gram. Detta innebär att RF minskar mellan 0,03% RF och 0,09 % RF efter 61 dygns test om fuktkapaciteten antas vara 300 kg/m³. Normalt sett sker mätning på uttaget prov under 2 dygn men det är tillåtet att slutföra mätningen inom 10 dygn. Om viktförlusten sker med konstant hasighet innebär det att viktförlusten är cirka 1/30 del av redovisat läckage under 2 dygn och att sänkningen i RF i så fall är försumbar för glaströr. Om tiden mellan provtagning till avläsning är 10 dygn är viktförlusten cirka 1/6 del av redovisat läckage. Även efter 10 dygn är sänkningen i RF försumbar. Glasrören vägdes också 1 dygn efter att dessa förslutits. En viktförlust upptäcktes då. Därför trycktes gummikrokarna in hårdare i glasprovrören för att minska läckaget. Trots denna åtgärd läckte ett av provrören 0,002 gram. Den totala viktförlusten inkluderar all viktförlust från start till slut.

Tabell 2. Resultat från mätning av fyllnadsgrad och läckage för rör av plast med två förslutningskorkar, enheter anges längst till höger.

	Plast		Enhet
	Plaströr	Plaströr	
Innerdiameter	22	22	mm
Betong	27,548	43,485	g
Provrör+betong	86,855	102,493	g
Provrör+betong+vatten	133,54	142,607	g
provrör+vatten	116,802	116,209	g
Massa provrör	59,307	59,008	g
Massa vatten	57,495	57,201	g
Volym vatten i tomt provrör	0,000057495	0,000057201	m ³
Massa vatten i provrör inkl btg	46,685	40,114	g
Volym vatten (=luft) i provrör inkl btg	0,000046685	0,000040114	m ³
Volym betong	0,00001081	0,00001709	m ³
Densitet betong	2548,38	2544,92	kg/m ³
Volymandel betong	0,19	0,30	-
Massa före uttorkning i 55% RF	86,922	102,531	g
Massa efter uttorkning i 55% RF	86,895	102,502	g
Viktförlust	0,027	0,029	g
Beräknad uttorkning i RF			
ΔW fukthaltsförlust(kg/m ³)	2,498	1,697	kg/m ³
Fuktkapacitet	300	300	kg/m ³
W/fuktkapacitet	0,00833	0,00566	-
RF förlust i procentenheter	0,83	0,57	%

Resultatet av undersökningen visar att volymandelen betong är 19 % vid ett halvfullt provrör och 30 % av totalvolymen i ett fullt provrör.

Viktförlusten vid läckagetestet är mellan 0,027 gram och 0,029 gram. Detta innebär att RF minskar mellan 0,83% RF och 0,57 % RF efter 60 dygns test om fuktkapaciteten antas vara 300 kg/m³. Normalt sett sker mätning på uttaget prov under 2 dygn. Om tiden mellan provtagning till avläsning ökar till 10 dygn är viktförlusten cirka 1/6 del av redovisat läckage. Även då är sänkningen i RF försumbar, maximalt 0,1% RF. Om viktförlusten sker med konstant hasighet innebär det att viktförlusten är cirka 1/30 del av redovisat läckage under 2 dygn och att sänkningen i RF i så fall är försumbar även för plaströr.

Observera att gummikorkarna trycktes in väldigt hårt i plexiglasrören samtidigt som gummikorken vreds om. Detta gjordes för att säkerställa att gummikorken slöt tätt mot plexiglasröret. Provrören av plexiglas fylldes med betongprov en dag efter glaströren fyllts med betongprov. Kontrollvägnings skedde med provrören av glas en dag efter provtagning och då upptäcktes en stor viktförlust. Gummikorkarna för glaströren trycktes då in ytterligare men försiktigt för att inte spränga sönder provröret. För att undvika ett stort läckage även på provrören av plexiglas, trycktes gummikorken in med stor kraft samtidigt som korken vreds om.

8 Diskussion och slutsatser

8.1 Simulering av borrhålsmätning

Resultatet från simuleringen av borrhålsmätning med HumiGuard-sensorn visar att fuktigheten i sensorn blir 86,0% RF vid avläsning 2 dygn efter tredje återmontaget om fuktigheten i betongen är 86% RF från början. Det innebär att fuktkapaciteten för HumiGuard-sensorn är så låga att den visar aktuell fuktighet för betongkonstruktionen. Vidare visar simuleringen att det råder jämvikt i systemet luft, sensor och betongytan i borrhålet eftersom kurvorna som visar relativ fuktighet i sensorn, se Figur 20 i avsnitt 4.1.2, är i princip horisontella precis innan avläsning. Om kurvorna hade haft en tydlig lutning uppåt, dvs fuktigheten hade ökat med tiden skulle jämvikt inte kunna anses råda.

Simuleringarna av fuktmätning i borrhål med Vaisala HMP44 visar att fuktigheten blir 85,8% RF vid avläsning 2 dygn efter tredje återmontaget om fuktigheten i betongen är 86% RF från början. Det innebär att HMP44 visar en lägre fuktighet än den verkliga, skillnaden är cirka ,2% RF. Eftersom RF i sensorn ökar med tiden så råder inte jämvikt mellan komponenterna betong, luft och sensor, se Figur 25 i avsnitt 04.2.2. Det innebär att det pågår en omfördelning mellan dessa komponenter som inte riktigt är avslutad.

Simuleringarna av fuktmätning i borrhål med Testo 605-H1 **med tejp** visar att fuktigheten blir 85,7% RF vid avläsning 2 dygn efter tredje återmontaget om fuktigheten i betongen är 86% RF från början. Det innebär att Testo 605-H1 **med tejp** visar en lägre fuktighet än den verkliga, skillnaden är cirka 0,3% RF. Eftersom RF i sensorn ökar med tiden så råder inte jämvikt mellan komponenterna betong, luft, sensor och tejp, se Figur 26 i avsnitt 4.2.3. Det innebär att det pågår en omfördelning mellan dessa komponenter som inte riktigt är avslutad 2 dygn efter sensormontage. Simuleringarna för Testo 605-H1 **utan tejp** visar att fuktigheten blir 85,8% RF efter tredje återmontaget vilket innebär att skillnaden från betongkonstruktionens RF är 0,2% RF. Tejpen har en marginell påverkan på mätresultatet vid borrhålsmätning.

Detta innebär att HMP44, visar en lägre RF än HumiGuard-sensorn vid samma förhållanden i övrigt. En anledning är att sensorn antas ha en fuktighet på 55% RF vid montage, en annan anledning är att fuktkapaciteten är högre än för HumiGuard.

Simuleringarna tyder på att fuktflödet från betong till sensor via luften har betydelse och att det kan lång tid till dess att fuktjämvikt råder.

Diffusionskoefficienten för betong är beräknad med en modell och resultatet från modellen är kontrollerat mot mätdata. Fukttransport i sensorn styrs av diffusionskoefficienten och är antagen att vara hög, vilket innebär att responsen från sensorn av en fuktändring sker snabbt. Detta visar sig också i simuleringarna, där en övervägande del av förändringen sker under det första dygnet efter montage.

Fuktkapaciteten för sensorerna är generellt sett låg, vilket har visats med laboratorieförsök. Vid en borrhålsmätning är det fuktigheten i betongen som bestämmer RF och inte fuktkapaciteten i

sensorn. Fukttransporten mellan betong, luft och sensor är det som bestämmer hur lång tid som krävs för att uppnå jämvikt. Eftersom en stor del av förändringen har skett efter två dygn blir slutsatsen att RF är lite lägre på grund av att fukten inte har utjämnats tillräckligt. Skillnader i temperatur mellan sensor, betong och luft och dess eventuella påverkan på mätningen har inte retts ut i den här simuleringen. En anledning till detta är att det inte finns några mätdata för temperatur och RF vid borrningstillfället att jämföra med.

Sammantaget innebär detta att sänkningen av RF både beror på att jämvikt inte råder efter 2 dygns utjämnningstid och att fuktkapaciteten hos sensorn har betydelse.

8.2 Simulering av uttaget prov

Resultatet från simuleringarna från uttaget prov med Vaisala HMP44 visar att fuktigheten i sensorn två dygn efter tredje sensormontaget är 85,1% RF för hel provmängd och i princip samma vid halv provmängd 85,1% RF. En RF avläsning 1% RF under det aktuella har självfallet stor betydelse, och kan inte anses försumbar. Däremot så är fuktigheten i sensorn cirka 85,5% RF 2 dygn efter första sensormontaget, vilket är ett bättre resultat. Både i fallet med hel och halvprovsmängd råder inte riktigt fuktjämvikt mellan komponenterna betong, sensor och luft. RF ökar fortfarande med tiden två dygn efter sensormontage.

Resultatet från simuleringarna med Testo 605-H1 **med tejp** visar att sensorn har en fuktighet av 84,7% RF två dygn efter det tredje sensormontaget för hel provmängd och 84,6% RF vid halv provmängd. Även i det här fallet innebär omfördelningen av fukt att fuktigheten i sensorn stiger när fukt tas upp från betongprovet. Avläst RF är i det här fallet cirka 1.3% RF lägre än det verkliga vilket är en större skillnad än i fallet för Vaisala HMP44. När simuleringen genomförs med Testo 605-H1 **utan tejp** blir avläst värde 85,6% RF vilket innebär att avläsningen är 0,2% under betongens aktuella RF två dygn efter montaget. I fallet där tejp är med i simuleringen så har inte fuktjämvikt uppnåtts 2 dygn efter sensormontage, däremot så råder det i princip fuktjämvikt efter 2 dygn när tejp utesluts.

Dock är det så att oavsett hur lång tid sensorn är monterad så kommer RF i sensorn att vara lägre än ursprunglig RF i betongprovet, givet att sensorn är mindre fuktig än betongprovet som stoppas i provröret. Det är en direkt följd av att fukt från betongprovet kommer att tas upp av sensorn, om sensorn är torrare än betongen, vilket innebär en uttorkning av betongen från ursprunglig nivå. Uttorkningen blir större om fuktkapacitet hos mätsensorn är hög.

Den stora skillnaden mellan uttaget prov och borrhålmätningen är att fuktmängden är begränsad eftersom betongmängden är begränsad. Dock pekar simuleringen på att det inte verkar ha någon stor betydelse att provmängden minskar till hälften om avläsningen sker 48 timmar efter montage. Däremot blir det skillnad om avläsningen sker 10 dygn efter för då märks den begränsade betongmängden tydligare. Vid hel provmängd och Testo605-H1 blir avläst RF maximalt 85,6% medan den blir 85,2% RF vid halv provmängd, se Figur 36 och Figur 37.

Inte heller i den här simuleringen är det fuktflödet från betong till sensor via luft som verkar vara den avgörande faktorn till att jämvikt inte råder utan det är snarare en följd av fuktkapaciteten hos sensorn.

Diffusionskoefficienten för betong är i simuleringen för uttaget prov är likadan som i borrhålssimuleringen, men geometrin skiljer sig åt väsentligt. Betongens exponerade yta mot luft samt volymförhållandet mellan luft sensor och betong, skiljer från borrhålsmätningen. Dessa faktorer ger inte någon stor skillnad i tid till jämvikt. Det innebär att även i det här fallet är det inte fuktflödet från betongen och tid till jämvikt som är betydelsefullt och ger ett lägre RF efter 2 dygn.

Här visar simuleringarna att det är fuktkapaciteten hos fuktsensorn som har störst betydelse och inte att ett lågt mätresultat beror på att jämvikt inte har ställt in sig.

8.3 Uttorkning av uttaget prov

Simuleringarna visar att fuktförlusten vid uttaget prov kan bli stor om provbitarna är små och är utsatta för låg fuktighet i 30 sekunder från uttagningstiden till provet placerats i ett provrör som sedan förseglas. Fuktigheten kan vid ogynnsamma omständigheter sjunka med 10 %-enheter, från till exempel 86% RF till 76% RF, vilket naturligtvis påverkar mätresultatet oerhört mycket.

Tiden från uttagningstillfälle, för respektive provbit, till det att provbiten placerats i ett provrör som förslutits får maximalt vara 30 sekunder enligt RBK-systemets regler. Den tidsgränsen kan vara för lång om provet är litet och om provet också blir varmare än omgivningen av provtagningsförfarandet. Om provet blir varmare ökar drivkraften mellan betong och omgivning vilket innebär att uttorkningshastigheten ökar och tiden mellan provtagning och försluten behållare får större betydelse. Storleken på varje provbit måste minst vara 5 mm. Vad måttet avser är inte definierat.

8.4 Bestämning av provmängd i provrör och läckage från provtagningsbehållare

Provmängden för uttaget prov i de olika behållarna mättes upp och resultatet blev mellan 11 och 27 cm³. Kravet på provmängden enligt RBK-systemet är att provröret ska vara fyllt med minst 15 cm³ och till minst halva rörets längd. Vid uppmätningen var volymen 13 cm³, i det korta provröret av glas, när det var helt fyllt med betongprover, vilket är i underkant jämfört med kravet.

8.5 Läckage från provtagningsbehållare

Mätningen av läckage visar att läckage sker från provrör i plast, men att det inte påverkar resultatet av en fuktmätning om mätningen avslutas inom 10 dagars tid från provtagning. Ett läckage kan däremot bli stort om korken inte trycks in ordentligt i provröret eller om det hamnar borrhål mellan gummikork och rörvägg. Detta hände med glasprovrören. Detta kan också hända med plexiglasrören som har två gummikorkar, en i vardera änden. När den sista korken trycks in så kan den första tryckas ut.

8.6 Rekommenderad mätmetod utifrån simuleringar

Den mätmetod som ger bäst resultat i simuleringarna och därmed är tillförlitligast är borrhålsmätning. Det främsta skälet till detta är att hela betongbjälklaget/plattan är ett fuktmagasin som är mycket stort i jämförelse med den begränsade mängd som kan utvinnas i ett uttaget prov. Det är också en risk att de uttagna proven hinner torka innan de läggs i det förslutna provröret, speciellt om de är tunna och har en hög ballastandel. Den mätsensor som ger bäst mätresultat i borrhålsmätningar är Humi-Guard-sensorn. Skälen till detta är att Humi-Guard-sensorn har lägst uppmätt fuktkapacitet och den är också reaktionssnabb och det avlästa värdet stämmer överens med aktuellt fuktighet i mätområdet.

Den rekommenderade tiden från montage av sensor till avläsning av RF är 48 timmar idag oavsett borrhål eller uttaget prov. De utförda simuleringarna tyder på att tiden till fuktjämvikt är längre än den rekommenderade för uttaget prov. Simuleringarna visar att det finns anledning att öka tiden mellan montage av sensor och avläsning. Den förhållandevis mindre luftmängden i en borrhålsmätning innebär att systemet luft/sensor/betong kommer i fuktjämvikt betydligt snabbare än vid uttaget prov. Den lilla exponerade ytan betong vid en borrhålsmätning verkar ha låg påverkan på mätningen.

9 Förslag på framtida forskning

Den här simuleringsstudien har enbart berört fukttransport vid isoterma förhållanden. Det innebär att den initiala temperaturhöjningen som sker vid uttaget prov och borrhålsmätning inte har beaktats i simuleringarna. Den främsta anledningen är att det saknas tillförlitliga mätningar av temperaturberoendet hos fuktegenskaper och det behövs för att simulera omfördelning av fukt när temperaturen inte är konstant och stabil. Det krävs stora resurser och mycket tid att mäta temperaturberoendet hos ingående materials och komponenters fuktegenskaper som behövs som ingångsdata till simuleringarna. Det vore därför önskvärt att reda ut hur temperaturen inverkar på fuktmätningen och hur stor betydelse det har på mätresultatet.

En simulering av temperaturens inverkan på en mätning måste också kunna valideras mot en mätning. Det är också en svårighet då det är svårt att mäta RF vid tempertursvängningar och det är också svårt att mäta temperaturen i trånga borrhål och provrör utan att påverka/störa fukttransportprocesserna.

Hydratationens inverkan på fuktmätningen har inte utvärderats trots att den finns med i den matematiska formuleringen och därmed även i simuleringen. Anledningen till detta är att hydratationsgraden och skillnader i denna inte mättes i SBUF-projekt 12656. Det är således inte möjligt att kontrollera effekten av hydratationen i det här projektet. Det vore intressant att undersöka hur pågående hydratation påverkar en fuktmätning i ett framtida projekt.

10 Referenser

- Byfors, J. 1980. *Plain concrete at early ages*. PhD, Royal institute of technology.
- Nilsson, L. O. 1994. *Betonghandbok: Material, utgåva 2, Kapitel 14 Fukt och betong*, Svensk byggtjänst.
- Norling Mjörnell, K. 1997. *Moisture Conditions in High Performance Concrete. Mathematical Modelling and Measurements*. Institutionen för byggnadsmaterial, Chalmers tekniska högskola.
- Åhs, M. 2011. *Redistribution of moisture and ions in cement based materials*. Div. of Building Materials, Lund University.