



LUND UNIVERSITY

Fortsatt uttorkning av byggfukt i betongkonstruktioner : system för beslutsstöd - Sensobyg delprojekt D4

Nilsson, Lars-Olof

2010

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Nilsson, L.-O. (2010). *Fortsatt uttorkning av byggfukt i betongkonstruktioner : system för beslutsstöd - Sensobyg delprojekt D4*. (Rapport TVBM (intern 7000-rapport); Vol. 7206). Avd Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola.

Total number of authors:

1

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

Fortsatt uttorkning av byggfukt i betongkonstruktioner – system för beslutsstöd

Sensobyg – delprojekt D4

Lars-Olof Nilsson

ISRN: LUTVDG/TVBM--10/7206--SE (1-30)

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 övervakning i byggeriet", har Lars-Olof Nilsson vid Avd Byggnadsmaterial vid Lunds Tekniska Högskola och Ane Mette Kjeldsen vid Teknologisk Institut utarbetat ett förslag till ett system för beslutsstöd inom delprojektet D4, "Fugt i byggefasen, för att få underlag för beslut om fortsatta torkåtgärder vid övervakning av ett uttorkningsförlopp med trådlösa fuktsensorer. Förslaget har sedan granskats kvalitativt genom att pröva det med ett exempel. Kommentarer ges i rapporten.

Rapporten är en arbetsrapport som skall användas av Teknologisk Institut för att skriva en sammanfattning i en rapport över hela delprojektet. Denna skall skrivas på danska. Av denna anledning har föreliggande rapport inte översatts fullständigt till svenska. Där underlag fanns på danska har detta behållits för att underlätta den vidare bearbetningen till en sammanfattande rapport.

Lund i maj 2010

Lars-Olof Nilsson

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.

SKALL UPPDATERAS

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.

SKALL UPPDATERAS

Innehåll

1	Problemställning	1
1.1	Exempel.....	3
1.2	Kommentarer.....	4
2	Steg 1: Omräkning av RF(T) till T_{ref}	5
2.1	Beregningsgang, steg 1.....	5
2.2	Exempel, steg 1.....	6
2.3	Kommentarer.....	8
3	Steg 2: Uppdelning i T-intervall	9
3.1	Beregningsgang, steg 2.....	9
3.2	Exempel, steg 2.....	9
3.3	Kommentar.....	10
4	Steg 3: Principiell RF₂₈-profil	11
4.1	Beregningsgang, steg 3.....	11
4.2	Exempel, steg 3.....	13
4.3	Kommentar.....	14
5	Steg 4: Justering av RF-profil	15
5.1	Justerad RF-profil efter 28 dygn.....	15
5.2	Exempel, steg 4.....	16
5.3	Kommentar.....	16
6	Steg 5: Beräkning av RF(t<t₁)	18
6.1	Beräkning av uttorkning efter 28 dygn.....	18
6.2	Exempel, steg 5.....	19
6.3	Kommentarer.....	20
7	Steg 6: Passning av diffusiviteter	22
7.1	Passning av diffusiviteter.....	22
7.2	Exempel, steg 6.....	22
8	Steg 7: Beräkning av fortsatt uttorkning	24
8.1	Beräkning av RF(x=0.5L, t ₁ <t<t _{target}) i betong.....	24
8.2	Exempel, steg 7.....	24
9	Steg 8: Val av torkklimat	25
9.1	Alternativa val av önskat uttorkningsklimat.....	25
10	Konklusioner	27
	Referenser	28
	Bilaga 1: Beregningsgang, version 0	29
	Bilaga 2: Beregningsverktyget KFX	30

1 Problemställning

I delprojekt D4 inom Sensobyg utvecklas teknik och beslutsstöd för att med trådlösa fuktsensorer kunna följa och utvärdera ett uttorkningsförlopp för betongkonstruktioner. Resultatet av denna loggning skall sedan utvärderas och användas för att fatta beslut om eventuella åtgärder för att uttorkningen skall fortsätta på ett sådant sätt att man når uppställda mål med uttorkningen, uttryckt som en acceptabel relativ fuktighet, RF_{target} , på den tid som står till förfogande.

Förutsättningarna är att man har använt trådlösa fuktsensorer för att logga relativ fuktighet RF och temperatur T som funktion av tiden (t), både i betongen och i omgivande torrklimat. Spörsmålen som skall besvaras vid någon tidpunkt är:

Kommer vi att nå under RF_{target} ? Om inte, vad skall man då göra?

Problemställningen åskådliggörs i figur 1.1.

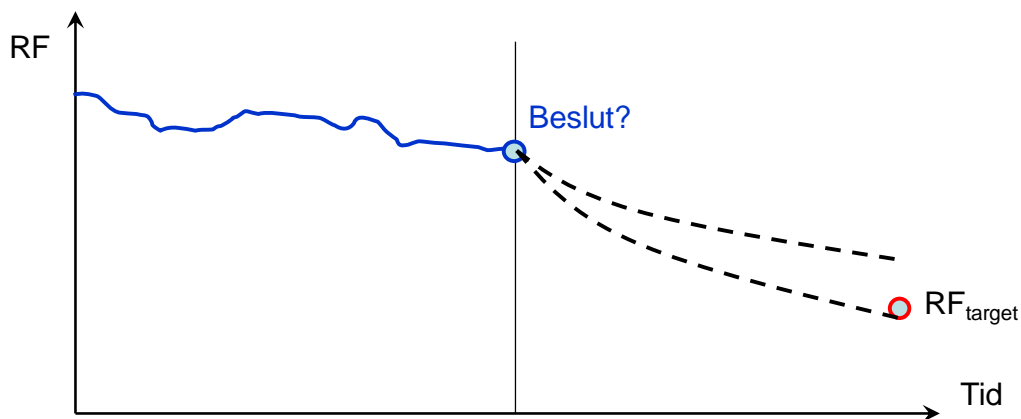


Fig. 1.1 Principiell problemställning då en betongplatta eller betongvägg har härdat och torkat en viss tid och RF har loggats med fuktsensorer. Beslut skall fattas om eventuella åtgärder.

Den input som måste finnas från loggning med sensorer är följande:

- $RF(x=0.5L, t < t_1)$ i betong
- $T(x=0.5L, t < t_1)$ i betong
- $RF(t < t_1)$ i luft
- $T(t < t_1)$ i luft

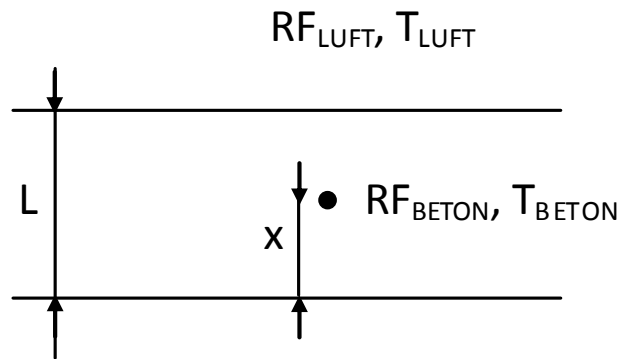


Fig. 1.2 Parametrar som har loggats med fuktsensorer.

Loggningen av betongens RF på ett mäddjup ser då principiellt ut som i nedanstående figur, från gjutning fram över 28 dygns ålder till tidpunkten t_1 där beslut skall fattas om eventuella åtgärder för att påverka den fortsatta uttorkningen.

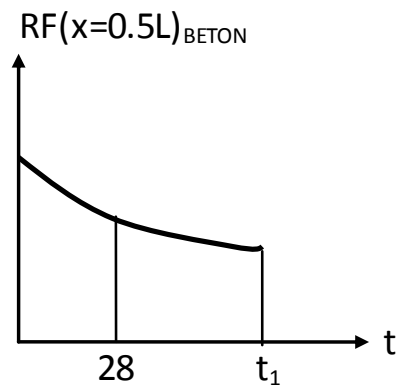


Fig. 1.3 Principiell Input fra sensorer i betong och luft.

Dessutom bör det finnas uppgifter om betongen och de krav som ställs på uttorkningen:

- Beton (w/c, cementtype, C)
- Enkelsidig eller dubbelsidig uttorkning?
- $RF(t_{\text{target}})$

De parametrar som kan styras i beslutsstödet skall vara det framtida torkklimatet:

- $RF(t_1 < t < t_{\text{target}})$ i luft
- $T(t_1 < t < t_{\text{target}})$ i luft

Detta är det önskade torkklimatet $RF(t > t_1)$ $T(t > t_1)$ i luft för att nå $RF_{target}(t_{target})$ under den kvarvarande torktiden. Alternativt kan output vara den kvarvarande torktiden i samma torkklimat. Detta visas i nedanstående figur.

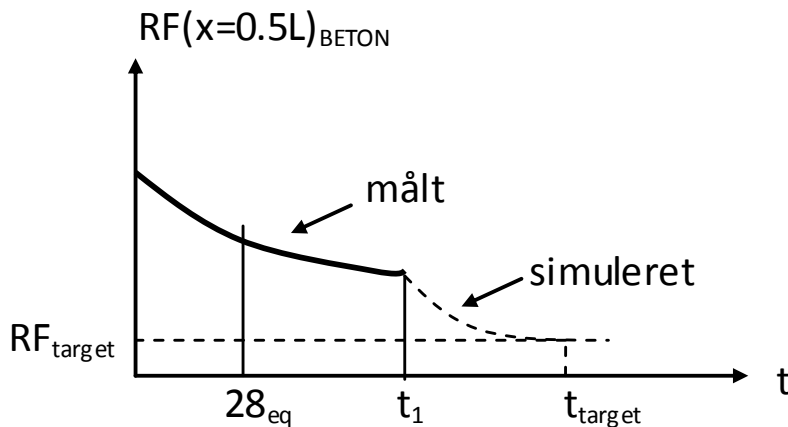


Fig. 1.4 Verifiering av output från beslutsstödet.

Ett system för beslutsstöd har utarbetats av Lars-Olof Nilsson, LTH, och Ane Mette Kjeldsen, Teknologisk. Den första versionen av detta finns i Bilaga 1.

1.1 Exempel

Som exempel vid den kvalitativa granskningen av beräkningsgången har ett hypotetiskt fall valts med följande förutsättningar:

- 200 mm tjockt betongbjälklag med dubbelsidig uttorkning
- Betong med vct 0.60 och blandningsvattenmängden 180 l/m^3
- Gjutning 2010-01-04 med en gjuttemperatur på $+15^\circ\text{C}$
- Härdning i ett naturligt klimat motsvarande Malmö/Köpenhamnsområdet.
- "Tätt hus" har antagits omedelbart efter gjutning för att simulera att det inte regnar på betongbjälklaget.
- Uttorkning i detta naturliga klimat, med skydd mot regn men utan uppvärmning, fram till 2010-05-10
- Krav på uttorkning till 90 % RF på mätdjupet $x/L=0.5$ 2010-08-09
- Beslut om fortsatta torkinsatser skall göras 2010-05-10

Med dessa förutsättningar har klimatdatafilen (RF, T) från TorkaS3.0 använts för den aktuella perioden. RF i betongen har beräknats med hjälp av

Torkas3.0 och omräknats till RF på mätdjupet $x/L=0.5$ som använts som loggad RF.

1.2 Kommentarer

Det bör påpekas att i Danmark används mätdjupet $x/L=0.5$ medan man i Sverige använder mätdjupen $x/L=0.4$ respektive 0.2 beroende på om det skett en ensidig eller dubbelsidig uttorkning.

I exemplet har valts ett hypotetiskt antagande om att byggnaden blir tät mot regn omedelbart efter gjutning. Om detta antagande inte skulle gjorts, skulle betongbjälklaget exponeras för regn som skulle bli stående på betongytan. Detta registreras inte av fuktsensorn som loggar luftens relativa fuktighet. Detta är en allmän brist, inte bara i detta fall, i underlaget för att följa ett uttorkningsförlopp. Randvillkoren blir inte korrekt beskrivna bara med en loggning av luften RF. Våttiderna på betongytan borde också dokumenteras.

2 Steg 1: Omräkning av RF(T) till T_{ref}

Loggad RF i betongen gäller vid den aktuella betongtemperaturen i mätpunkten. Denna RF är något temperaturberoende. Om betongtemperaturen varierar mycket bör man därför räkna om loggad RF till ekvivalent RF vid +20°C. Efter denna omräkning, om den är korrekt, bör betongens ekvivalenta RF variera betydligt mindre. Om den inte gör det är det ett tecken på att mätningen kan vara påverkad av andra temperatureffekter.

2.1 Beräkningsgång, steg 1

Med utgångspunkt i de loggade värden i betongen, $RF(x=0.5L, t < t_1)$ och $T(x=0.5L, t < t_1)$, räknas RF om till en ekvivalent $RF(T_{ref}, x=0.5L, t < t_1)$ i betong. Ett principiellt exempel visas i nedanstående figur.

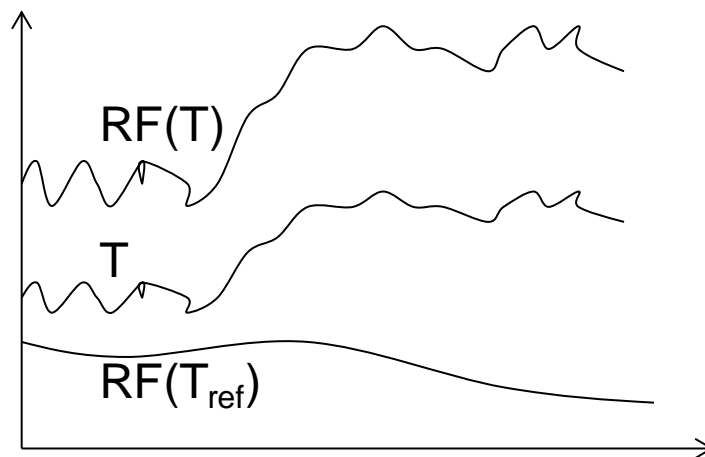


Fig. 2.1 Principiella RF- och T-varianter från loggningen samt ekvivalent RF efter omräkning.

Omräkningen görs till +20°C med hjälp av följande uttryck:

$$RF(T_{20}) = RF(T) + (T_{20} - T) \cdot \frac{dRF}{dT} \quad (2:1)$$

där dRF/dT är temperaturberoendet hos betongens RF. Denna ges av nedanstående figur.

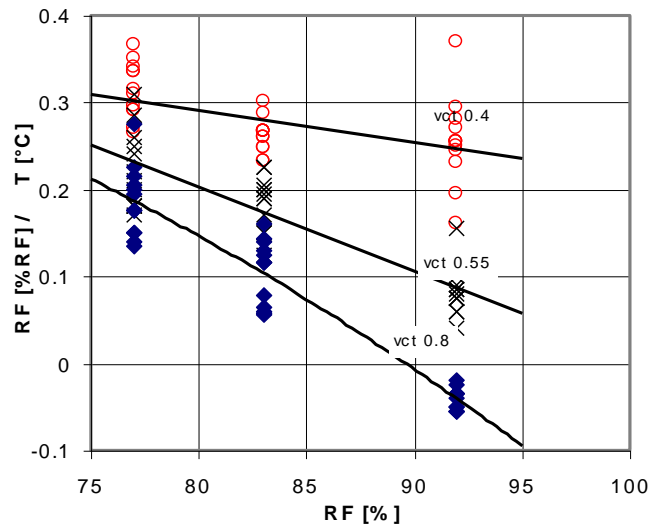


Fig. 2.2 Temperaturberoendet av RF i betong med olika vct, Sjöberg et al (2002).

Det bör observeras att temperaturberoendet enligt figur 2.2 är positivt, dvs RF i betongen ökar då temperaturen ökar!

2.2 Exempel, steg 1

"Loggad" T och RF i betongen ges i nedanstående figurer.

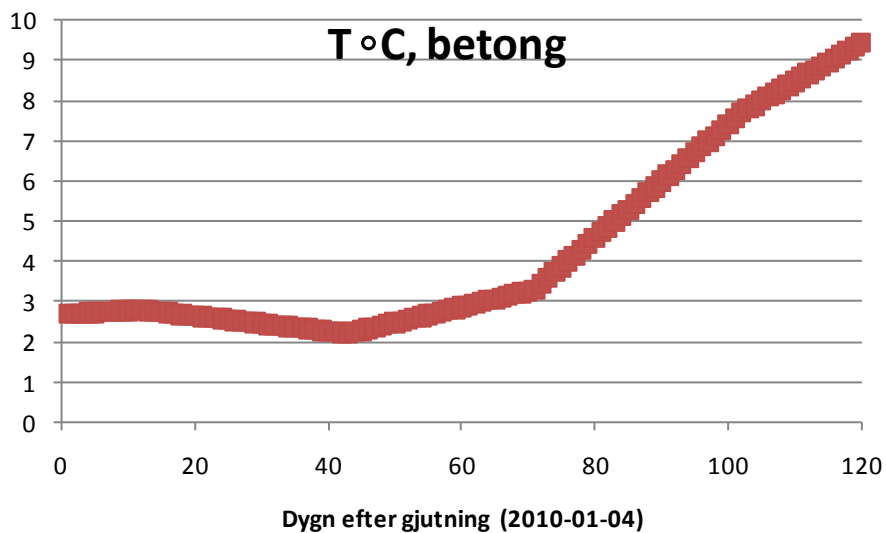


Fig. 2.3 "Loggad" betongtemperatur från gjutning till beslutstidpunkt

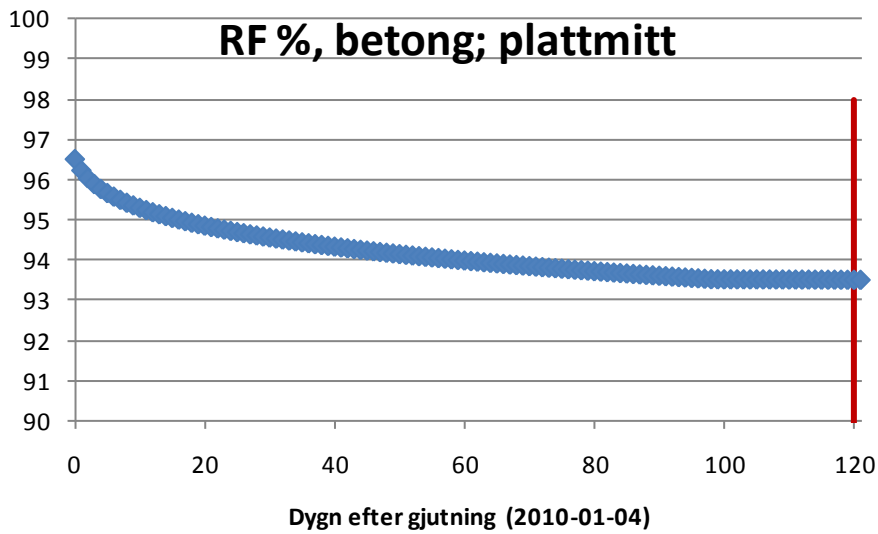


Fig. 2.4 "Loggad" RF i betongen i exemplet

Omräkningen till ekvivalent RF görs för betong med $v_{ct} = 0.60$. Interpolation i figur 2.2 ger $dRF/dT \approx 0.25 - 0.30(RF - 75)/25$. Med detta temperaturberoende blir den ekvivalenta relativa fuktigheten i betongen enligt figur 2.5.

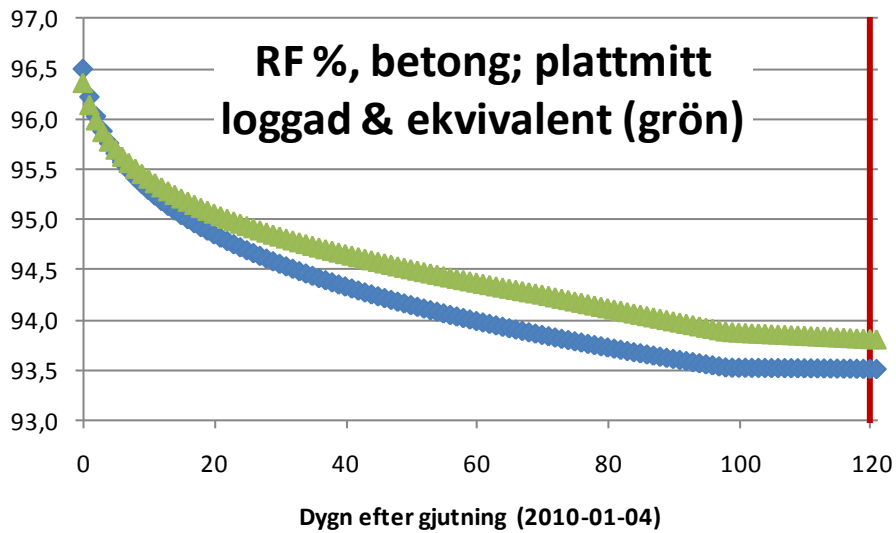


Fig. 2.5 "Loggad" RF respektive ekvivalent RF i betongen i exemplet

I exemplet blir korrektionen liten, maximalt ca 0.4 % RF. Vid höga RF blir korrektionen negativ.

Den ekvivalenta RF används i de fortsatta beräkningsstegen.

2.3 Kommentarer

Omräkningsfaktorn enligt figur 2.2 har en stor osäkerhet, vilket innebär att omräkningen till ekvivalent RF blir osäker om temperaturen avviker mycket från +20°C. I det svenska RBK-systemet tillåts inte mätningar utanför intervallet +15°C till +25°C, dvs temperaturskillnader större än 5°C, för att osäkerheterna inte skall bli för stora.

3 Steg 2: Uppdelning i T-intervall

Den fortsatta beräkningen skall göras med förenklade metoder i ett antal begränsade tidsintervall. För dessa behöver randvillkoren vara någorlunda konstanta. Därför görs en indelning av den loggade perioden i ett antal tidsintervall och vart och ett av dessa utvärderas en genomsnittlig temperatur.

3.1 Beräkningsgang, steg 2

Opdelning af $T(x=0.5L, t < t_1)$ i luften i $T(t)$ -intervaller med store T -differenser. Dette gøres f.eks. ved at udnytte "bevægeligt gennemsnit". Resultatet ges som tidsintervaller med tydeligt forskellige temperaturer, samt interval ved 28 modenhedsdøgn (=28_{eq}).

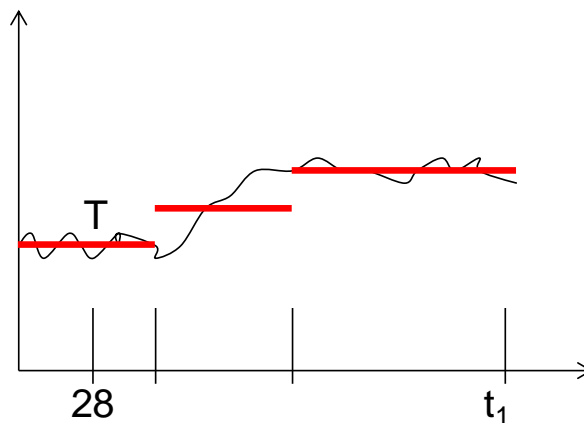


Fig. 3.1 Principielt temperaturförlopp, indelat i intervall med konstant T

Modenheden udregnes ved

$$t_{20} = \int_0^t k_T dt = \int_0^t \left(\frac{T+10}{30} \right)^2 dt \text{ for } T > -10^\circ C \quad (3:1)$$

3.2 Exempel, steg 2

Uppdelningen av betongtemperaturen enligt figur 2.3 görs dels i intervallet 0-28 dygn och dels i två intervall med tydliga temperaturskillnader, se nedanstående figur.

Intervallen och deras medeltemperatur blev:

0-28 dygn: +2.7°C
29-69 dygn: +2.6°C
70-125 dygn: +7.0°C

Dessa åskådliggörs i figuren.

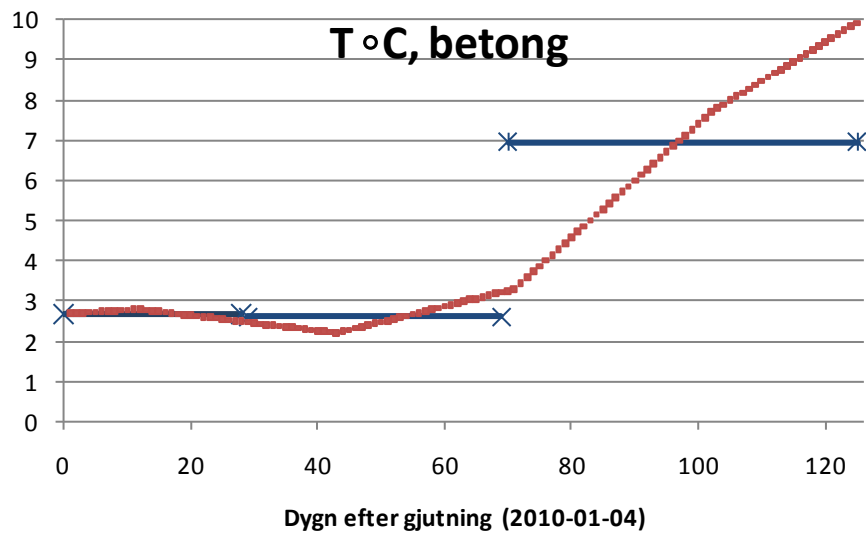


Fig. 3.2 Temperaturförlopp i exemplet, indelat i intervall med konstant T

3.3 Kommentar

Inga kommentarer. Uppdelningen är simpel.

4 Steg 3: Principiell RF₂₈-profil

Under den första periodens 28 dygn är härdnings- och uttorkningsförloppet synnerligen komplicerat. Här sker samtidigt kemisk bindning av vatten, olika på olika djup, och fukttransport med egenskaper som varierar med djupet och med tiden. Fuktbindningsegenskaperna ändras också med tiden och är olika på olika djup. Det är inte meningsfullt att försöka simulera detta med enkla metoder. Här görs istället en grov och enkel uppskattning av RF-profilen efter 28 dygn, med utgångspunkt från de loggade värdena på ett mätdjup.

4.1 Beräkningsgång, steg 3

Formen på RF-profilen efter 28 dygn bestäms. Denna skæring benyttes idet man især indenfor de første 28 dygn er nødt til at justere udtøringsprofilen for hydratiseringseffekter. Denne effekt antages at kunne negligeres efter 28 dygn).

Løs massebalanceligningen (ekskl. selvudtøringsdelen; ej vist her)

$$\frac{\partial w}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} - D_w(T, RF) \frac{\partial w}{\partial x} \quad (4:1)$$

hvor w er fugtindholdet, t er tiden, x er dybden og D_w er diffusiviteten.

D_w er principielt givet ved

$$D_w = \frac{\delta}{\frac{dw}{d(RH)}} \cdot v_s \quad (4:2)$$

hvor δ er fugttransportkoefficienten, v_s er det mættede vanddamp-indhold og $\frac{dw}{d(RF)}$ er hældningen på sorptionskurven i det givne punkt. I givne tilfælde benyttes en fast D_w -kurve som vist i figuren hvor D_w er afhængig af RF og v/c .

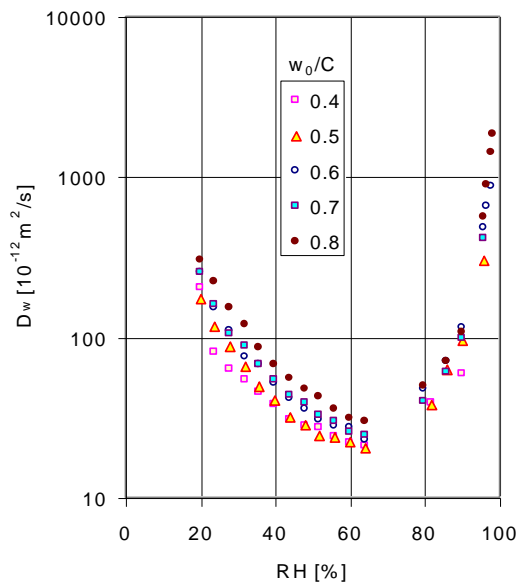


Fig. 4.1 Diffusivitetar för betong med olika vct, baserat på data från Hedenblad (1993) och Nilsson (1980)

Sorptionskurven (kendt fra målinger, Nilsson(1980)) benytttes til at omregne den målte RF til fugtindhold, w .

Løsning af massebalanceligningen kræver kendskab til nogle initial og randbetingelser. Initialbetingelsen er at ved $t=0$ er vandindholdet konstant = udgangsvandindholdet på betonen igennem hele tværsnittet. Udgangsvandindholdet fås fra brugers input-oplysninger om v/c-tal og cementindhold/ m^3 beton, c . Dette tal skal fratrækkes det kemisk bundne vand, hvilket vil variere gennem hele perioden. Det er derfor valgt at fratække den mængde vand der er kemisk bundet efter 28 modenhedsdøgn, idet der i step 4 justeres netop for denne fejl. Mængden af kemisk bundet vand er til ethvert tidspunkt givet ved $0,25 \cdot \alpha \cdot c$, hvor α er hydratiseringsgraden.

Hydratiseringsgraden er givet ved:

$\ln(\alpha) = a \cdot \ln\left(\frac{t}{t_{20}}\right)^b$ hvor a og b er afhængige af cementtypen. Typiske værdier er $a = -10$ (-5 til -20) og $b = -2$. t angives i timer.

Randbetingelsen består i kendskab til, at betonens RF i overfladen for $t > 0$ antages at være = luftens RF (omregnes til vandindhold).

Nedan er vist ett eksempel på løst massebalanceligning, hvor x/L er tværsnitsdybden og $U(x, F_0)$ er fugtindholdet.

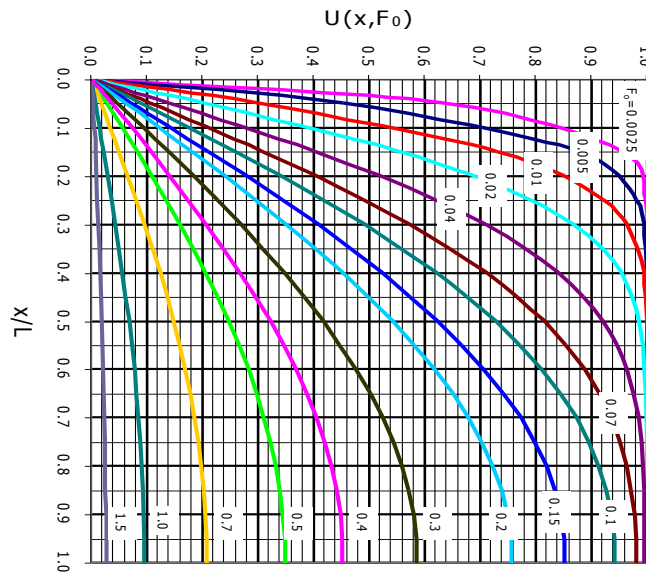


Fig. 4.2 Exempel på beräknade fukthaltsfördelningar genom en betongplatta för ett fall med konstanta diffusiviteter. Diagrammet visar fördelningar vid olika tider vid ensidig uttorkning uppåt eller övre hälften av en platta som torkar dubbelsidigt, uppåt och nedåt.

Det resulterande principiella RF-profil kan f.eks. se ud som vist i figuren nedan. Her er også vist det faktiske måleresultat fra målingen i midten.

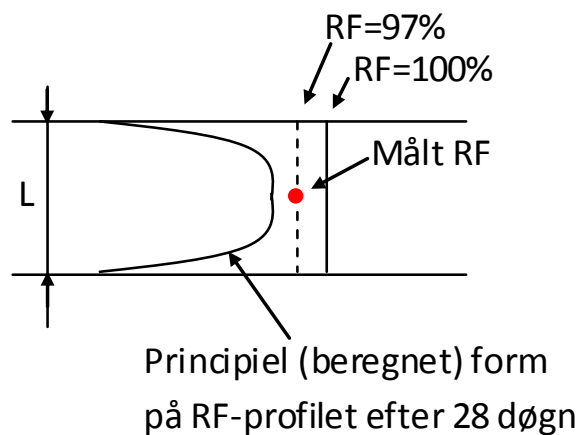


Fig. 4.3 Beräknad RF-profil principiellt och aktuellt mätvärde.

4.2 Exempel, steg 3.

Beräkningen har gjorts för det aktuella exemplet med ett finita differensprogrammet KFX, se bilaga 2, med uppskattad sorptionskurva och diffusivitet för den aktuella betongen. I figuren nedan visas beräknad RF-profil efter 28 dygn tillsammans med "mätvärdet" enligt loggningen.

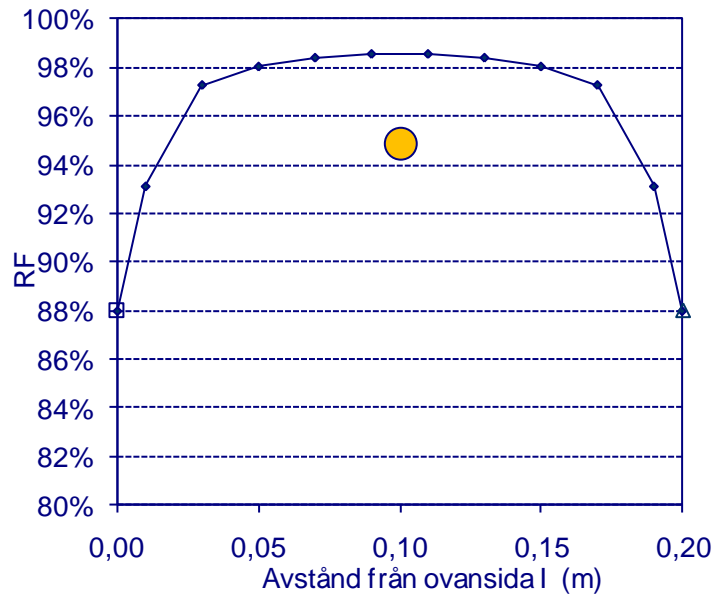


Fig. 4.4 Beräknad RF-profil efter 28 dygn och aktuellt mätvärde (punkt).

4.3 Kommentar

Exemplet visar hur svårt det är att göra beräkningen då betongen fortfarande härdar. I beräkningen har uppenbarligen självuttorkningen underskattats.

5 Steg 4: Justering av RF-profil

5.1 Justerad RF-profil efter 28 dygn.

RF-profilet justeras så det beräknade profil $RF(x=0.5L, t=28d)$ i betonen stemmer med mätte värder.

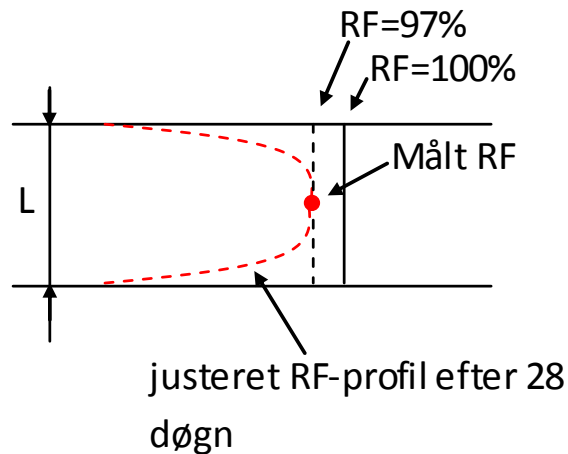


Fig. 5.1 Beräknad RF-profil efter 28 dygn principiellt, justerad så att den passar med aktuellt mätvärde (punkt). Dubbelsidig uttorkning.

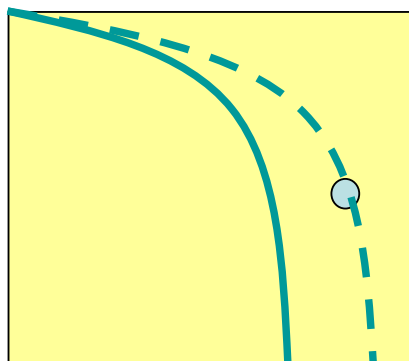


Fig. 5.2 Beräknad RF-profil efter 28 dygn principiellt, justerad så att den passar med aktuellt mätvärde (punkt). Enkelsidig uttorkning uppåt.

Den beräknade RF-profilen efter 28 dygn "justeras" så att den stämmer med dels RF-värdena i ytorna och dels med mätpunkten. "Justeringen" kan naturligtvis göras på olika sätt, men enklast är att göra en linjär förskjutning av RF på alla djup.

5.2 Exempel, steg 4.

För beräkningsexemplet har en linjär förskjutning av RF gjorts på alla djup så att RF stämmer med omgivande lufts RF i över- och underytan samt med uppmätt, ekvivalent RF på mätdjupet. Resultatet framgår av nedanstående figur.

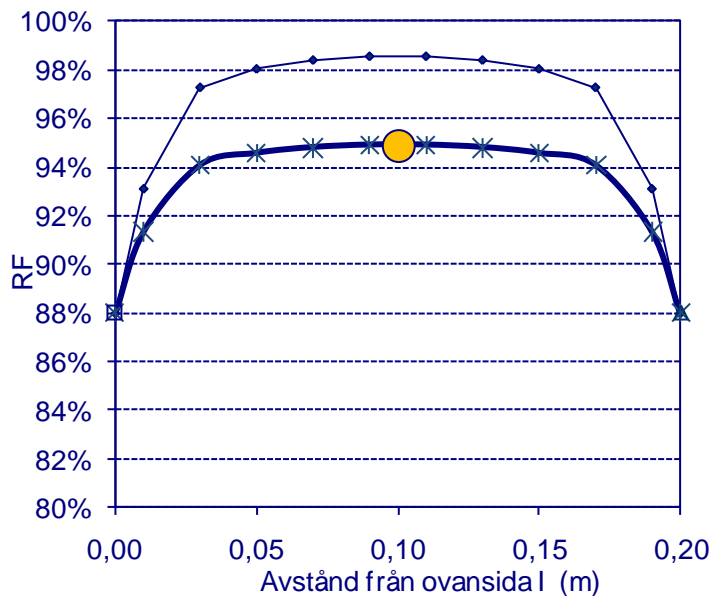


Fig. 5.3 Beräknad RF-profil efter 28 dygn, justerad för att stämma med aktuellt mätvärde (punkt).

Den justerade RF-profilen stämmer nu med den uppmätta i en punkt och stämmer med RF i omgivande klimat. Denna RF-profil tas nu som initialvillkor för den fortsatta beräkningsgången.

5.3 Kommentar

Justeringen är en grov anpassning av den felaktigt beräknade RF-profilen till det som faktiskt mätts upp. En jämförelse görs i figuren nedan mellan den "verkliga" RF-profilen och den justerade. Den "verkliga" RF-profilen är den som ligger bakom mätpunkten, dvs beräknad med TorkaS3.0. Denna är omräknad till ekvivalent RF från den aktuella betongtemperaturen till +20°C.

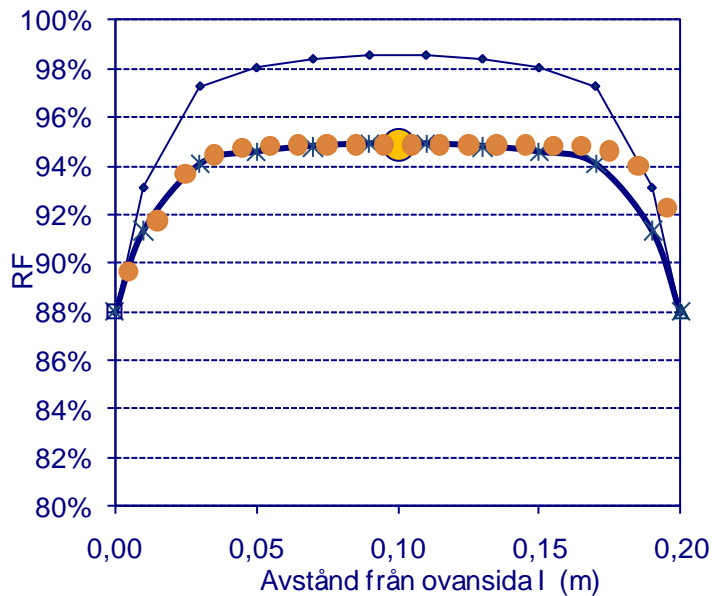


Fig. 5.4 Beräknad RF-profil efter 28 dygn, justerad för att stämma med mätpunkten i plattmitt, jämförd med "verklig" RF-profil

Den "verkliga RF-profilen är något osymmetrisk, på grund av inverkan av formen, som inte beaktats i beräkningarna. Annars stämmer RF-profilerna väl överens. Den justerade borde alltså kunna vara en bra utgångspunkt för den fortsatta beräkningen.

6 Steg 5: Beräkning av $RF(t < t_1)$

6.1 Beräkning av uttorkning efter 28 dygn.

Med den justerade RF-profilen efter 28 dygn, som stämmer med de loggade värdena, görs nu fortsatta beräkningar som skall jämföras med loggade värden mellan 28 dygn och beslutstidpunkten t_1 .

Lös massebalanceligningen utan självuttorkning hvor randbetingelserne er givet ved:

- Initielt: $RF(x, t=28)$, se figur 6.1
- $RF(28 < t < t_1)$ i luft
- $T(28 < t < t_1)$ i luft
- Funktion af parametrene: D_{w1}, D_{w2}

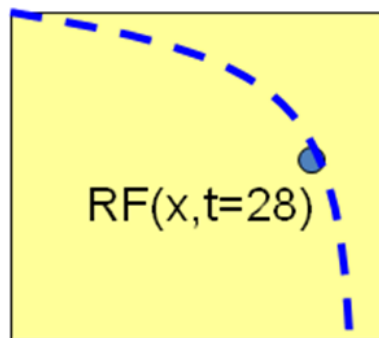


Fig. 6.1 Beräknad RF-profil efter 28 dygn, justerad för att stämma med mätvärden.

Diffusiviteterna D_{w1}, D_{w2} väljs ur figur 4.1 för den aktuella betongen. Därefter görs en beräkning för att få en första uppfattning om hur väl man kan simulera de loggade värdena. Om beräkningsresultaten inte alls stämmer, prövas nya diffusiviteter, i steg 6.

Diffusiviteterna skall vara temperaturberoende, enligt ekvation (4:2) ovan. Det ställer krav på att beräkningsalgoritmerna klarar av att ta hänsyn till detta.

Randvillkoren $RF(t)$ och $T(t)$ i luft kan antingen väljas så att de varierar så som de loggade värdena eller kan konstanta värden väljas i ett antal tidsintervall, jfr figur 3.1 och figur 3.2. Vilket man väljer beror också här på vad beräkningsalgoritmen klarar.

De beräknade RF-värdena på mätdjupet jämförs sedan med de loggade RF-värdena på samma djup, se figur 6.2.

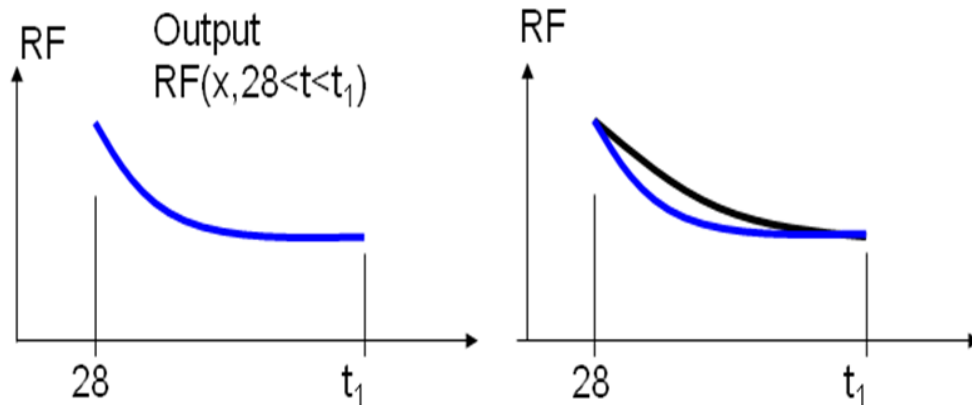


Fig. 6.2 Beräknad RF på mätdjupet i tidsintervallet efter 28 dygn, till vänster, och samma värden jämförda med loggade värden, till höger.

6.2 Exempel, steg 5.

Den justerade RF-profilen efter 28 dygn, som stämmer med det loggade RF-värdet på mätdjupet enligt figur 5.3, har använts som initialvillkor för beräkning med KFX av det fortsatta uttorkningsförloppet.

Omgivningsklimatet har utvärderats från de loggade värdena till två tidsintervall, samma för temperatur, se figur 3.2, och för RF. RF-värdena i dessa tidsintervall åskådliggörs i figur 6.3.

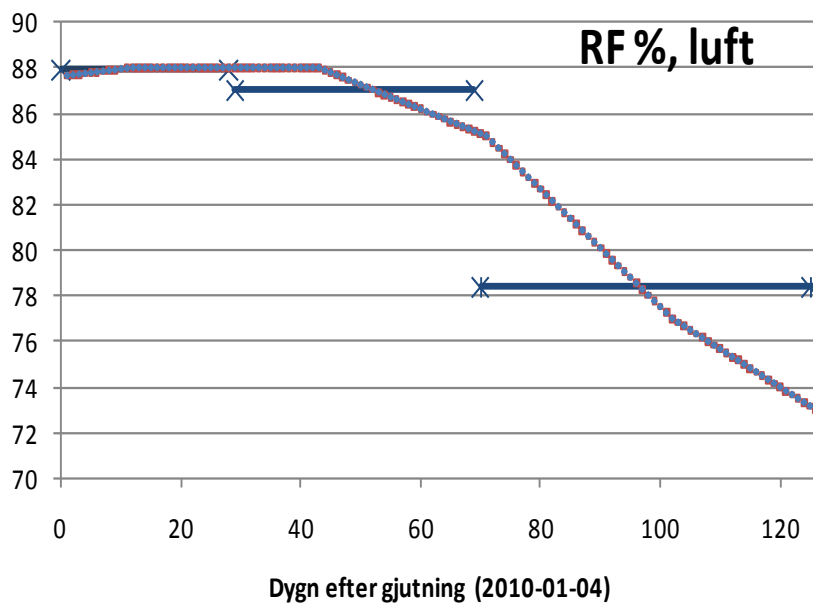


Fig. 6.3 Loggade RF-värden i luften, indelade i de tre tidsintervallen.

Intervallen och deras medel-RF i luften blev:

0-28 dygn: 87.9 %

29-69 dygn: 87.0 %

70-125 dygn: 78.4 %

För de två tidsintervallen efter 28 dygn görs sedan beräkningar med KFX med konstanta omgivningsvillkor. Resultatet från det första intervallet används som initialvillkor för det andra.

Resultatet av den första beräkningen visas i figuren nedan.

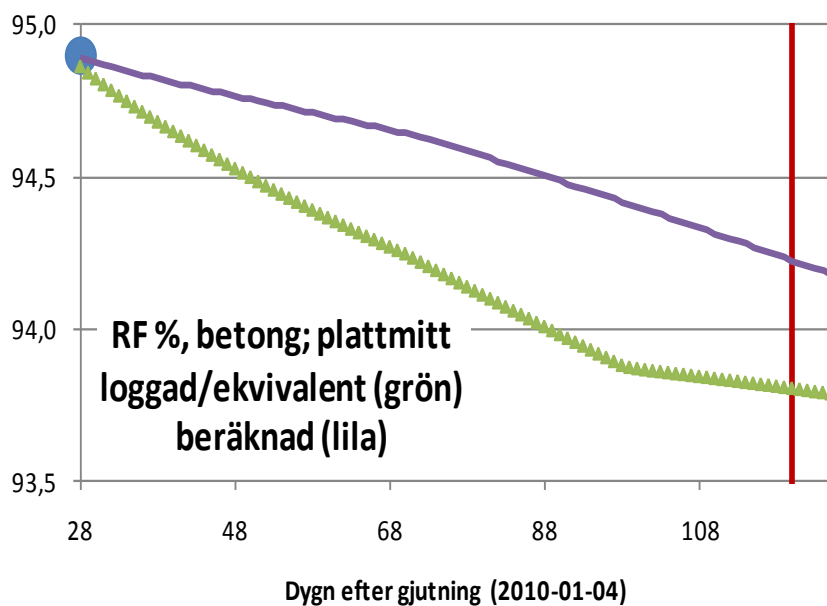


Fig. 6.4 Loggad RF i betongen jämfört med beräknade värden (övre kurvan)

Skillnaden mellan loggad RF och beräknad RF i plattmitt efter 125 dygn är mindre än 0.5 % RF. Detta låter inte mycket men hela ändringen från 28 dygn är bara ca 1 % RF! Förloppet stämmer inte heller; det uppmätta har ett uppbromsande förlopp efter ca 95 dygn medan det beräknade har snabbare uttorkning då, antagligen på grund av den högre temperaturen i det sista tidsintervallet.

6.3 Kommentarer

Det blir högst osäkert att passa ett uppmätt uttorkningsförlopp mot ett beräknat om totala ändringen under den loggade uttorkningen är så liten som någon % RF. Uppmätta RF-skillnader ligger då inom mätfelet.

Passningen genom att använda olika diffusiviteter och göra dem temperaturberoende blir onödigt svårt. Bättre är då att använda en fix sorptionskurva och variera fukttransportkoefficienten δ , se ekvation (4:2). Då

får man temperaturberoendet "på köpet" eftersom man räknar i ånghalter; temperaturberoendet ligger då i mättnadsånghalten.

7 Steg 6: Passning av diffusiviteter

7.1 Passning av diffusiviteter.

I den första versionen av beräkningsgången, se bilaga 1, beskrevs steg 6 på följande sätt.

I dette tilfælde er givet en diffusivitet, hvor kurveformen er givet, men kan rykkes op og ned som fitting-parameter. Ydermere benyttes fitting af D_{w1} og D_{w2} ved hhv. 70% og 100% RF til at sikre at kurven passer på hele forløbet (der fittes efter start, midt og slut af forløbet).

D_{w1} , D_{w2} tilpasses, så beregnet $RF(x=0.5L, t < t_1)$ i beton stemmer med måleværdierne ved tiderne $t=t_1$ og $t=(t_1-28)/2+28$

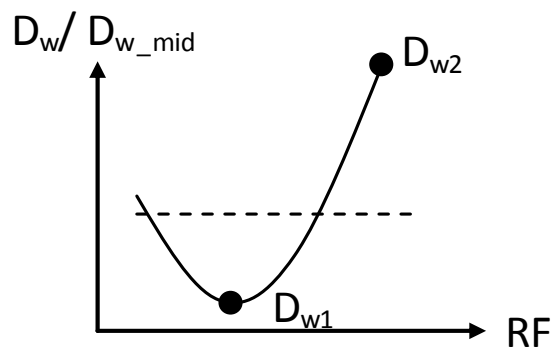


Fig. 7.1 Diffusivitetens fuktberoende

I exemplet i steg 5, se avsnitt 6.3, blev det klart att detta beräkningssteg bör ändras så att man istället för diffusiviteter använder fukttransportkoefficienten δ . Passningen blir då också mycket enklare.

7.2 Exempel, steg 6.

En ny beräkning på samma sätt som tidigare har gjorts genom att bara öka fukttransportkoefficienten δ till det dubbla. Resultatet framgår av figur 6.2.

Beräknad RF är nu ett par tiondels % lägre än de loggade värdena. Förloppet är också nu helt annorlunda än det loggade uttorkningsförloppet. Något uppenbar förklaring till detta har inte hittats.

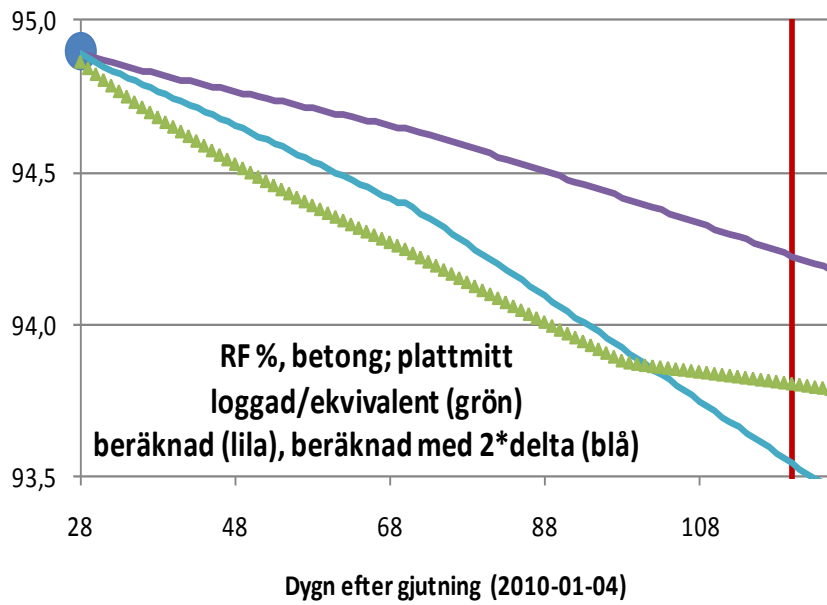


Fig. 7.2 Loggad RF i betongen jämfört med beräknade värden, dels första beräkningen (övre kurvan) och dels den andra (undre, blå kurva), med dubbel så stor δ .

8 Steg 7: Beräkning av fortsatt uttorkning

8.1 Beräkning av $RF(x=0.5L, t_1 < t < t_{\text{target}})$ i betong.

I den första versionen av beräkningsgången beskrevs steg 7 på följande sätt.

Lös massebalanceligningen

Initiellt: $RF(x, t=t_1)$

Med diffusiviteter D_{w1} , D_{w2}

Tilpasning med $RF(t > t_1)$ $T(t > t_1)$ i luft

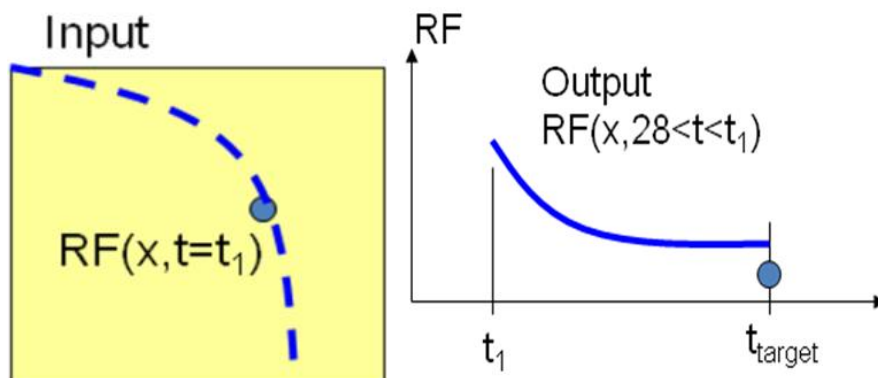


Fig. 8.1 Initialvillkor för den slutliga beräkningen (till vänster) och principiellt uttorkningsförlopp (till höger).

8.2 Exempel, steg 7.

Eftersom det finns en så uppenbar skillnad mellan det loggade uttorkningsförloppet och det beräknade, och skillnaden inte kan förklaras, har inte exemplet prövats i de fortsatta stegen.

9 Steg 8: Val av torkklimat

9.1 Alternativa val av önskat uttorkningsklimat.

I den första versionen av beräkningsgången beskrevs det sista steget på följande sätt.

Tilpas $RF(t > t_1)$ $T(t > t_1)$ i luften sådan att beräknat $RF(x=0.5L, t=t_{\text{target}})$ i betonen stämmer överens med $RF_{\text{target}}(t_{\text{target}})$

Pröv flera alternative $RF(T)$

Alternativt: Önsket udtørningstid

Såfremt der ønskes nyt tørreklima skal de fundne diffusiviteter justeres med en faktor, idet v_s i

$D_w = \frac{\delta}{d(RH)} \cdot v_s$ varierer med temperaturen.

$$D_w(T) = \frac{v_m(T)}{v_m(T_{ref})} \cdot D_w(T_{ref}) \quad (9:1)$$

Denne justering er givet ved:

$$v_m(T) = e^{\frac{a-b}{T+273.16}}; \quad [g / m^3] \quad (9:2)$$

hvor c og d er givet ved værdene i tabellen.

	$T > 0^\circ\text{C}$	$T < 0^\circ\text{C}$
c	20.111	23.077
d	5060.73	5871.99

Olika alternativa torkklimat kan sedan redovisas enligt nedanstående figur, där torkklimat som uppfyller kravet har markerats med "OK". Användaren av systemet för beslutsstöd kan sedan välja bland dessa alternativ och ta hänsyn till andra parametrar i valet.

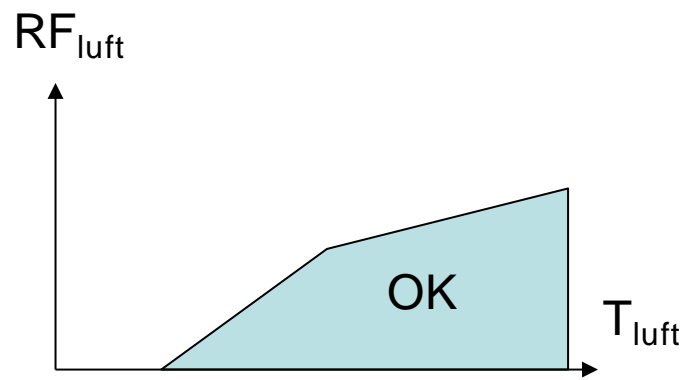


Fig. 9.1 Alternativa torkklimat (RF_{luft} , T_{luft}) som ger uttorkningsförlopp som uppfyller kraven.

10 Konklusioner

Den första versionen av systemet för beslutsstöd har reviderats på ett antal punkter vid applicering av systemet på ett exempel. Detta gäller främst användningen av fukttransportkoefficienten δ istället för diffusiviteter D_w .

Systemet verkar fullt användbart i denna reviderade version.

Det finns ett antal frågetecken i beräkningarna som innebär oklarheter kring vilken osäkerhet som beräkningarna ger. Den största osäkerheten ligger i att beräknade uttorkningsförlopp i det valda exemplet inte kunde simulera det verkliga, "loggade" uttorkningsförloppet. Förklaringen till denna skillnad bör först utredas innan man fortsätter utvecklingen av ett system för beslutsstöd vid fortsatt uttorkning.

Referenser

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

Hedenblad, G. (1993) Moisture permeability for cement paste, mortar and concrete. Rapport TVBM-10XX, Avd. Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola, Lund

RBK, www.rbk.nu

Sjöberg, A., Nilsson, L.-O. & Rapp, T. (2002) Chalmers tekniska högskola

Bilaga 1: Beregningsgang, version 0

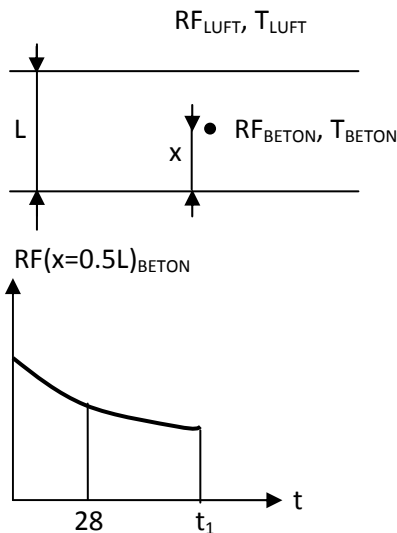
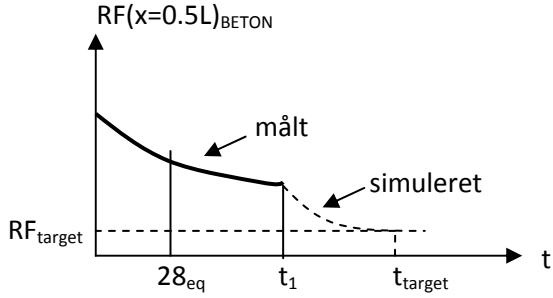
Beslutningsstøttesystem, Version 0 Beregningsgang

Nomenklatur:

RF=relativ luftfugtighed

T=temperatur

t=tid

<p>Input</p> <p><i>Fra sensorer i hhv. beton og luft</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • $RF(x=0.5L, t < t_1)$ i beton • $T(x=0.5L, t < t_1)$ i beton • $RF(t < t_1)$ i luft • $T(t < t_1)$ i luft <p><i>Fra bruger</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Beton (w/c, cementtype, C) • Enkeltsidig eller dobbeltsidig udtørring? • RF_{target} (evt. ved t_{target}) <p><i>Softwareparametre til at variere den simulerede udtørringstid</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • $RF(t_1 < t < t_{target})$ i luft • $T(t_1 < t < t_{target})$ i luft 	 <p>The diagram shows a concrete slab of thickness L with a sensor at x measuring RF_{BETON}, T_{BETON}. The air above has RF_{LUFT}, T_{LUFT}. Below the slab, a graph plots $RF(x=0.5L)_{BETON}$ against time t. The curve starts at a high value and decays towards a target value. Key time points 28 and t_1 are marked on the x-axis.</p>
<p>Output</p> <p>Ønsket udtørringsklima $RF(t > t_1), T(t > t_1)$ i luft for at nå $RF_{target}(t_{target})$</p> <p>Alternativt: Tilbageværende tørretid? (i samme udtørringsklima)</p>	 <p>The graph plots $RF(x=0.5L)_{BETON}$ against time t. It shows a solid line for 'målt' (measured) data and a dashed line for 'simuleret' (simulated) data. A horizontal dashed line represents RF_{target}. Key time points 28_{eq}, t_1, and t_{target} are marked on the x-axis.</p>

Step 1 – Omregning af T til T_{ref}

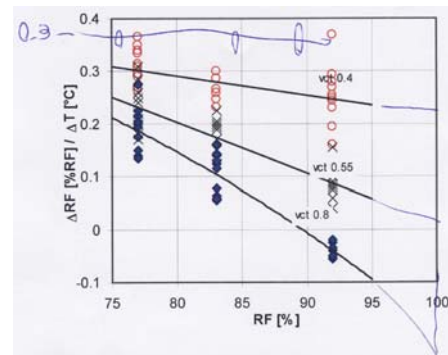
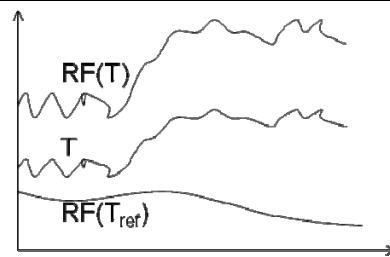
- RF(x=0.5L, t<t₁) i beton
- T(x=0.5L, t<t₁) i beton

Omregnes til

- RF(T_{ref}, x=0.5L, t<t₁) i beton.
Dette kan f.eks. være RF ved 20°C:

$$RF(T_{20}) = RF(T) + (T_{20} - T) \cdot \frac{dRF}{dT}$$

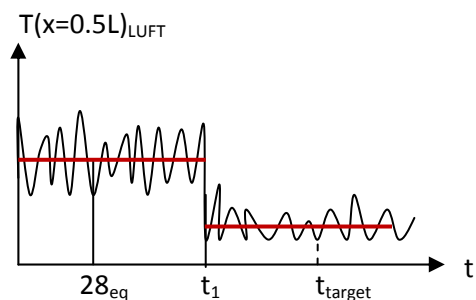
Hvor dRF/dT er givet ved:



Step 2 – Opdeling i konstante T-intervaller

- Opdeling af T(x=0.5L, t<t₁) i luften i T(t)-intervaller med store T-differenser
- Dette gøres f.eks. ved at udnytte "bevægeligt gennemsnit"
- Resultat: Tidsintervaller med tydeligt forskellige temperaturer, samt interval ved 28 modenhedsdøgn (=28_{eq}). Modenheden udregnes ved

$$t_{20} = \int_0^t k_T dt = \int_0^t \left(\frac{T + 10}{30} \right)^2 dt \text{ for } T > -10^\circ C$$



Step 3 - Principielt RF-profil 28 døgn

Formen på RF-profilet efter 28 døgn bestemmes. Denne skæring benyttes idet man især indenfor de første 28 døgn er nødt til at justere udtørningsprofilet for hydratiseringseffekter. Denne effekt antages at kunne negligeres efter 28 døgn)

- Løs massebalanceligningen (ekskl. selvudtørningsdelen; ej vist her) hvor w er fugtindholdet, t er tiden, x er dybden og D_w er diffusiviteten.
- D_w er principielt givet ved $D_w = \frac{\delta}{\frac{dw}{d(RF)}} \cdot v_s$ hvor δ er fugttransportkoefficienten, v_s er det mættede vanddamp-indhold og $\frac{dw}{d(RF)}$ er hældningen på sorptionskurven i det givne punkt. I givne tilfælde benyttes en fast D_w-kurve som vist t.h. hvor D_w er afhængig af RF og v/c.
- Sorptionskurven (kendt fra målinger) benyttes til at

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} - D_w(T, RF) \frac{\partial w}{\partial x}$$

omregne den målte RF til fugtindhold, w .

- Løsning af massebalanceligningen kræver kendskab til nogle initial og randbetingelser. Initialbetingelsen er at ved $t=0$ er vandindholdet konstant=udgangsvandindholdet på betonen igennem hele tværsnittet.

Udgangsvandindholdet fås fra brugers input-oplysninger om v/c -tal og cementindhold/ m^3 beton, c . Dette tal skal fratrækkes det kemisk bundne vand, hvilket vil variere gennem hele perioden. Det er derfor valgt at fratrække den mængde vand der er kemisk bundet efter 28 modenhedsdøgn, idet der i step 4 justeres netop for denne fejl. Mængden af kemisk bundet vand er til ethvert tidspunkt givet ved $0,25 \cdot \alpha \cdot c$, hvor α er hydratiseringsgraden.

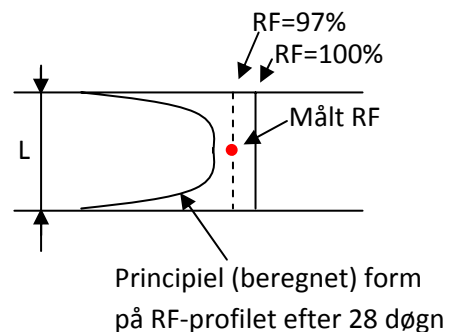
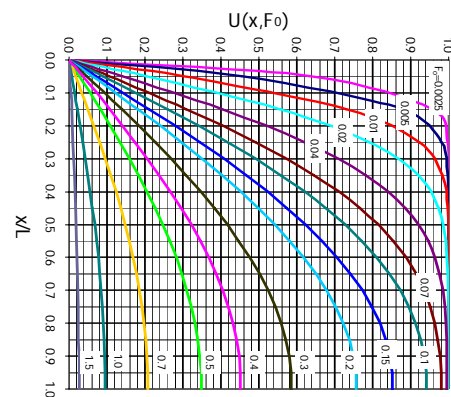
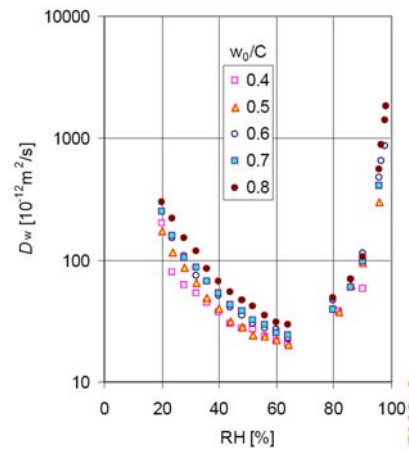
Hydratiseringsgraden er givet ved:

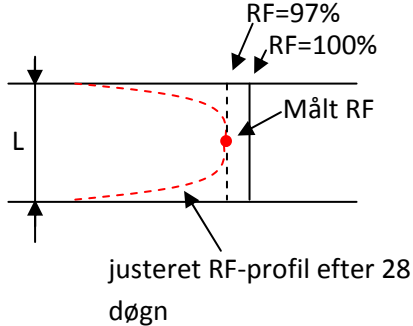
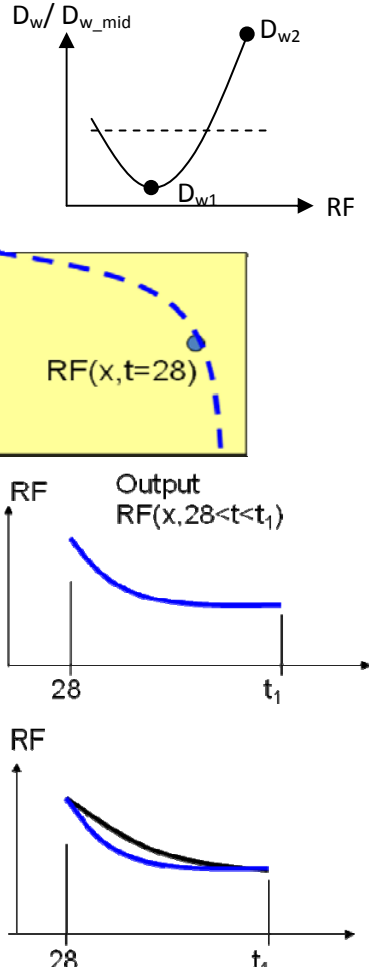
$\ln(\alpha) = a \cdot \ln(t/28)^b$ hvor a og b er afhængige af cementtypen. Typiske værdier er $a=-10$ (-5 til -20) og $b=-2$. t angives i timer.

Randbetingelsen består i kendskab til, at betonens RF i overfladen for $t>0$ antages at være = luftens RF (omregnes til vandindhold).

Til højre er vist eksempel på løst massebalanceligning, hvor x/L er tværsnitsdybden og $U(x, F_0)$ er fugtindholdet.

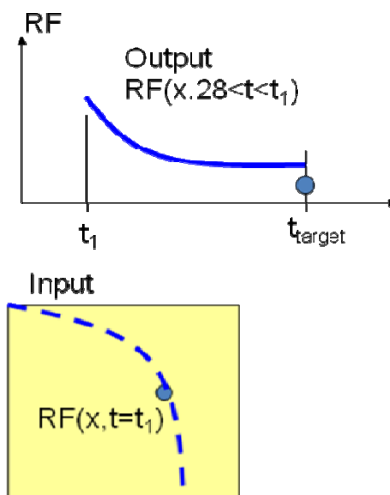
Det resulterende principielle RF-profil kan f.eks. se ud som vist t.h. Her er også vist det faktiske måleresultat fra målingen i midten.



<p>Step 4 - Justeret RF-profil 28 døgn</p> <ul style="list-style-type: none"> RF-profilet justeres så det beregnede profil $RF(x=0.5L, t=28d)$ i betonen stemmer med målte værdier. 	
<p>Step 5 - Beregn $RF(x=0.5L, t < t_1)$ i betonen</p> <ul style="list-style-type: none"> Løs massebalanceligningen hvor randbetingelserne er givet ved: Initielt: $RF(x, t=28)$ $RF(28 < t < t_1)$ i luft $T(28 < t < t_1)$ i luft Funktion af parametrene: D_{w1}, D_{w2} 	
<p>Step 6 - Diffusivitet D_w</p> <ul style="list-style-type: none"> I dette tilfælde er givet en diffusivitet, hvor kurveformen er givet, men kan rykkes op og ned som fitting-parameter. Ydermere benyttes fitting af D_{w1} og D_{w2} ved hhv. 70% og 100% RF til at sikre at kurven passer på hele forløbet (der fittes efter start, midt og slut af forløbet). <p>D_{w1}, D_{w2} tilpasses, så beregnet $RF(x=0.5L, t < t_1)$ i beton stemmer med måleværdierne ved tiderne $t=t_1$ og $t=(t_1-28)/2+28$</p>	

Step 7 - Beregn RF(x=0.5L, t₁<t<t_{target}) i beton

- Løs massebalanceligningen
- Initielt: RF(x, t=t₁)
- Med diffusiviteter D_{w1}, D_{w2}
- Tilpasning med RF(t>t₁) T(t>t₁) i luft



Step 8 - Ønsket tørreklima

- Tilpas RF(t>t₁) T(t>t₁) i luften sådan at beregnet RF(x=0.5L, t=t_{target}) i betonen stemmer overens med RF_{target}(t_{target})
- Prøv flere alternative RF(T)

Alternativt: Ønsket udtørningstid

Såfremt der ønskes nyt tørreklima skal de fundne diffusiviteter justeres med en faktor, idet v_s i

$D_w = \frac{\delta}{a \cdot v_s} \cdot v_s$ varierer med temperaturen. Denne

justering er givet ved: $v_m(T) = e^{c - \frac{d}{T+273.16}}$ [g/m³] hvor c og d er givet ved

	T>0°C	T<0°C
c	20.111	23.077
d	5060.73	5871.99

$$D_w(T) = \frac{v_m(T)}{v_m(T_{ref})} \cdot D_w(T_{ref})$$

$$v_m(T) = e^{c - \frac{d}{T+273.16}}; \quad [g/m^3]$$

Bilaga 2: Berägningsverktyget KFX

Datorverktyget *KFX03* för en-dimensionell beräkning av samtidiga fukt- och temperaturändringar med fuktberoende materialegenskaper och tidsvarierande randvillkor.

Bakgrund

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

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

Programmet

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

Fuktttransport beskrivs med ekvationerna

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

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

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

Materialegenskaper

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

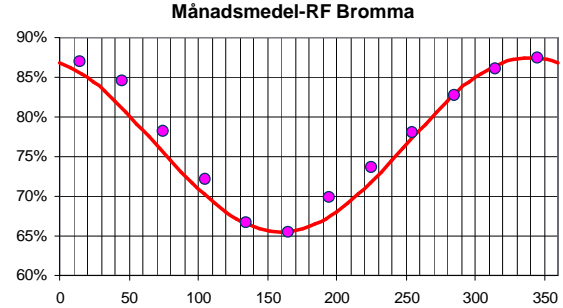
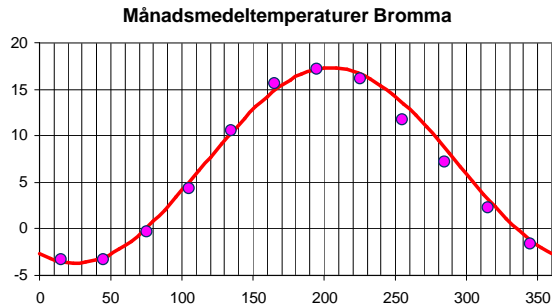
Fukthaltsändringar beskrivs med hjälp av materialens sorptionskurva, vars "omvända S-form" kan beskrivas med fyra parametrar.

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

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

Randvillkoren

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



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

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

Exempel på ett indatablad:

Material	Element	Element													
		Sida I	I-1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	II-1	Sida II
Wen	[kg/m ³]			0.25	0.25	0.25	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	
Wen	[kg/m ³]			0.8	0.8	0.8	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	
Wen	[kg/m ³]			0.8	0.8	0.8	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	
α, formfaktor				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
U ₀	[W/m ²]			1.5E-05	1.5E-05	1.5E-05	1.0E-07	1.0E-07	1.0E-07	1.0E-07	1.0E-07	1.0E-07	1.0E-07	1.0E-07	
U ₁	[W/m ²]			1.5E-05	1.5E-05	1.5E-05	5.0E-06	5.0E-06	5.0E-06	5.0E-06	5.0E-06	5.0E-06	5.0E-06	5.0E-06	
U ₂	[W/m ²]			1.5E-05	1.5E-05	1.5E-05	6.0E-06	6.0E-06	6.0E-06	6.0E-06	6.0E-06	6.0E-06	6.0E-06	6.0E-06	
U ₃	[W/m ²]			1.5E-05	1.5E-05	1.5E-05	6.0E-06	6.0E-06	6.0E-06	6.0E-06	6.0E-06	6.0E-06	6.0E-06	6.0E-06	
Elementvikt	[m]			0.04	0.04	0.04	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	
W _{in} vikt	[m]			0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	
R ₀ övergångsotstånd	[m E/W]			0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
R ₀ övergångsmotstånd	[m]			0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Element				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
W _{in} vikt				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
R ₀ övergångsotstånd				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
R ₀ övergångsmotstånd				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

Mellan element	I-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-II
Ångström	1.5E-07										1.5E-07

T _{in}	[°C]	Sida I		Sida II	
		alt 1	alt 2	alt 1	alt 2
T _{in}	[°C]	22	22	T _{in}	[°C]
T _{in}	[°C]	0	0	Max RF _{in}	[%]
T _{in} (för T _{in})	[W/m ²]	10	10	U _{in} = m - u _{in}	[kg/m ³]
RF _{in}		100.0%	-0.0%		
RF _{in} (för RF _{in})		0.0%	0.0%		
RF _{in} (för RF _{in})	[W/m ²]	100	100		
T _{in}	[W/m ²]	0	0		
T _{in}	[W/m ²]	0	0		
T _{in} (för T _{in})	[W/m ²]	0	0		
T _{in} (för T _{in})	[W/m ²]	0	0		

T _{in}	Period	[dagar]	0.00
T _{in}	Period	[dagar]	0.00
T _{in}	T _{in} (för T _{in})	[m]	0.01
T _{in}	T _{in} per resultat	[m]	0.01
T _{in}	T _{in} totalt	[dagar]	0.00

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.000	0.060	0.100	0.160	0.200	0.250	0.300			

Calculate

Beräkningsresultat

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

Exempel på alternativa sätt att presentera beräkningsresultaten:

