LUND UNIVERSITY

Ingjuten sensor för mätning av uttorkningsförlopp : beräkning av inverkan av sensorns dimension och orientering - Sensobyg - delprojekt D4

Nilsson, Lars-Olof; Fredlund, Per

2009

Link to publication

Citation for published version (APA):
Nilsson, L.-O., & Fredlund, P. (2009). *Ingjuten sensor för mätning av uttorkningsförlopp : beräkning av inverkan av sensorns dimension och orientering - Sensobyg - delprojekt D4*. (TVBM (Intern 7000 -rapport); Vol. 7198). 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

LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA
LUNDS UNIVERSITET

Avd Byggnadsmaterial

Ingjuten sensor för mätning av uttorkningsförlopp – beräkning av inverkan av sensorns dimension och orientering

Sensobyg – delprojekt D4

Lars-Olof Nilsson & Per Fredlund

Rapport TVBM-7198 Lund 2009

ISRN: LUTVDG/TVBM--09/7198--SE (1-14)

ISSN: 0348-7911 TVBM

Lunds Tekniska Högskola
Byggnadsmaterial
Box 118

221 00 LUND

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

Förord

Inom projektet Sensobyg, ”Sensorbaseret overvågning i byggeriet”, har Avd Byggnadsmaterial vid Lunds Tekniska Högskola genomfört en studie inom delprojektet D4 ,”Fugt i byggefasen, för att kvantifiera effekten av olika storlek och orientering av en fuktsensor vi övervakning av ett uttorkningsförlopp. Detta har gjorts med hjälp av FEM-beräkningar i 3D för några olika fall. De första beräkningsresultaten har påverkat utformningen och orienteringen av den fuktsensor som tagits fram inom Sensobyg.

Beräkningarna har i huvudsak utförts av Per Fredlund.

Sammanfattning

FEM-beräkningar i 3D har använts för att kvantifiera effekten av hur en fuktgivare placeras vid övervakning av ett uttorkningsförlopp. I beräkningarna har en behållare innehållande elektronik, fuktsensor, batteri och antenn beskrivits. Behållaren har en liten öppning på ena sidan som utgör kontakten mellan fuktsensorn och den torkande betongen. Behållaren placeras så att denna öppning finns på ett visst mätdjup, 40 mm i en 100 mm tjock betongplatta som torkar på ett håll.

I beräkningarna har prövats olika storlek, olika form och olika orientering av behållaren. Fuktfördelningen i 3D har beräknats och utvärderats genom att beräknad RF på mätdjupet 40 mm intill öppningen respektive på stort avstånd från denna har jämförts.

Om en behållare med fuktsensor placeras med öppningen på undersidan blir det systematiska mätfelet mycket stort, mer än 10 % RF om behållaren är 50 mm stor. Om sensoröppningen däremot placeras på sidan av behållaren blir det systematiska mätfelet mycket litet. Med de dimensioner som prövats, och som överensstämmer med en aktuell prototyp, blir felet ca 0.4 % RF. Detta systematiska fel är dock så stort att det måste korrigeras för i den slutliga mätproceduren.

Summary

FEM-calculations in 3D have been used to quantify the effect of how a threadless moisture probe is placed when following a drying-out process. In the calculations a container with electronics, moisture sensor, battery and antenna has been described. The container has a small opening on one side which is the connection between the sensor and the drying concrete. The container is placed in such a way that this opening always is at a measuring depth of 40 mm in a 100 mm thick concrete slab that dries in one direction.

In the calculations different sizes, shapes and orientation of the container have been tested. The moisture distribution in 3D has been calculated and analyzed by comparing the predicted RH at the depth of 40 mm close to the opening and at a large distance, respectively.

If a container with a moisture sensor is placed with the opening at the bottom side, the systematic error will be very large, more than 10 % RH if the sensor has a size of 50 mm. If the sensor opening, instead, is placed at the vertical side of the container, the systematic error will be very small. With the dimensions tested that coincide with the current prototype the error will be only some 0.4 % RH. This systematic error, however, is large enough to be corrected for in the final measuring procedure.

Innehåll

1 Problemställning 1

2 Beräkningsförutsättningar 4
2.1 Massbalansekvation för fukt i betong 4
2.2 Partiell differentialekvation (PDE) i simuleringar 4
2.3 Begynnelsevillkor och randvillkor 5

3 Simuleringar 6

4 Resultatanalys 10
4.1 Kvadratiska behållare med sensoröppning nedåt 10
4.2 Cylindrisk behållare med sensoröppning på sidan. 11

5 Konklusioner 13

Referenser 14

1 Problemställning

I delprojekt D4 inom Sensobyg utvecklas teknik och beslutsstöd för att med trådlösa fuktsensorer kunna följa och utvärdera ett uttorkningsförlopp för betongkonstruktioner. Fuktsensorn skall då mäta den relativa fuktigheten RF i betongen på ett visst, förutbestämt mätdjup. Eftersom fuktsensorn måste kombineras med ett batteri, antenn och elektronik som allt inryms i en behållare, kommer uttorkningsförloppet att störas just intill fuktsensorn. Det är viktigt att minimera det systematiska mätfel som detta ger upphov till och kunna kvantifiera hur stort det blir.

Problemställningen åskådliggörs i figur 1.1.

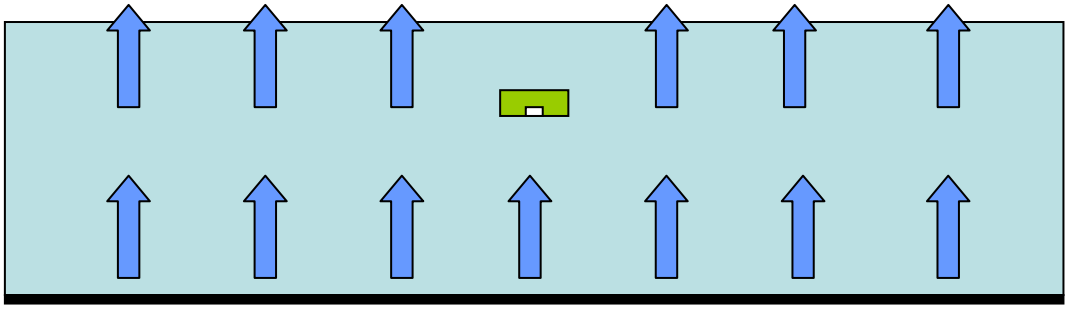


Fig. 1.1 Principiell problemställning då en behållare, innehållande en fuktsensor, med en öppning på en sida stör fukttransporten vid ensidig uttorkning av en betongplatta.

Fukttransporten i betongplattan just under behållaren kommer att störas vid uttorkningen eftersom behållaren är tät så att denna fukt måste transporteras vid sidan av behållaren, dvs få en längre transportväg. Det medför då att det blir fuktigare mitt på undersidan av behållaren än vad det är på motsvarande djup där uttorkningsförloppet är ostört. Skillnaden bör bli beroende av hur stor behållaren görs. Om behållaren däremot kan orienteras ”vertikalt”, med öppningen på ena sidan, bör felet bli betydligt mindre.

I figur 1.2 visas de två typerna av behållare med fuktsensor som har prövats. Den kvadratiska behållaren med öppningen för fuktsensorn på undersidan var den första prototypen som prövades. Öppningen är placerad på undersidan för att undvika att betong och vatten kan komma i kontakt med fuktsensorn under gjutningen. Med denna orientering blir det en luftbubbla i öppningen som hindrar att detta sker.

Den cirkulära behållaren är betydligt större och har öppningen för fuktsensorn på den ena sidan. Öppningen är täckt med ett filter som hindrar betong och vatten att komma in under gjutningen. Denna utformning, och dess mått,

överensstämmer med en sensorprototyp som var aktuell i början av år 2009 inom Sensobyg.

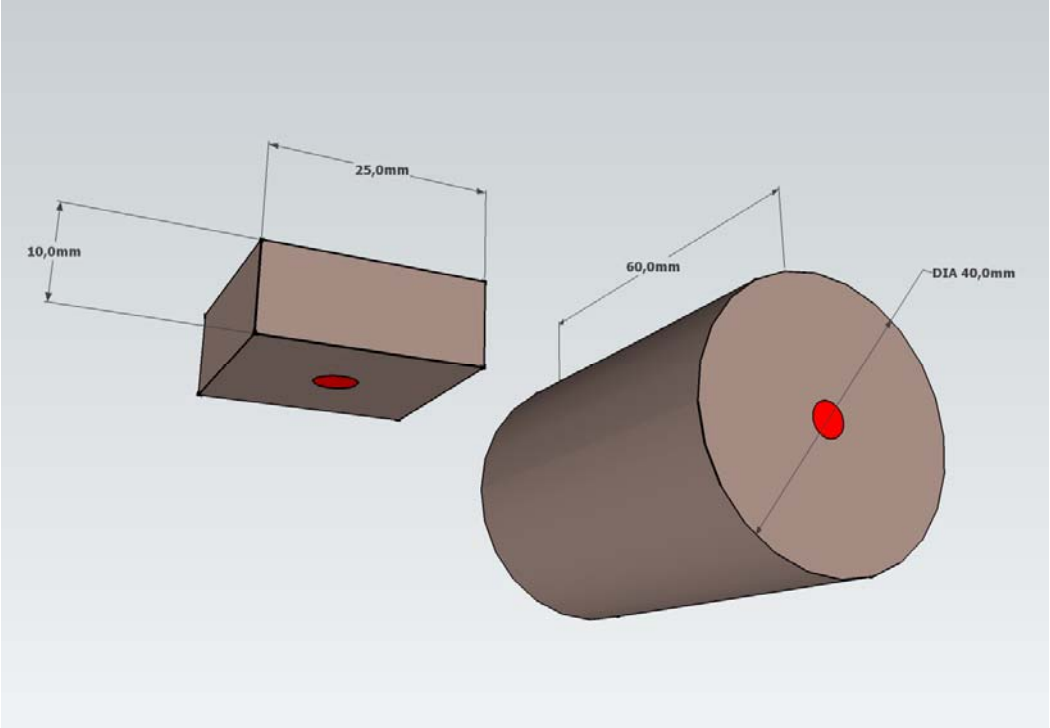


Fig. 1.2 De två typerna av behållare med fuktsensorer bakom de rödmarkerade öppningarna.

I figur 1.3 visas placeringen av de båda typerna av behållare I en betongplatta med tjockleken 100 mm, båda med öppningen för fuktsensorn på djupet 40 mm.

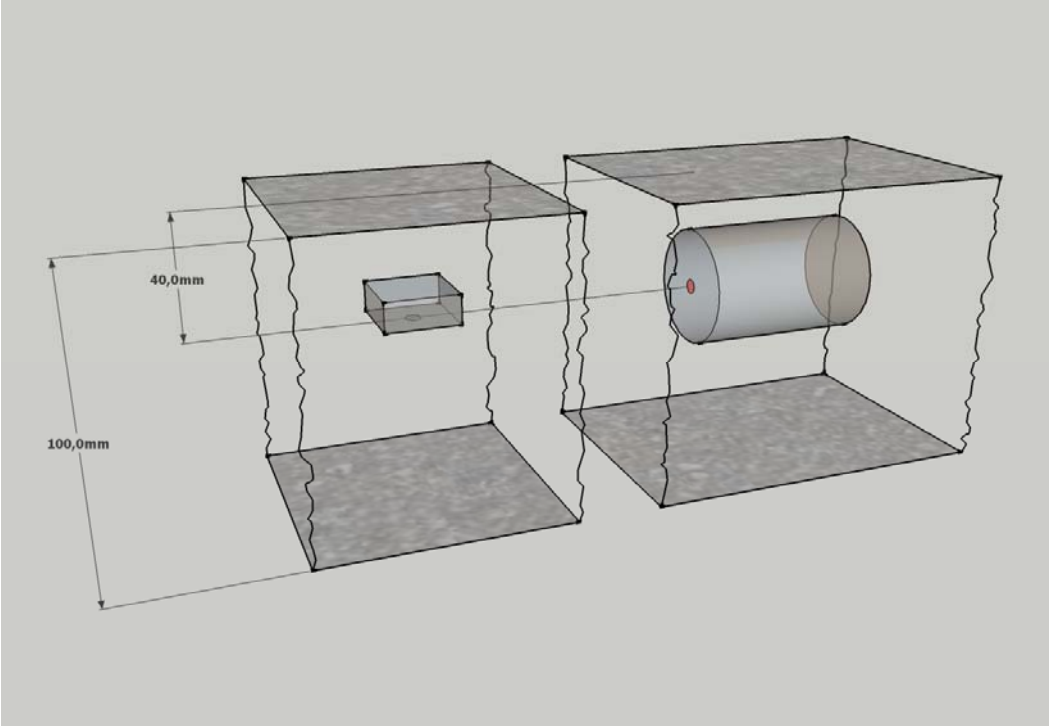


Fig. 1.3 Behållarnas placering i respektive betongplatta.

2 Beräkningsförutsättningar

2.1 Massbalansekvation för fukt i betong

Massbalansekvationen för fukt i betong kan i en dimension beskrivas på följande sätt, Nilsson (1980)

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} g - \frac{\partial w_n}{\partial t} \qquad (2:1)$$

där
w = fukthalten [kg/m^3]
w_n= kemiskt bundet vatten
g = fukttransport [kg/(m^{2}s)] på djupet x, vid tiden t

Den sista termen är stor under de första dygnen efter gjutning och har försummats här. Fukttransporterad mängd *g* kan beskrivas på en mängd olika sätt. Ett sätt är att använda den relativa fuktigheten RF som fukttransportpotential. Fukttransportkoefficienten blir då en diffusionskoefficient D_{RF}.

Massbalansekvationen (2:1) blir då

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}\left(-D_{RF}\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right) - \frac{\partial w_n}{\partial t}$$

eller

$$\frac{\partial w}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x}\left(D_{RF}\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right) = \frac{\partial w_n}{\partial t} \qquad (2:2)$$

eller

$$\frac{\partial w}{\partial \varphi}\cdot\frac{\partial \varphi}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x}\left(D_{RF}\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right) = \frac{\partial w_n}{\partial t}$$

Ekvationen skrivs på detta sätt för att det skall vara lätt att identifiera parametrarna i beskrivningen i nästa avsnitt.

2.2 Partiell differentialekvation (PDE) i simuleringar

Eftersom simuleringarna måste göras i tre dimensioner har ett finita-element-program använts: Comsol Multiphysics. Värmeledningsekvationen i Comsol Multiphysics anges enligt följande:

$$d_a \frac{\partial u}{\partial t} - \nabla \cdot (c \nabla u) = f \qquad (2:3)$$

där
u = den beroende variabeln (RF i det aktuella fallet)
d_a = masskoefficient (sattes till 100)
c = diffusionskoefficient (sattes till 1)
f = källterm som sattes till 0

Här kan parametrarna i (2:2) identifieras. Den beroende variabeln u är den relativa fuktigheten RF eller φ. ”Masskoefficienten” d_a är fuktkapaciteten $dw/d\varphi$. Källtermen f är ändringen av kemiskt bundet vatten med tiden dw_n/dt. Parametern *c* är diffusionskoefficienten D_{RF}.

Genom att välja fuktkapaciteten och diffusionskoefficienten som konstanter, och försumma källtermen, blir den partiella differentialekvationen som skall lösas mycket enkel. Om tidsförloppet inte är väsentligt, som här, kan man då fritt välja dimensioner på den beroende variabeln. Här har valts att räkna i % RF!

2.3 Begynnelsevillkor och randvillkor

Begynnelsevillkoret i betongplattorna sattes till 100, dvs. den relativa fuktigheten i respektive betongplatta var 100 % vid tiden t = 0.

Alla ränder angavs som täta, dvs. att ingen fukttransport fick ske genom dessa, förutom betongplattornas ovansidor, där randvillkoret sattes till 40 % RF. Ränderna mellan behållaren och betongen angavs också som täta, dvs öppningen vid fuktsensorn finns inte med i beräkningen. Den har bara en definierad position i en rand mellan betong och fuktsensorns behållare.

3 Simuleringar

Den aktuella behållaren med fuktsensorn placerades mitt i en 1 m^2 stor, 100 mm tjock betongplatta, på ett djup så att positionen hos öppningen för fuktsensorn hamnade på djupet 40 mm, se figur 1.3. Placeringen visas i figur 3.1.

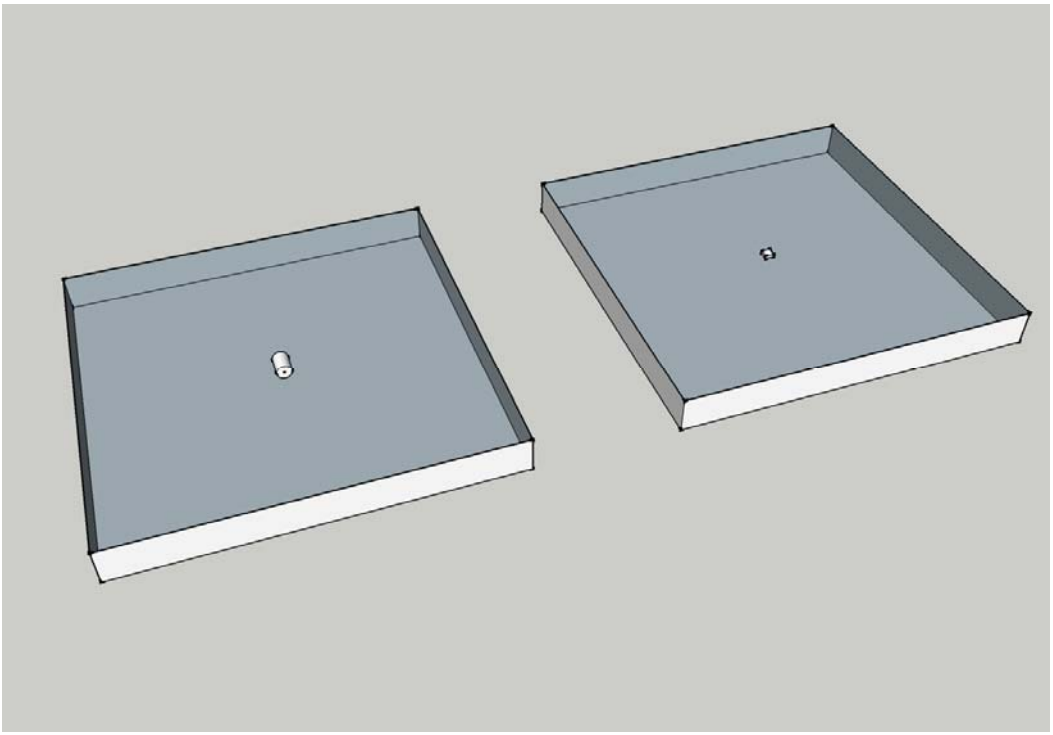


Fig. 3.1 1 m^2 stora betongplattor med fuktsensorer.

Tre simuleringar gjordes i beräkningsverktyget Comsol Multiphysics. Först ritades aktuella geometrier in, dvs. betongplatta och fuktsensor, och därefter angavs vilken PDE som skulle gälla för betongen. Även om det var uttorkning som skulle simuleras användes istället värmeledningsekvationen som gällande ekvation. Betongplattans dimensioner var samma i alla simuleringarna (1·1·0.1 m^3).

Innan beräkningarna kunde genomföras ”meshades” geometrierna, dvs. delades in i mindre element. Figur 3.2 nedan visar hur betongplattan i simulering 1 (kvadratisk sensor) såg ut i mesh-läget.

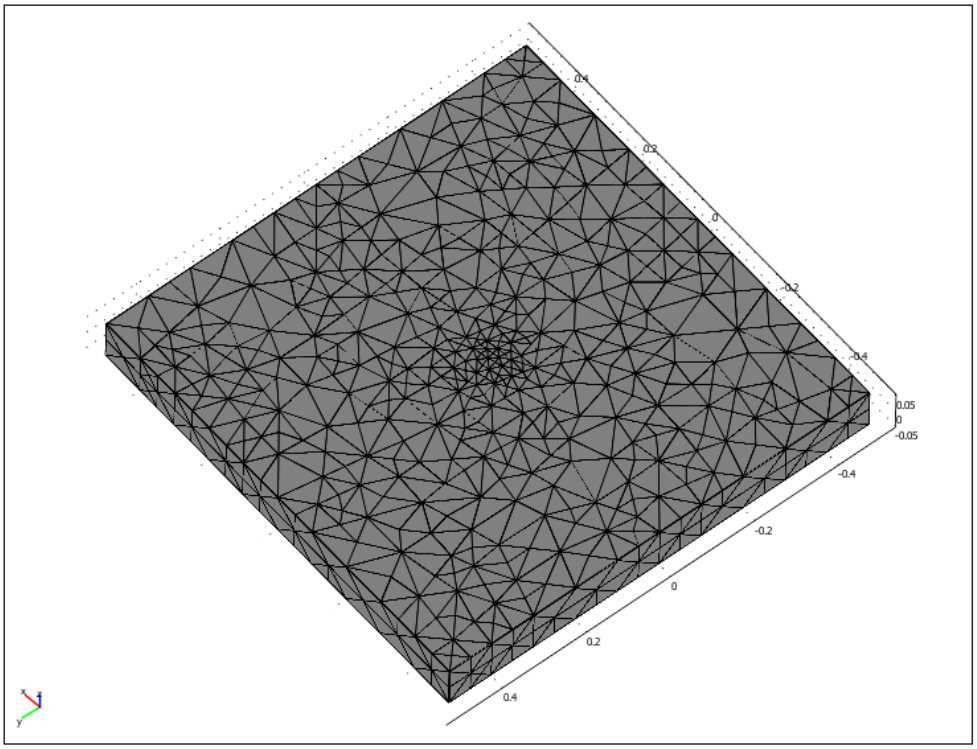
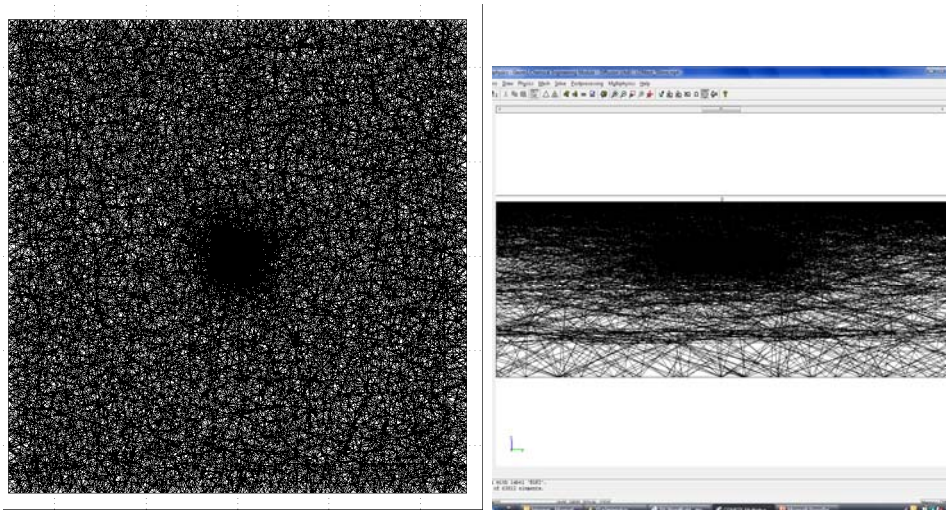


Fig. 3.2 Betongplatta i mesh-läge.

I vissa beräkningar förfinades meshindelningen kraftigt för att klara av att representera geometrin kring de kvadratiska behållarnas hörn. Exempel på en sådan finare mesh ges i figur 3.3.



Figur 3.3 Finare meshindelning, i plan (till vänster) och i sektion (till höger)

Exempel på beräkningsresultat ges i figur 3.4-3.6 för de olika typerna av behållare.

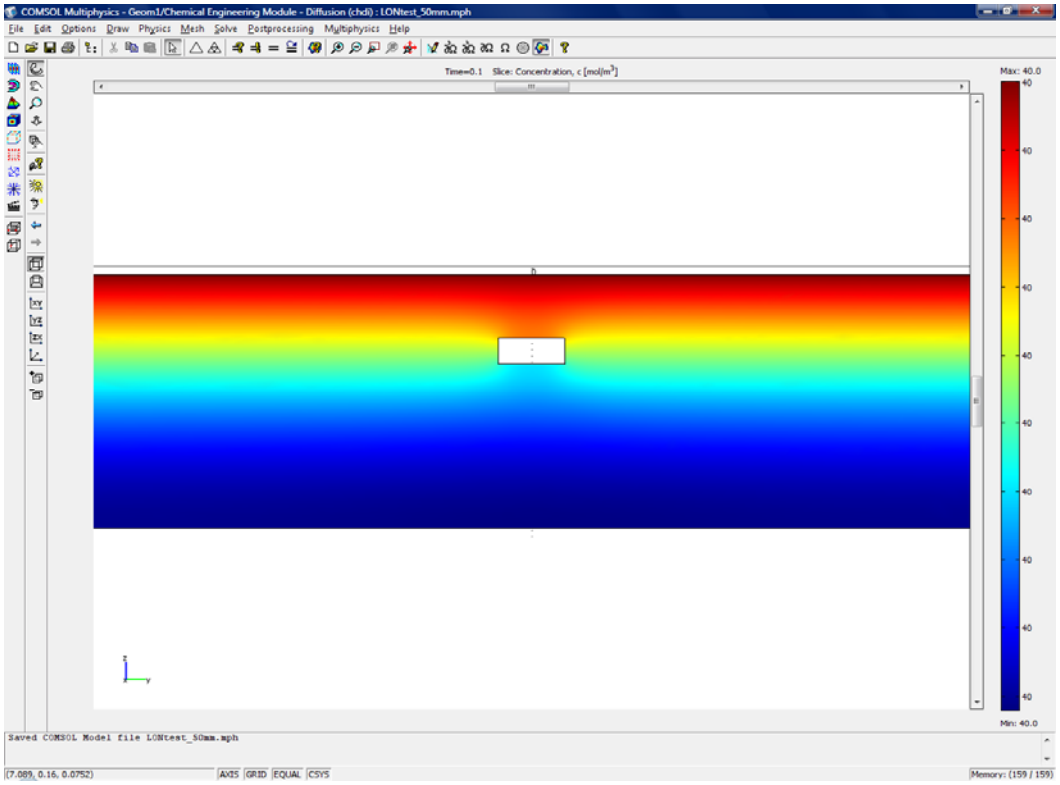


Fig. 3.4 Fuktfördelning i 3D i den centrala delen av en betongplatta med en kvadratisk behållare med måtten 25 x 25 mm.

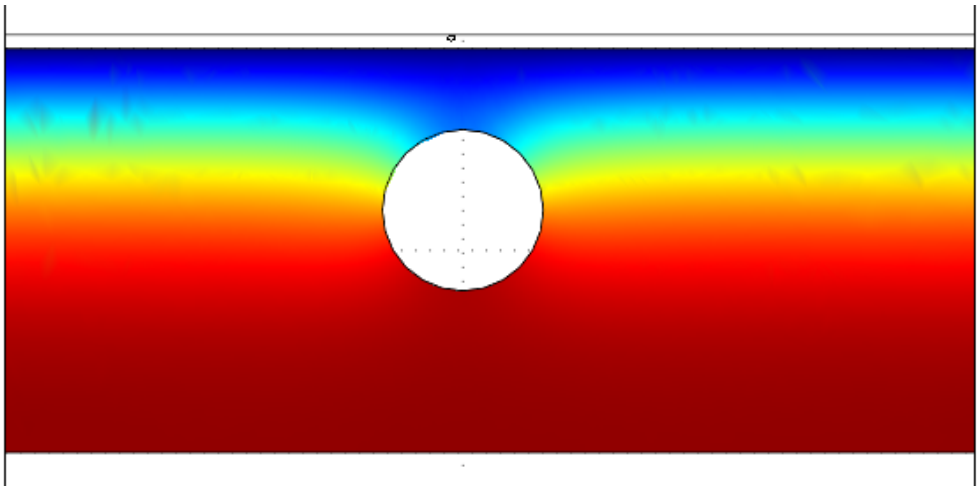


Fig. 3.5 Fuktfördelning i 3D i den centrala delen av en betongplatta med en cylindrisk behållare med måtten ϕ40 x 60 mm. Sektion tvärs behållaren.

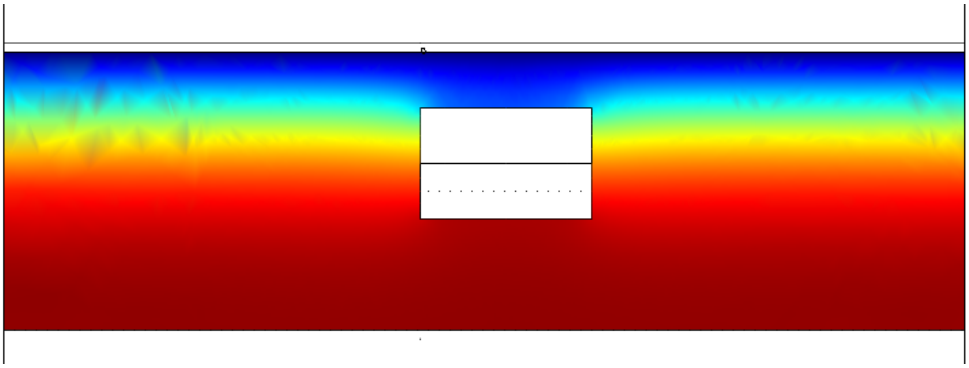


Fig. 3.5 Fuktfördelning i 3D i den centrala delen av en betongplatta med en cylindrisk behållare med måtten ϕ40 x 60 mm. Sektion längs behållaren.

4 Resultatanalys

För att kunna utvärdera effekten av de olika behållarna och deras orientering jämfördes, vid en viss tidpunkt, den vertikala RF-fördelningen i ett snitt vid respektive sensoröppning med RF-fördelningen på ett stort avstånd från sensorn. RF-fördelningen på ett stort avstånd från sensorn fick representera vad RF hade blivit utan fuktsensor.

4.1 Kvadratiska behållare med sensoröppning nedåt

Figur 4.1 visar RF-fördelningarna för två olika stora behållare med sensoröppningarna nedåt, men på djupet 40 mm. RF-fördelningarna har valts så att den ostörda RF-fördelningen har ca 85 % RF på djupet 40 mm.

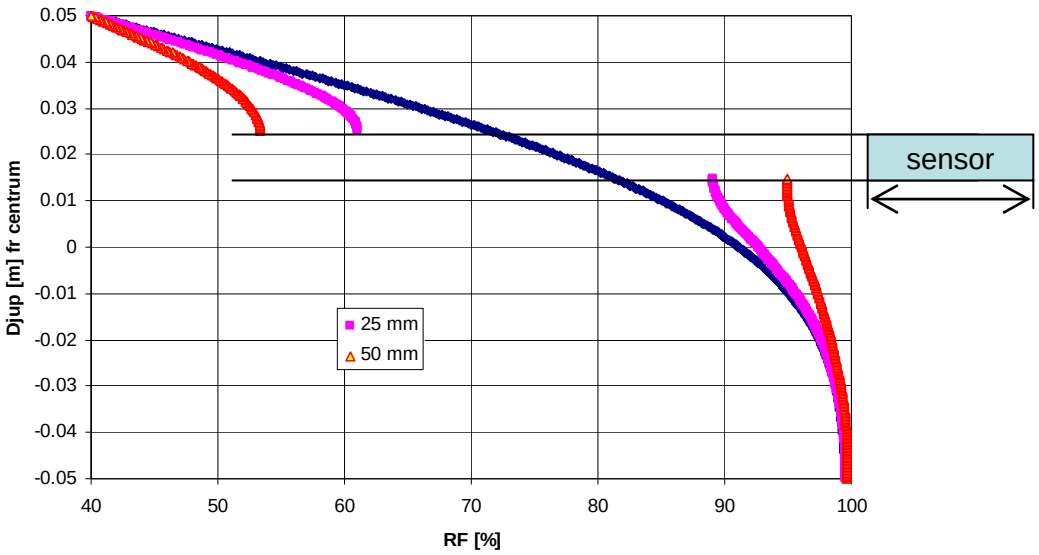


Fig. 4.1 Vertikala RF-fördelningar dels centriskt genom två olika stora kvadratiska behållare med sensoröppningar på undersidan och dels ostört på stort avstånd från centrum.

Av figur 4.1 framgår tydligt att denna orientering av fuktsensoröppningarna ger mycket stora systematiska mätfel. På djupet 40 mm borde RF vara ca 81-82 % RF. Med den större av de två behållarna, 50 x 50 mm, blir RF i undersidans centrum ca 95 %. Felet är alltså över 10 % RF! Med den mindre behållaren, 25 x 25 mm, blir RF ca 88-89 %, dvs felet blir 6-7 % RF.

Dessa beräkningsresultat redovisades tidigt och ledde sensorutvecklingen inpå spåret att placera sensoröppningen på sidan av behållaren.

4.2 Cylindrisk behållare med sensoröppning på sidan.

Resultatet av simulering av fallet med en cylindrisk behållare med sensoröppning på ena sidan, enligt figur 1.2 och 1.3, visades i figur 3.4 och 3.5. Den vertikala RF-fördelningen alldeles i kanten av den vertikala ytan med sensoröppning jämförs med en ostörd RF-fördelning i figur 4.2.

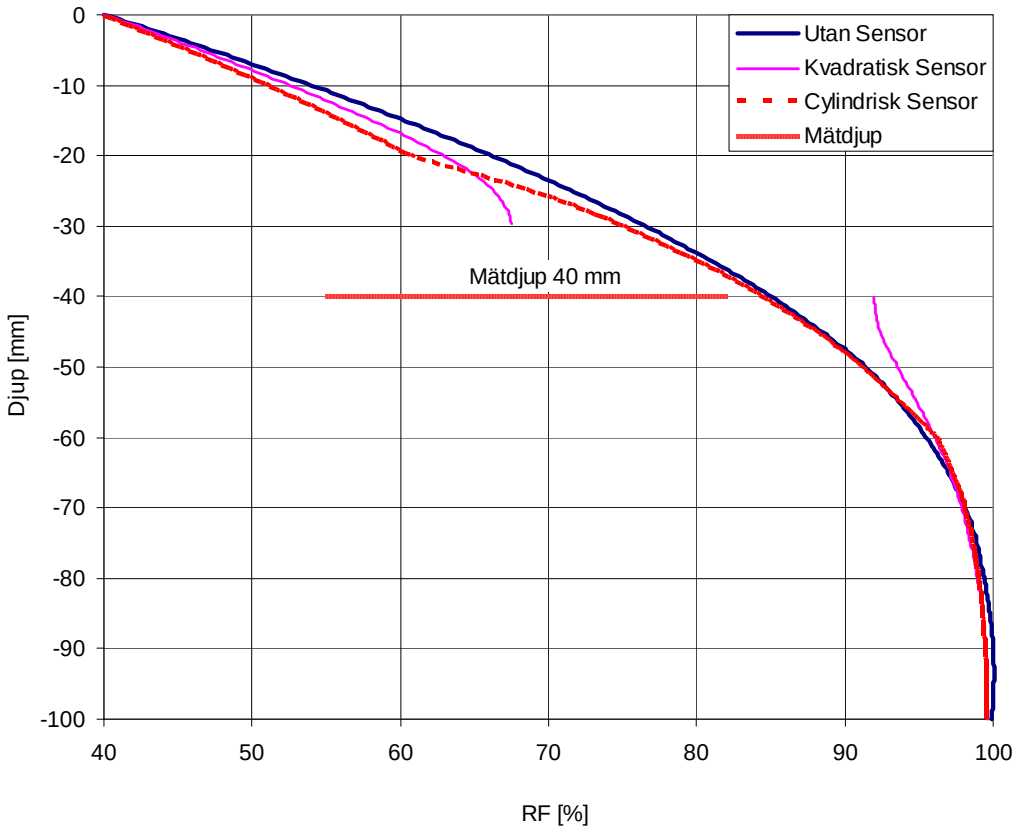


Fig. 4.2 Vertikala RF-fördelningar dels intill den sida av den cylindriska behållaren som innehåller en centrisk sensoröppning och dels ostört på stort avstånd från centrum.

I figur 4.2 är ostörd RF på mätdjupet ca 85 %. RF i ett vertikalsnitt genom den sida av behållaren där sensoröppningen sitter avviker något från den ostörda RF-profilen. I nederkanten är RF något högre än i ett ostört snitt medan den är rätt mycket lägre i ovankanten, ca 7 % RF. Mitt på sidan, där sensoröppningen finns är skillnaden betydligt mindre. För att kunna visa skillnaden har en förstoring gjorts av delen alldeles intill sensoröppningen, se figur 4.3.

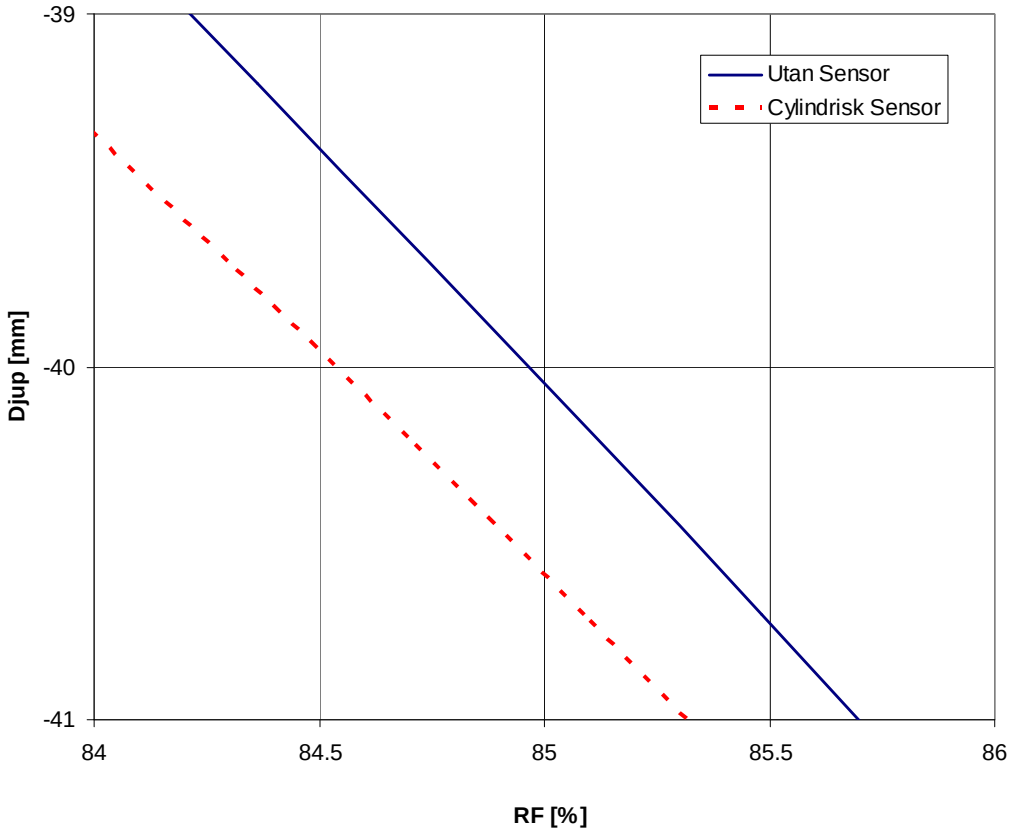


Fig. 4.3 Vertikala RF-fördelningar dels intill den sida av den cylindriska behållaren som innehåller en centrisk sensoröppning (heldragen kurva) och dels ostört på stort avstånd från centrum (streckad kurva).

Skillnaden kan avläsas i figur 4.3 till ca 0.4 % RF.

Detta är visserligen ett mycket litet fel jämfört med de övriga alternativ som undersökts, men det är ett systematiskt fel som är så stort att ett mätvärde bär korrigeras för det. Detta måste beaktas i den slutliga mätproceduren.

Av figur 4.3 framgår också hur viktigt det är att öppningen för fuktsensorn placeras rätt i höjdled. Ett fel i höjdled på 1 mm (!) ger ett större mätfel än den störning som den ingjutna behållaren ger!

5 Konklusioner

Comsol Multiphysics är ett utmärkt verktyg för att kvantifiera effekten av ingjutna fuktsensorer på den fuktfördelning som de skall mäta, genom att det är enkelt att genomföra beräkningar i tre dimensioner.

De simuleringar som gjorts här har gjorts med vissa förenklingar i den partiella differentialekvation som använts, men detta bedöms inte påverka resultaten nämnvärt.

Simuleringsresultaten är väldigt tydliga. ”Horisontellt” placerade behållare med sensoröppningar på undersidan, för att stänga inne en luftbubbla så att inträngning av betong och vatten under gjutningen hindras, ger mycket stora systematiska fel i uppmätt RF. Här har två storlekar på behållare prövats, 25 x 25 respektive 50 x 50 mm, vilket gett systematiska fel på 6-7 % RF respektive 13 % RF!

Med en ”vertikalt” placerad behållare, dvs med sensoröppningen på en av de vertikala sidorna, blir det systematiska felet betydligt mindre, bara ca 0.4 % RF.

Även ett litet systematiskt fel, på grund av att en trådlös fuktsensor stör den fuktfördelning en skall mäta, måste korrigeras i den slutliga mätproceduren.

Av beräkningarna framgår också hur viktigt det är att öppningen för fuktsensorn placeras rätt i höjdled. Ett fel i höjdled på 1 mm (!) ger ett större mätfel än den störning som den ingjutna behållaren ger!

Referenser

Nilsson, L-O (1980) Hygroscopic moisture in concrete – drying, measurements and related material properties. Rapport TVBM-1003, Avd. Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola, Lund