



# LUND UNIVERSITY

## Förändringsprocesser i reaktorinneslutningar : betongväggarnas klimatförhållanden och uttorkning

Nilsson, Lars-Olof; Johansson, Peter

2009

[Link to publication](#)

*Citation for published version (APA):*

Nilsson, L.-O., & Johansson, P. (2009). *Förändringsprocesser i reaktorinneslutningar : betongväggarnas klimatförhållanden och uttorkning*. (Elforsk rapport; Vol. 09:100). Elforsk.  
[http://www.elforsk.se/Rapporter/?rid=09\\_100\\_](http://www.elforsk.se/Rapporter/?rid=09_100_)

*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

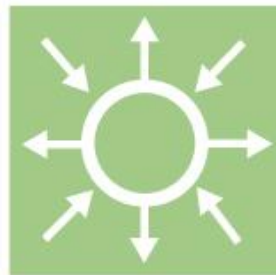




# Förändringsprocesser i reaktorinneslutningar

Betongväggarnas klimatförhållanden och  
uttorkning

Elforsk rapport 09:100



Lars-Olof Nilsson, Peter Johansson

September 2009

# **Förändringsprocesser i reaktorinneslutningar**

Klimatförhållanden och uttorkning

Elforsk rapport 09:100

## Förord

Sedan 2007 pågår inom Elforsk ett forskningsprogram kring betongkonstruktioner inom kärnkraftverken. Det finns ett behov av att både bygga upp kompetens inom området och att utveckla teknikbasen för teknisk förvaltning av byggnader och konstruktioner inom kärnkraftindustrin. Det övergripande målet med det betongtekniska programmet är att säkerställa avsedd livslängd och hög tillgänglighet för svenska kärnkraftverk med bibehållen säkerhet. Programmet finansieras av Vattenfall, av kärnkraftverken i Forsmark, Ringhals samt OKG i Oskarshamn, av Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) samt av Teollisuuden Voima Oy (TVO) i Finland. Inom ramen för detta forskningsprogram har föreliggande projekt "Prognoser över förändringsprocesser hos betong i reaktorinneslutningar" beställts.

Projektet bygger på ett tidigare materialprovsningsprojekt med Scanscot Technology AB som projektledare och som finansierades av SSM, Barsebäck Kraft AB, Forsmark, OKG, Ringhals och Teollisuuden Voima Oy.

Projektet har genomförts av Peter Johansson vid Lunds Tekniska Högskola med Lars-Olof Nilsson som projektledare. Det har följts av Betongprogrammets styrgrupp bestående av Jonas Bergfors EON OKG, Jan Gustavsson och Urban Broms Vattenfall Ringhals, Christian Bernstone och Manouchehr Hassanzadeh Vattenfall Research and Development, Kostas Xanthopoulos SSM, Lars-Erik Berglund, Marcus Edin och Philip Persson Vattenfall Forsmark samt Juha Riihimäki TVO. Elforsk tackar styrgruppen för värdefulla synpunkter och kommentarer.

Personal från Ringhals kärnkraftverk gjorde temperaturdata tillgängliga och var till stor hjälp vid loggningen av klimatförhållanden. Jan Gustavsson vid Ringhals AB gjorde betydande insatser i samband med fältmätningarna och hjälpte till med mycket information om anläggningarna. Laboratoriepersonalen vid avdelningen för Byggnadsmaterial har också alla bidragit till projektet på ett förtjänstfullt sätt.

Elforsk i september 2009

Lars Wrangensten

Programområde Kärnkraft

## Sammanfattning

Projektet har haft som övergripande syfte att bedöma och kvantifiera tidigare och framtida förändringsprocesser i betonginneslutningarna i de två typerna av svenska kärnkraftverk. Detta skall kunna utgöra en del av underlaget för bedömning av kvarvarande livslängd hos inneslutningarna. Projektet har lagt huvudvikten vid den pågående uttorkningen av fukten i inneslutningsväggen och hur fuktfördelningen har varit och kommer att ändras framöver.

Två typer av reaktorinneslutningar har studerats, BWR och PWR (*Boiling Water* resp. *Pressurized Water Reactor*). De har båda en tjock betongvägg som är uppbyggd av en yttre och en inre betongcylinder med en helsvetsad stålplåt emellan, men BWR-inneslutningar är omgivna av en byggnad så att de inte kommer i direktkontakt med uteklimatet. PWR-inneslutningar är till stor del direkt exponerade för uteklimat. Förhållandena inuti inneslutningarna karakteriseras främst av en med höjden ökande drifttemperatur, upp till ca +40-50°C.

Sådana betongkonstruktioner, med ensidig uttorkning av 0.8 m tjocka väggar, kommer att torka extremt långsamt trots den mycket höga temperaturen i delar av konstruktionen. Detta upptäcktes i en tidigare undersökning efter ca 30 års uttorkning där fuktmätningar gjordes.

En uttorkningsmodell presenteras i rapporten och de olika delarna beskrivs i detalj och är experimentellt kvantifierade. Särskilt fukteffekter på cementreaktionerna som binder vatten kemiskt diskuteras. Omfattande studier har också gjorts av klimatförhållandena på de utvändiga betongytorna, som är randvillkor i uttorkningsberäkningarna. Med fältmätningar under en årscykel på både en BWR- och en PWR-inneslutning har klimatmodeller kunnat formuleras som gör det möjligt att beskriva klimatförhållandena både historiskt och i framtiden genom korttidsmätningar och loggade data på drifttemperaturer.

Den första beräkningen med en förenklad modell visade hyfsad överensstämmelse med fältmätningar. Beräkningsmodellen har sedan uppdaterats efter verifiering mot laboratoriemätningar under mer än två år. Nya beräkningar överensstämmer därefter mycket bra med fältmätningensresultaten. Beräkningar har därefter gjorts för en PWR-inneslutning exponerad för uteklimat.

## Summary

The overall objective of the project is to assess and quantify previous and future changes in the concrete containment walls of the two types of nuclear reactors in Sweden. The results are meant to be a part of the foundation for assessment of the remaining service-life of the containments. The project has been concentrated on the moisture conditions in the containment walls and how the moisture distributions will change in the future, due to further drying.

Two types of nuclear reactor containments are studied, for BWR reactors and PWR reactors in Sweden. They both have a thick concrete wall with a steel lining inside, but the BWR containment walls are enclosed in a building, protecting it from the outdoor climate. The PWR containment walls are exposed to outdoor weather conditions. The conditions inside the containment walls include high temperature, up to around +40-50°C.

Such a concrete structure, with one-sided drying of a 0.8 m thick wall, will dry extremely slow, in spite of the very high temperatures in part of the structure. This was seen in an earlier study after some 30 years of drying where moisture measurements were performed.

A drying model for concrete containments is presented and the various parts are described in detail and partly experimentally quantified. Especially the moisture effects on the extent of the cement reactions chemically binding water are discussed. Extensive studies have been carried out for clarifying the climatic conditions at the outer concrete surfaces, which are boundary conditions in the drying predictions. Through field measurements during a year for both a BWR and a PWR containment climate models could be formulated which makes it possible to describe the past and future climatic conditions from short-term measurements and data on temperatures during service.

A first prediction with a simplified model shows fairly good agreement with measured data. The model is updated after verification against laboratory measurements of drying at high temperatures for more than two years. A second prediction coincides very well with measured data. Predictions are also made for a PWR containment wall exposed to outdoor climate.

## Innehåll

<b>1</b>	<b>Bakgrund</b>	<b>1</b>
1.1	Bakgrund, syfte .....	1
1.1.1	Begränsningar.....	1
1.2	Tidigare fuktmätningar .....	1
1.3	Genomförande - principiellt .....	4
1.3.1	Beskrivning av miljöpåverkan på reaktorinneslutningar .....	4
1.3.2	Detaljerad beskrivning av betongmaterial och betongkonstruktionerna m a p möjliga förändringsprocesser .....	4
1.3.3	Inventering och analys av internationella och nationella erfarenheter.....	4
1.3.4	Tillståndsbedömning – förändringar hittills .....	4
1.3.5	Analys av fuktförhållanden hos betong i reaktorinneslutningarna.....	4
<b>2</b>	<b>Beräkningsmodell</b>	<b>6</b>
2.1	Traditionella, förenklade uttorkningsberäkningar .....	6
2.2	Uttorkningsberäkningar för betong .....	8
<b>3</b>	<b>Materialegenskaper</b>	<b>10</b>
3.1	Kemisk bindning av vatten .....	10
3.1.1	Teoretisk bakgrund .....	10
3.1.2	Tidigare mätning i reaktorinneslutningsväggar .....	12
3.1.3	Nya studier i svepelektronmikroskop .....	13
3.1.4	En ny metod att mäta fuktberoendet hos cementreaktionerna ...	15
3.2	Jämviktsfuktkurvor.....	16
3.2.1	Teoretisk bakgrund .....	16
3.2.2	Tidigare mätningar .....	16
3.2.3	Sorptionskurvans temperaturberoende - allmänt .....	18
3.2.4	Mätningar av sorptionskurvans temperaturberoende med sorptionsvåg .....	19
3.2.5	Mätningar av RF-ändringar på förseglade prover vid temperaturändring.....	21
3.3	Fukttransportegenskaper .....	23
3.3.1	Teoretisk bakgrund .....	23
3.3.2	Tidigare mätningar av fukttransportegenskaper.....	24
3.3.3	Fukttransportegenskaper vid höga temperaturer .....	25
3.3.4	Fukttransport under temperaturgradient.....	26
<b>4</b>	<b>Uttorkningsförsök</b>	<b>30</b>
4.1	Försöksupplägg.....	30
4.1.1	Material och provkroppar .....	30
4.1.2	Torkklimat och mätningar .....	33
4.2	Resultat – viktförluster .....	33
4.3	Resultatanalys av viktförluster .....	36
4.4	Resultat – fuktprofiler .....	37
4.4.1	137 dygns membranhärdning.....	38
4.4.2	165-200 dygns uttorkning .....	39
4.4.3	300 dygns uttorkning .....	42
4.4.4	450 dygns uttorkning .....	44
4.4.5	600 dygns uttorkning .....	45
4.5	Sammanställning av fuktprofiler vid olika torktider .....	48
4.5.1	KMG-profiler under 600 dygns uttorkning vid +20°C .....	49
4.5.2	KMG-profiler under 600 dygns uttorkning vid +50°C .....	50
4.5.3	RF-profiler under 600 dygns uttorkning vid +20°C .....	52

4.5.4	RF-profiler under 600 dygns uttorkning vid +50°C .....	53
<b>5</b>	<b>Klimatpåverkan</b>	<b>55</b>
5.1	Klimatpåverkan på BWR-inneslutningar i B1 & B2 .....	55
5.1.1	Tillgängliga mätdata.....	55
5.1.2	Klimatloggning i B2.....	56
5.1.3	Yttertemperaturer i B2 .....	60
5.1.4	Beräkningar .....	62
5.1.4	Konklusioner .....	65
5.2	Klimatpåverkan på BWR-inneslutningen i R1.....	66
5.2.1	Klimatförhållande på reaktorinneslutningens utsida.....	67
5.2.2	Jämförelse av olika nivåer.....	78
5.2.3	Klimatförhållande på reaktorinneslutningens insida .....	81
5.2.4	Konklusion .....	84
5.3	Klimatpåverkan på PWR-inneslutningen i R3.....	85
5.3.1	Klimatförhållande på reaktorinneslutningen utsida (del som är exponerad för utomhusklimat) .....	85
5.3.2	Klimatförhållande på reaktorinneslutningen utsida (del som inte är exponerad för utomhusklimat) .....	101
5.3.3	Klimatförhållande på reaktorinneslutningen insida .....	106
5.3.4	Konklusion.....	110
5.4	Klimatpåverkan – konklusioner .....	111
<b>6</b>	<b>Beräkningar</b>	<b>114</b>
6.1	Första beräkningar för B1.....	114
6.2	Beräkningar – inverkan av sorptionskurvans form .....	115
6.3	Jämförelser laboratoriemätningar - beräkningar .....	119
6.3.1	Experiment vs. beräkningar, 170 mm. Viktsförluster .....	119
6.3.2	Experiment vs. beräkningar, 100 mm. Viktsförluster .....	120
6.3.3	Experiment vs. beräkningar, RF-profiler.....	121
6.4	Nya beräkningar för B1 .....	122
6.5	Fortsatta beräkningar för BWR-inneslutningar.....	125
6.6	Första beräkningar för R3.....	128
6.7	Slutsatser angående beräkningar .....	132
<b>7</b>	<b>Slutsatser</b>	<b>133</b>
<b>8</b>	<b>Publikationer, referenser, litteratur</b>	<b>134</b>
8.1	Projektpublikationer internationellt .....	134
8.2	Referenser .....	134
8.3	Litteraturlista.....	136

# 1 Bakgrund

## 1.1 Bakgrund, syfte

Projektet "Prognoser över förändringsprocesser hos betong i reaktorinneslutningar" har haft som övergripande syfte att bedöma och kvantifiera tidigare och framtida förändringsprocesser i betonginneslutningarna i de två typerna av svenska kärnkraftverk. Detta skall kunna utgöra en del av underlaget för bedömning av kvarvarande livslängd hos inneslutningarna.

Kvantifieringen av naturliga förändringsprocesser, och sådana som orsakats av driftförhållandena (t ex höga temperaturer), skall baseras på förändringsmodeller på vetenskaplig grund, med indata i form av uppmätta materialegenskaper, så långt som är möjligt, och på randvillkor i form av uppmätta och särskilt prognosticerade klimatdata för inneslutningarnas ut- och insida. Underlaget då det gäller förändringsprocesser som bedöms som mer eller mindre irrelevanta skall också dokumenteras.

För de flesta förändringsprocesserna i armerade betongkonstruktioner är fuktförhållandena viktiga och ibland helt avgörande. I inneslutningar för kärnkraftreaktorer påverkar fuktförhållandena i huvudsak krympning och krypning hos inneslutningsväggarna och därmed spänningsförluster hos spännarmeringen, Anderson (2005). För initiering av, och hastigheten hos, metallkorrosion är fukttillståndet också avgörande. Uttorkningsprocessen och den möjliga uttorkningsgraden beror på randvillkoren, dvs. fukttillståndet på betongytorna.

### 1.1.1 Begränsningar

Projektet har lagt huvudvikten vid den pågående uttorkningen av fukten i inneslutningsväggen och hur fuktfördelningen har varit och kommer att ändras framöver. Det behandlar dock inte konsekvenser av denna uttorkning över tid, dvs krympning, krympspänningar och krypdeformationer över tvärsnittet. Dessa förändringar är väsentliga för t ex spännkraftförluster över tiden, som behandlas i andra projekt. Andra förändringsprocesser har analyserats men bedömts som mindre väsentliga.

## 1.2 Tidigare fuktmätningar

Tillförlitligheten i projektresultaten baseras mycket på att jämförelser varit möjliga med bra fältmätningar. Efter ca 30 års användning stängdes först Barsebäck 1 och ett par år senare Barsebäck 2. Här har det varit möjligt att dels ta ut prover för fuktmätning och mätning av materialegenskaper och dels samtidigt kartlägga klimatförhållandena under driftförhållanden så länge Barsebäck 2 var i drift.

Jämförelser med dessa tidigare fuktmätningar görs på ett antal ställen i rapporten. I figur 1.1 visas de två punkter där borrhävar för dessa mätningar

togs ut. Temperaturerna under drift har varit helt olika i dessa två punkter, med ca +25°C vid den undre och ca +50°C vid den övre.

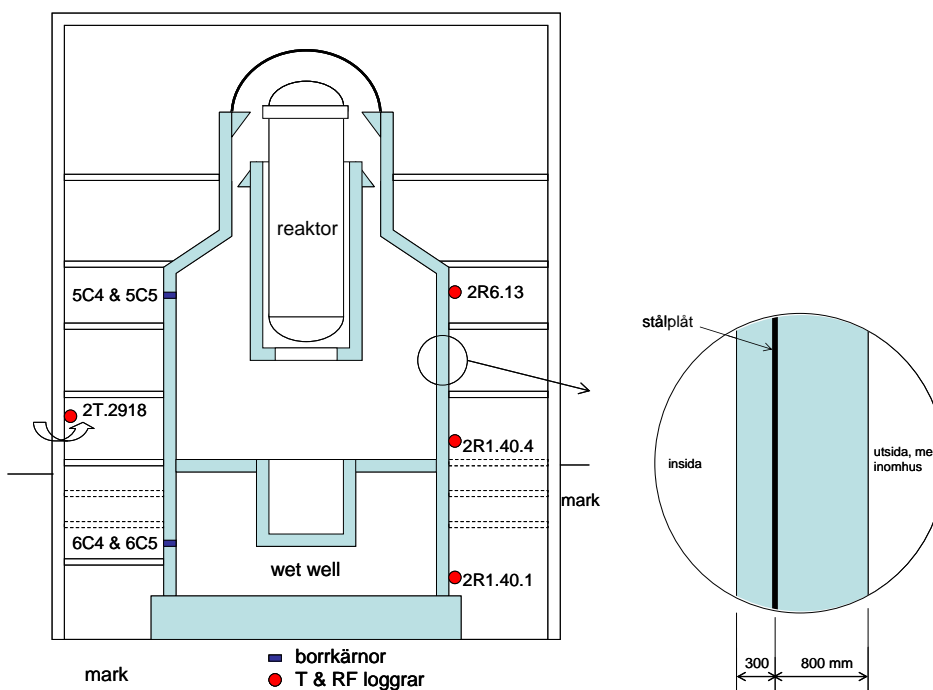


Fig. 1.1 Principskiss över en BWR-inneslutning med punkterna markerade där borrhäror tagits ut i ett tidigare projekt. En detalj över inneslutningsväggen visas till höger, med stålplåtens läge

I figur 1.2 visas fördelning av relativ fuktighet (RF) genom den yttre, ca 800 mm tjocka delen av inneslutningsväggen i den undre punkten. Temperaturen under drift var här ca +25°C. I figur 1.3 visas motsvarande för den övre provtagningspunkten, där drifttemperaturen varit ca +50°C.

Av de uppmätta fuktprofilerna framgår det tydligt att väggarna fortfarande håller på att torka ut, efter mer än 30 års uttorkning. I den undre punkten är RF fortfarande 90 % i den innersta delen närmast stålplåten. I den övre delen där temperaturen varit nära +50°C under mer än 30 år, är RF fortfarande omkring 85 % intill stålplåten.

Uttorkningsförloppet är uppenbarligen extremt långsamt, även där temperaturen varit hög, på grund av den tjocka konstruktionen och att den bara torkar på ett håll.

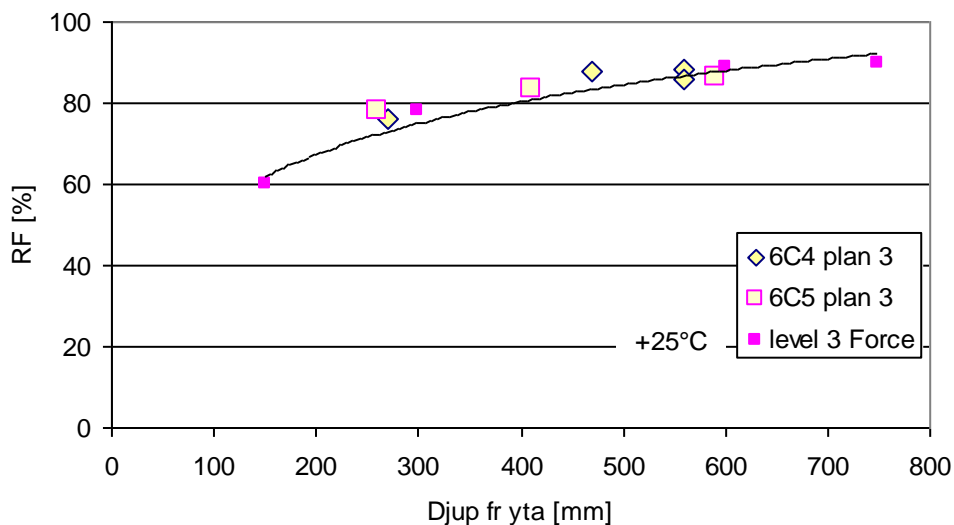


Fig. 1.2 Uppmätta RF-fördelningar genom den yttre delen av inneslutningsväggen i borrhål (level3 Force) och på två borrhärnor från nivå 3, där drifttemperaturen varit ca +25°C, Nilsson (2005). Osäkerheten är ca 2 % RF (på prover) och 3 % RF (i borrhål).

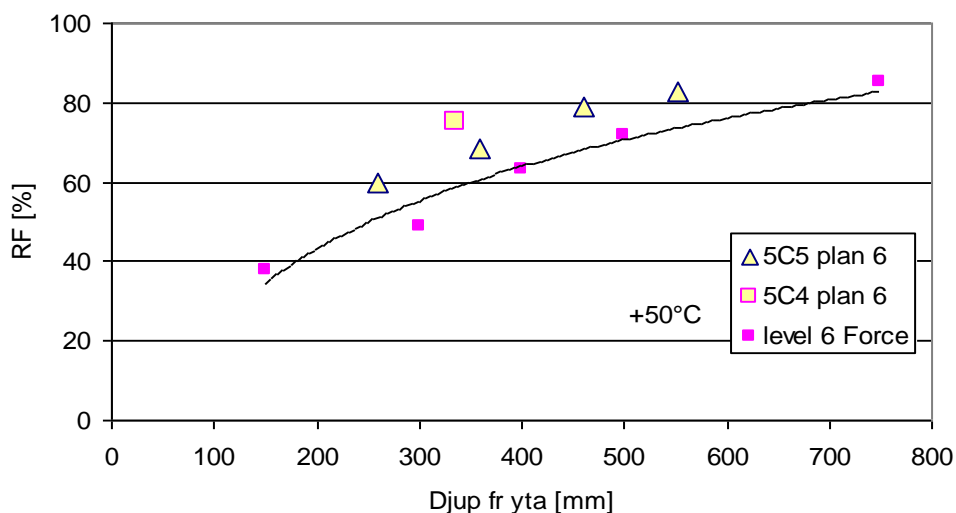


Fig. 1.3 Uppmätta RF-fördelningar genom den yttre delen av inneslutningsväggen i borrhål (level6 Force) och på två borrhärnor från nivå 6, där drifttemperaturen varit ca +50°C, Nilsson (2005). Osäkerheten är ca 2 % RF (på prover) och 3 % RF (i borrhål).

Från mätresultaten är det också tydligt att den varmare delen av väggen torkar i mycket torrare klimat. Om man extrapolerar RF-profilerna fram till betongytan hamnar man på ca 10 % RF, jämfört med ca 35-40 % RF i den undre, kallare delen.

### 1.3 Genomförande - principiellt

De moment som ingått i projektet har varit följande.

#### 1.3.1 Beskrivning av miljöpåverkan på reaktorinneslutningar

Den faktiska miljön på ömse sidor om reaktorinneslutningarnas olika delar, och angränsande konstruktionsdelar, dokumenteras genom fortsatt inventering av de mätningar inuti inneslutningen som finns på verken och en teoretisk analys av vad som borde förväntas på utsidan. Besök görs hos ett antal verk för att få klimatförhållandena mer klarlagda. Klimatförhållandena på utsidan dokumenteras, på samma sätt som gjorts under några månader på B1, med fortsatta mätningar/loggningar under minst en årscykel. Beskrivningen skall göras för de två typerna av svenska kärnkraftverk, med B2 och endera av R2-R4 som exempel.

#### 1.3.2 Detaljerad beskrivning av betongmaterial och betongkonstruktionerna m a p möjliga förändringsprocesser

Detaljerad genomgång av materialsammansättningar, egenskaper hos delmaterial samt använd produktions teknik i svenska verk med avseende på förutsättningar för vissa förändringsmekanismer. Ytterligare mätningar av nödvändiga materialegenskaper på prover uttagna i Barsebäck 1.

#### 1.3.3 Inventering och analys av internationella och nationella erfarenheter

Internationella konferenser inom området bevakas och pågående arbeten runt om i världen inventeras och kontakter knyts med viktiga internationella forskningsinstitutioner.

#### 1.3.4 Tillståndsbedömning – förändringar hittills

Kompletterande mätningar och analyser på redan uttagna prover från Barsebäck 1, främst med avseende på hydratationsgrad på olika djup.

Kloridprofiler utifrån på angränsande betongkonstruktioner till inneslutningar som exponeras för luftburna salter från havet (Barsebäck och Ringhals). Sådana mätningar visade inga relevanta inträngningsdjup eller -nivåer och tas därför inte upp i rapporten.

#### 1.3.5 Analys av fuktförhållanden hos betong i reaktorinneslutningarna

Fukttransport och uttorkning hos grova betongkonstruktioner under temperaturgradient och vid höga temperaturnivåer har studerats i en del forskningsinsatser under årens lopp. Litteraturen granskas och analyseras mer omsorgsfullt och befintliga modeller prövas teoretiskt. Fullskaleförsök i litteraturen granskas särskilt för verifiering av befintliga modeller.

Uppmätta materialegenskaper analyseras och jämförs med svenska mätningar vid rumstemperatur. Några laboratoriemätningar av fukttransportegenskaper vid olika temperaturnivåer prövas på de provkroppar som tagits ur B1.

En försöksserie med uttorkning vid hög temperatur av provkroppar med olika dimension genomförs för att pröva traditionella modeller och verifiera de indata som tagits fram.

Beräkningar görs med modeller som utvecklas i den grad som visar sig nödvändigt.

## 2 Beräkningsmodell

### 2.1 Traditionella, förenklade uttorkningsberäkningar

Traditionellt beräknas fuktförhållanden i porösa material genom att lösa den enkla massbalansekvationen

$$\frac{\partial w_e}{\partial t} = - \frac{\partial J}{\partial x} \quad (2.1.1)$$

där  $w$  är fukthalten i  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $J$  är fuktflödet i  $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ,  $t$  är tiden och  $x$  är lägeskoordinaten [m] i konstruktionen. Massbalansekvation visas grafiskt i figur 2.1.1.

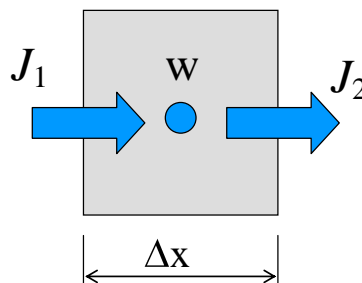


Fig. 2.1.1 Den traditionella massbalansekvationen för ett poröst material

I många fall beskriver man fuktflödet  $J$  med fukthalten  $w$  som fukttransportpotential

$$J = -D_w \frac{\partial w}{\partial x} \quad (2.1.2)$$

där  $D_w$  är fuktdiffusiviteten i  $\text{m}^2/\text{s}$ . Om man antar att fuktdiffusiviteten  $D_w$  är konstant och omgivningsklimatet inte varierar kan man hitta enkla analytiska lösningar för uttorkning. För ensidig uttorkning av en skiva med tjockleken  $L$ , eller dubbelsidig uttorkning av en skiva med dubbla tjockleken, visas den generella lösningen grafiskt i figur 2.1.2. Lösningen innehåller Fouriertalet  $F_o$

$$F_o = \frac{D_w \cdot t}{L^2} \quad (2.1.3)$$

och ges som "uttorkningspotentialen"  $U(x, F_o)$

$$U(x, F_o) = \frac{w(x, t) - w_\infty}{w_0 - w_\infty} \quad (2.1.4)$$

där  $w_0$  är fukthalten vid torkstart och  $w_\infty$  är jämviktsfukthalten i det aktuella uttorkningsklimatet.

Med en känd, konstant fuktdiffusivitet  $D_w$  kan då fuktprofilen  $w(x, t)$  enkelt beräknas för den aktuella tjockleken  $L$  och uttorkningstiden  $t$ .

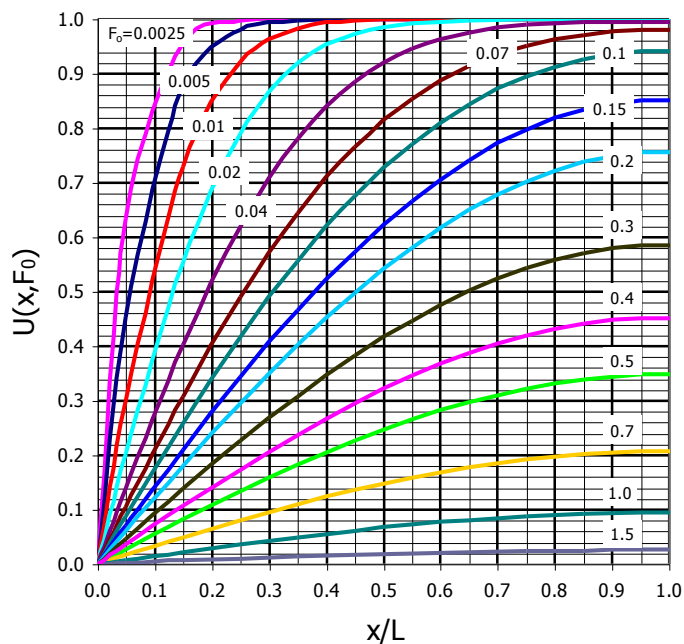


Fig. 2.1.2 Lösningen, som fuktprofiler, till den traditionella massbalansekvationen för ensidig uttorkning (åt vänster) för ett material med tjockleken  $L$

Medelfukthalten  $\bar{w}$  vid varje tidpunkt  $t$  kan beräknas genom integration av kurvorna i figur 2.1.2. Den beskrivs då med "medeluttorkningspotentialen"  $U_m$

$$U_m(F_o) = \frac{\bar{w}(t) - w_\infty}{w_0 - w_\infty} \quad (2.1.5)$$

som visas i figur 2.1.3.

Fuktdiffusiviteten  $D_w$  är emellertid inte konstant annat än i mycket speciella fall och i små uttorkningsintervall. Antagandet med konstant fuktdiffusivitet kan därför ge stora fel i uttorkningsberäkningar. Ett exempel visas i figur 2.1.4 där medelfuktpotentialen  $U_m$  "anpassats" vid en uttorkningstid motsvarande Fouriertalet 0.2. Fuktprofilerna stämmer då inte med varandra, vid denna uttorkningstid. Vid en annan uttorkningstid, motsvarande Fouriertalet 0.7, blir uttorkningsgraden helt annorlunda. Det är uppenbart att sådana förenklingar inte duger. Fuktdiffusivitetens fuktberoende måste beaktas i en uttorkningsberäkning. För betong måste dessutom den kemiska bindningen av vatten tas med i beräkningen. Detta beskrivs i avsnitt 2.2.

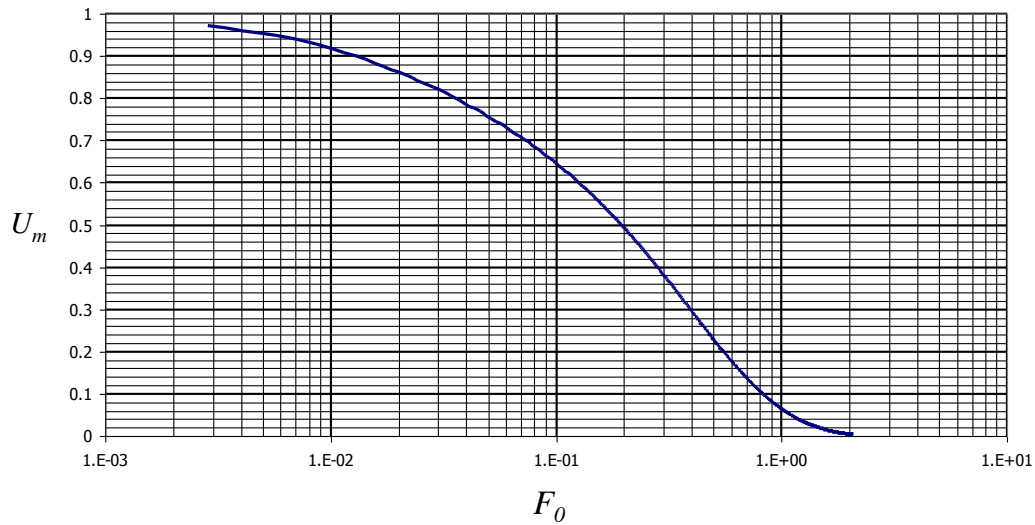


Fig. 2.1.3 Lösningen, som medeluttorkningspotential, till den traditionella massbalanskvationen för ensidig uttorkning för ett material med tjockleken  $L$

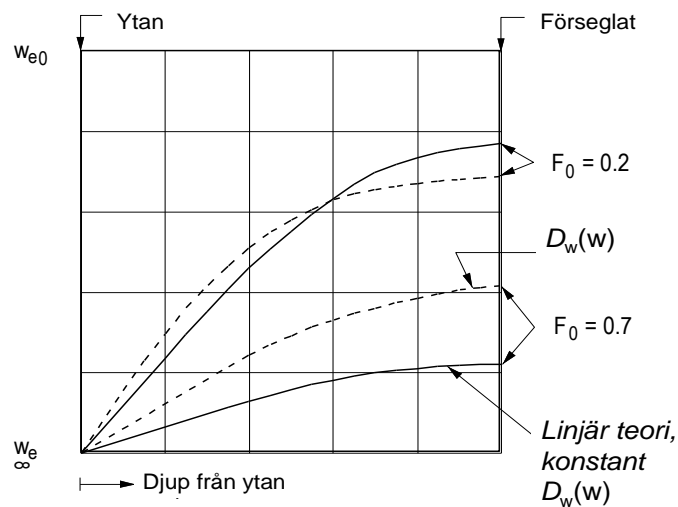


Fig. 2.1.4 Jämförelser mellan lösningar med konstant fuktdiffusivitet och fuktberoende fuktdiffusivitet vid två uttorkningstider, Nilsson (1980)

## 2.2 Uttorkningsberäkningar för betong

Fuktförhållandena i en härdande och torkande betongkonstruktion kan beräknas genom att lösa den kompletta massbalanskvationen för fukt, Nilsson (1980). Uttryckt som ändringar av fukthalten  $w_e$  med tiden kan denna skrivas i en dimension

$$\frac{\partial w_e}{\partial t} = -\frac{\partial J}{\partial x} - \frac{\partial w_n}{\partial t} \quad (2.2.1)$$

där  $w_e$  och  $w_n$  är den förångningsbara (*evaporable*) respektive den icke-förångningsbara (*non-evaporable*) fukthalten i  $\text{kg/m}^3$ . Ekvationen säger att fukthalten ändras med tiden av två skäl: den första termen anger effekten av fukttransportskillnader till och från varje punkt i konstruktionen, den andra beskriver fukthaltssänkningen på grund av kemisk bindning av vatten i cementreaktionerna. Denna massbalans åskådliggörs i figur 2.2.1.

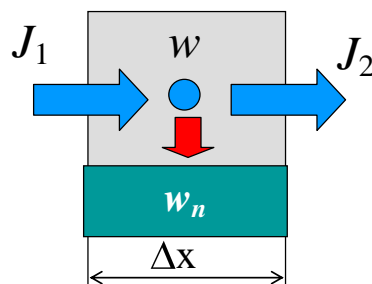


Fig. 2.2.1 Massbalansekvationen för en härdande betong

För att det skall vara möjligt att lösa denna massbalansekvation, för att beskriva ändringen av fuktfördelningen med tiden, ingår fyra huvuduppgifter

- Beskrivning av den kemiska bindningen av vatten  $\frac{\partial w_n}{\partial t}$ , genom att beakta de lokala temperatur- och fuktförhållandena samt hydratationsgraden för det aktuella cementet.
- Beskrivning av den lokala fuktjämvikten  $RF(x, w_e, T)$  mellan fukthalt och fuktillstånd i varje punkt  $x$  genom att kvantifiera (de)sorptionsisotermerna  $w_e(RF, T, \alpha)$  för den aktuella betongen, som funktion av temperatur  $T$  och hydratationsgrad  $\alpha$ ,
- Beskrivning av fuktflödets storlek och riktning  $J$  genom att definiera en eller flera relevanta fukttransportpotentialer och kvantifiera fukttransportkoefficienterna för respektive potential, som funktion av fukthalt eller fuktillstånd och beakta temperaturnivå, temperaturgradient och materialets utveckling med tiden,
- Beskrivning av randvillkoren  $T(x=0, t)$  och  $RF(x=0, t)$  på betongytorna, med hänsyn till omgivande klimat och klimatvariationer och temperaturskillnaderna mellan omgivande luft och betongytorna.

Materialegenskaperna (a-c) beskrivs i kapitel 3. Randvillkoren (d) för den aktuella tillämpningen beskrivs i kapitel 5.

## 3 Materialegenskaper

De tre materialegenskaper som ingår i massbalansekvationen är kemisk bindning av vatten, jämviktsfuktkurvor och fukttransportkoefficienter. Dessa beskrivs nedan, först med en kort, teoretisk genomgång av nuvarande kunskaper och sedan de nya mätningar och undersökningar som gjorts i projektet.

### 3.1 Kemisk bindning av vatten

#### 3.1.1 Teoretisk bakgrund

När cement reagerar med vatten binds en vattenmängd som är ca 25 % av det hydratiserade cementets vikt. Med cementhalten  $C$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] och hydratationsgraden  $\alpha$  blir mängden kemiskt bundet vatten  $w_n$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] då

$$w_n / C = 0.25 \cdot \alpha \quad (3.1.1)$$

Mängden kemiskt bundet vatten bestäms alltså av hur långt cementreaktionerna har gått, dvs. av hydratationsgraden. Hur denna utvecklas med tiden beskrivs med uttryck som ekvation (3.1.2), Norling-Mjörnell (1997), Nilsson & Mjörnell (2005), där flera parametrar ingår

$$\frac{\partial \alpha(t)}{\partial t} = \beta_{w/C} \cdot \beta_T \cdot \beta_\phi \cdot \left. \frac{\partial \alpha(t)}{\partial t} \right|_{ref} \quad (3.1.2)$$

Den sista faktorn är specifik för det aktuella cementet och beskriver hydratationsutvecklingen i ett referensklimat, normalt  $+20^\circ\text{C}$  och full vattenmättnad ("100 % RF"). De tre "korrektionsfaktorerna" beskriver inverkan av tillgängligt utrymme för reaktionsprodukterna ( $\beta_{w/C}$ ), inverkan av temperatur ( $\beta_T$ ) och inverkan av fuktnivån ( $\beta_\phi$ ).

Inverkan av det tillgängliga utrymmet för reaktionsprodukterna är naturligtvis liten i början av hydratationsförloppet, då hydratationsgraden är liten, men effekten blir stor när kapillärporsystemet börjar bli "fullt", dvs. när det bildats så mycket reaktionsprodukter att kvarvarande utrymme är litet och ojämnt fördelat. Effekten är starkt vct-beroende, se figur 3.1.1, eftersom kapillärporsystemet är direkt vct-beroende; ju högre vct desto större kapillärporositet.

För de betonger som är aktuella i reaktorinneslutningar, vct kring 0.5, närmar sig  $\beta_{w/C}$  värdet 0 när hydratationsgraden överstiger 0.8. Kurvorna i figur 3.1.1 är dock inte verifierade för så höga  $\alpha$  vid sådana vct.

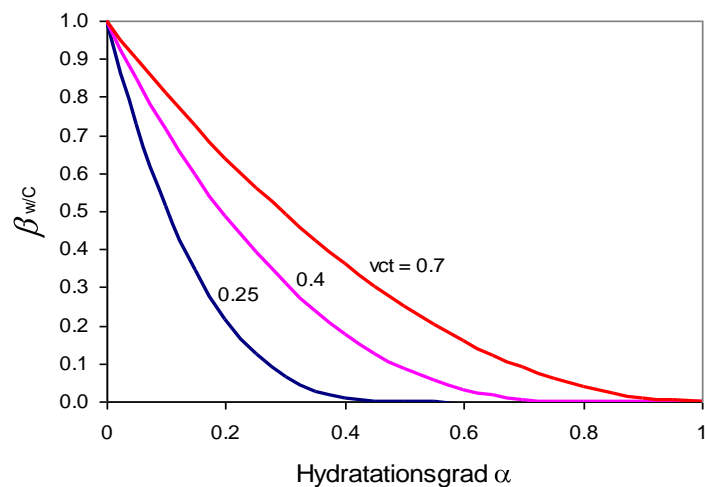


Fig. 3.1.1 Inverkan på cementreaktionernas hastighet av tillgängligt kvarvarande utrymme för reaktionsprodukterna, Norling-Mjörnell (1997)

Cementreaktionerna behöver vatten inte bara för att vatten är den ena reaktanten utan också för att reaktionerna kräver en viss fuktnivå för att överhuvudtaget kunna fortsätta. Förloppet är starkt fuktberoende, se figur 3.1.2. Vid 59 % RF sker inga reaktioner alls och vid 75 % RF sker de ytterst långsamt.

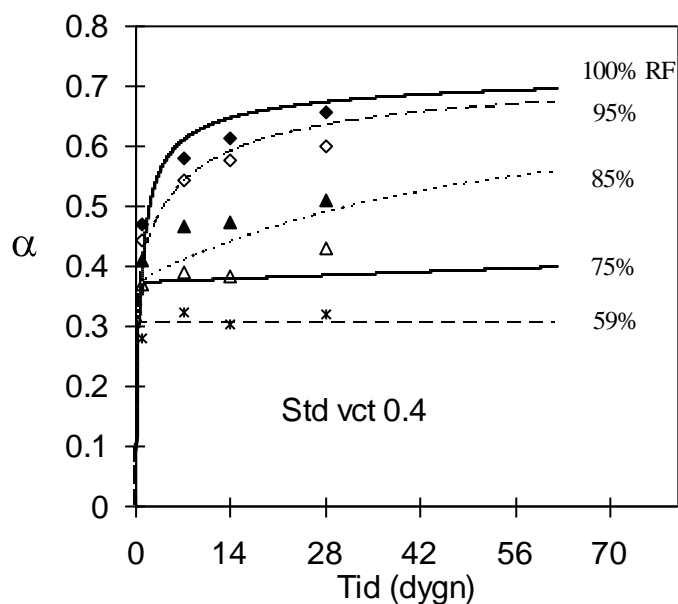


Fig. 3.1.2 Inverkan på utvecklingen av cementreaktionerna av olika fuktnivåer, Norling-Mjörnell (1997)

Mätningarna i figur 3.1.2 har använts för att kvantifiera korrektionsfaktorn  $\beta_\phi$  för fuktnivå i ekvation (3.1.2), se figur 3.1.3. Här finns ett tydligt hydratationsgradsberoende.

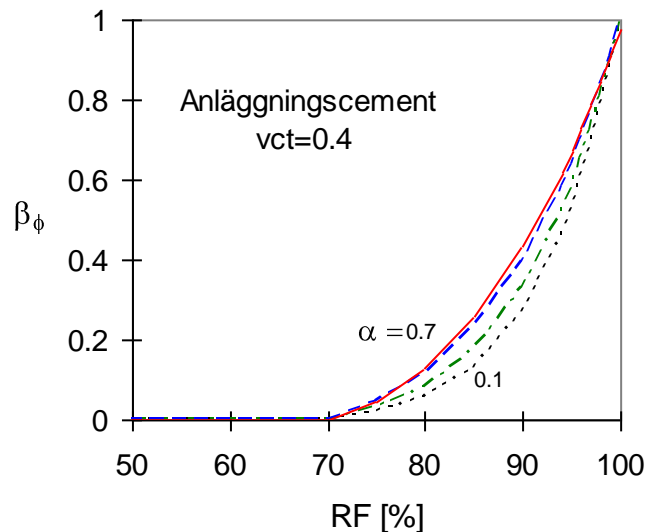


Fig. 3.1.3 Inverkan på cementreaktionernas hastighet av fuktnivån, vid olika hydratationsgrader, Norling-Mjörnell (1997)

### 3.1.2 Tidigare mätning i reaktorinneslutningsväggar

Tillämpningen av ovanstående beräkningsmetoder för kemiskt bundet vatten är naturligtvis mycket intressant för reaktorinneslutningsväggar, där det är fuktigt, och olika fuktigt på olika djup, under mycket lång tid. Samtidigt är temperaturen mycket hög i vissa delar av inneslutningarna. Mängden kemiskt bundet vatten  $w_n$  kan visa hur långt cementreaktionerna gått, vilket kan jämföras med förväntade värden, och skillnaden mellan olika djup, som kanske kan förklara skillnaden mellan de materialegenskaper som tidigare bestämts.

Från samma borrhärnor som fuktprover tidigare tagits från, togs prover också från flera olika djup för termogravimetrisk analys (TGA) av kemiskt bundet vatten, Nilsson (2005). Proverna kom från olika nivåer med olika drifttemperaturer. Resultaten visas i figur 3.1.4

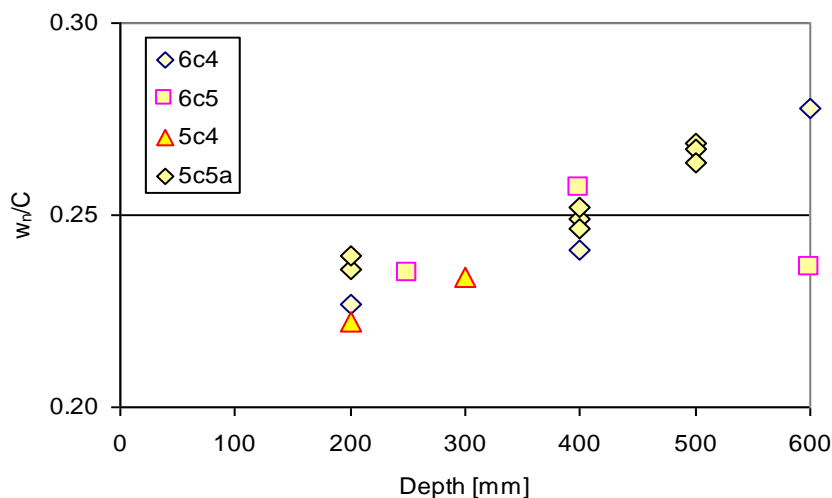


Fig. 3.1.4 Kemiskt bundet vatten [kg/kg cement] som funktion av djupet från betongytan, från tidigare TGA-mätningar på prover från nivå 3 respektive 6 i B1, Nilsson (2005)

Spridningen är stor men det finns en tydlig tendens att mängden kemiskt bundet vatten ökar med djupet precis som förväntat. Längst in har det varit så fuktigt att cementreaktionerna fortfarande kan ske, efter 30 år!

Absolutnivåerna är egendomligt höga, med en del värden över  $w_n/C = 0.25$ , vilket borde motsvara hydratationsgraden  $\alpha = 1$ . En del av viktförlusterna i TGA-mätningarna kan härröra från ballasten och cementet, som inte korrektion gjorts för.

Det syns ingen signifikant skillnad i hydratationsgrad mellan områden som haft helt olika drifttemperatur. De varmare delarna borde ha hydratiserat snabbare, men å andra sidan har de torkat något mer. Dessa båda effekter kan ha tagit ut varandra.

### 3.1.3 Nya studier i svepelektronmikroskop

Ytterligare undersökningar av hydratationsförloppet har gjorts för att kunna verifiera de tidigare mätningarna. Ett prov "5CS 270-350" från djupet 270-350 mm i en borrkärna på nivån 3 analyserades i svepelektronmikroskop av CBI i Stockholm. Provet visas i figur 3.1.5, med den analyserade provbiten bortsågad. Alla bilder är tagna inom detta område av ca 10x10 mm.

#### Metod

Bilder togs med BSE (*back-scattered electron detector*) kopplad till ett svepelektronmikroskop. Bilder togs på olika ställen i provbitens polerade yta och tros vara representativa för strukturen hos provets cementgel. Bilderna visar områden med en storlek på 490x380  $\mu\text{m}$ . Ett exempel visas i figur 3.1.6.



Fig. 3.1.5 Jämförelser mellan lösningar med konstant fuktdiffusivitet och fuktberoende fuktdiffusivitet vid två uttorkningstider, Nilsson

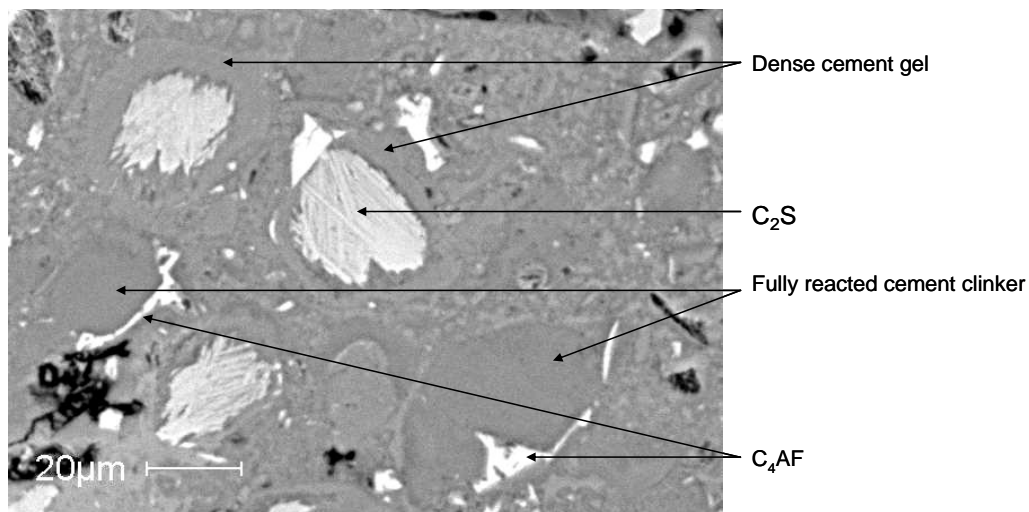


Fig. 3.1.6 Små mängder oreagerade klinkerkomponenter ( $C_2S$ ,  $C_4AF$ ) i det analyserade provet från djupet 270-350 mm i borrhärna 5CS i inneslutningsväggen på B1 efter ca 30 års drifttid

#### Resultat

Hydratationsgraden av klinkerkomponenterna i provets betong bedömdes vara hög. Mängden av ohydratiserad klinker som finns kvar i betongen, huvudsakligen belitkomponenten ( $C_2S$ ), uppskattades inte vara större än vad som är normalt hos välhydratiserad, 10-20 år gammal betong med Portlandcement. Mängden av ohydratiserad klinker uppskattades till < 5 %. De befintliga resterna av oreagerad klinker är omslutna av tät cementgel, vilket har fördröjt hydratationen av kalciumsilikaterna. Detta är ett vanligt förekommande fenomen och i den mängd man ser i provet kan det betraktas som normalt för välhydratiserat Portlandcement. Uppskattningen av hydratationsgraden är alltså:  $\alpha > 0.95$ , men definitivt inte 1.0!

### 3.1.4 En ny metod att mäta fuktberoendet hos cementreaktionerna

I en förstudie har en ny metod prövats för att direkt kunna mäta fuktberoendet hos cementreaktionerna. Metoden visas i figur 3.1.7.

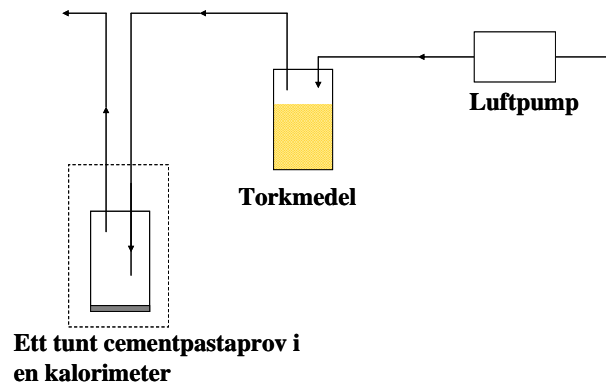


Fig. 3.1.7 En ny metod för direkt mätning av fuktberoendet hos cementreaktionerna

Ett nyblandat prov av cementpasta placeras i en isoterm kalorimeter som kan mäta värmeutvecklingen från cementreaktionerna som funktion av tiden. Efter en viss härdningstid får en torr luftström passera provet som då börjar torka. Exempel på resultat visas i figur 3.1.8.

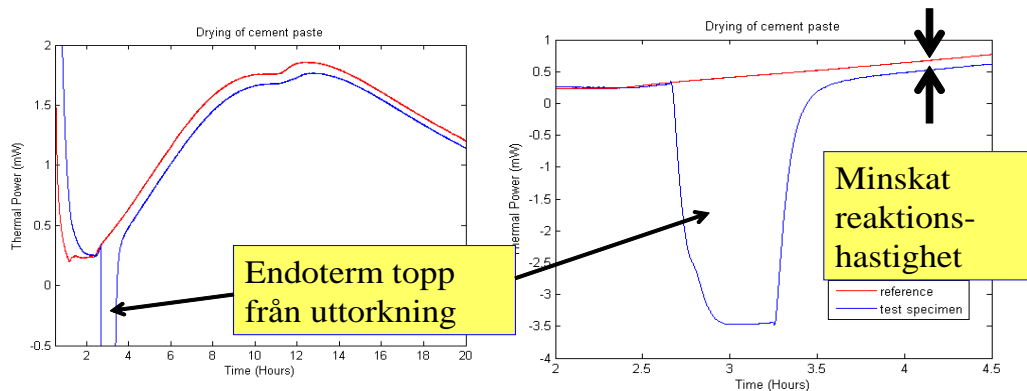


Fig. 3.1.8 De första resultaten från den nya metoden för mätning av fuktberoendet hos cementreaktionerna, med en jämförelse mellan ett prov som torkat något och ett prov som inte torkat alls. Det högra diagrammet är en förstoring av en del av det vänstra

Metoden kan dels mäta hur mycket fukt som avdunstat genom att integrera skillnaden mellan de båda kurvorna i figur 3.1.8 och dels detektera skillnaden i värmeutveckling som är ett mått på reaktionshastigheten. Metoden bedöms dock för närvarande inte kunna detektera de små skillnaderna i den mycket välhärjade betongen i 30 år gamla reaktorinneslutningar.

## 3.2 Jämviktsfuktkurvor

### 3.2.1 Teoretisk bakgrund

Sambandet mellan fukttinnehåll och RF är relativt väl känt för olika betonger, varför en uppmätt kurva för en aktuell betong kan jämföras med förväntat samband. Sambandet, sorptionskurvan (sorptionsisotermen), ger också information om materialets inre struktur och därför om det eventuellt har förändrats eller är olika på olika djup.

Teoretiska desorptionsisotemer för relativt välhärdad betong kan beräknas med hjälp av figur 3.2.1.

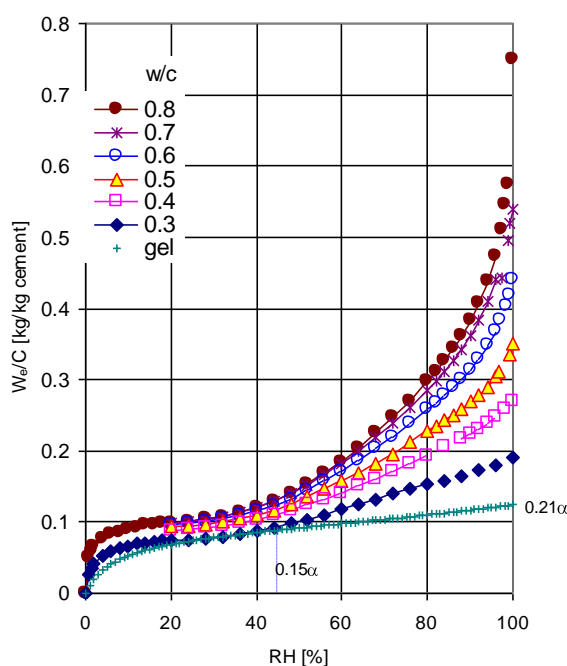


Fig. 3.2.1 Desorptionsisotemer [kg/kg cement] för betong med olika vct, Nilsson (1980)

Hydratationsgraderna för de olika betongerna i figur 3.2.1 varierar mellan 0.6 och 0.8 för betong med vct 0.4 respektive 0.8.

### 3.2.2 Tidigare mätningar

Hur bra desorptionskurvorna i figur 3.2.1 kan beskriva jämviktssambanden i betong i reaktorinneslutningar har prövats i ett tidigare projekt. Där gjordes mätningar i klimatboxar med mättade saltlösningar för ett stort antal prover från olika delar av borrhärdningar från B1. Resultaten visas i figur 3.2.2, som kapillärmättnadsgrad, dvs fukttinnehåll som andel av maximalt fukttinnehåll.

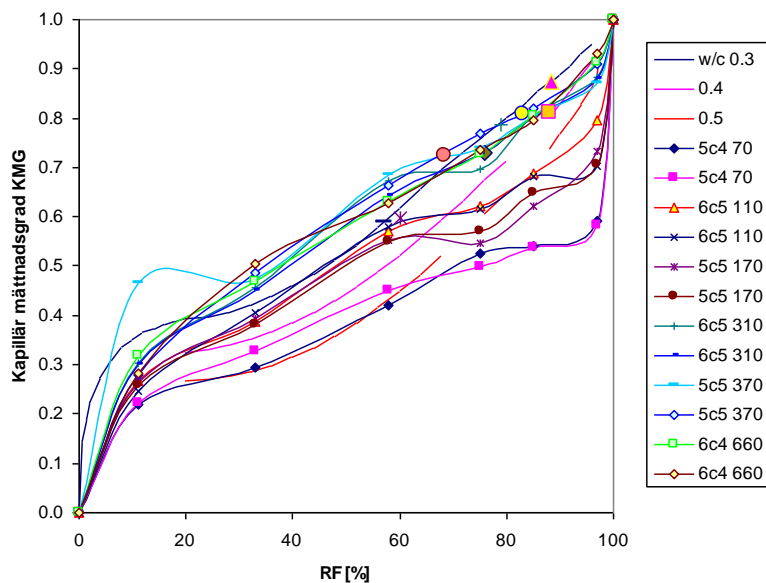


Fig. 3.2.2 Desorptionsisotermer vid +20°C, som kapillärmättnadsgrad, för betongprover från B1, Nilsson (2005)

I figur 3.2.2 ses framför allt ett djupberoende hos desorptionsisotermerna; isotermerna från de största djupen ligger högst. Skillnaden mellan de båda provplatserna är inte signifikant. I figuren jämförs de uppmätta desorptionsisotermerna med motsvarande isotermer i figur 3.2.1, för betong med betydligt yngre ålder. Isotermerna för prover från stora djup, där hydratationen pågått under 30 år, ligger över dessa isotermer, medan de från prover närmre ytan ligger under. Den fortsatta hydratationen på stora djup, och den avbrutna närmast de torkande ytorna, påverkar alltså sorptionskurvorna tydligt.

Fuktmättningsresultat från prover i borrkärnor från B1 har jämförts med beräknade desorptionsisotermer, se figur 3.2.3. Fuktmättningsresultaten presenteras som samhörande värden på fukttillstånd (kapillärmättnadsgrad) och fukttillstånd (RF). Sådana punkter borde ligga på sorptionskurvan.

Som framgår av figur 3.2.3 stämmer detta relativt väl även om absolutvärdena är olika.

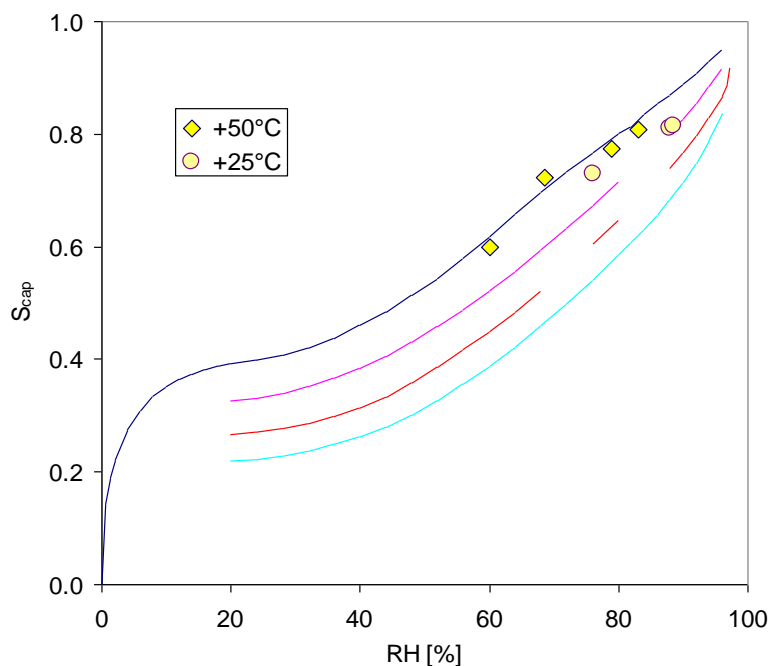


Fig. 3.2.3 Fuktmättningsresultat, som kapillärmättnadsgrad ( $S_{cap}$ ) respektive relativ fuktighet (RF), från betongprover från B1 jämförda med desorptionsisotemer beräknade ur figur 3.2.1, Nilsson (2005)

I figur 3.2.3 ligger punkterna på sorptionskurvan något högre för den betong som haft en högre drifttemperatur. Detta skall inte förväxlas med sorptionskurvans temperaturberoende, se nästa avsnitt, utan är förmodligen en följd av en något högre hydratationsgrad hos denna betong.

### 3.2.3 Sorptionskurvans temperaturberoende - allmänt

Eftersom det är så olika temperatur i olika delar av reaktorinneslutningarna måste man också känna till temperaturberoendet hos sorptionskurvan. Denna är normalt försumbar för andra tillämpningar, men här är det så stora temperaturskillnader att den måste beaktas.

Temperaturberoendet visas principiellt i figur 3.2.4. Vid en högre temperatur ligger kurvan lägre, dvs. vid samma RF är fukttinnehållet lägre. Detta beror i första hand på att adsorptionen av vattenånga på de inre porväggarna förändras med temperaturen. Adsorbatets tjocklek minskar med högre temperatur.

Sorptionskurvans temperaturberoende kan mätas på två principiellt olika sätt. Båda har prövats här:

1. Fukthalt vid viss RF i olika T (nya mätningar med sorptionsväg)
2. RF vid olika T med konstant fukthalt (examensarbete)

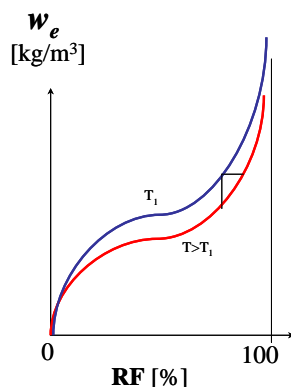


Fig. 3.2.4 Principiellt temperaturberoende hos sorptionskurvan för ett poröst material.

### 3.2.4 Mätningar av sorptionskurvas temperaturberoende med sorptionsvåg

Provbitar från B1 har använts för att bestämma kompletta sorptionskurvor vid två temperaturnivåer med hjälp av en sorptionsvåg, se figur 3.2.5.

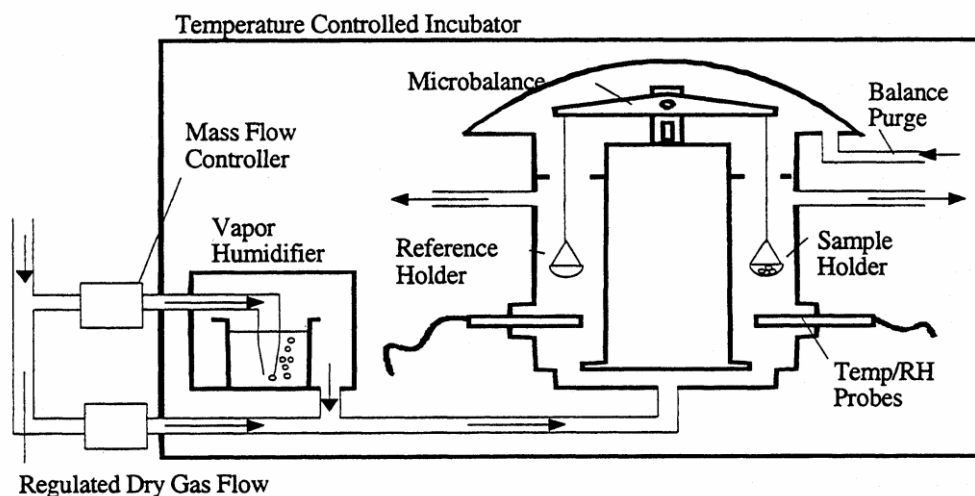


Fig. 3.2.5 Principen för den använda sorptionsvågen

En liten provbit placeras i den ena vågskålen hos en balansvåg; den andra är tom och utgör referens. Balansvågen är placerad inuti en klimatkammare där klimatet kan styras genom en blandning av ett torrt och ett fuktigt gasflöde. Mätningarna kan ske vid olika temperaturnivåer.

Ett exempel på en mätning visas i figur 3.2.6. Erhållna viktändringar vid övergång från ett inställt klimat till ett annat kurvpasas så att förväntad slutvikt i respektive klimat kan utvärderas. På så sätt kan en desorptionsisoterm mätas på mindre än en vecka.

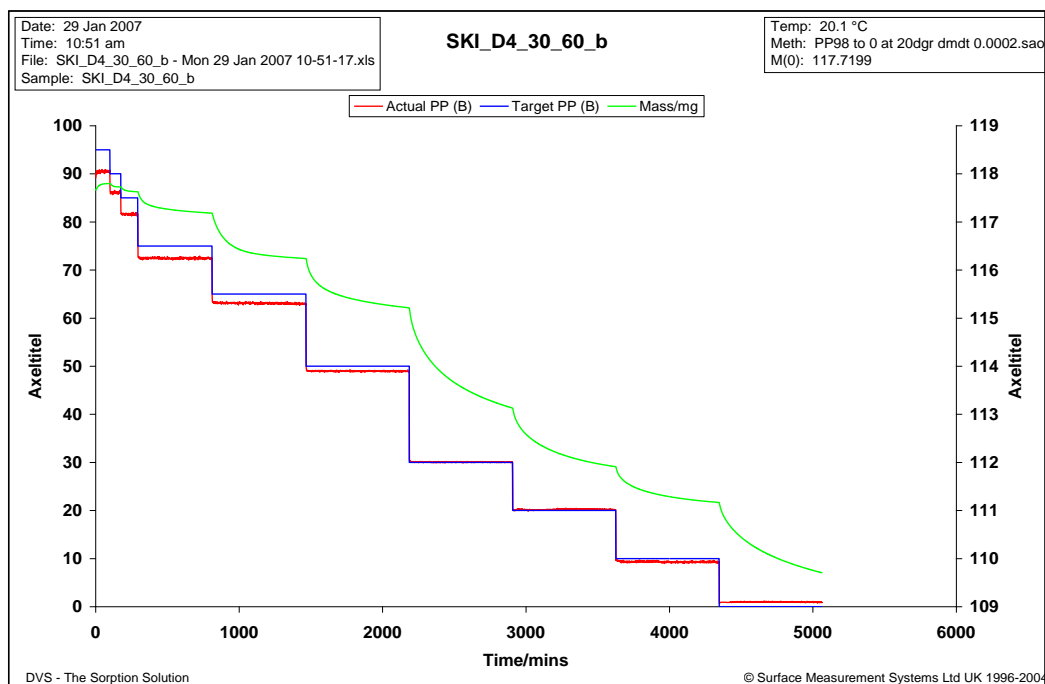


Fig. 3.2.6 Exempel på resultat från mätning av desorptionsisotermen med sorptionsvågen. Trappstegskurvan visar inställda RF-nivåer och kurvan visar viktändring som funktion av tiden.

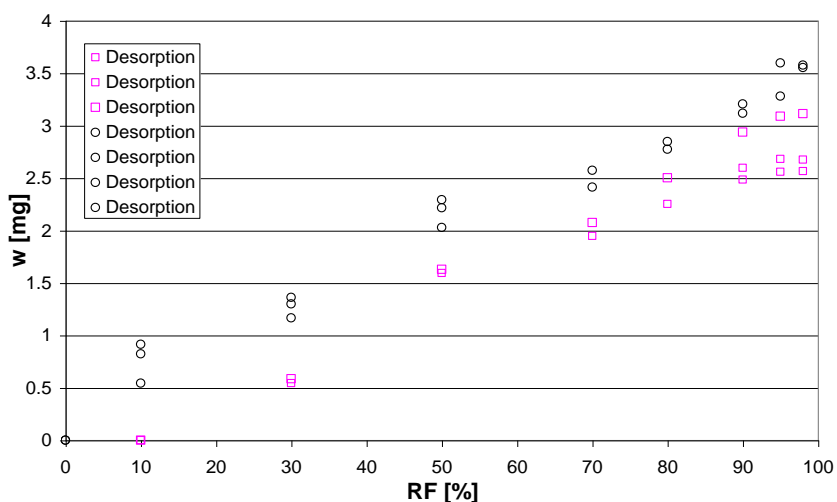


Fig. 3.2.7 Resultat från en serie mätningar med sorptionsvågen av desorptionsisotermen vid två temperaturnivåer, +25°C (diamanter) resp. +50°C (kvadrater).

Det var inte möjligt att kvantifiera sorptionskurvorna med någon större precision efter som provbitarna var så små och därför inte alls representativa för

den ursprungliga betongsammansättningen. Cementhalten var därför olika i varje provbit och mätresultaten därför inte jämförbara.

### 3.2.5 Mätningar av RF-ändringar på förseglade prover vid temperaturändring

För att kunna bestämma sorptionskurvas temperaturberoende med bättre precision har en annan metod använts, som inte påverkas i lika stor grad av provets representativitet. Principen fram går av figur 3.2.8.

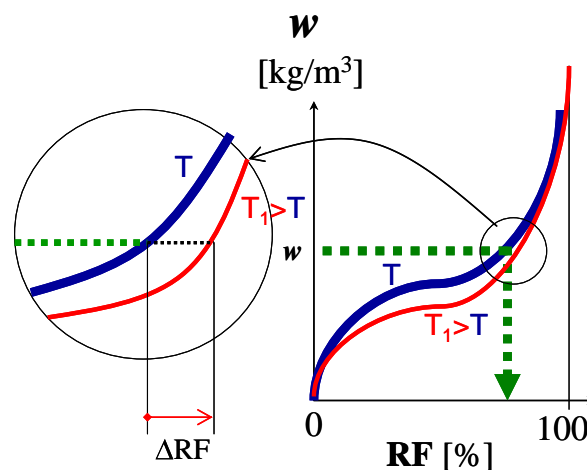


Fig. 3.2.8 Sorptionskurvas temperaturberoende, som RF-ändring vid konstant fukthalt.

Ett material med en konstant fukthalt under en temperaturändring får olika RF vid olika temperaturnivåer, på grund av sorptionskurvas temperaturberoende. När temperaturen är högre blir också RF högre, se figur 3.2.8. Detta kan utnyttjas för att bestämma sorptionskurvas temperaturberoende genom att direkt mäta denna RF-ändring vid en viss temperaturändring.

Sådana mätningar har gjorts tidigare för temperaturer under +20°C, se Sjöberg et al (2002). Dessa resultat sammanfattas i figur 3.2.9. Här finns ett tydligt vct-beroende och ett stort RF-beroende. Effekten blir större ju lägre RF är, åtminstone i det aktuella RF-intervallet.

Inom ramen för projektet har ett examensarbete genomförts där temperaturberoendet hos sorptionskurvan bestämts vid högre temperaturnivåer med samma metod, Fredin & Skoog (2005). Deras resultat sammanfattas i figur 3.2.10. De sammanfaller väldigt väl med de tidigare resultaten för lägre temperaturnivåer, men här finns också data för lägre RF-nivåer än i de tidigare undersökningarna.

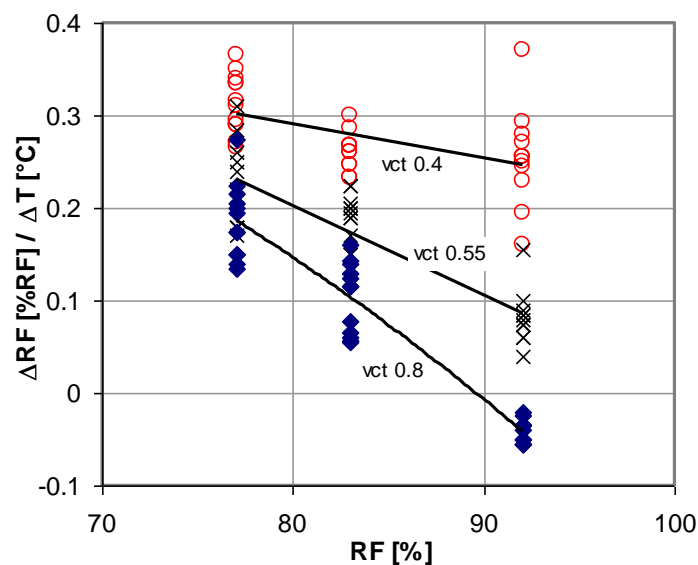


Fig. 3.2.9 Sorptionskurvas temperaturberoende för betong med olika vct, som RF-ändring vid konstant fukthalt. Mätningar i temperaturintervallet +5 - +20°C, Sjöberg et al (2002)

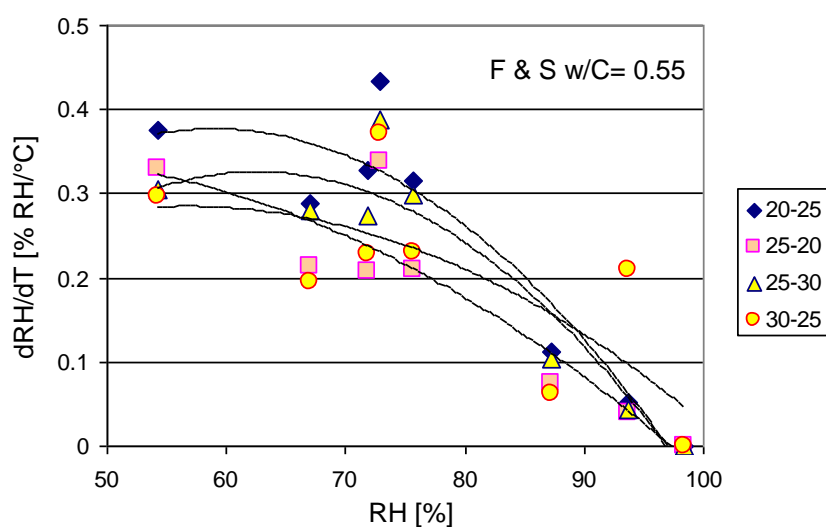


Fig. 3.2.10 Sorptionskurvas temperaturberoende för betong med vct 0.55, som RF-ändring vid konstant fukthalt. Mätningar i temperaturintervallet +20 - +30°C, Fredin & Skoog (2005)

Med hjälp av dessa kvantifieringar av RF-ändringar vid temperaturändringar kan temperaturberoendet hos sorptionskurvan kvantifieras med utgångspunkt från en känd sorptionskurva vid en temperaturnivå. Noggrannheten är naturligtvis begränsad, men bör vara tillräcklig för de tillämpningar som är aktuella här.

### 3.3 Fukttransportegenskaper

#### 3.3.1 Teoretisk bakgrund

Fukttransport i betong sker genom en kombination av ångtransport, vätske-transport och transport av adsorberad fukt. Med utgångspunkt från dessa olika mekanismer borde följaktligen fukttransport beskrivas med tre olika termer. I praktiken fordras det dock att man kan mäta respektive fukttransportkoefficient och för närvarande finns det inga metoder för att skilja på olika transportmekanismer; man kan bara mäta det totala fuktflödet. Så länge det inte finns någon temperaturgradient är alla tänkbara fukttransportpotentialer översättningsbara i varandra och man kan fritt välja en av dem. Man måste alltid ta hänsyn till fuktberoendet hos fukttransportkoefficienten och, för betong, inverkan av hydratationsgraden. Ibland måste dessutom effekten av temperaturnivån kvantifieras.

En vanligt använd fukttransportpotential i Sverige är ånghalten  $v$  i materialet. Den kan enkelt beräknas ur temperatur och relativ fuktighet så kopplingen till sorptionskurvan är självklar. Fuktflödet beskrivs då med följande uttryck

$$J = -\delta(RF, T, \alpha) \cdot \frac{\partial v(x)}{\partial x} \quad (3.3.1)$$

där  $\delta$  är fukttransportkoefficienten [ $\text{m}^2/\text{s}$ ], som beror på fuktnivån  $RF$ , hydratationsgraden  $\alpha$  och eventuellt temperaturnivån  $T$ .

Denna fukttransportkoefficient har kvantifierats för välhärdad betong av Hedenblad (1993). Hans resultat för betong med olika vct visas i figur 3.3.1.

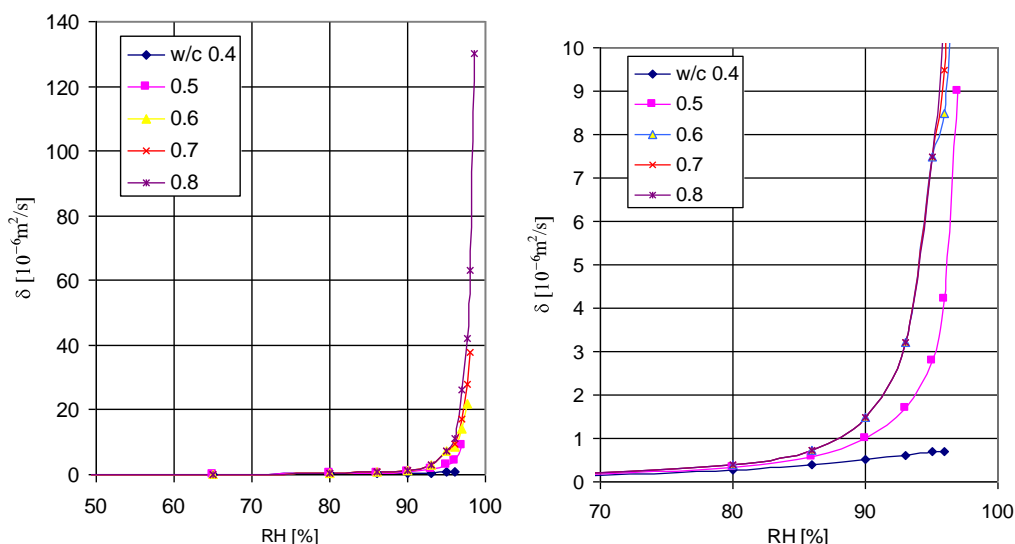


Fig. 3.3.1 Fukttransportkoefficienten enligt ekvation (3.3.1) för betong med olika vct, Hedenblad (1993). Det högra diagrammet är en förstoring av det nedre högra hörnet av det vänstra.

Fukttransportkoefficienten enligt ekvation (3.3.1) är kraftigt fuktberoende, särskilt vid höga vct. Även vid vct omkring 0.5 finns ett tydligt fuktberoende, se det högra diagrammet i figur 3.3.1. Detta innebär att varje försök att mäta fukttransportkoefficienter måste hantera detta fuktberoende i utvärderingen av mätresultat.

### 3.3.2 Tidigare mätningar av fukttransportegenskaper

Fukttransportkoefficienten enligt ekvation (3.3.1) har tidigare kvantifierats för tunna skivor utsågade ur de borrkärnor som tagits i B1. Detta har gjorts med den klassiska "koppmetoden", dvs. med materialskivan som lock på en "kopp" där klimatet inuti koppen styrs av en mättad saltlösning och klimatet utanför av det klimatrum där koppen är placerad medan stationärt fuktflöde inväntas. Ur detta stationära fuktflöde, skivans tjocklek och ånghaltsdifferensen mellan materialskivans ömse sidor beräknas sedan fukttransportkoefficienten med hjälp av ekvation (3.3.1). Den blir då medelvärdet i ett RF-intervall bestämt av de båda klimaten.

Resultatet av de tidigare mätningarna visas i figur 3.3.2 som funktion av djupet in från betongytan i inneslutningsväggen. RF-intervallet var 55-85 % RF vid +20°C.

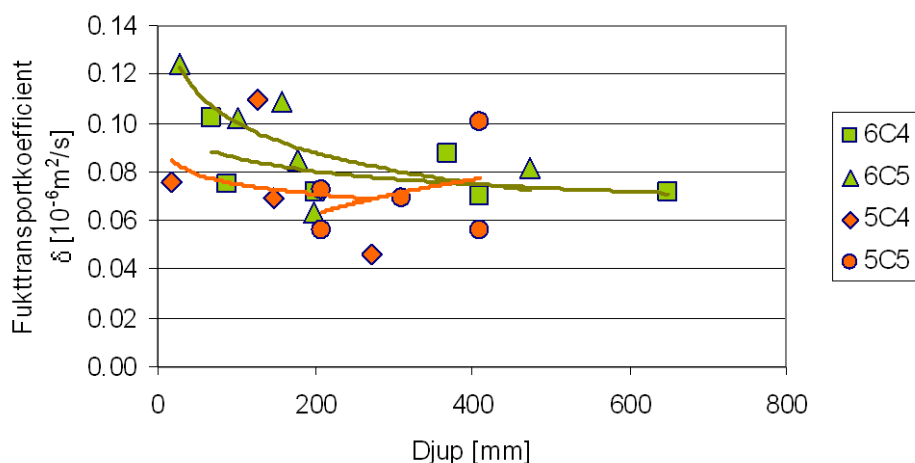


Fig. 3.3.2 Fukttransportkoefficienten enligt ekvation (3.3.1) vid +20°C för betongskivor från olika djup i inneslutningsväggen på B1, Nilsson (2005).

I figur 3.3.2 anas ett visst djupberoende, men spridningen är för stor för att det skall kunna påstås vara visat. Jämfört med kända data för normalbetong, Hedenblad (1993), fem år gammal, är absolutvärdena bara cirka hälften, dvs. den aktuella betongen är "dubbelt så tät" mot fukttransport som yngre normalbetong.

### 3.3.3 Fukttransportegenskaper vid höga temperaturer

Nya mätningar har nu gjorts för högre temperaturnivå, +50°C. Metoden, provkropparna och kopparna var desamma som i de tidigare mätningarna. Skillnaden blir framför allt att klimatet utanför koppen nu har mycket lägre RF, ca 10-30 %, eftersom kopparna placerats i en ugn vid +50°C där ånghalten styrs av laboratorieklimatet.

Viktförlusten hos respektive kopp, dvs. fuktflödet genom betongskivan visas i figur 3.3.3.

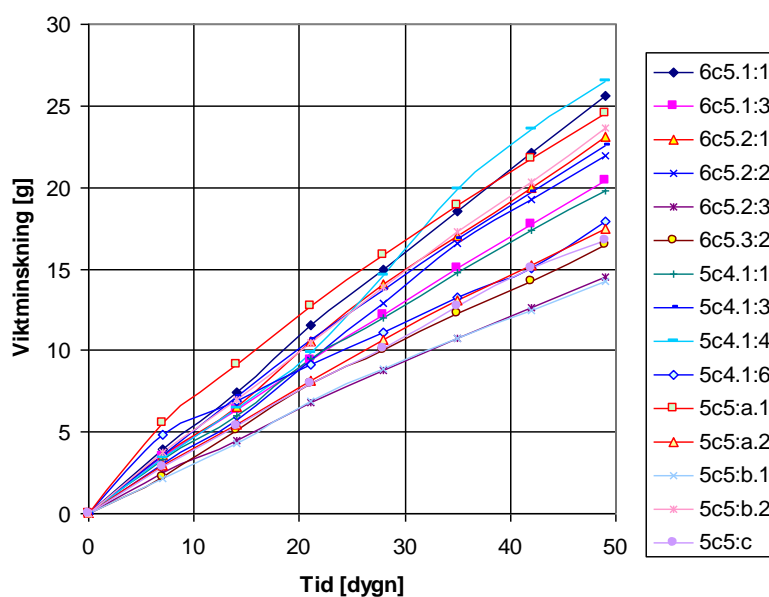


Fig. 3.3.3 Fuktflödet genom betongskivorna i koppmätningar vid +50°C, med de tidigare använda femton provkropparna.

Ur den räta delen av kurvorna i figur 3.3.3 utvärderas det stationära fuktflödet. Med det aktuella klimatet inuti kopparna respektive i ugnen utanför kopparna utvärderas fukttransportkoefficienten på samma sätt som tidigare, med den skillnaden att det nu är ett annat RF-intervall. Hänsyn tas på samma sätt till fuktmotståndet hos luftskiktet mellan saltlösningen och betongskivans undersida.

Resultatet visas i figur 3.3.4, som jämförelse mellan de nya fukttransportkoefficienterna, vid +50°C, och de tidigare, vid +20°C, för respektive provkropp.

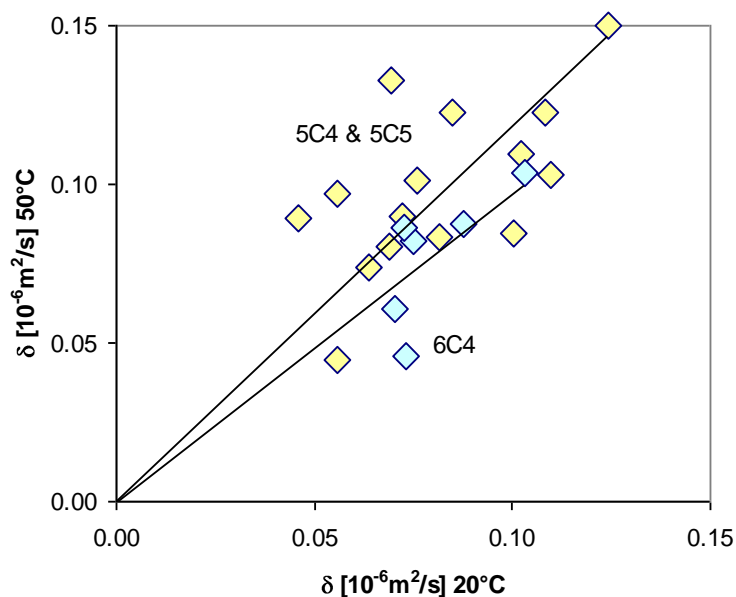


Fig. 3.3.4 Fuktransportkoefficienterna för samma femton betongprovkroppar vid två temperaturnivåer, bestämda med koppmetoden.

Spridningen är även här stor, men någon tydlig effekt av temperaturnivån +20°C till +50°C kan inte upptäckas. Följaktligen kan fuktflödesekvationen (3.3.1) förenklas genom att exkludera temperaturen  $T$ . Temperatureffekten på fukttransporten verkar vara tillräckligt beskriven genom temperaturens stora inverkan på ånghalten i betongen.

Att den senaste mätningen av fukttransportkoefficienten, vid hög temperatur, gjorts i ett större fuktintervall, ca 20-85 % RF jämfört med 55-85 % RF, kan ha marginell effekt. I intervallet 33-55 % RF anger Hedenblad (1993) en konstant fukttransportkoefficient, vilket skulle innebära att det större fuktintervall inte påverkar medelfukttransportkoefficienten särskilt mycket.

### 3.3.4 Fuktransport under temperaturgradient

I vissa fall kommer fukttransport i reaktorinneslutningsväggar att äga rum under en temperaturgradient. För att klargöra hur långt ekvation (3.1.1) då klarar av att beskriva fuktflödet har en speciell studie gjorts av fukttransport då det finns en temperaturskillnad över en provkropp.

Mätningarna gjordes på en väldokumenterad sandsten, vars isoterma fukttransportegenskaper kvantifierats väl av Janz (2000). Försöksupställningen visas i genomskärning i figur 3.3.5 och i fotot i figur 3.3.6.

Principen är enkel. Skivor av materialet med en tjocklek av sammanlagt 40 mm värmeisolerar och fuktisolerar på sidorna så att värmeflödet och fuktflödet blir så endimensionella som möjligt. Materielskivorna med sin islering placeras som lock på en kopp. En temperaturskillnad och en RF-skillnad över provkroppen åstadkoms med hjälp av en mättad saltlösning i koppen som ger 85 % RF vid +40°C. Den högre temperaturen åstadkoms genom att placera

koppen på en värmeplatta, se figur 3.3.5. Klimatet ovanför provkroppen styrs genom klimatet i rummet.

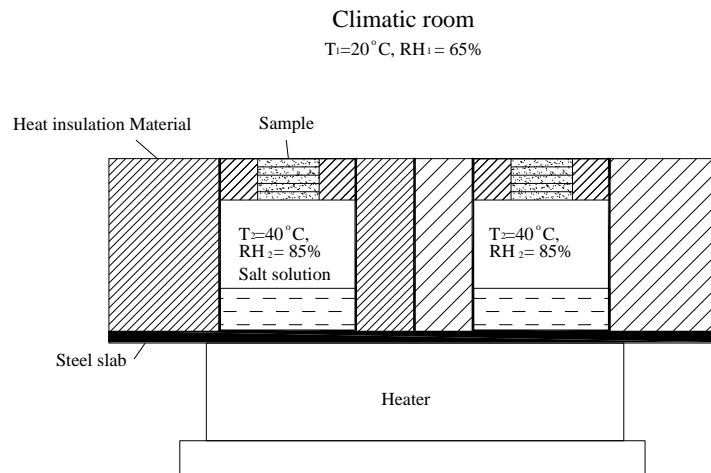


Fig. 3.3.5 Försöksupställning för mätning av fukttransportegenskaper under temperaturgradient,  $Q_{in}$  (2007)

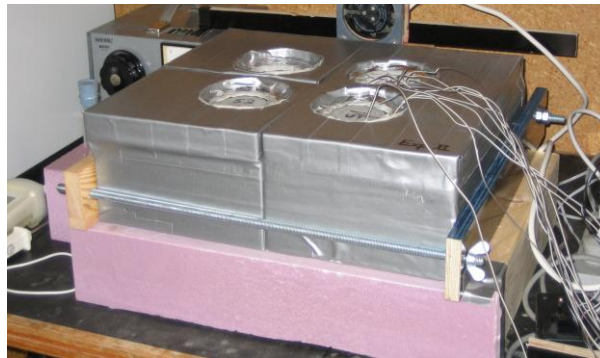


Fig. 3.3.6 Foto av försöksupställningen i figur 3.3.5 för mätning av fukttransportegenskaper under temperaturgradient,  $Q_{in}$  (2007)

Temperaturskillnaden mellan värmeplattan och rummet ger en temperaturskillnad över provkroppen, se figur 3.3.7. Den blev ca  $4^\circ\text{C}$ . Koppen vägdes regelbundet för att avgöra när stationärt flöde erhållits. Detta flöde användes sedan i utvärderingen, genom att jämföra det med flödet för en liknande uppställning utan temperaturgradient.

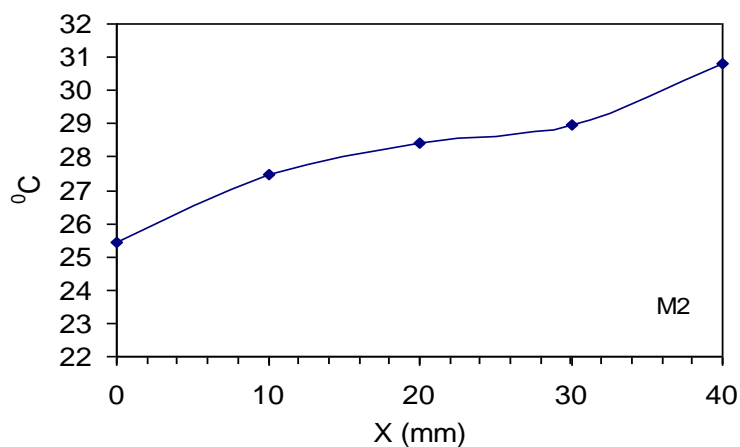


Fig. 3.3.7 Temperaturprofil genom provkroppen vid mätning av fukttransportegenskaper under temperaturgradient, Qin (2007)

Detta arrangemang, med samma klimat i rummet och 85 % RF i kopparna gav ungefär samma RF-intervall i de båda fallen. Riktigt samma blev det inte eftersom den övre materialytan håller lägre RF än rummet eftersom den var ca 5.5°C varmare. RF-profilen mättes på uttagna prov efter avslutat experiment. Ur denna och temperaturprofilen utvärderades ånghaltsprofilen. Resultatet redovisas i figur 3.3.8 och 3.3.9 för det isoterma respektive icke-isoterma fallet.

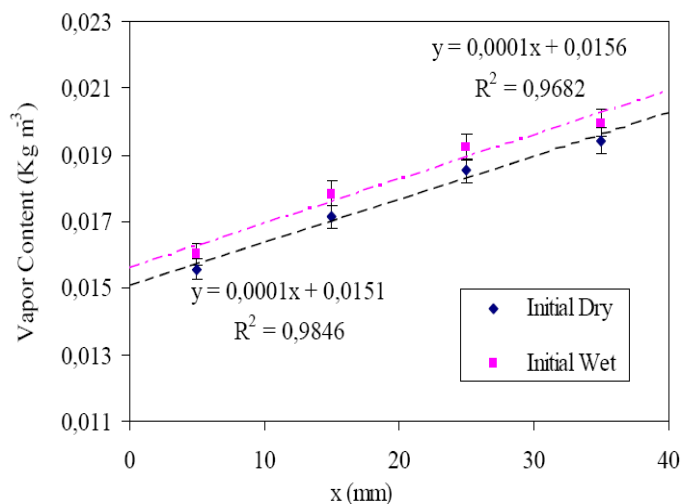


Fig. 3.3.8 Ånghaltsprofil genom provkroppen utan temperaturgradient för mätning av fukttransportegenskaper under temperaturgradient, Qin (2007)

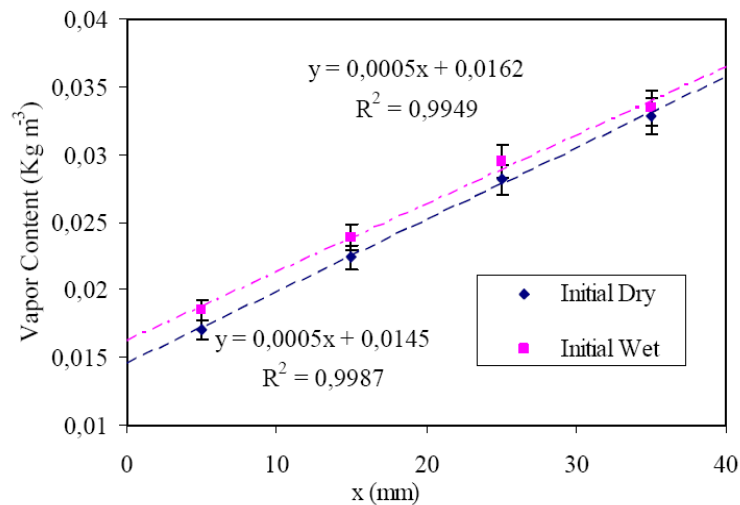


Fig. 3.3.9 Ånghaltsprofil genom provkroppen med temperaturgradient för mätning av fukttransportegenskaper under temperaturgradient, Qin (2007)

Utvärderingen gjordes med en flödesekvation med en extra term innehållande temperaturgradienten

$$J = -\delta(RF) \cdot \left( \frac{\partial v(x)}{\partial x} + \varepsilon \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (3.3.2)$$

Från mätningen utan temperaturgradient kunde fukttransportkoefficienten utvärderas. Med denna kunde sedan temperaturfukttransportkoefficienten  $\varepsilon$  utvärderas ur experimentet med temperaturgradient. Resultatet ges i tabell 3.3.1.

Tabell 3.3.1 Fukttransportkoefficienter utvärderade ur experiment med fukttransport under temperaturgradient, Qin (2007)

Startvillkor	$\delta$ [ $10^{-6}$ m <sup>2</sup> /s]	$\varepsilon$ [kg/(m <sup>3</sup> K)]
Torrt	1.12	0.032
Vätt	1.10	0.032

Med dessa data är effekten av temperaturgradienten stor. I experimentet var temperaturskillnaden ca 4°C och ånghaltsdifferensen ca 0.02 kg/m<sup>3</sup>. Under dessa förhållanden är den andra termen inom parentes i ekvation (3.3.2) ca 6 gånger större än den första!

## 4 Uttorkningsförsök

För att experimentellt verifiera beräkningsmodellen har en större försöksserie genomförts i laboratoriet med ensidig uttorkning vid två temperaturnivåer, +20°C & +50°C, av provkroppar med olika dimension.

I detta kapitel redovisas experimentens genomförande samt alla resultat. Jämförelsen med beräkningar görs i kapitel 6.

### 4.1 Försöksupplägg

Laboratorieförsöken syftade till att verifiera början av ett uttorkningsförlopp som så långt som möjligt efterliknar det som betongen i reaktorinneslutningsväggar har genomgått. Därför valdes en betongsammansättning som är snarlik den som använts i Barsebäck. För att simulera uttorkning av så tjocka betongkonstruktioner som möjligt, men ändå med provkroppar med rimlig vikt som kunde vägas på en våg med god noggrannhet, valdes ensidig uttorkning. För att kunna verifiera en viss extrapolering till större tjocklekar valdes att inkludera flera olika tjocklekar i försöksserien. Provkroppsstorleken bestämdes av vilken maximal vikt som kunde registreras på en för ändamålet nyinköpt våg med upplösningen 0.1 gram. På detta vis kunde de tunna provkropparna ha en större torkarea, medan de tjockaste provkropparna måste ha en mindre diameter.

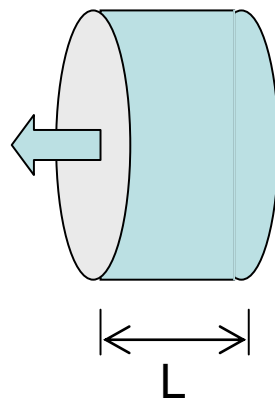


Fig. 4.1.1 Principiell provkroppsutformning

Uttorkningsförloppet skulle följas dels som regelbundet bestämda viktförluster hos provkropparna och dels som fuktprofiler vid ett antal tillfällen.

#### 4.1.1 Material och provkroppar

Betongsammansättningen valdes med utgångspunkt från den kunskap vi har om "Barsebäcksbetong". Samma cement, Limhamn LH, finns inte längre att

tillgå. Istället valdes Anläggningscement Degerhamn Std, som är det närmaste man kan komma ifråga om reaktionshastighet och låg alkalitet. Samma typ av ballast, Från Åstorp respektive Dalby kunde införskaffas.

Betongsammansättningen framgår av Tabell 4.1.1.

Tabell 4.1.1 Betongsammansättning

Delmaterial	kg/m <sup>3</sup>
Makadam 16-25 mm Dalby, Sydsten	459
Makadam 8-16 mm, Dalby, Sydsten	381
Makadam 4-8 mm, Dalby, Sydsten	35
Sand 0-8 mm, Åstorp, Skanska	967
Cement A (Degerhamn)	380
Vatten	186
Våtdensitet	2408
Vattencementtal vct	0.47

Gjutning av provkroppar med tre tjocklekar, 100, 170 & 250 mm, och diametern avpassad för vågens kapacitet, skedde i betongstation med fukttät härdning (teypad plastfolie) första tre dyggen. Därefter avformades provkropparna i ett fuktigt klimatrum med 92 % RF och härdades därefter vid +20°C förseglade i polyetenpåsar och en sluten klimatlåda under sex månader.

Under härdningsperioden förseglades alla ytor utom den blivande torkeytan med påstruken epoxi och klistring av dubbla lager aluminiumfolie. Ett specialföretag hyrdes in för denna försegling.

Totalt tillverkades tio provkroppar av respektive tjocklek för de två torkklimaten, totalt 60 stycken, plus några referensprovkroppar.



Fig. 4.1.2 Arbetet med försegling av provkropparnas alla ytor utom den blivande torkytan



Fig. 4.1.3 En färdigförseglad provkropp med torkytan uppåt, kortvarigt exponerad för laboratorieklimat under vägningstillfället.

#### 4.1.2 Torkklimat och mätningar

Provkropparna placerades efter härdning i två torkklimat, dels i ett klimatrum med +20°C och 60 % RF och dels i en ugn i laboratoriet med temperaturen +50°C. Båda klimaten loggades kontinuerligt.

Uttorkningen av de olika provkropparna startade i september/oktober 2006 med lite tidsförskjutning mellan olika grupper av provkroppar så att alla provkroppar inte behöver vägas samtidigt för att få viktförlusten vid samma uttorkningstid.

- Regelbundna vägningar ger uttorkad mängd fukt som funktion av tiden
- Fuktprofiler vid några tillfällen: RF & KMG på uttagna prover från olika djup (förstörande).

För vägningarna flyttades provkropparna i tur och ordning från klimatrum respektive ugn till den centralt placerade vågen, se figur 4.1.3. Under självviktbestämningen exponerades torkytan kortvarigt för laboratorieklimatet.

För två temperaturnivåer, tre tjocklekar, tio provkroppar och mer än 600 dygns ensidig uttorkning bestämdes mer än ca 1500 vikter!

## 4.2 Resultat – viktförluster

Samtliga resultat av alla viktbestämningar redovisas i nedanstående sex diagram, som viktsförluster som funktion av tid, grupperade efter temperaturnivån.

Som framgår av figurerna är spridningen som regel liten, ca 5 %. Kurvan över förlust som funktion av tid slutar för vissa provkroppar efter en viss tid; de provkropparna har använts för förstörande provtagning för mätning av fuktprofiler, se nedan.

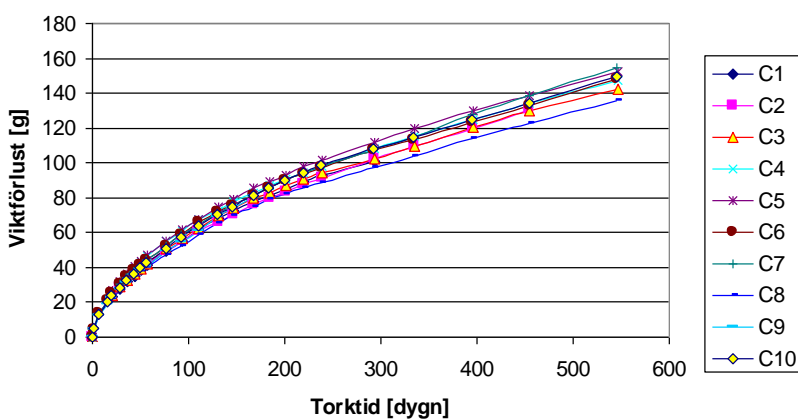
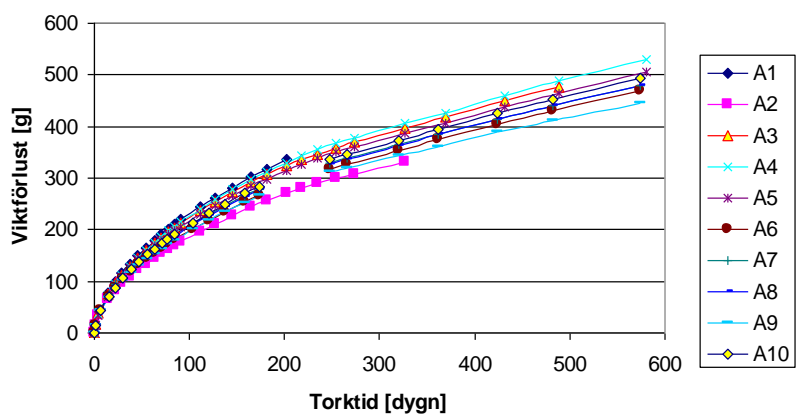
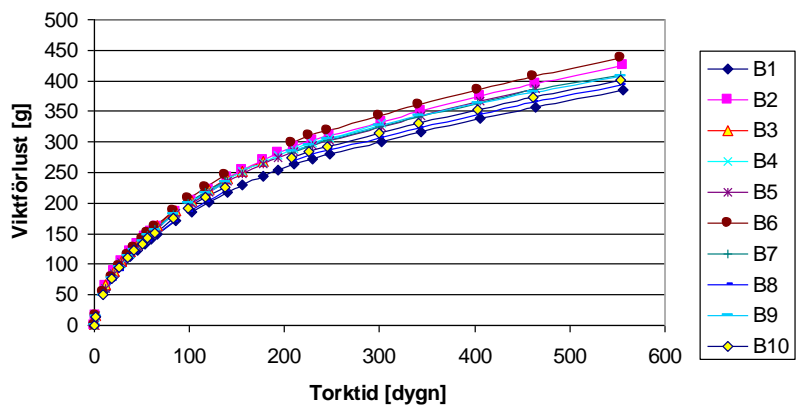


Fig. 4.2.1 Uttorkningsförloppet, som viktförluster som funktion av tid, för provkroppar med tre tjocklekar som torkat i ugn med +50°C.

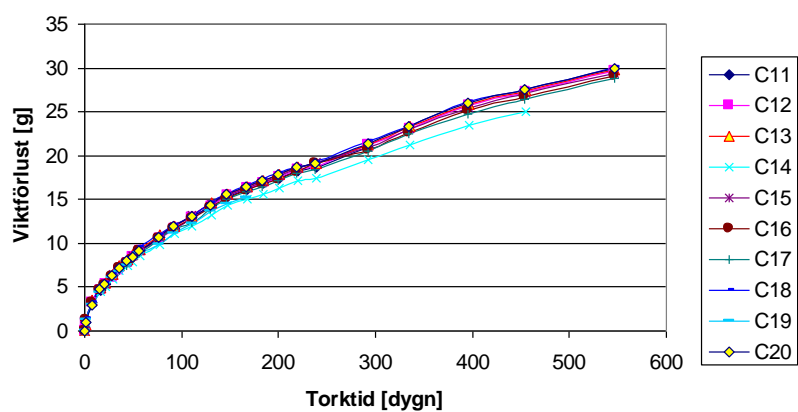
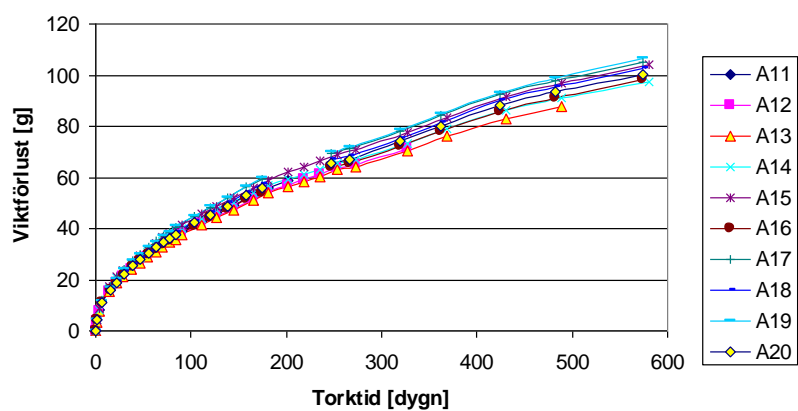
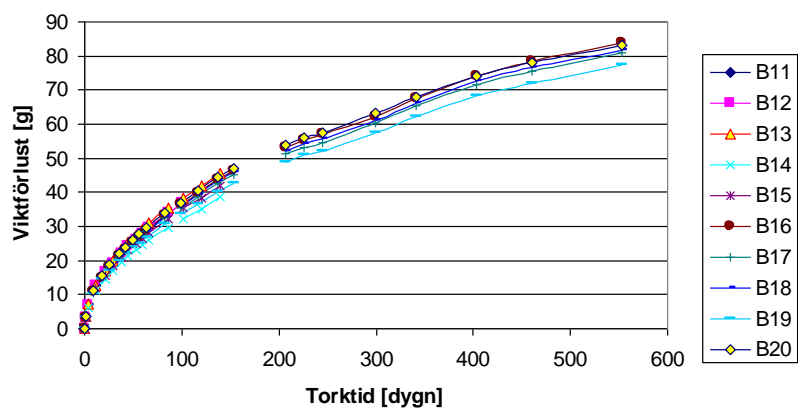


Fig. 4.2.2 Uttorkningsförloppet, som viktsförluster som funktion av tid, för provkroppar med tre tjocklekar som torkat i klimatrums med +20°C och 60 % RF.

### 4.3 Resultatanalys av viktförluster

Provkropparna med olika tjocklek  $L$  hade också olika diameter, dvs. viktförlusterna är inte enkelt jämförbara. Diffusionsteori, se avsnitt 2.1, säger att den relativa viktförlusten borde vara proportionell mot  $t/L^2$ , där  $t$  är torktiden. Den relativa viktändringen beräknas då som viktändring dividerad med totalvikt, exklusive vikten av förseglingen och redovisas i vikt-%.

Resultaten redovisade på detta sätt ges i nedanstående två figurer, för respektive temperaturnivå.

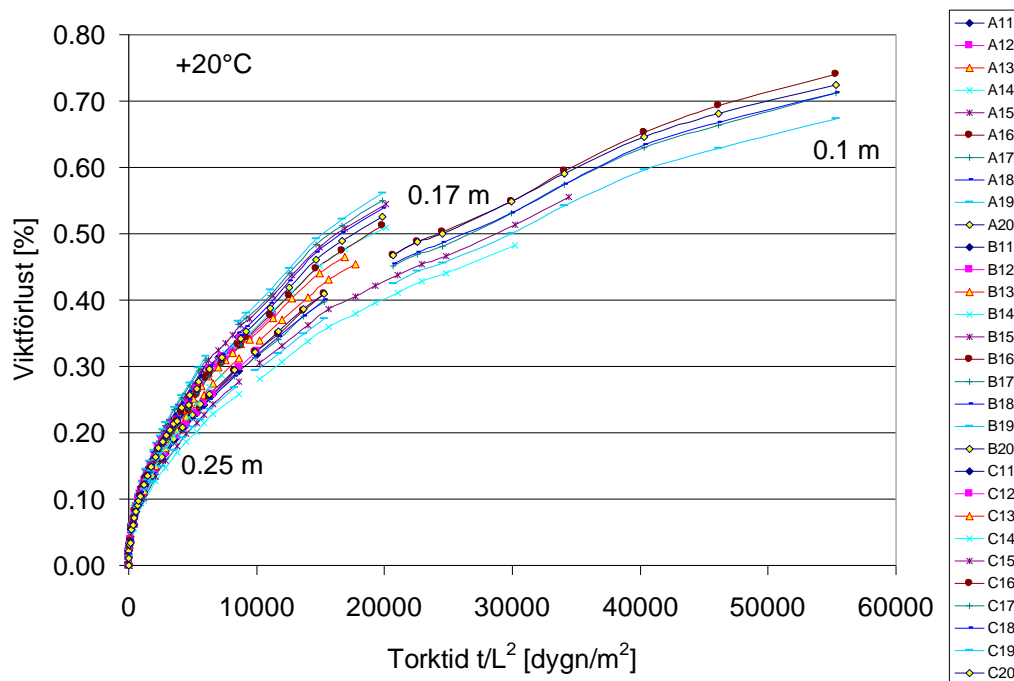


Fig. 4.3.1 Uttorkningsförloppet, som relativa viktförlusten mot  $t/L^2$ , för provkroppar med tre tjocklekar som torkat i klimatrum med +20°C och 60 % RF.

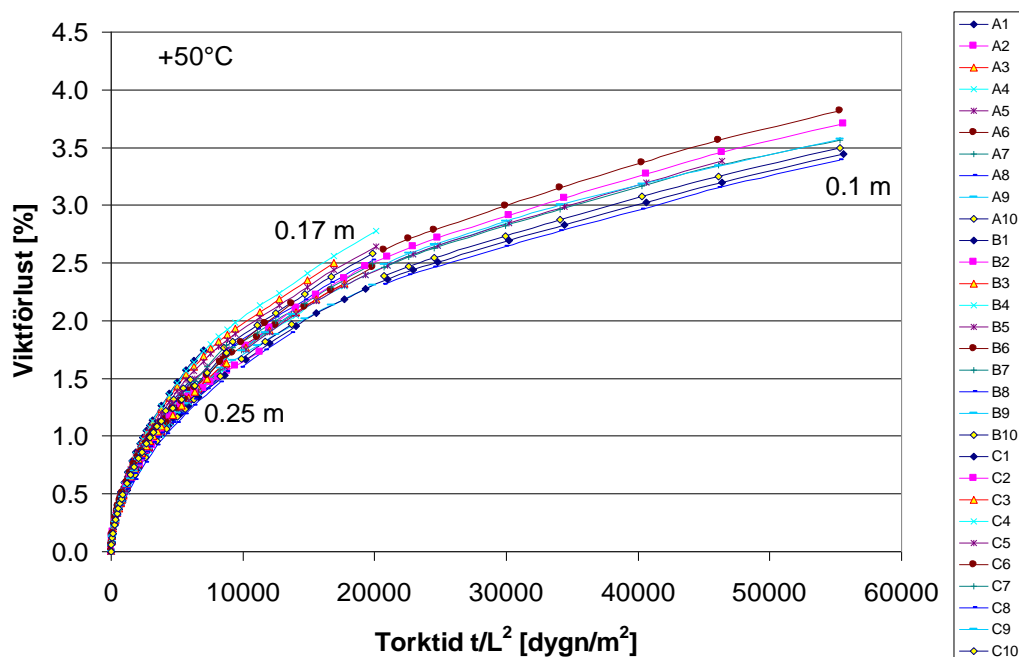


Fig. 4.3.2 Uttorkningsförloppet, som relativa viktförlusten mot  $t/L^2$ , för provkroppar med tre tjocklekar som torkat i klimatrums med  $+50^\circ\text{C}$  och ca 10-20 % RF.

Jämförelsen på detta sätt är relativt god, även om resultaten avviker något från  $t/L^2$ -beroendet enligt den enkla diffusionsteorin, särskilt för provkropparna med tjockleken 0.17m som torkat vid  $+20^\circ\text{C}$ . Någon tydlig förklaring till detta har inte hittats.

#### 4.4 Resultat – fuktprofiler

Vid några tillfällen har ett antal provkroppar använts för bestämning av fuktprofiler. Provkropparna har då spräckts i en tryckpress och delats så att prover kunnat tas ut från olika djup från torkytan.

På vissa prover har vikten  $m$  bestämts direkt varefter de placerats i kontakt med vatten, under ett avdunstningsskydd. Då de blivit kapillärt mättade har en ny vikt  $m_{\text{våt}}$  bestämts varefter de torkats i ugn vid  $+105^\circ\text{C}$  för att få torrvikten  $m_{\text{torr}}$ . Ur dessa tre vikter har kapillärmättnadsgraden KMG beräknats

$$S_{\text{cap}} = \frac{m - m_{\text{torr}}}{m_{\text{våt}} - m_{\text{torr}}} \quad (4.4.1)$$

På andra prover har den relativa fuktigheten bestämts genom att placera proverna i ett provrör av glas tillsammans med en regelbundet kalibrerad RF-givare. När provet kommit i fuktjämvikt med luften och RF-givarens sensor och filter, avlästes RF-givaren. Verklig RF erhöles sedan ur en kalibreringskurva för respektive RF-givare.

#### 4.4.1 137 dygns membranhärdning

Efter ca 3.5 månads membranhärdning mättes fuktfördelningen, men bara som kapillärmättnadsgrad, eftersom RF förväntades vara nära 100 % för en betong med aktuellt vct.

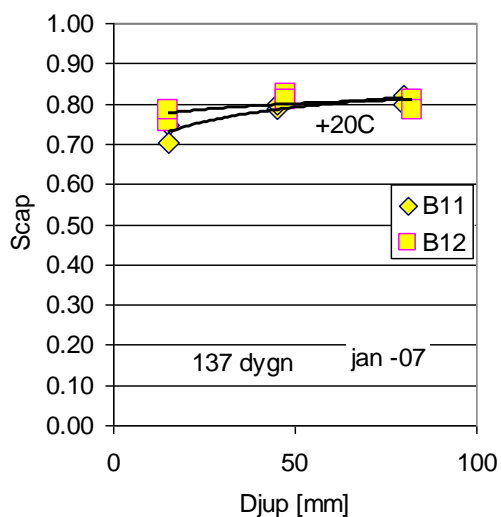


Fig. 4.4.1 Fuktfördelning, som kapillärmättnadsgrad, för provkroppar med tjockleken 100 mm som membranhärdat ca 3.5 månader vid +20°C

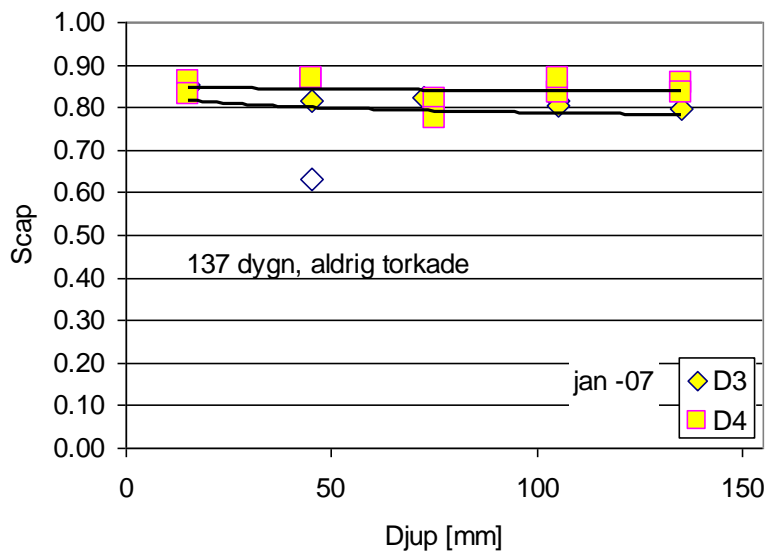


Fig. 4.4.2 Fuktfördelning, som kapillärmättnadsgrad, för provkroppar med tjockleken 170 mm som membranhärdat ca 3.5 månader vid +20°C

Den förväntade kapillärmättnadsgraden efter membranhärdning kan beräknas ur

$$S_{cap} = \frac{vct - 0.25\alpha}{vct - 0.19\alpha} \quad (4.4.2)$$

där täljaren är ett mått på mängden blandningsvatten minus mängden kemiskt bundet vatten och nämnaren är ett mått på porvolymen. Med hydrationsgraden  $\alpha = 0.9$  blir  $S_{cap} = 0.82$ , vilket är ungefär vad som mätts.

#### 4.4.2 165-200 dygns uttorkning

Efter ca 5-6 månaders uttorkning mättes fuktprofilerna i tre provkroppar vid respektive temperaturnivå. Resultaten visas i nedanstående figurer.

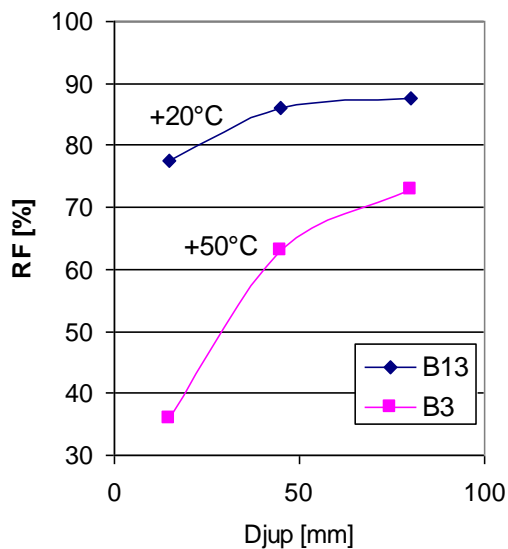


Fig. 4.4.3 Fuktfordelning, som relativ fuktighet, för provkroppar med tjockleken 100 mm som membranhärdat ca 3.5 månader vid +20°C och torkat 170 dygn vid olika temperaturnivå.

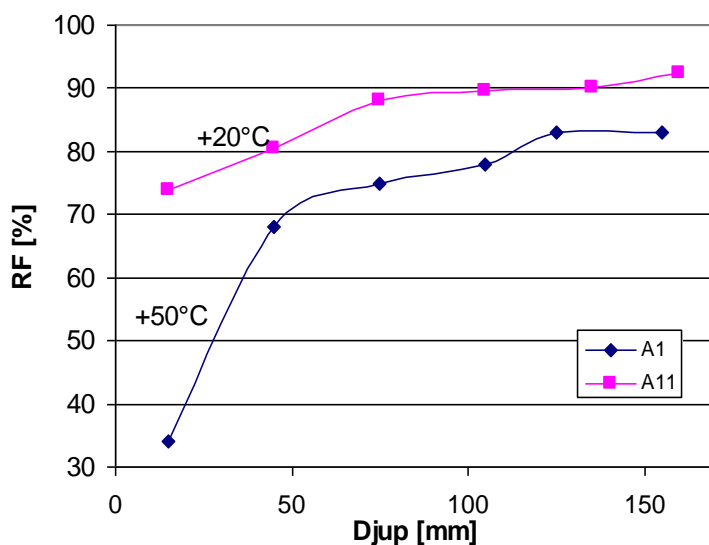


Fig. 4.4.4 Fuktfordelning, som relativ fuktighet, for provkroppar med tjockleken 170 mm som membranhardat ca 3.5 månader vid +20°C och torkat 200 dygn vid olika temperaturnivå.

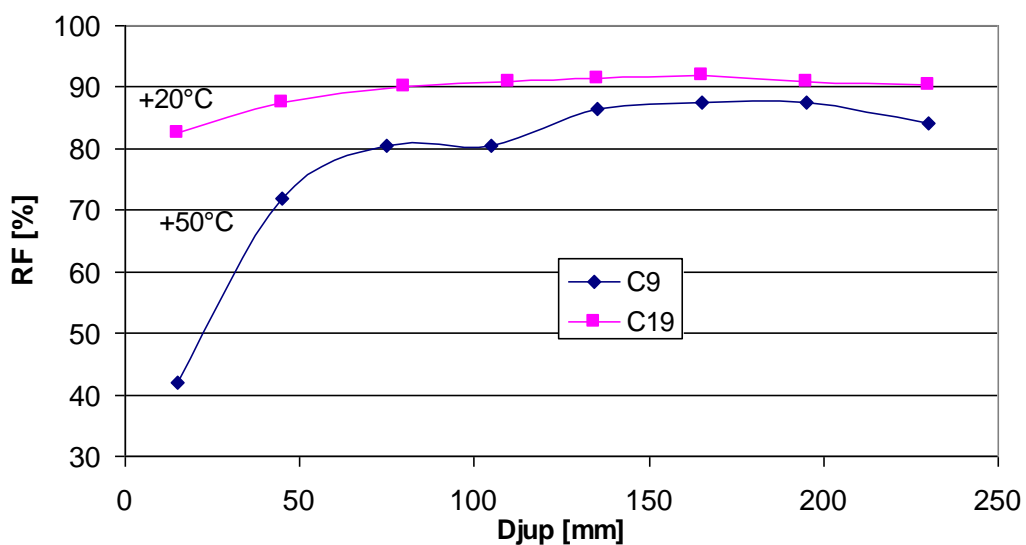


Fig. 4.4.5 Fuktfordelning, som relativ fuktighet, for provkroppar med tjockleken 250 mm som membranhardat ca 3.5 månader vid +20°C och torkat 165 dygn vid olika temperaturnivå.

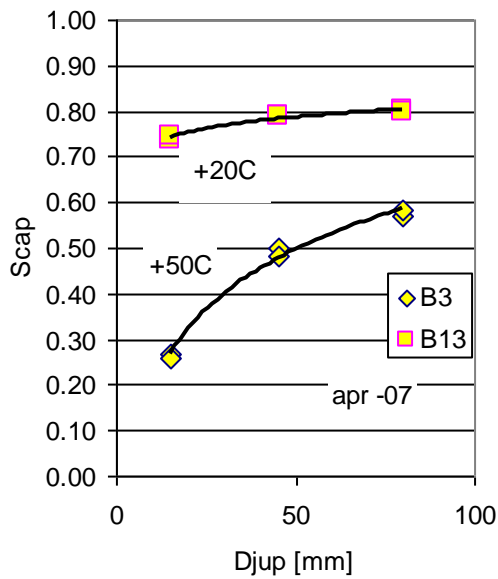


Fig. 4.4.6 Fuktfordelning, som kapillarmattnadsgrad, for provkroppar med tjockleken 100 mm som membranhardat ca 3.5 månader vid +20°C och torkat 170 dygn vid olika temperaturnivåer.

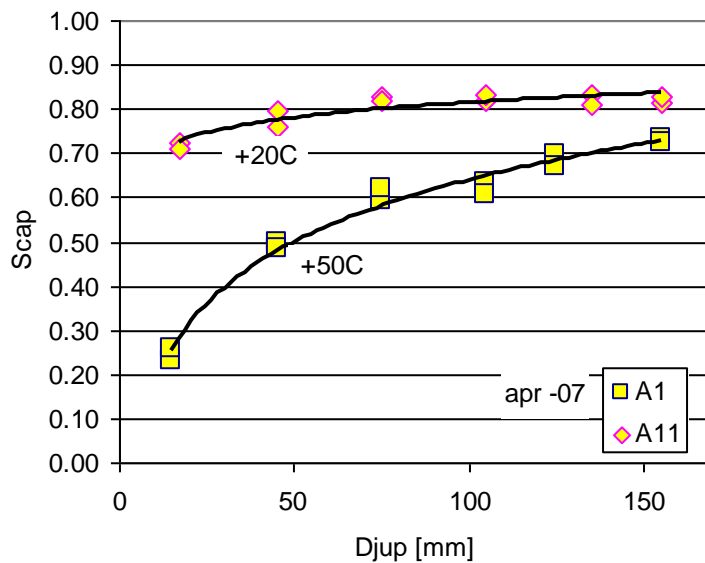


Fig. 4.4.7 Fuktfordelning, som kapillarmattnadsgrad, for provkroppar med tjockleken 170 mm som membranhardat ca 3.5 månader vid +20°C och torkat 200 dygn vid olika temperaturnivåer.

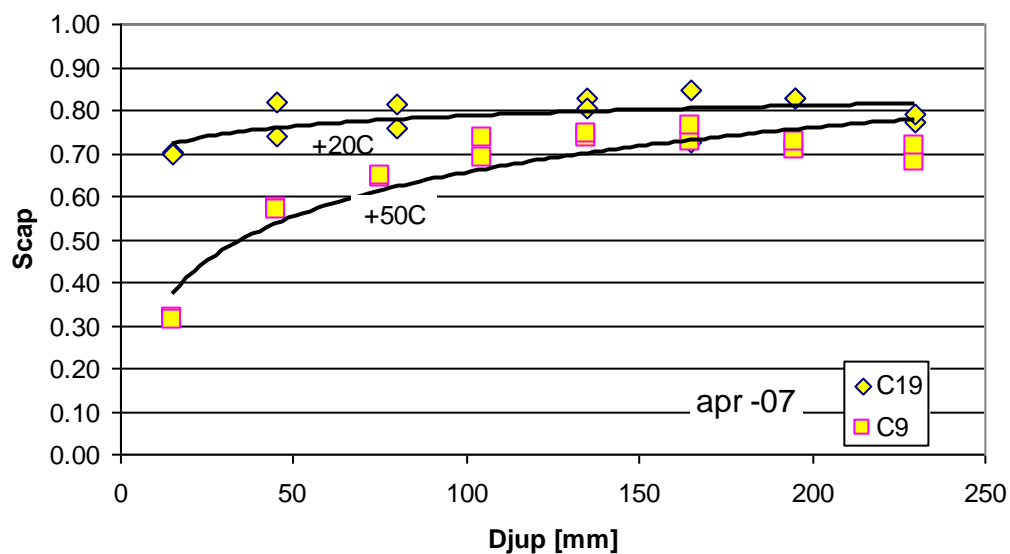


Fig. 4.4.8 Fuktfordelning, som kapillarmattnadsgrad, for provkroppar med tjockleken 250 mm som membranhardat ca 3.5 månader vid +20°C och torkat 165 dygn vid olika temperaturnivåer.

#### 4.4.3 300 dygns uttorkning

I augusti 2007 bestämdes enbart  $S_{cap}$ -profilerna, se följande figurer.

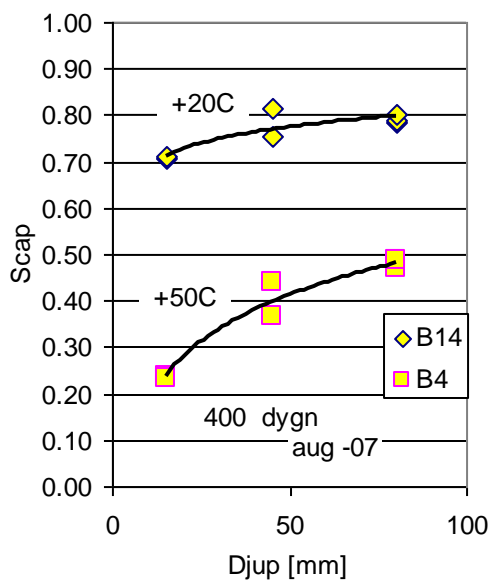


Fig. 4.4.9 Fuktfordelning, som kapillarmattnadsgrad, for provkroppar med tjockleken 100 mm som membranhardat ca 3.5 månader vid +20°C och torkat ca tio månader vid olika temperaturnivåer.

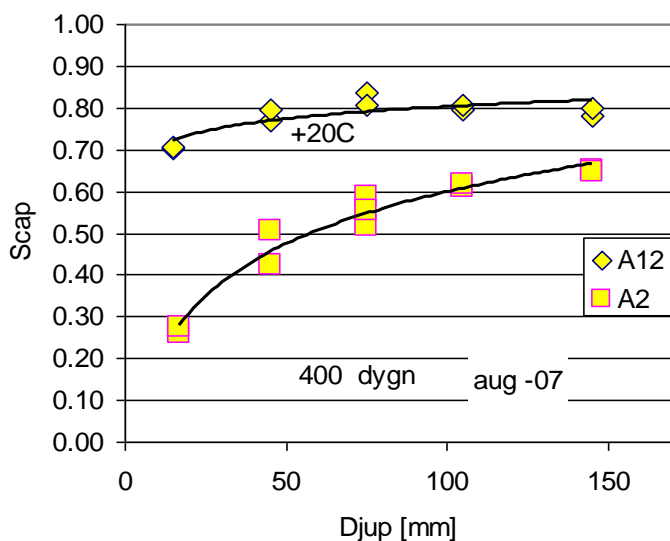


Fig. 4.4.10 Fuktfordelning, som kapillarmatttnadsgrad, for provkroppar med tjockleken 170 mm som membranhardat ca 3.5 manader vid +20°C och torkat ca tio manader vid olika temperaturnivar.

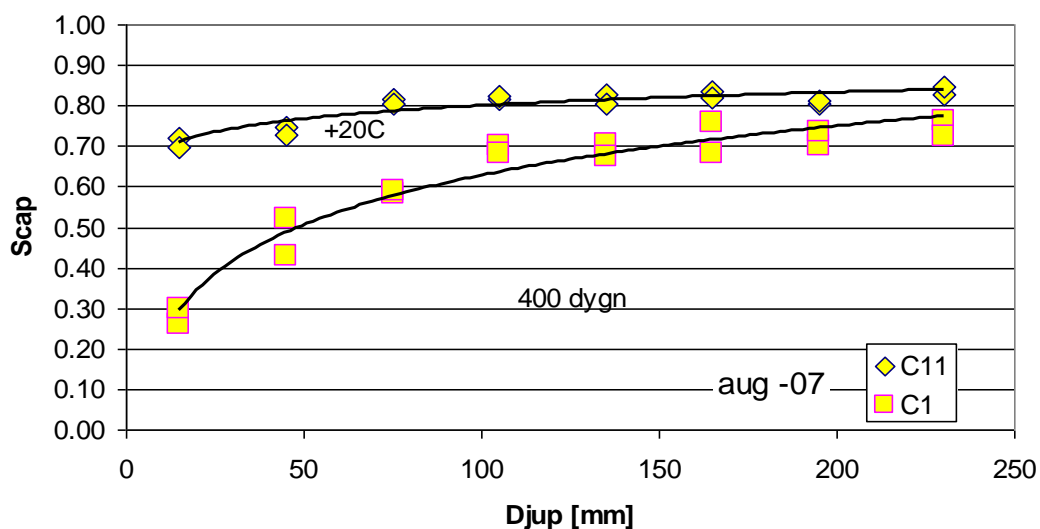


Fig. 4.4.11 Fuktfordelning, som kapillarmatttnadsgrad, for provkroppar med tjockleken 250 mm som membranhardat ca 3.5 manader vid +20°C och torkat ca tio manader vid olika temperaturnivar.

#### 4.4.4 450 dygns uttorkning

I januari 2008 bestämdes på samma sätt enbart  $S_{cap}$ -profilerna, se följande figurer.

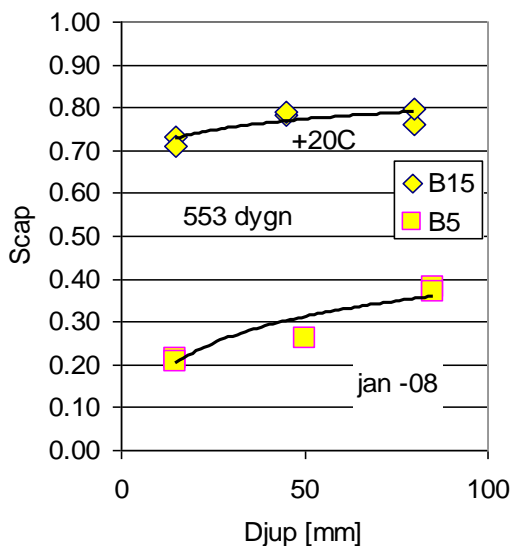


Fig. 4.4.12 Fuktfordelning, som kapillärmättnadsgrad, för provkroppar med tjockleken 100 mm som membranhärdad ca 3.5 månader vid +20°C och torkat 15 månader vid olika temperaturnivåer.

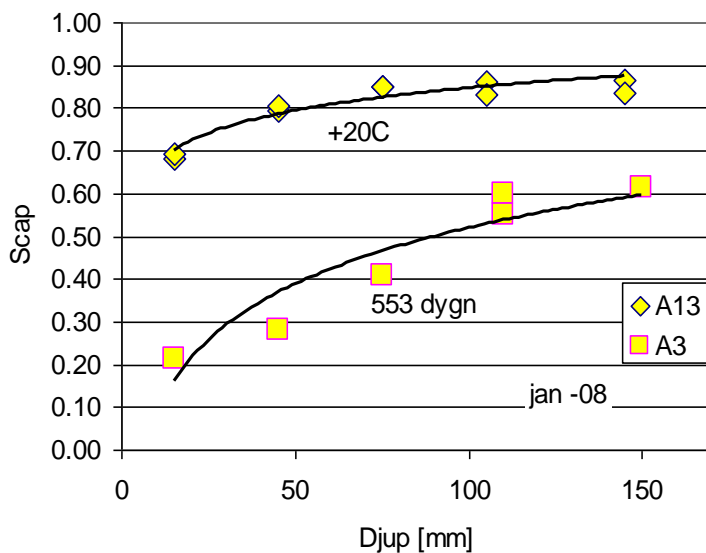


Fig. 4.4.13 Fuktfordelning, som kapillärmättnadsgrad, för provkroppar med tjockleken 170 mm som membranhärdad ca 3.5 månader vid +20°C och torkat 15 månader vid olika temperaturnivåer.

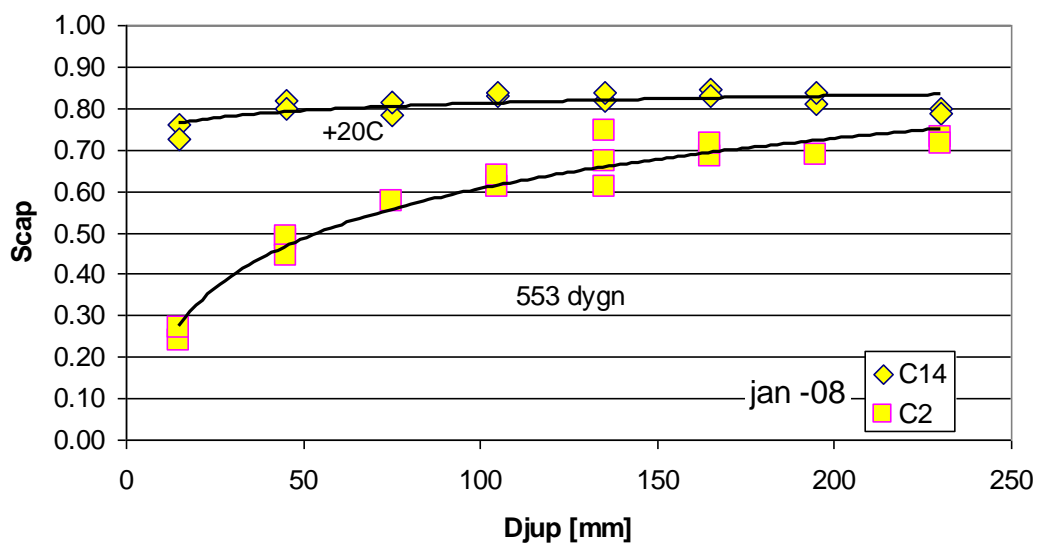


Fig. 4.4.14 Fuktfordelning, som kapillarmattnadsgrad, for provkroppar med tjockleken 250 mm som membranhardat ca 3.5 manader vid +20°C och torkat 15 manader vid olika temperaturnivaer.

#### 4.4.5 600 dygns uttorkning

10-11 juni 2008 togs de sista proverna for bestamning av fuktprofiler, både RF och  $S_{cap}$ . Resultaten visas i nedanstående diagram.

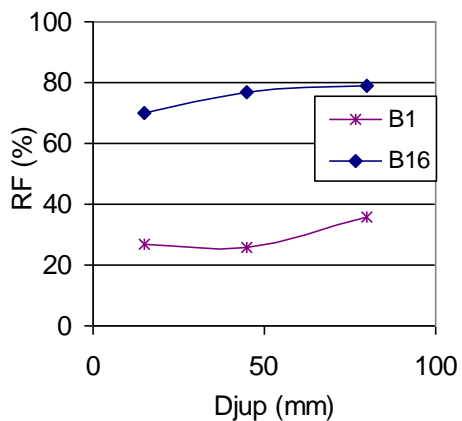


Fig. 4.4.15 Fuktfordelning, som kapillarmattnadsgrad, for provkroppar med tjockleken 100 mm som membranhardat ca 3.5 manader vid +20°C och torkat 20 manader vid olika temperaturnivaer.

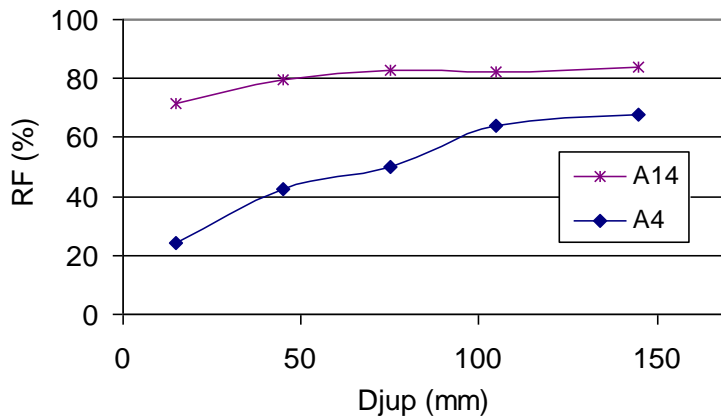


Fig. 4.4.16 Fuktfördelning, som kapillärmättnadsgrad, för provkroppar med tjockleken 170 mm som membranhärdad ca 3.5 månader vid +20°C och torkat 20 månader vid olika temperaturnivåer.

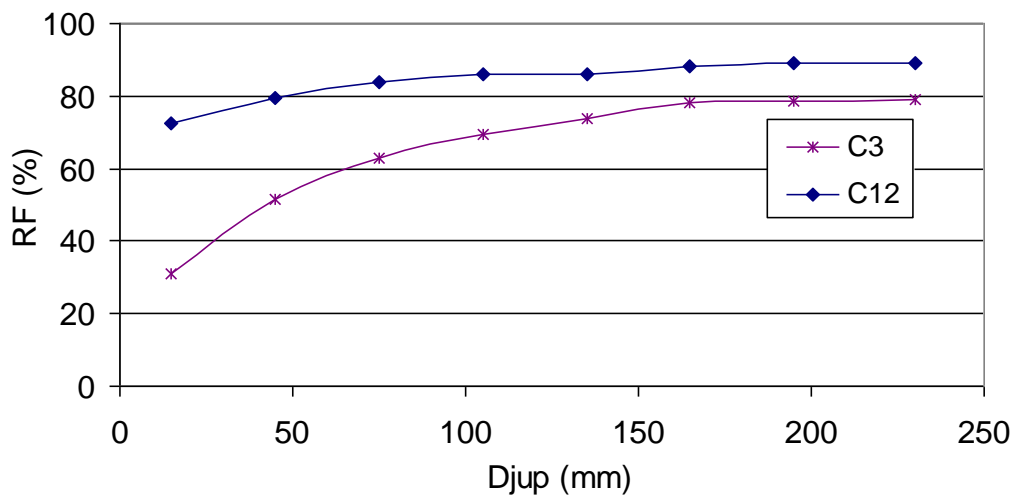


Fig. 4.4.17 Fuktfördelning, som kapillärmättnadsgrad, för provkroppar med tjockleken 250 mm som membranhärdad ca 3.5 månader vid +20°C och torkat 20 månader vid olika temperaturnivåer.

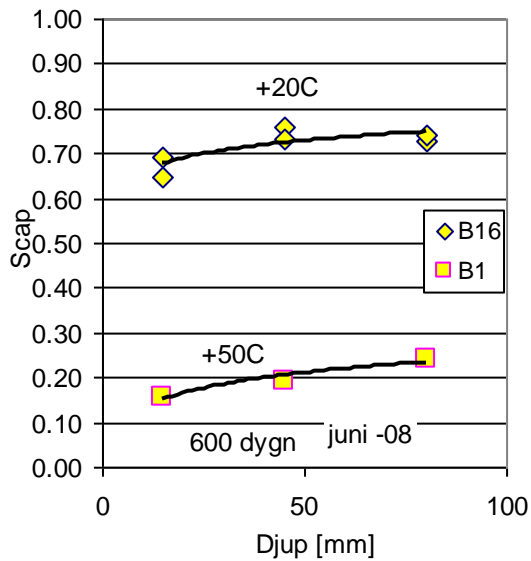


Fig. 4.4.18 Fuktfordelning, som kapillarmatttnadsgrad, for provkroppar med tjockleken 100 mm som membranhardat ca 3.5 manader vid +20°C och torkat 20 manader vid olika temperaturnivaer.

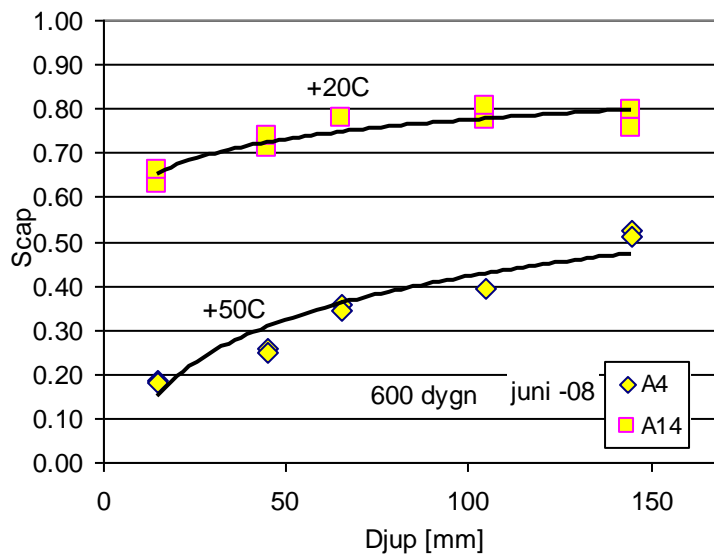


Fig. 4.4.19 Fuktfordelning, som kapillarmatttnadsgrad, for provkroppar med tjockleken 170 mm som membranhardat ca 3.5 manader vid +20°C och torkat 20 manader vid olika temperaturnivaer.

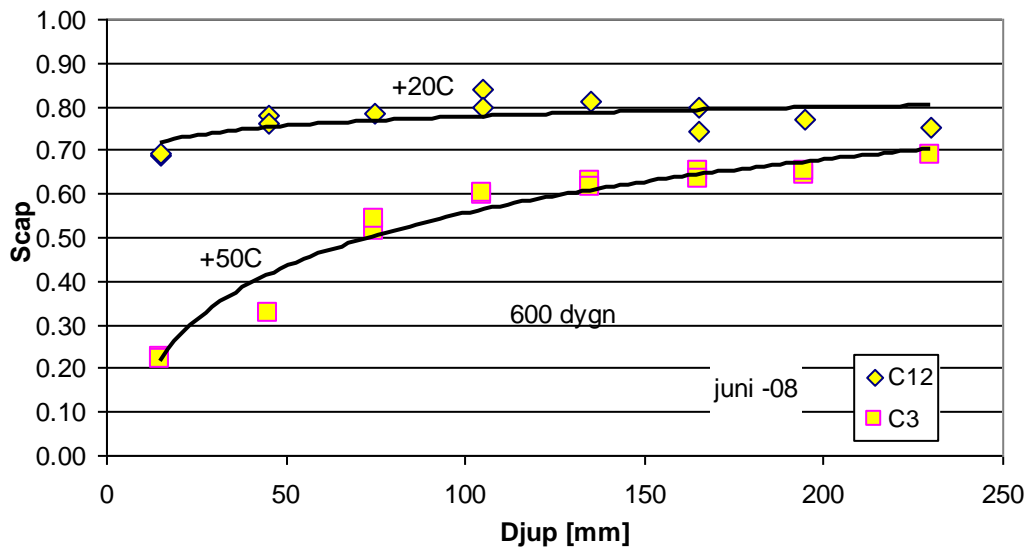


Fig. 4.4.20 Fuktfördelning, som kapillärmättnadsgrad, för provkroppar med tjockleken 250 mm som membranhärdad ca 3.5 månader vid +20°C och torkat 20 månader vid olika temperaturnivåer.

#### 4.5 Sammanställning av fuktprofiler vid olika torktider

I nedanstående diagram har alla fuktprofiler sammanställts för respektive provkroppstjocklek och torktemperatur. En närmre analys och jämförelser med beräkningar görs i kapitel 6.

## 4.5.1 KMG-profiler under 600 dygns uttorkning vid +20°C

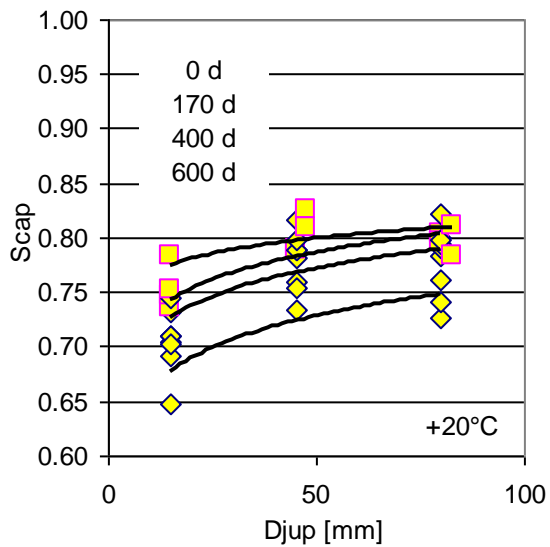


Fig. 4.5.1 Fuktfordelningar, som kapillärmättnadsgrad, för provkroppar med tjockleken 100 mm som torkat 600 dygn vid +20°C

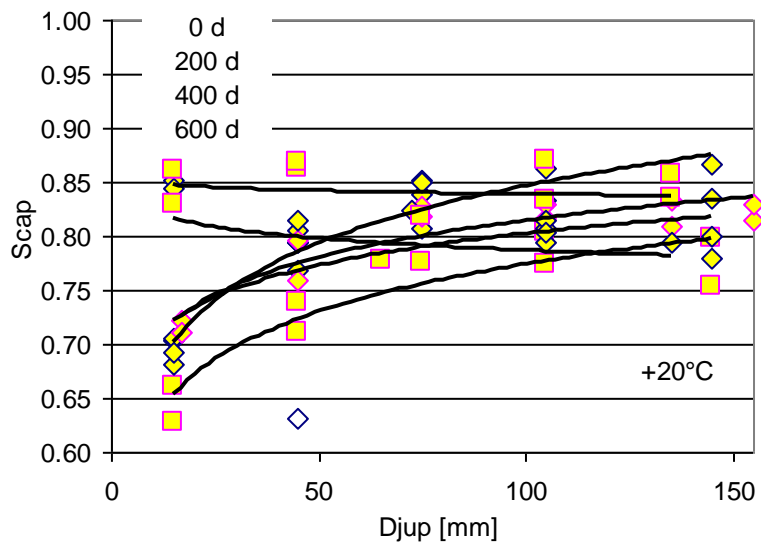


Fig. 4.5.2 Fuktfordelningar, som kapillärmättnadsgrad, för provkroppar med tjockleken 170 mm som torkat 600 dygn vid +20°C

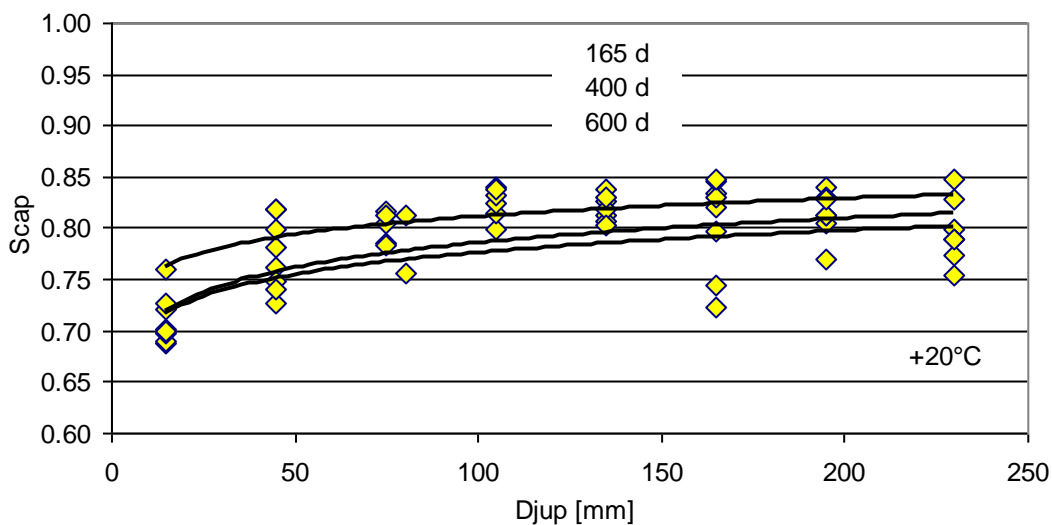


Fig. 4.5.3 Fuktfordelningar, som kapillarmattnadsgrad, for provkroppar med tjockleken 250 mm som torkat 600 dygn vid +20°C

#### 4.5.2 KMG-profiler under 600 dygns uttorkning vid +50°C

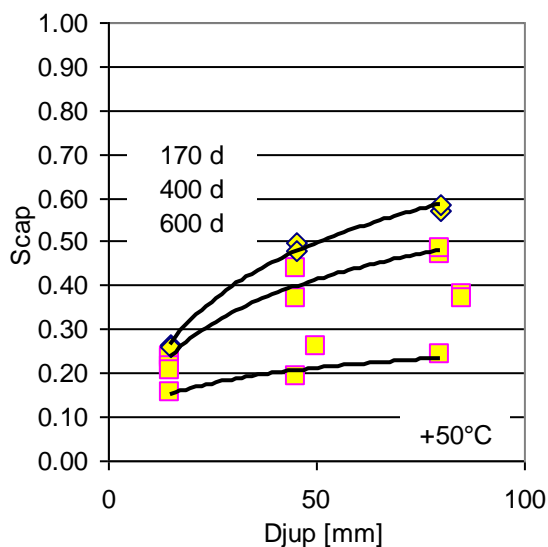


Fig. 4.5.4 Fuktfordelningar, som kapillarmattnadsgrad, for provkroppar med tjockleken 100 mm som torkat 600 dygn vid +50°C

Den sista KMG-profilen visar att dessa tunna provkroppar som torkat i +50°C nu i stort sett har torkat ut. KMG når ca 0.20 att jämföras med de som torkat i +20°C, som inte nått under 0.60.

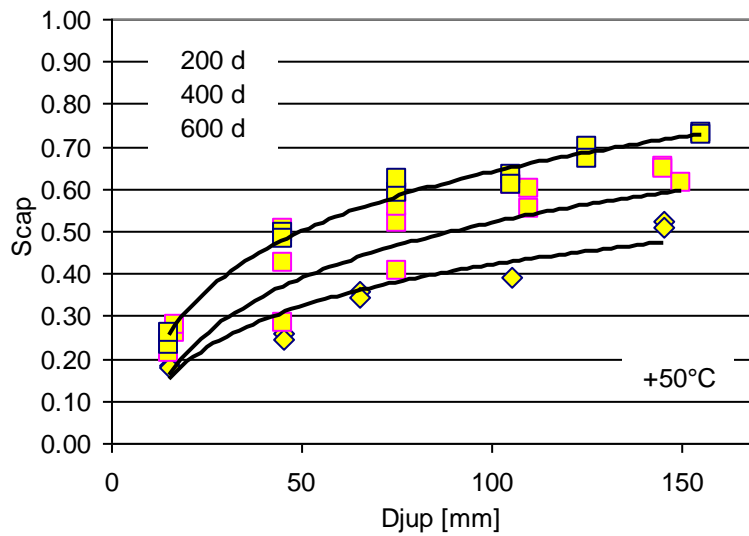


Fig. 4.5.5 Fuktfordelningar, som kapillarmatttnadsgrad, for provkroppar med tjockleken 170 mm som torkat 600 dygn vid +50°C

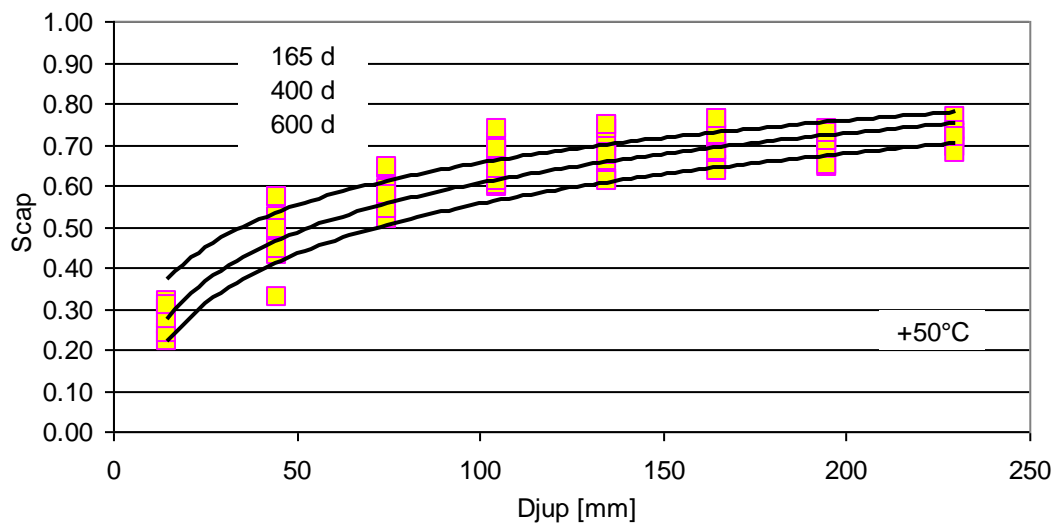


Fig. 4.5.6 Fuktfordelningar, som kapillarmatttnadsgrad, for provkroppar med tjockleken 250 mm som torkat 600 dygn vid +50°C

## 4.5.3 RF-profiler under 600 dygns uttorkning vid +20°C

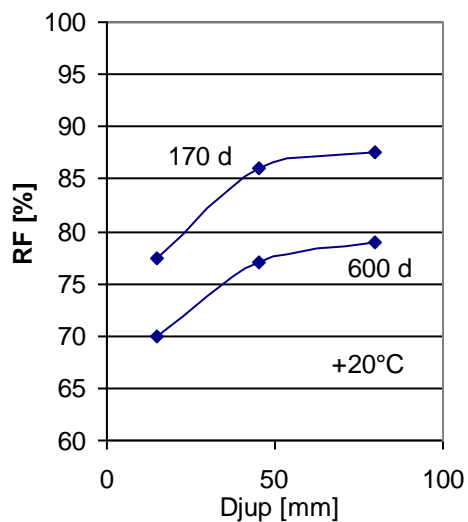


Fig. 4.5.7 Fukt fördelningar, som relativ fuktighet, för provkroppar med tjockleken 100 mm som torkat 600 dygn vid +20°C

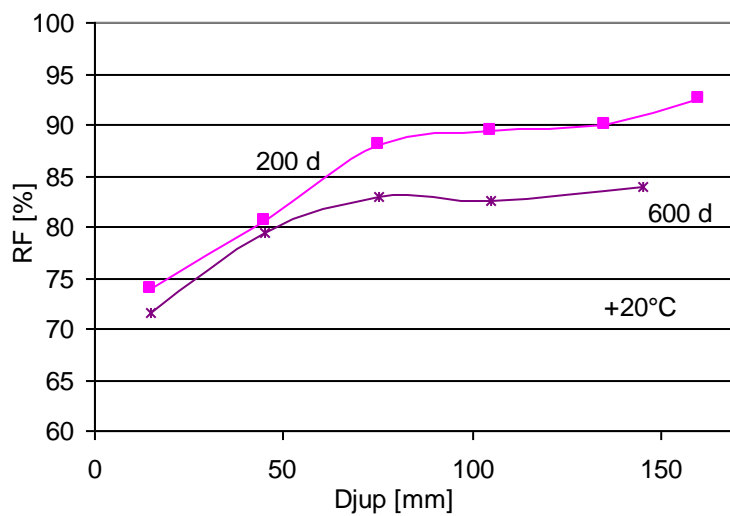


Fig. 4.5.8 Fukt fördelningar, som relativ fuktighet, för provkroppar med tjockleken 170 mm som torkat 600 dygn vid +20°C

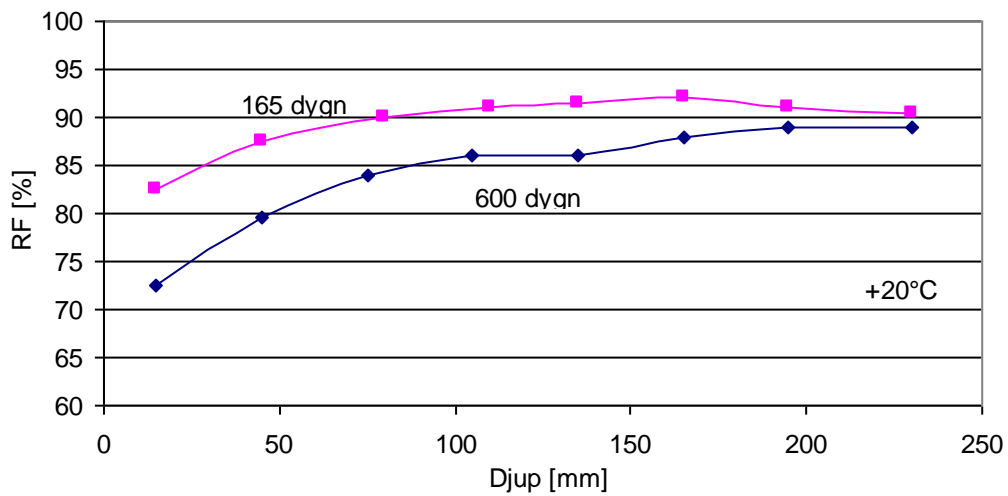


Fig. 4.5.9 Fukt fördelningar, som relativ fuktighet, för provkroppar med tjockleken 250 mm som torkat 600 dygn vid +20°C

#### 4.5.4 RF-profiler under 600 dygns uttorkning vid +50°C Db

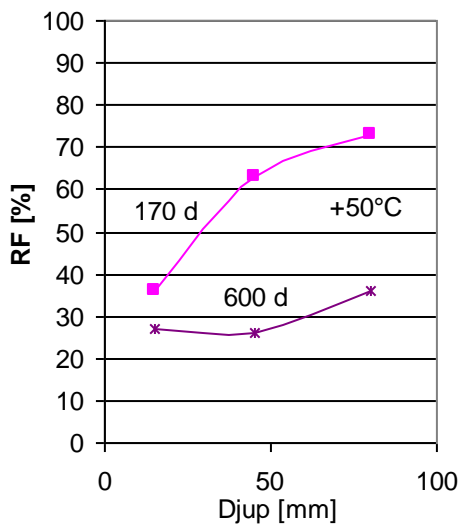


Fig. 4.5.10 Fukt fördelningar, som relativ fuktighet, för provkroppar med tjockleken 100 mm som torkat 600 dygn vid +50°C

Den sista RF-profilen visar att dessa tunna provkroppar som torkat i +50°C nu har torkat ut. Fuktprofilen avspeglar effekten av det fluktuerande klimatet i laboratoriet.

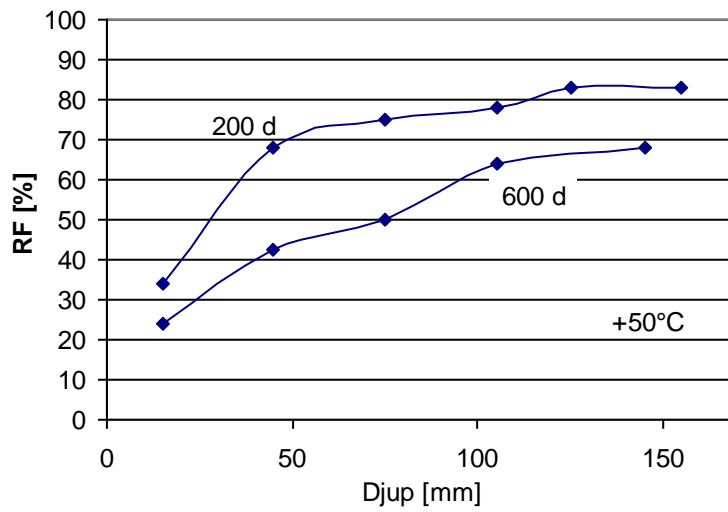


Fig. 4.5.11 Fuktfordelningar, som relativ fuktighet, för provkroppar med tjockleken 170 mm som torkat 600 dygn vid +50°C

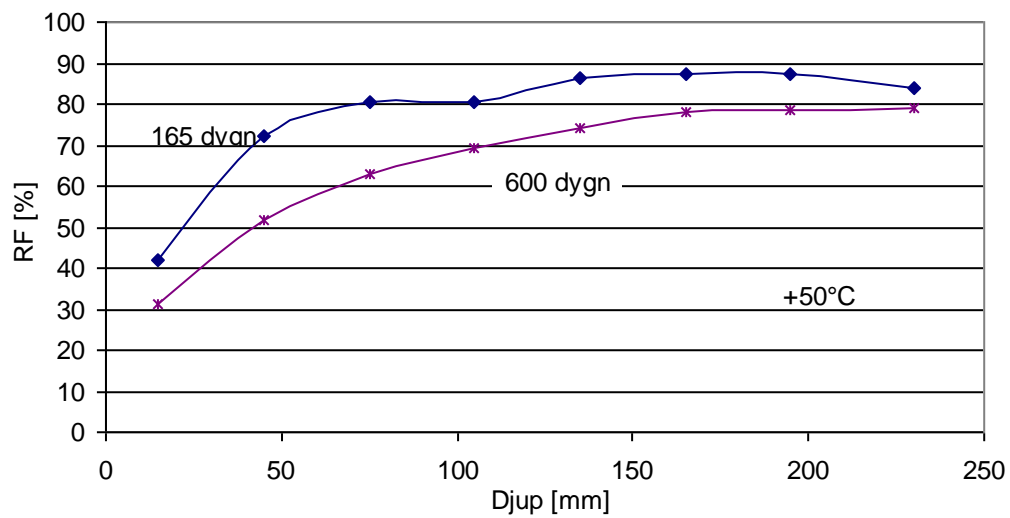


Fig. 4.5.12 Fuktfordelningar, som relativ fuktighet, för provkroppar med tjockleken 100 mm som torkat 600 dygn vid +50°C

## 5 Klimatpåverkan

Förändringarna över tiden inne i inneslutningsväggarnas betong styrs av randvillkoret på ytan, dvs. vilket ytklimat som råder där. Detta har studerats på de två typerna av reaktorinneslutningar.

### 5.1 Klimatpåverkan på BWR-inneslutningar i B1 & B2

I en förstudie undersöktes klimatpåverkan på utsidan av BWR-reaktorinneslutningen i Barsebäcks B2, som då fortfarande var i drift (BWR = Boiling Water Reactor). Fuktmätningar hade då tidigare gjorts i betonginneslutningen i B1 och eftersom dessa båda reaktorinneslutningar är väldigt lika borde mätningar på den ena vara användbara för jämförelse med den andra.

Det första besöket vid kärnkraftverken gjordes vid Barsebäck 27/10 2003. Övriga verk har sedan besökts av Peter Johansson på samma sätt. Vid besöken har tillgängliga mätdata diskuterats och mätdata har sedan gjorts tillgängliga från de olika verken. Erhållna klimatdata har sedan kompletterats och kontrollerats genom utplacering av klimatdataloggrar i Barsebäck 2, under januari - maj 2004. Där har också direkta mätningar av yttemperaturer skett.

Utvärderingen av dessa data har inte genomförts fullt ut; säkrare slutsatser kräver en noggrannare genomgång.

#### 5.1.1 Tillgängliga mätdata

Reaktorer har valts ut så att samtliga reaktortyper representeras på de olika verken. Generellt finns det bara mätdata från insidan av reaktorinneslutningarna och de gäller temperaturloggning samt daggpunkt i samtliga fall.

Även om tätplåten befinner sig på insidan av den spännarmerade betongkonstruktionen, och därmed spärrar inverkan av fukt inne i inneslutningen på det yttre betongskalet, kan kanske daggpunkten vara av intresse för en eventuell livslängdsbedömning av missilskyddet.

Generellt finns inga tillförlitliga temperaturloggningar utanför reaktorinneslutningarna. I de fall där temperaturen loggas är givarna dessutom ofta placerade i anslutning till processutrustning vilken i sig kan alstra värme och på så sätt ge missvisande mätresultat. Värderingen av data måste därför ske genom att klargöra den omedelbara omgivningen kring varje mätpunkt. Efter diskussioner med verken valdes följande reaktorer och respektive år för mätdatagranskning:

- Barsebäck: B2 år: 1998
- Forsmark: F1 och F3 år: 2003
- Oskarshamn: O1 och O2 år: 2001/2003, O3 år: 2001/2002
- Ringhals: R1 år: 2002, R3 år: 2003

Dessa data är tillgängliga på helt olika sätt från de olika reaktorerna. I vissa fall finns de på handskrivna blad; i andra som datafiler.

Jan Norlin på Barsebäck har kontrollerat flera av mätpunkterna med avseende på placering eftersom någon av mätpunkterna visade orimligt höga värden. Vid kontrollen visade det sig att dessa är placerade i direkt anslutning till reaktortanken i ett litet utrymme vilket utgör sockel till den biologiska skärmen. Även om utrymmet under reaktortanken har förbindelse med den övriga omgivningen i reaktorinneslutningen anser Jan att dessa punkter inte är representativa för reaktorinneslutningsväggen insida.

Användningen av tillgängliga data kräver alltså att man noga analyserar mätpunkternas lägen innan värdena användes okritiskt.

### 5.1.2 Klimatloggning i B2

Hypotesen att det inte råder något fukttillskott i utrymmena utanför reaktorinneslutningen har prövats i B2. Utrymmena ventileras med ett mekaniskt till- och frånluftssystem. Om hypotesen håller kommer klimatdata från SMHI att kunna ge en bra uppfattning om den aktuella ånghalten på utsidan av reaktorinneslutningen under hela den gångna brukstiden.

Datalagrare som registrerar temperatur och relativ fuktighet monterades 2004-01-13 i tre representativa utrymmen samt utomhus i anslutning till reaktorbyggnaden, se Figur 5.1.1 för principiell placering.

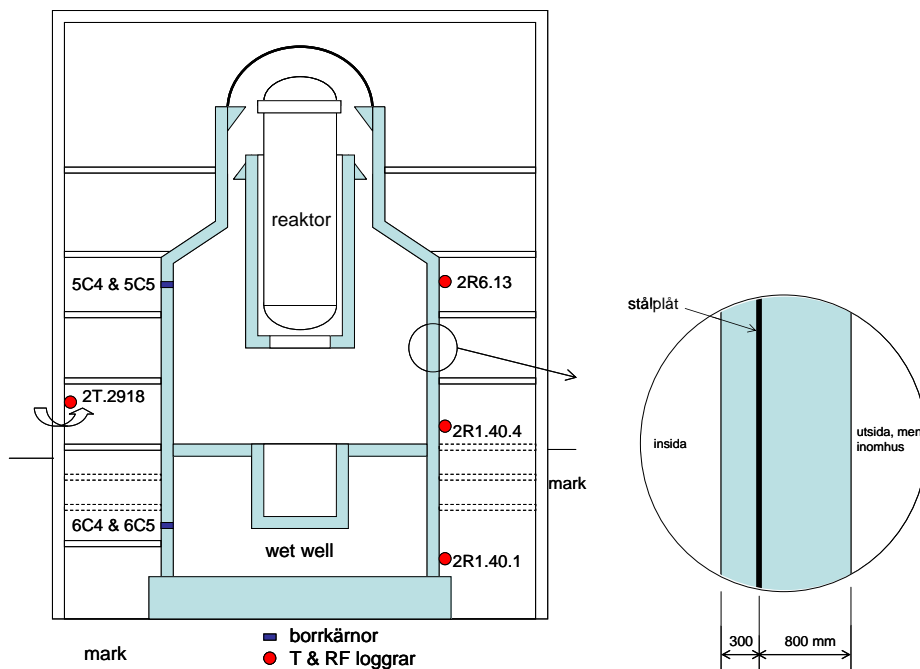


Fig. 5.1.1. En principskiss över en BWR-inneslutning och omslutande byggnad.

I Figurerna 5.1.2 – 5.1.3 visas placeringen av denna utrustning i förhållande till uteluftsintag samt reaktorinneslutningsvägg. Dataloggarna togs in och tömdes på data 2004-05-06, vilka sedan utvärderades.

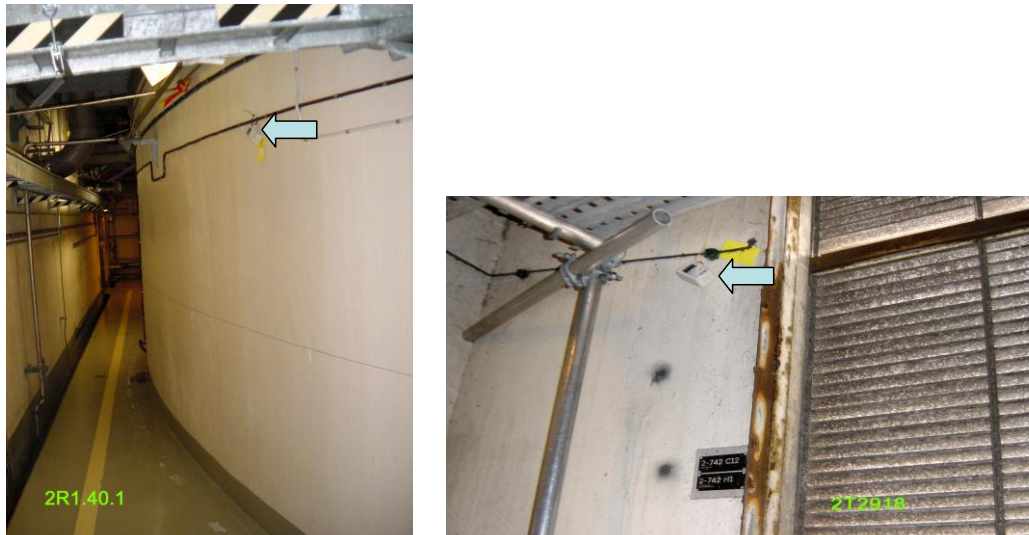


Fig. 5.1.2. Placering av dataloggrar i B2 vid uteluftsintag (vänstra bilden) och på utsidan av reaktorinneslutningen på plan 1 i fyrkantschaktet.



Fig. 5.1.3. Placering av dataloggrar i B2 på plan 4 i fyrkantsschaktet (vänstra bilden) och i utrymme under ringplatta (högra bilden).

Resultaten av kontinuerlig loggning av temperatur och relativ fuktighet i dessa fyra mätpunkter redovisas i nedanstående figurer. Värdena har sedan omräknats till ånghalter i luften.

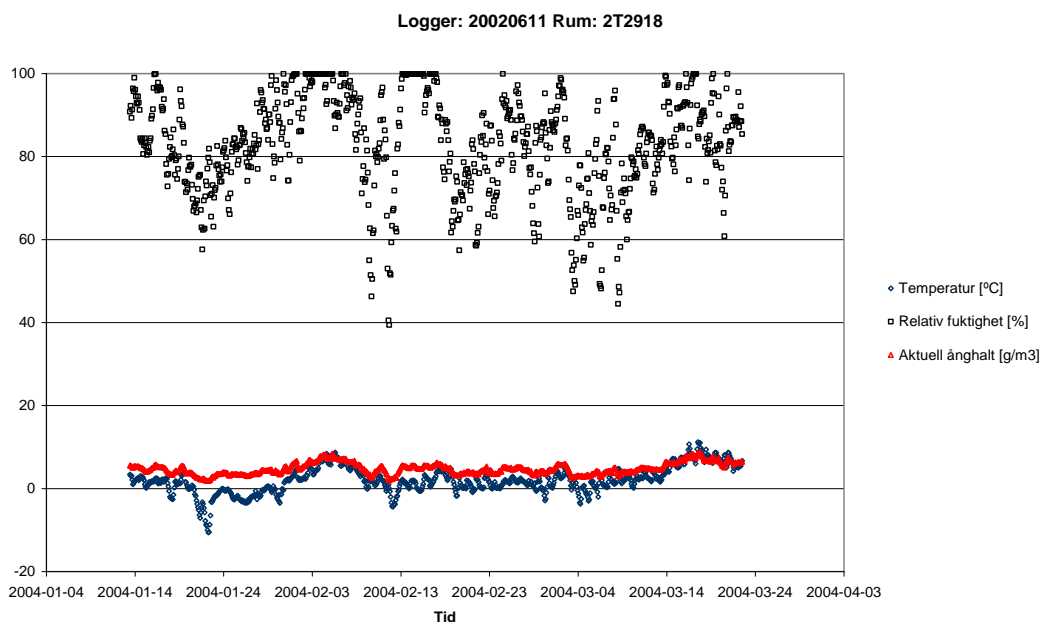


Fig. 5.1.4. Resultatet från loggning av temperatur och relativ fuktighet samt därur beräknade ånghalter, mätpunkt intill uteluftsluftintaget.

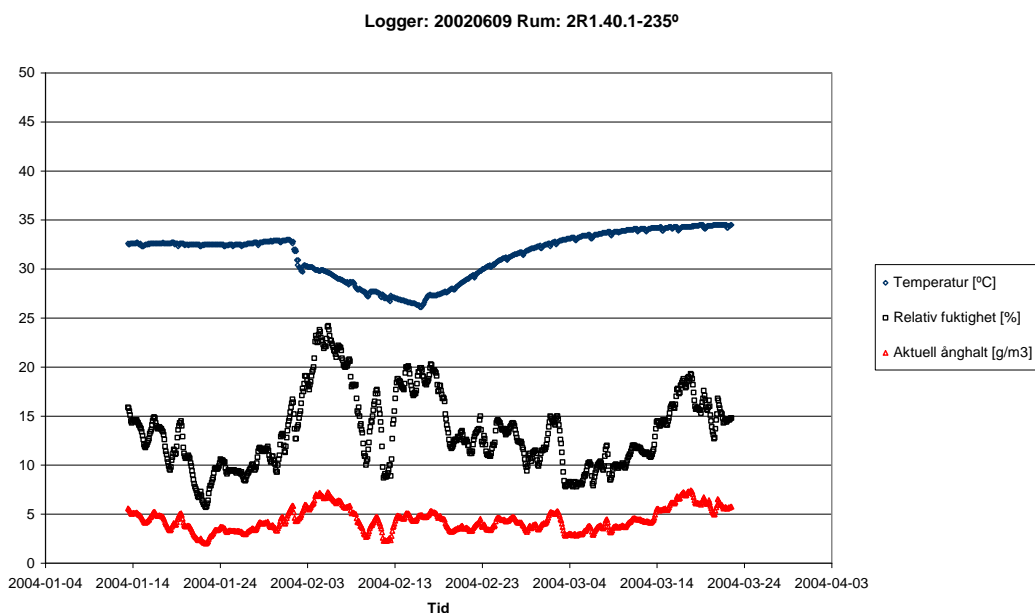


Fig. 5.1.5. Resultatet från loggning av temperatur och relativ fuktighet samt därur beräknade ånghalter, mätpunkten nertill på inneslutningsväggs utsida (plan 1 i fyrkantschaktet).

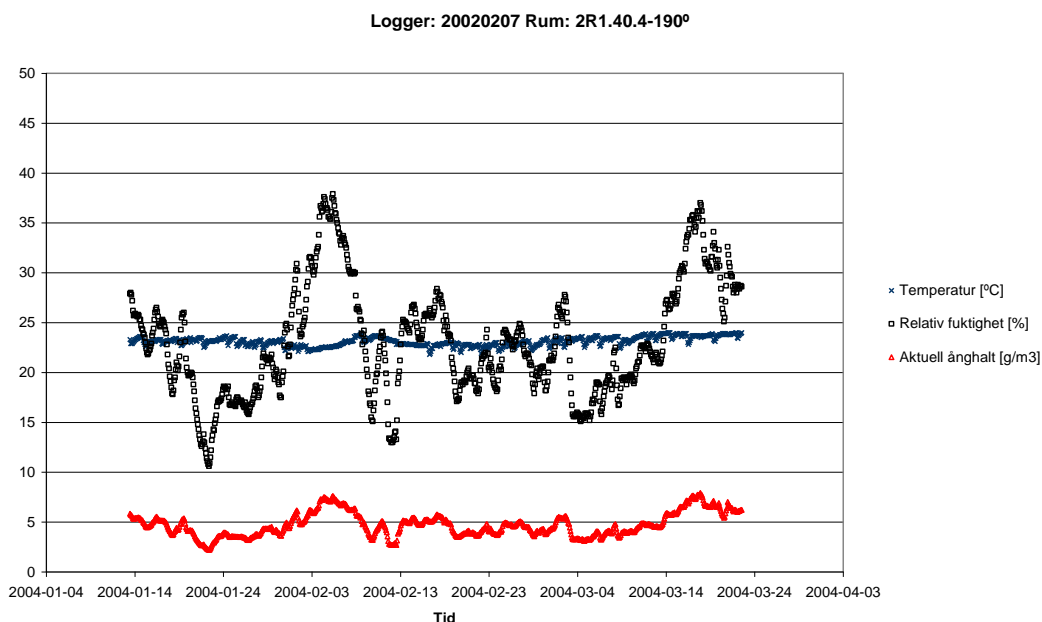


Fig. 5.1.6. Resultatet från loggning av temperatur och relativ fuktighet samt därur beräknade ånghalter, mätpunkten på utsida samt cirka halva höjden av inneslutningsväggen (fyrcantsschaktets övre del).

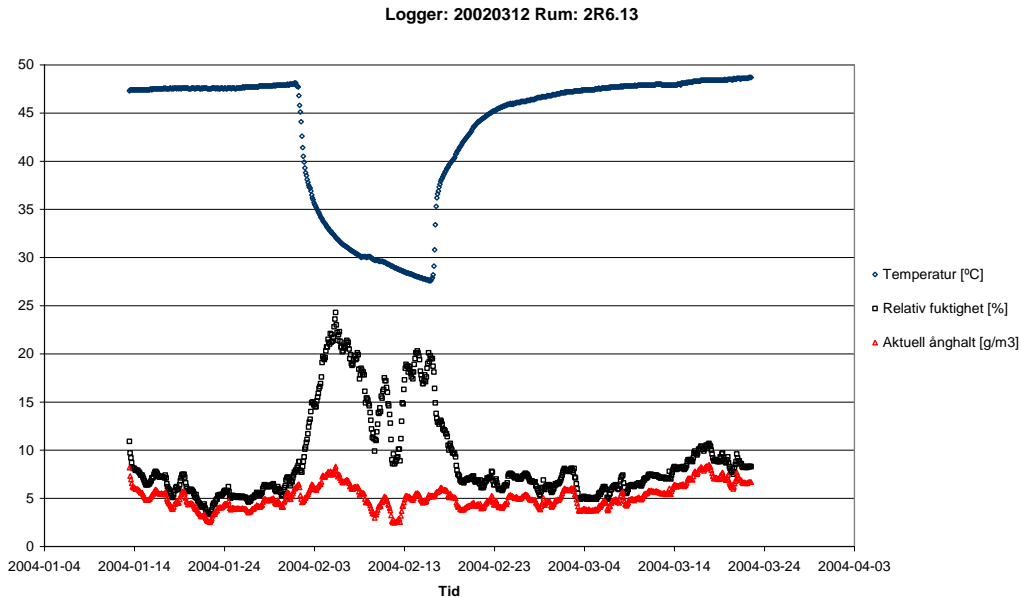


Fig. 5.1.7. Resultatet från loggning av temperatur och relativ fuktighet samt därur beräknade ånghalter, mätpunkten upptill på inneslutningsväggens utsida (utrymme under ringplatta).

Det framgår tydligt att ånghalten variera relativt lite under mätperioden, trots att både temperatur och relativ fuktighet varierar mycket i toppen av

inneslutningen. Under mätperioden stängdes reaktorn av, vilket syns i toppen som en temperatursänkning från strax under 50°C till ca 27°C innan reaktorn startas igen. Temperatursänkningen medförde att den relativa fuktigheten steg tillfälligt, från ca 8 % RF till ca 25 % RF i början av temperatursänkingsperioden. Ånghalten steg något under denna period.

I nedanstående figur ges en sammanställning av ånghalterna i de fyra mätpunkterna. Som synes är "fukttillskottet", dvs skillnaden i ånghalt mot uteluftens ånghalt, bara något enstaka gram per m<sup>3</sup>. Utrymmena är alltså så väl ventilerade och har så litet fukttillskott att ånghalten i uteluften kan användas för att relativt väl beskriva fuktförhållandena i ineluften kring inneslutningens utsida.

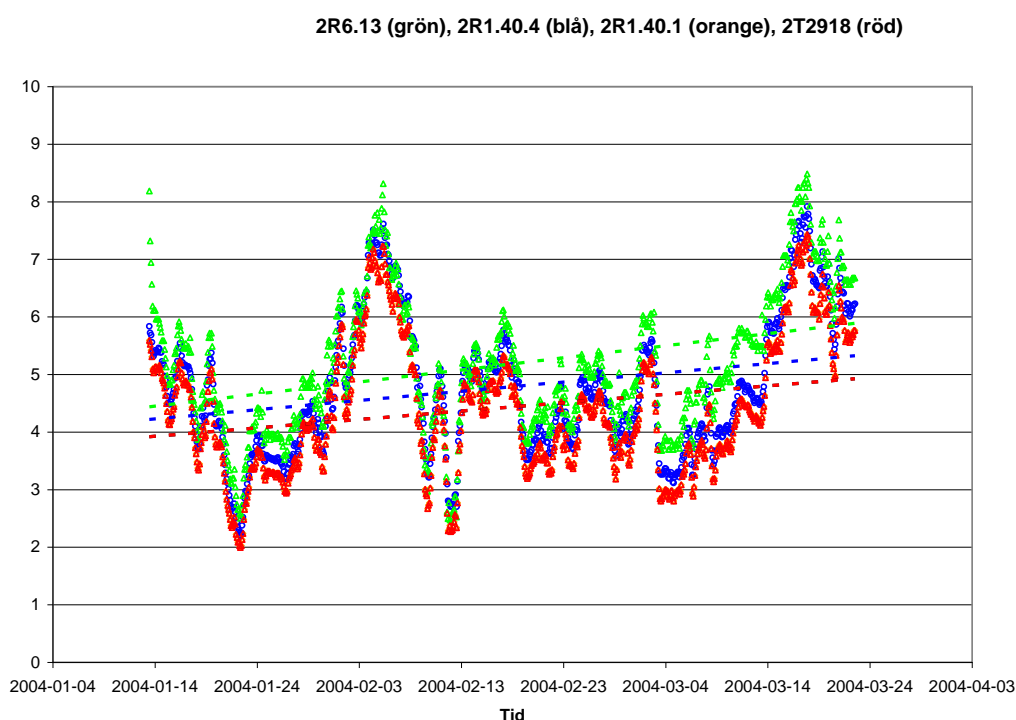


Fig. 5.1.8. Ånghalter på de olika nivåerna, beräknade ur uppmätta T & RF

En liknande kontroll borde göras under andra tider på året för att bekräfta att tekniken är användbar även då. För andra typer av reaktorer kan förhållandena vara annorlunda.

### 5.1.3 Yttertemperaturer i B2

För att kunna beräkna fuktförhållandena inne i betongkonstruktionen krävs att klimatet är känt på själva betongytan. Då fordras bland annat yttertemperaturerna, som bör kunna vara rätt skilda från lufttemperaturen. Dessa finns inte uppmätta, men försök har gjorts att mäta yttertemperaturer ut- och invändigt, på några ställen i B2.

Yttemperaturen på inneslutningen i B2 har mätts med hjälp av IR-termometer i de tre utrymmen där datalagrarna är placerade samt i ytterligare tre utrymmen. Vid val av dessa utrymmen har det eftersträvat så representativa utrymmen så möjligt. Små utrymmen med extremt höga eller låga temperaturer har därför undvikits. Yttemperaturmätningarna utfördes 2004-03-15. Resultaten framgår av Tabell 5.1.1.

Tabell 5.1.1 Yttemperaturer på B2:s inneslutningsvägg i olika rum uppmätta 2004-03-15 med mätinstrument: RAYTEK RAY ST6LXG. Emissionsfaktorn inställd på 0,93 (värdet för "paint" enligt manualen). Mätavstånd c:a 1 m.

Rum	Logger nr.	Mätyta (h*b) meter	Medel-temp.	Max-temp.	Mintemp .	Kommentar
2T2918	...611	-	-	-	-	Utetemp
2R6.56	-	2.5*2.5	36.2	37.4	35.3	
2R6.31	-	1*1	49.5	51.1	49.2	
2R6.13	...312	1*2	47.2	50.2	46.8	
2R1.40.6-190°	-	1*1	36.3	36.7	36.1	
2R5.10	-	1*1	31.3	31.5	30.8	
2R1.40.4-190°	...609	1*1	37.1	37.2	36.8	
2R4.10	-	1*1	30.2	30.3	29.9	
2R3.43	-	1*1	29.1	29.9	28.4	
2R1.47.3-330°	-	1*1	32.0	32.4	31.8	
2R1.40.2-235°	-	1*1	24.6	25.1	24.4	
2R1.47.1-340°	-	1*1	22.4	22.7	22.0	
2R1.40.1-235°	...207	1*1	22.2	22.3	21.6	

I tabell 5.1.2 redovisas temperaturerna under en årscykel 1998 i rum intill utsidan av reaktorinneslutningen i B2. Temperaturerna är relativt stabila under hela året.

Tabell 5.1.2 Temperaturer i B2 i olika rum intill utsidan av reaktorinneslutningen, under åren 1998 och 2003.

Rum	Anlägg	2003	1998								
			0602	0112	0223	0413	0601	0629	0727	0824	1102
2R1.40	B2-547-K529	41	39	40	40	42	43	44	45	37	39
2R4.41	B2-547-K544	34	31	31	32	33	34	35	36	29	31
2R6.13	B2-547-K518	54	51	51	52	52	54	54	55	50	50

Historiken för driftsäsongen 2003-2004 är följande. Full värme från processen har erhållits 20031210-20040201 samt fr.o.m 20040216. Övrig tid har reaktorn varit avställd och därmed kall, dvs ca 20°C. Värdena i tabellen får därför anses vara representativa för driftförhållandena.

### 5.1.4 Beräkningar

Med den enkla modellen som skisserats ovan kan klimatpåverkan historiskt och i framtiden beräknas med hjälp av klimatdata för den aktuella platsen.

$$RF_{yta} = \frac{v_{yta}}{v_m(T_{yta})} = \frac{v_{ute} + \Delta v}{v_m(T_{yta})} \approx \frac{v_{ute}}{v_m(T_{yta})} = \frac{RF_{ute} \cdot v_m(T_{ute})}{v_m(T_{yta})} \quad (5.1.1)$$

Utgångspunkten för Barsebäck kan vara klimatdata från SMHIs väderstation på Sturups flygplats, några mil från Barsebäck. Data från perioden 1973-1990 visas i figur 5.1.8, omräknade till månadsmedelvärden av uteluftens ånghalt  $v_{ute}$ . Ånghalten med ett litet fuktillskott på  $\Delta v = 0.5 \text{ g/m}^3$  visas också. I figuren har mätdata från friskluftintaget enligt ovan för de första tre månaderna under 2004 lagts in som jämförelse.

Med dessa ånghalter som utgångspunkt har sedan relativa fuktigheten beräknats med hjälp av ekvationen ovan för tre olika nivåer på utsidan av inneslutningsväggen. Resultatet visas i figur 5.1.9.

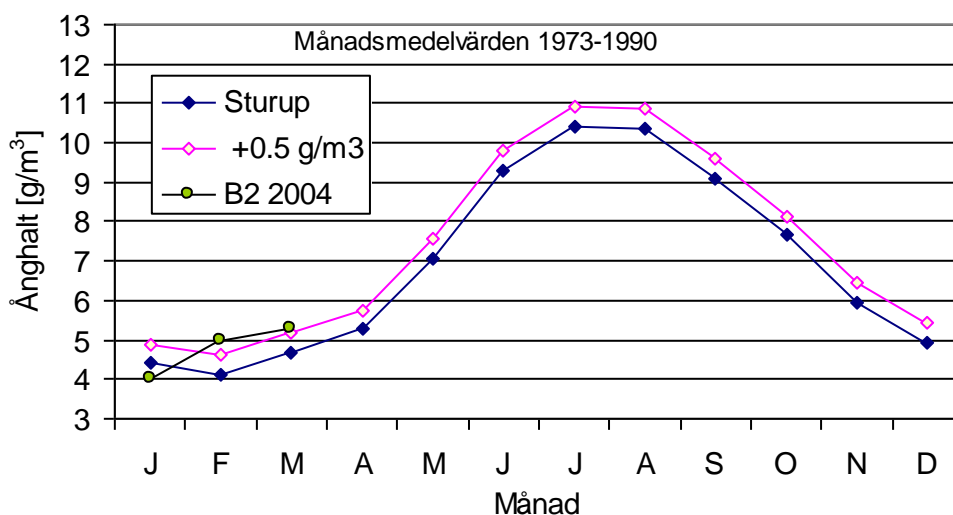


Fig. 5.1.9 Klimatdata för Sturup som månadsmedelvärden 1973-1990, uttryckta i ånghalt v. Mätvärden från Barsebäck för januari-mars 2004 har lagts in som jämförelse.

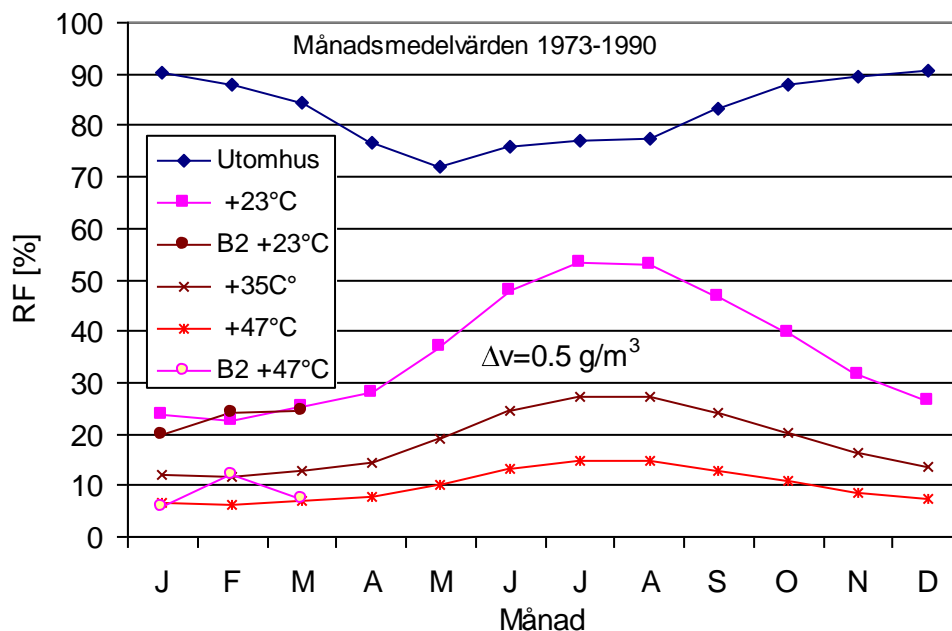


Fig. 5.1.10 Beräknade relativa fuktigheter på den utvändiga ytan av reaktorinneslutningen i B1-B2, med ånghalten i utomhusluften som utgångspunkt. Kurvorna gäller för olika nivåer med olika yttemperaturer.

De beräknade relativa fuktigheterna är naturligtvis starkt kopplade till yttemperaturen. Längst ner varierar RF mellan 30-35 % under vintern till 50-55 % under sommaren. Längst upp, där det är som varmast, blir beräknad RF 5-15 % under årscykeln. Dessa beräknade värden har jämförts med de uppmätta RF-profilerna på olika nivåer i inneslutningsväggen i den jämförbara B1, se figur 5.1.11 och 5.1.12.

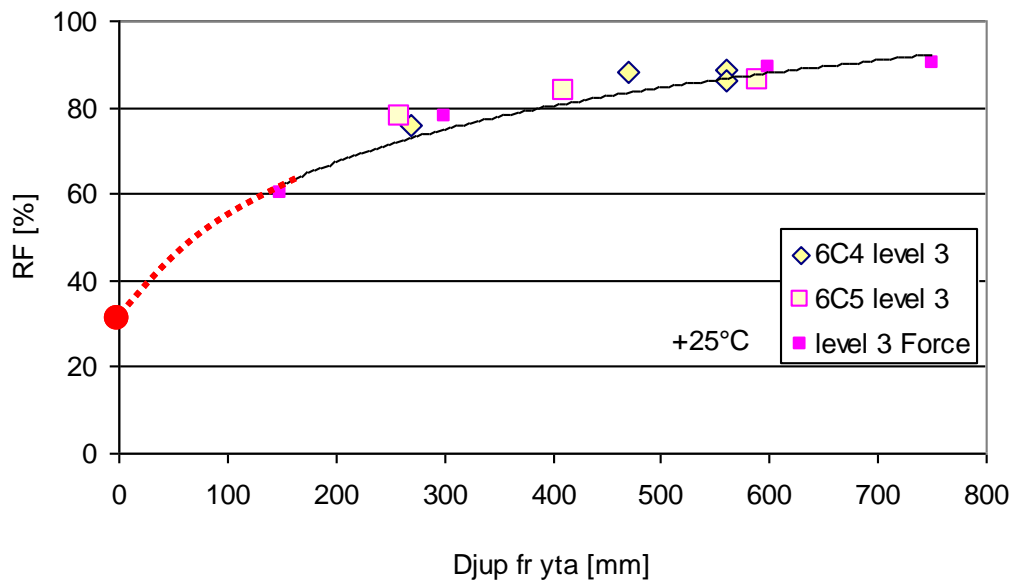


Fig. 5.1.11 Uppmätt RF-profil i inneslutningsväggen till B1 på en nivå där drifttemperaturen är ca +25°C, Nilsson (2004). Den streckade kurvan och punkten på den yttre betongytan har ritats in med utgångspunkt från beräknad RF på ytan enligt modellen ovan.

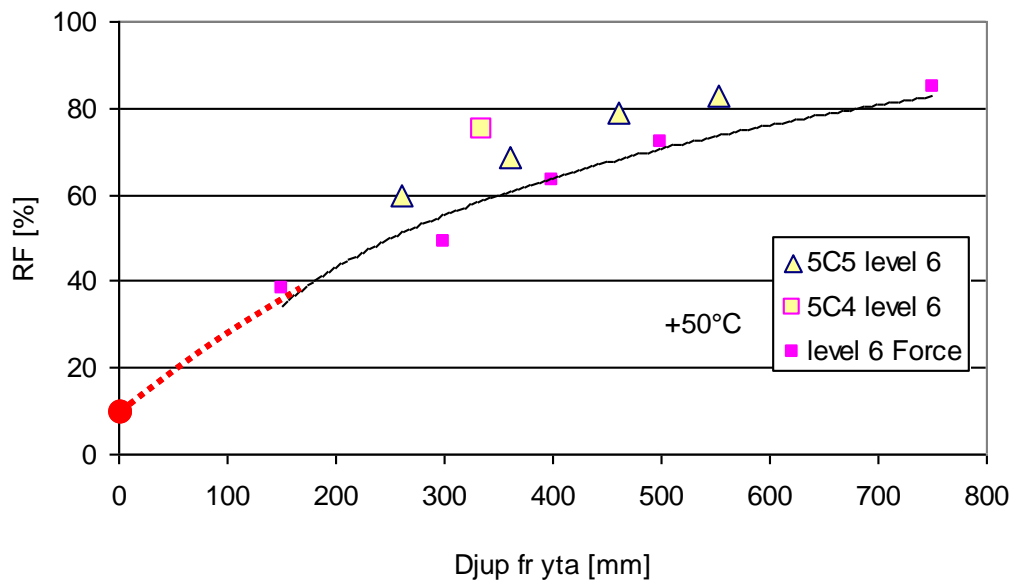


Fig. 5.1.12 Uppmätt RF-profil i inneslutningsväggen till B1 på en nivå där drifttemperaturen är ca +50°C, Nilsson (2004). Den streckade kurvan och punkten på den yttre betongytan har ritats in med utgångspunkt från beräknad RF på ytan enligt modellen ovan.

#### 5.1.4 Konklusioner

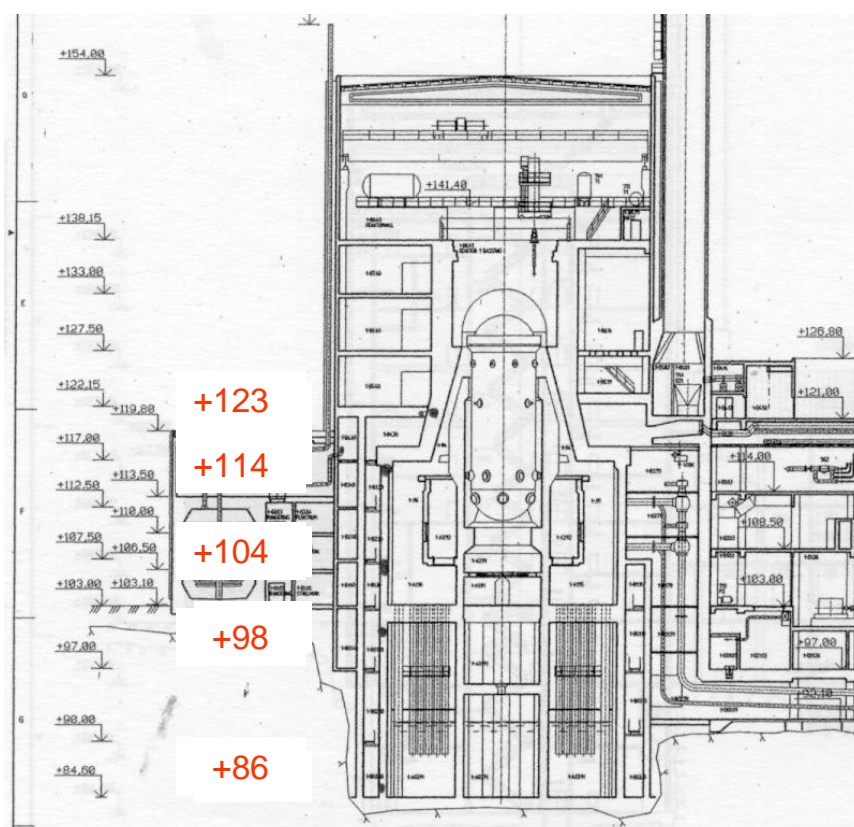
- Det finns omfattande klimatdata tillgängliga från de olika verken, men bara från insidan av inneslutningsväggen.
- Dessa data måste granskas noggrant för att klargöra att de är relevanta för klimatet på betongytorna och inte är störda av lokala värmekällor.
- Temperaturer på utsidan av inneslutningsväggarna, liksom yttemperaturer, kan uppmätas idag och kan göras relevanta för den hittillsvarande brukstiden genom att förhållandena på insidan har loggats under hela perioden och det finns en klar relation mellan dessa.
- Fuktförhållandena på inneslutningsväggarnas utsida, och på betongytan, kan på samma sätt beskrivas genom att genomföra klimatmätningar idag. I B2 är fuktillskottet mycket litet, varför uteklimatmätningar vid tilluftkanaler kan användas för att bestämma ånghalterna. Dessa kan sedan översättas till relativa fuktigheter i andra rum och på ytorna.
- Förhållandena förefaller variera relativt kraftigt, främst i höjdlängd. Temperaturen skiljer mycket, och därmed RF, men det verkar inte vara några större temperaturskillnader över inneslutningsväggen, som ursprungligen misstänktes.
- Istället är det viktigt att klarlägga vilka partier av inneslutningsbetongen som haft höga temperaturer under lång tid och vilka delar som varit betydligt kallare. Detta bör kraftigt påverka vilken uttorkning de redan har fått och kommer att få under resterande livslängd. Detta i sin tur påverkar då bland annat krympningsförloppet och spännkraftförluster.

## 5.2 Klimatpåverkan på BWR-inneslutningen i R1

Liknande mätningar som gjordes under tre månader i Barsebäcks B2 har också gjorts i BWR-inneslutningen till Ringhals R1. Nio loggers för temperatur och relativ fuktighet placerades på utsidan av inneslutningsväggen i olika riktningar och på olika höjder under perioden februari 2006 till april 2007, dvs. under mer än en hel årscykel. En logger placerades ute under tak. Samtliga loggrar kalibrerades före monteringen.

För att kunna kontrollera om avvikelser hos loggrarna ökade eller minskade under perioden för mätningen genomfördes ytterliggare en kalibrering efter avslutad mätperiod. Kalibreringen genomfördes med hjälp av en precisionsfuktkammare av fabrikat "Thunder Scientific Corporation" där den relativa fuktigheten varierades mellan 30-95 % samtidigt som temperaturen varierade mellan 10-30°C för samtliga fuktnivåer.

På insidan monterades loggrar för registrering av T&RF (Testo 175-H2). Yttemperaturen på den utvändiga ytan kontrollerades med termografering några gånger. Givarplaceringen i höjddled framgår av figur 5.2.1 och på respektive nivå i följande avsnitt.

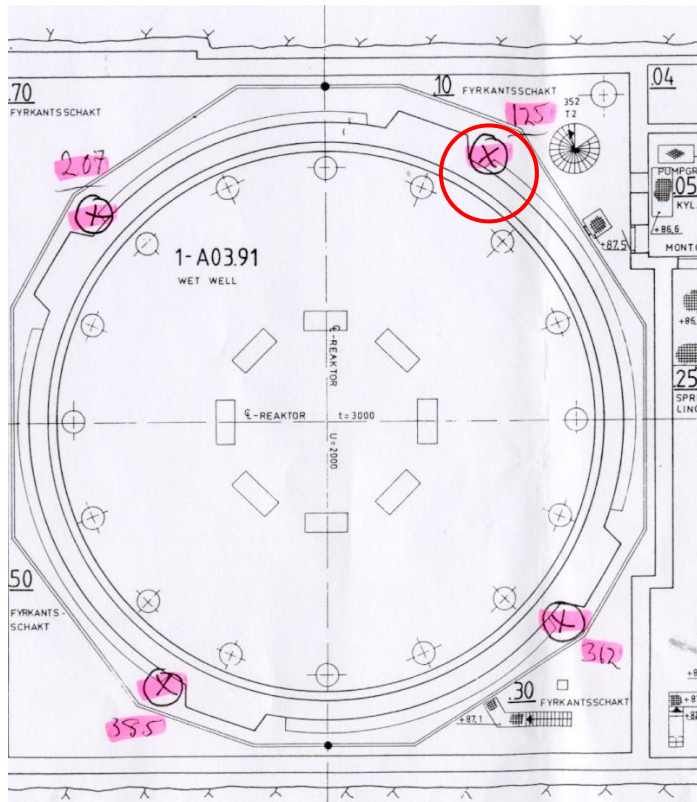


Figur 5.2.1. Nivåer där givarna placerades.

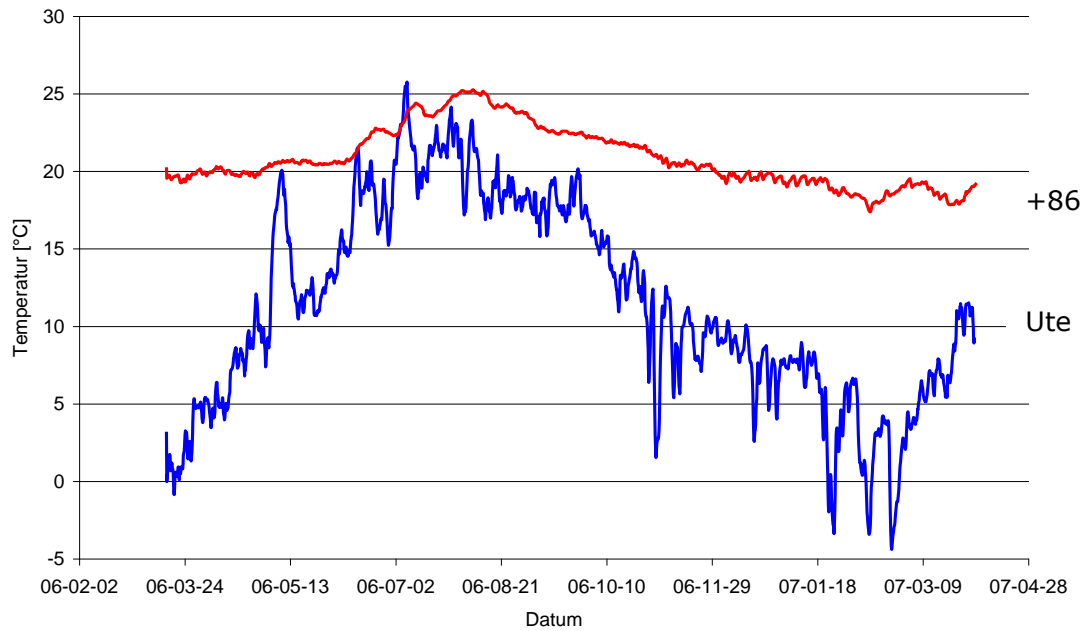
### 5.2.1 Klimatförhållande på reaktorinneslutningens utsida.

#### Nivån +86 m

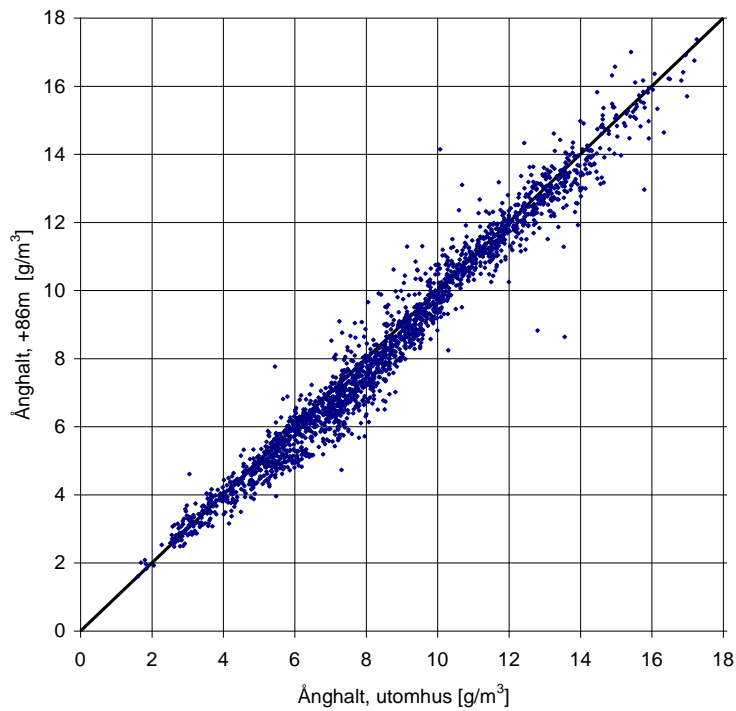
Givarnas placering på nivån +86 m redovisas i figur 5.2.2 nedan. Efter analys av mätresultaten framkom att de fyra givarna visade likvärdiga resultat, varför endast resultat från givare nr. 125 redovisas i figur 5.2.3-5.2.4.



Figur 5.2.2. Placeringen av de 4 givarna på fyrkantschaktets bottenplan (nivån +86 m).



Figur 5.2.3. Resultat från temperaturmätningarna på nivån +86 m (logger nr. 125), jämfört med ute.

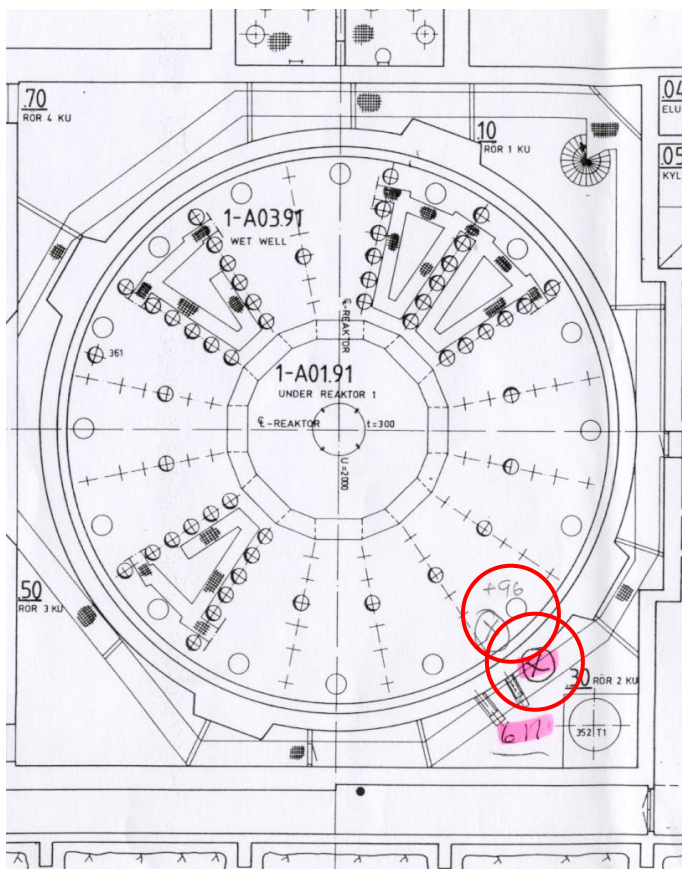


Figur 5.2.4. Resultat av temperatur- och RF-mätningarna på nivån +86 m, omräknade till ånghalt, jämfört med uteluftens ånghalt.

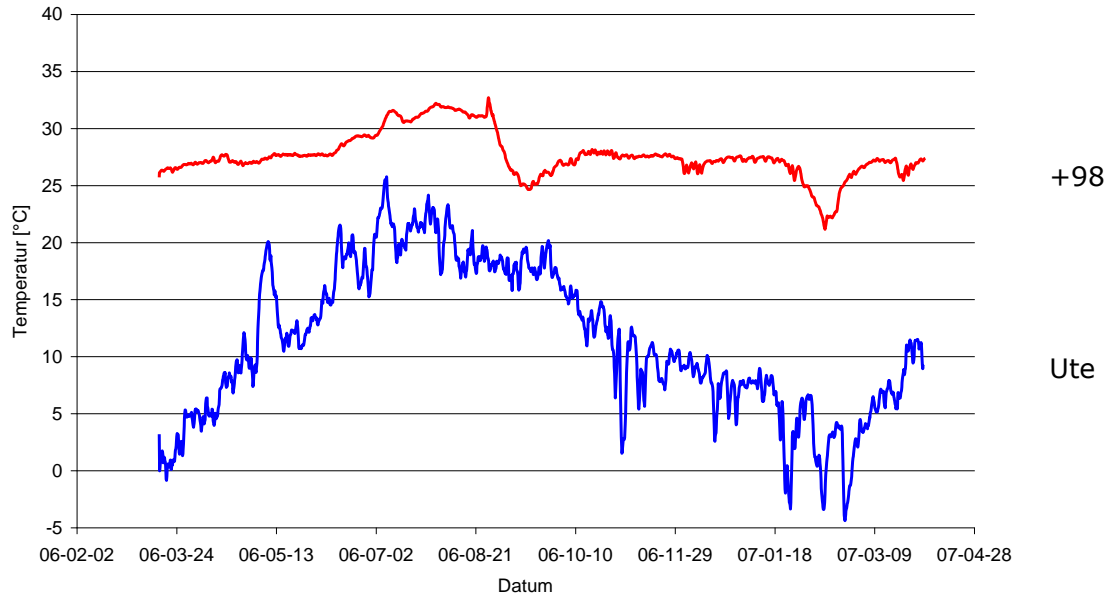
Skillnaden i ånghalt på nivån +86 m och i uteluften är liten, mindre än  $1 \text{ g/m}^3$ .

#### Nivån +98 m

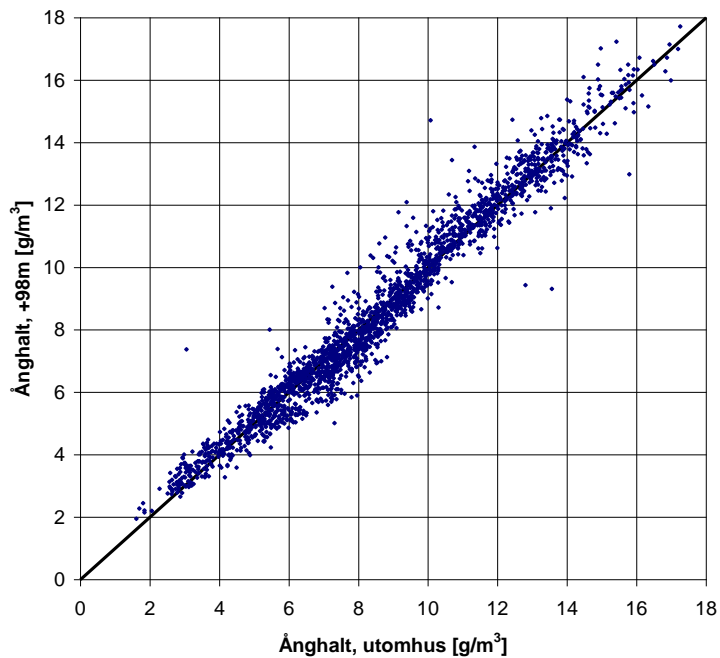
Placeringen av givarna på nivån +98 m framgår av figur 5.2.5. Temperaturen på denna nivå pendlade mellan  $+25$  och  $+30^\circ\text{C}$ , se figur 5.2.6. Ånghalterna beräknade ur uppmätta temperaturer och relativa fuktigheter framgår av figur 5.2.7. Som synes var det även här ungefär samma ånghalt som i uteluften. Skillnaden var mindre än  $1 \text{ g/m}^3$ .



Figur 5.2.5. Placering av givarna, dels på inneslutningsväggs utsida (nivån +98 m) och dels på dess insida (nivån +97 m).



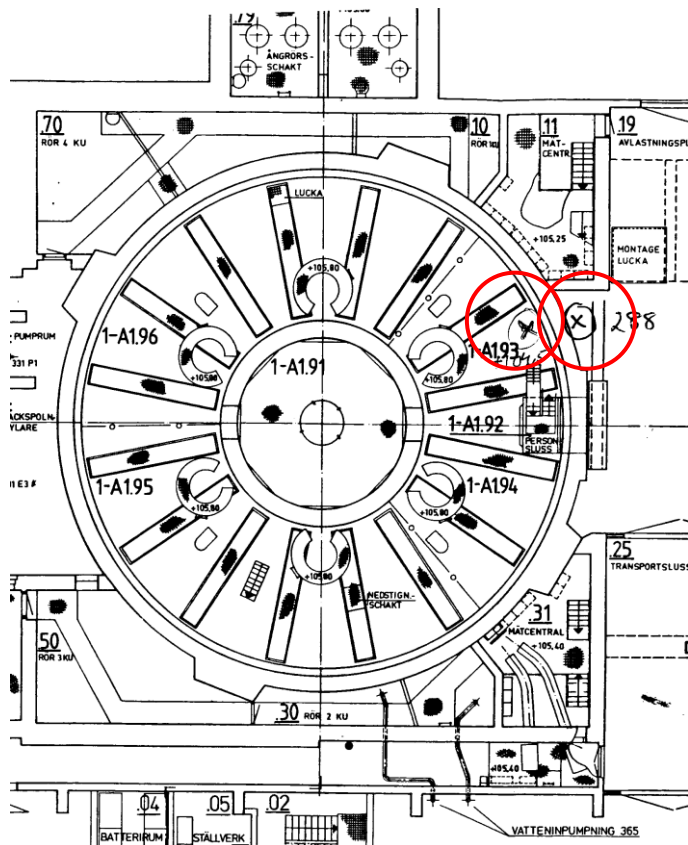
Figur 5.2.6. Resultat av temperaturmätningarna på nivån +98 m, jämfört med ute.



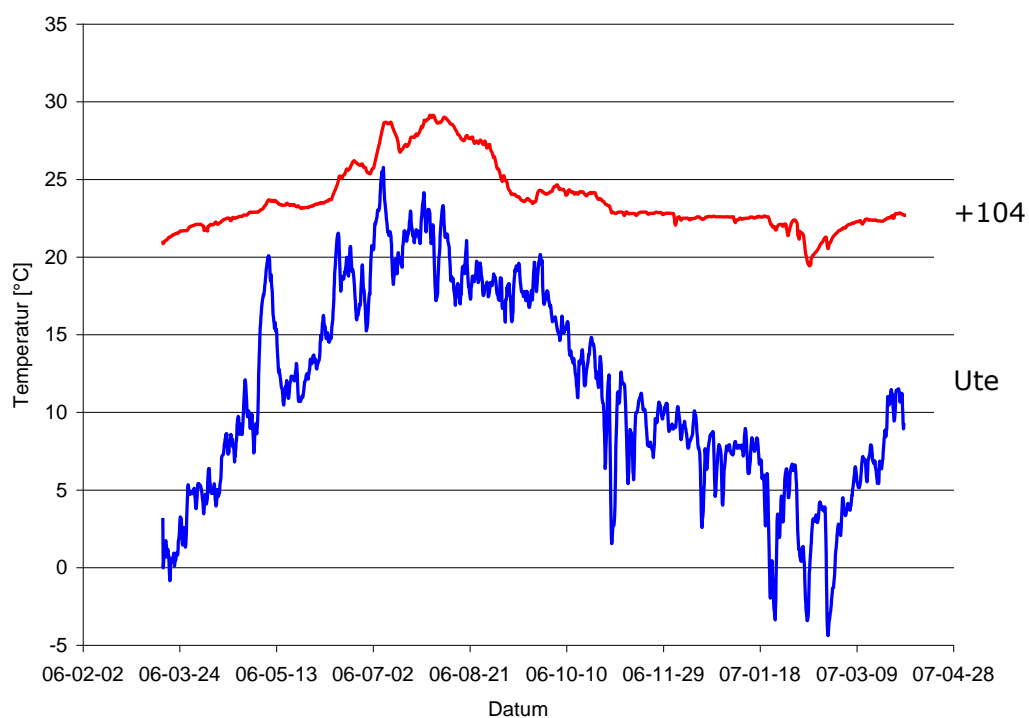
Figur 5.2.7. Resultat av temperatur- och RF-mätningarna på nivån +98 m, omräknade till ånghalt, jämfört med uteluftens ånghalt.

### Nivån +104 m

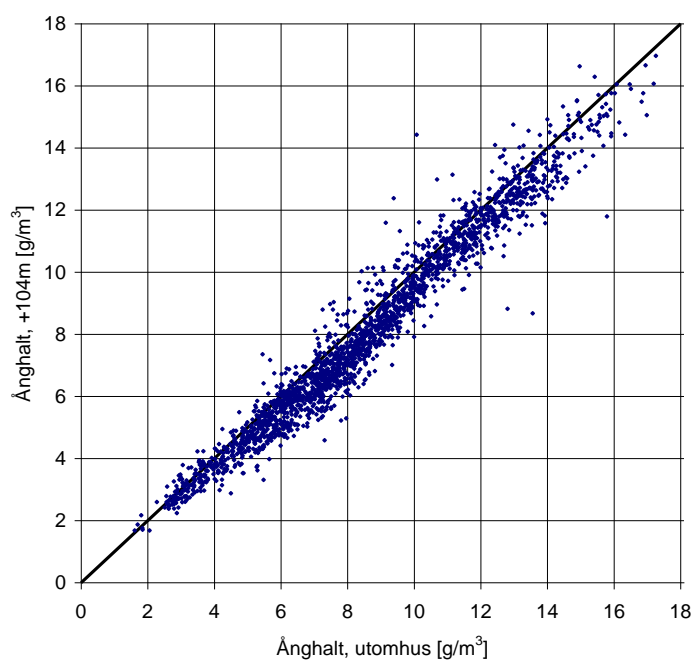
Placeringen av givarna på nivån +104 m framgår av figur 5.2.8. Temperaturen på denna nivå pendlade mellan +20 och +30C, se figur 5.2.9. Ånghalterna beräknade ur uppmätta temperaturer och relativa fuktigheter framgår av figur 5.2.10. Som synes var det även här ungefär samma ånghalt som i uteluften. Skillnaden var upp till ca 1 g/m<sup>3</sup>, med lägre ånghalt vid inneslutningsväggens yta än ute.



Figur 5.2.8. Placering av givarna på nivån +104 m, dels på utsidan och dels på insidan.



Figur 5.2.9. Resultat av temperaturmätningarna på nivån +104 m, jämfört med ute

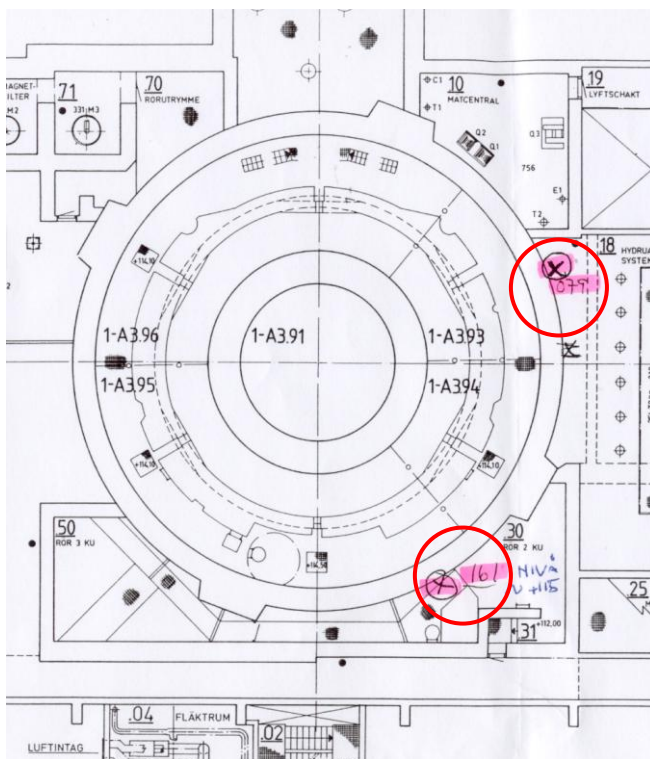


Figur 5.2.10. Resultat av temperatur- och RF-mätningarna på nivån +104 m, omräknade till ånghalt, jämfört med uteluftens ånghalt.

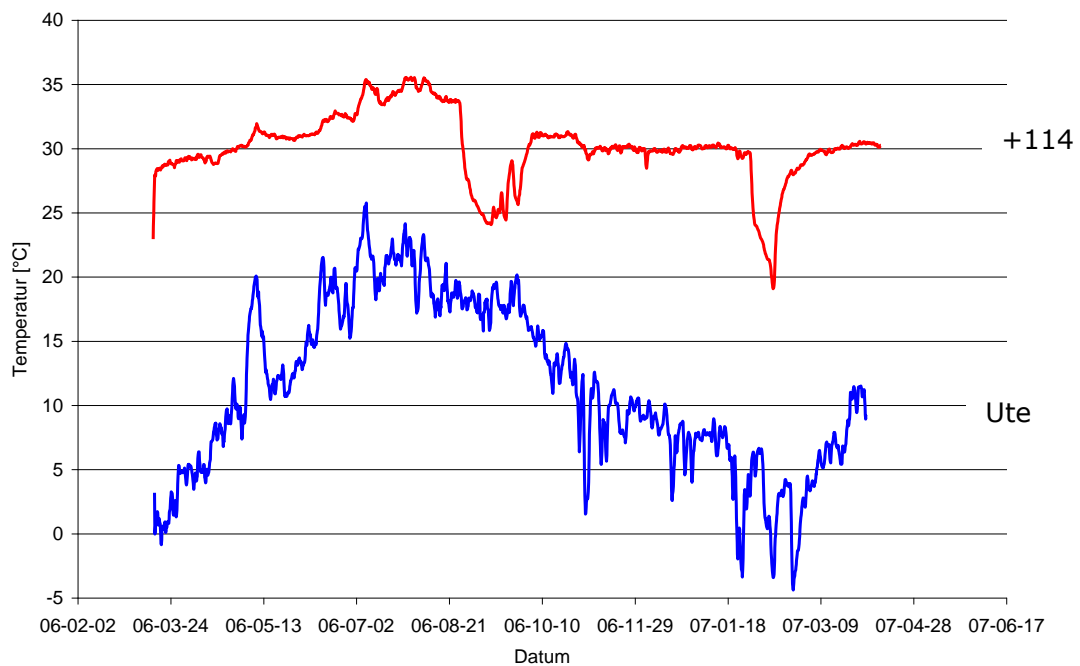
### Nivån +114 m

Placeringen av givarna på nivån +114 m framgår av figur 5.2.11. Temperaturen på denna nivå, i den ena punkten (079), pendlade mellan +20 och +35C, se figur 5.2.12. Ånghalterna beräknade ur uppmätta temperaturer och relativa fuktigheter framgår av figur 5.2.13. Som synes var det även här ungefär samma ånghalt som i uteluften. Skillnaden var upp till ca 1-1.5 g/m<sup>3</sup>, med lägre ånghalt vid inneslutningsväggs yta än ute.

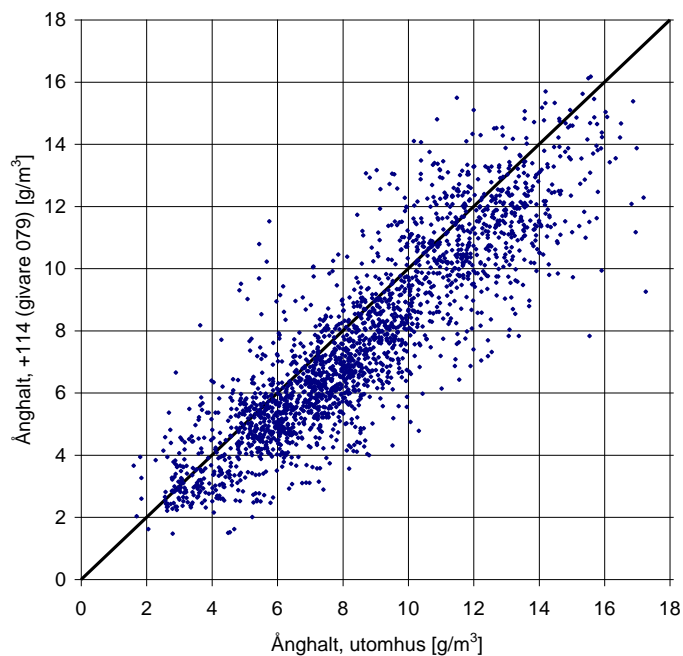
I den andra punkten (161) på nivån +114 mm var temperaturen periodvis under sommaren mycket högre, upp till +55C. Här var också ånghalten högre än i uteluften, upp till 3 g/m<sup>3</sup> högre, inte bara under perioden med hög temperatur.



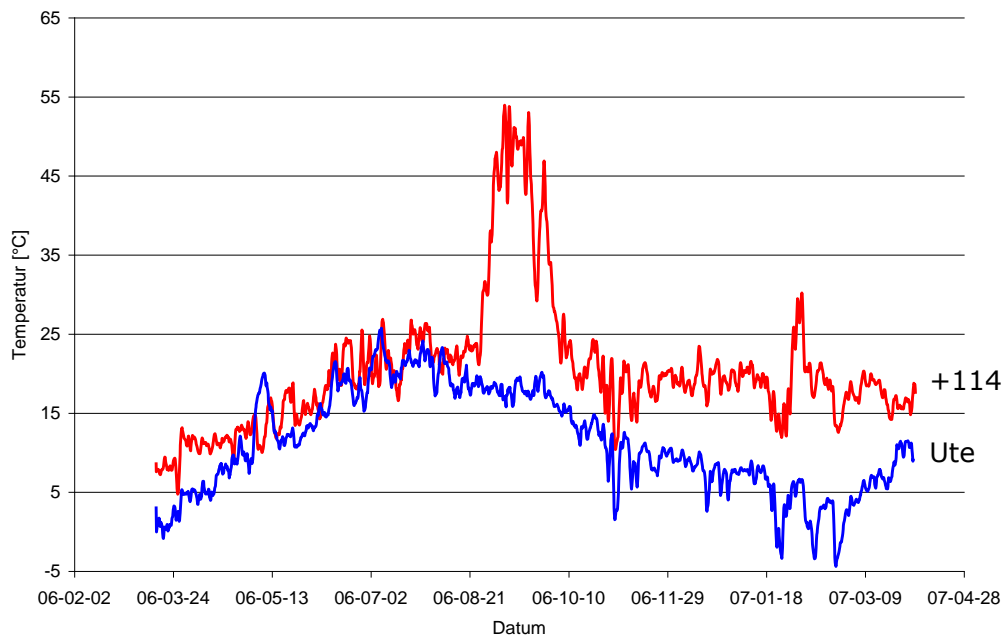
Figur 5.2.11. Placering av givarna på nivån +114 m, dels på utsidan och dels på insidan.



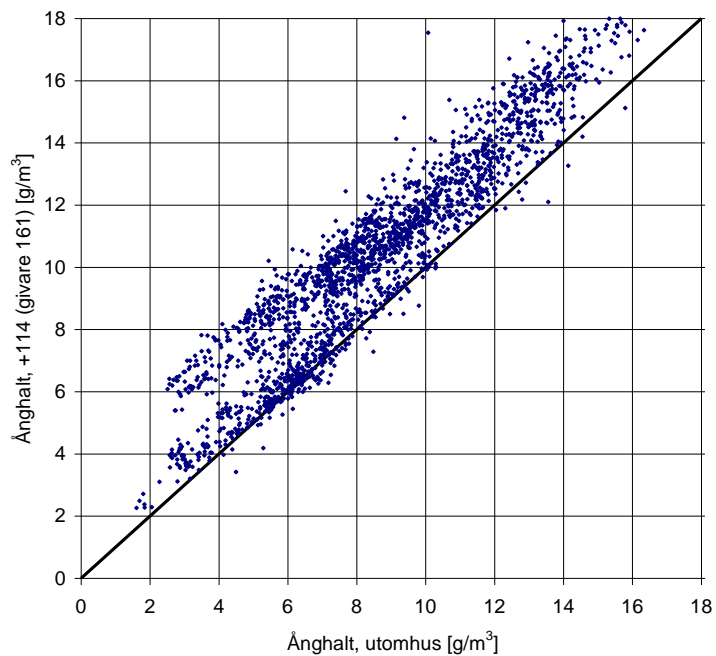
Figur 5.2.12. Resultat av temperaturmätningarna på nivån +114 m, i punkt 079, jämfört med ute.



Figur 5.2.13. Resultat av temperatur- och RF-mätningarna på nivån +114 m, i punkt 079, omräknade till ånghalt, jämfört med uteluftens ånghalt.



Figur 5.2.14. Resultat av temperaturmätningarna på nivån +114 m, i punkt 161, jämfört med ute

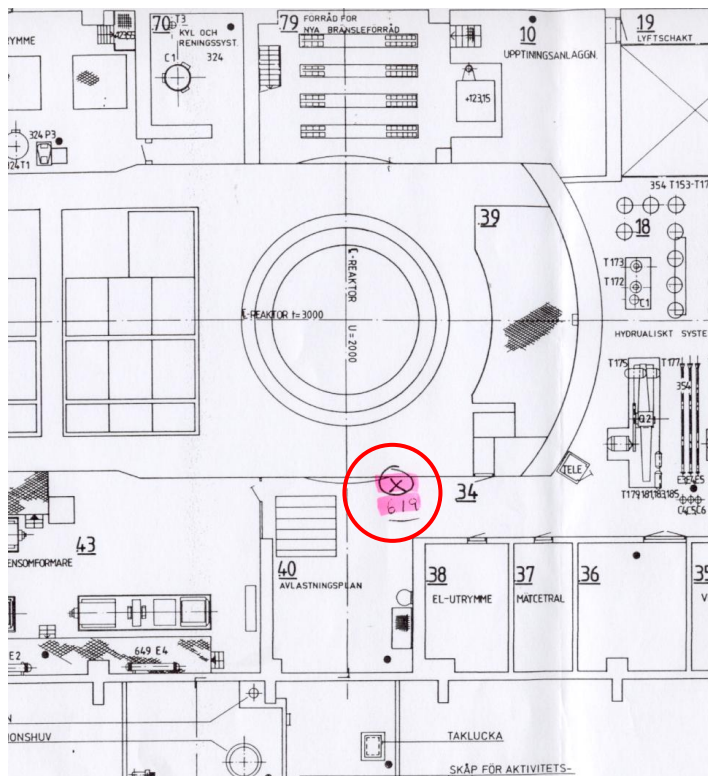


Figur 5.2.15. Resultat av temperatur- och RF-mätningarna på nivån +114 m, i punkt 161, omräknade till ånghalt, jämfört med uteluftens ånghalt.

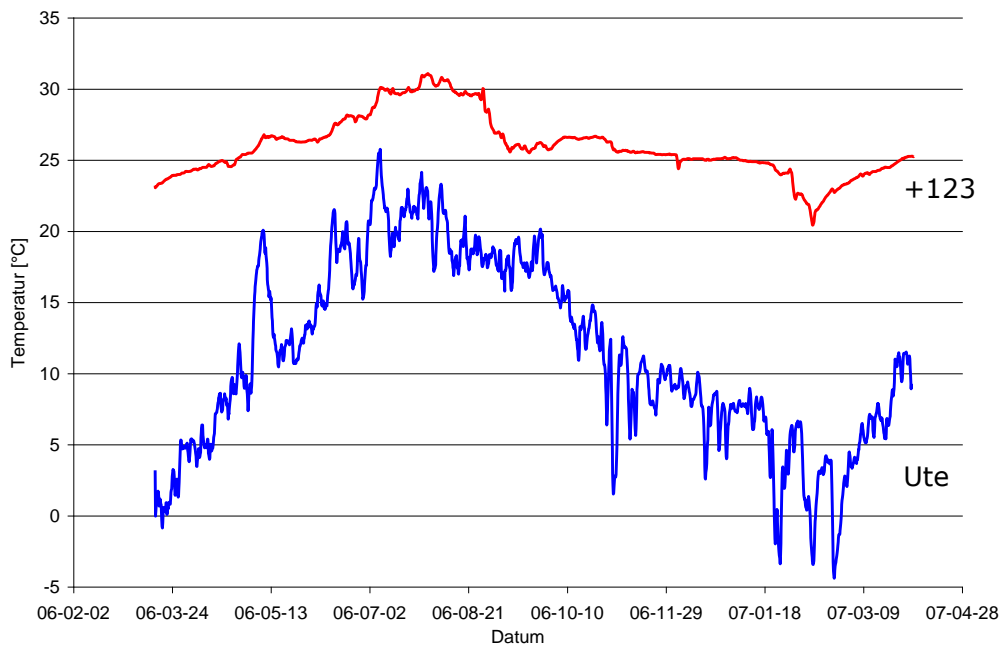
### Nivån +123 m

Placeringen av givarna på nivån +123 m framgår av figur 5.2.16. Temperaturen på denna nivå, punkt 619, pendlade mellan +25 och +30C, se figur 5.2.17, med temperatur ner mot +20C under en kort period.

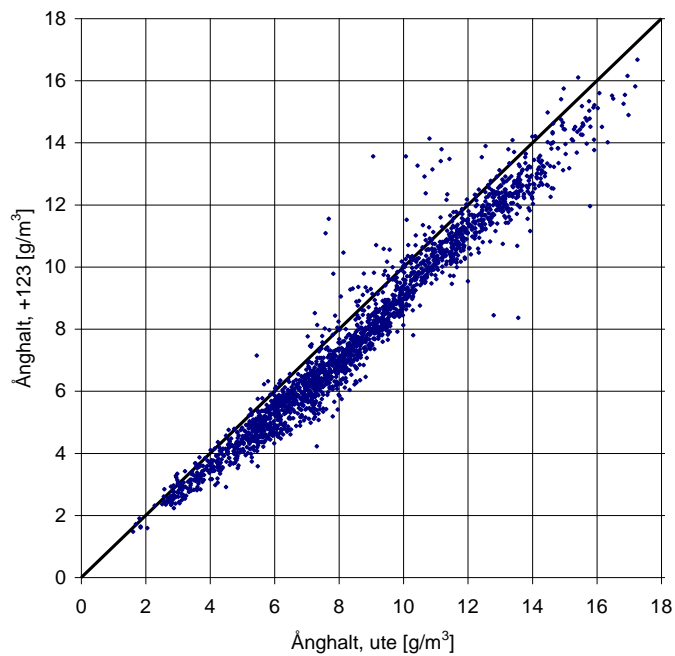
Ånghalterna beräknade ur uppmätta temperaturer och relativa fuktigheter framgår av figur 5.2.18. Som synes var det även här ungefär samma ånghalt som i uteluften. Skillnaden var upp till ca 1 g/m<sup>3</sup>, med lägre ånghalt vid inneslutningsväggens yta än ute.



Figur 5.2.16. Placering av givarna på nivån +123 m på utsidan av inneslutningsväggen



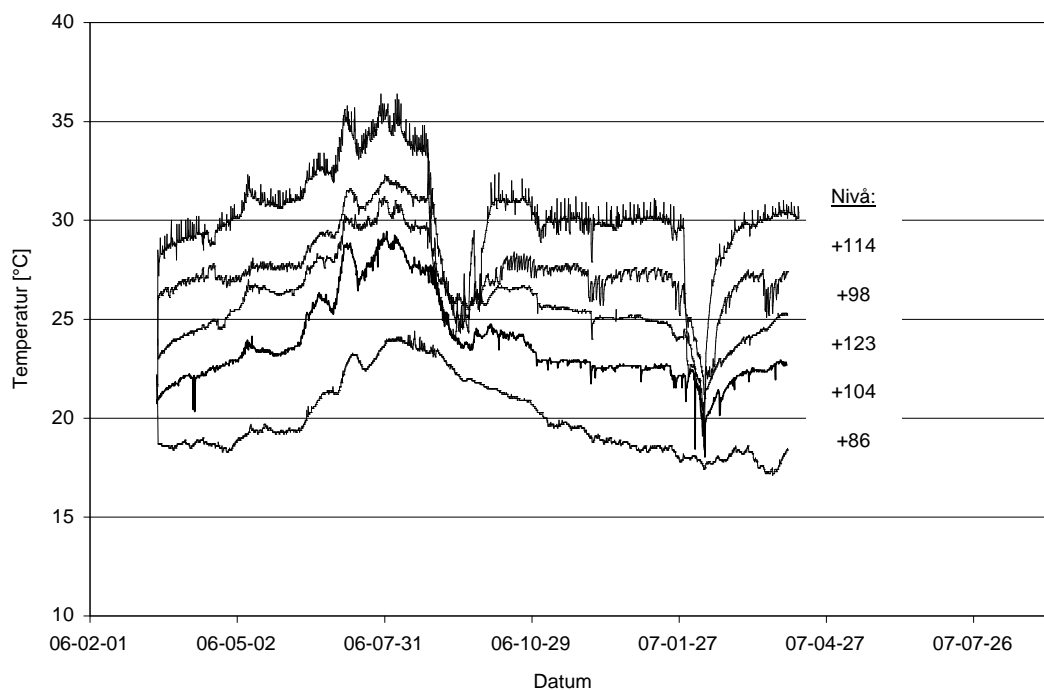
Figur 5.2.17. Resultat av temperaturmätningarna på nivån +123 m, jämfört med ute



Figur 5.2.18. Resultat av temperatur- och RF-mätningarna på nivån +123 m, omräknade till ånghalt, jämfört med uteluftens ånghalt.

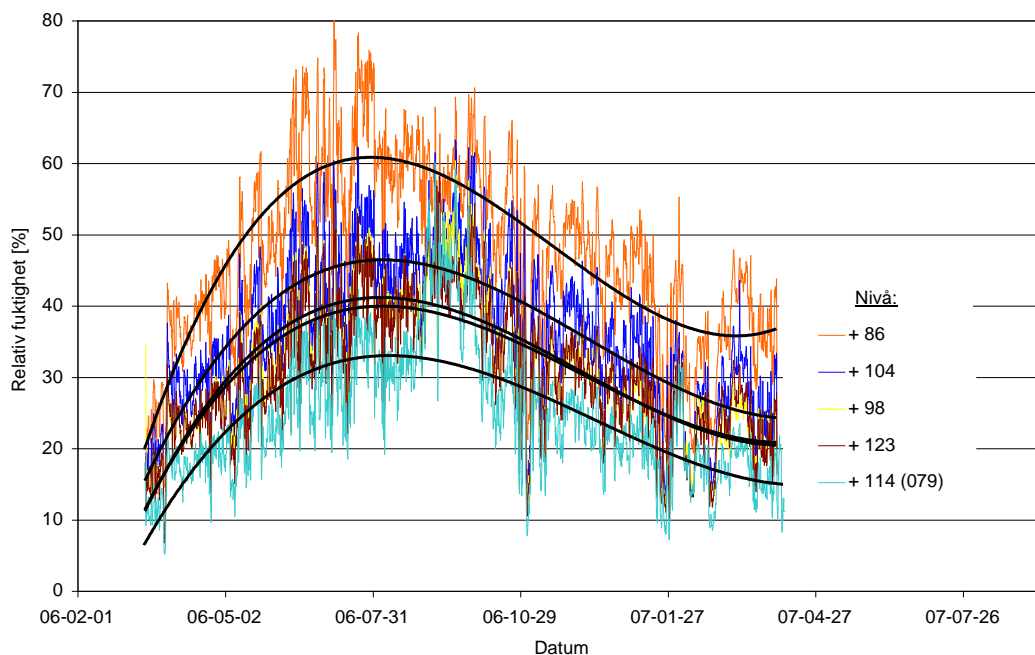
### 5.2.2 Jämförelse av olika nivåer

I figur 5.2.19 jämförs temperaturen på alla nivåer och uteluftens temperatur. Reaktorn har varit tillfälligt avstängd under två perioder under den aktuella årscykeln.



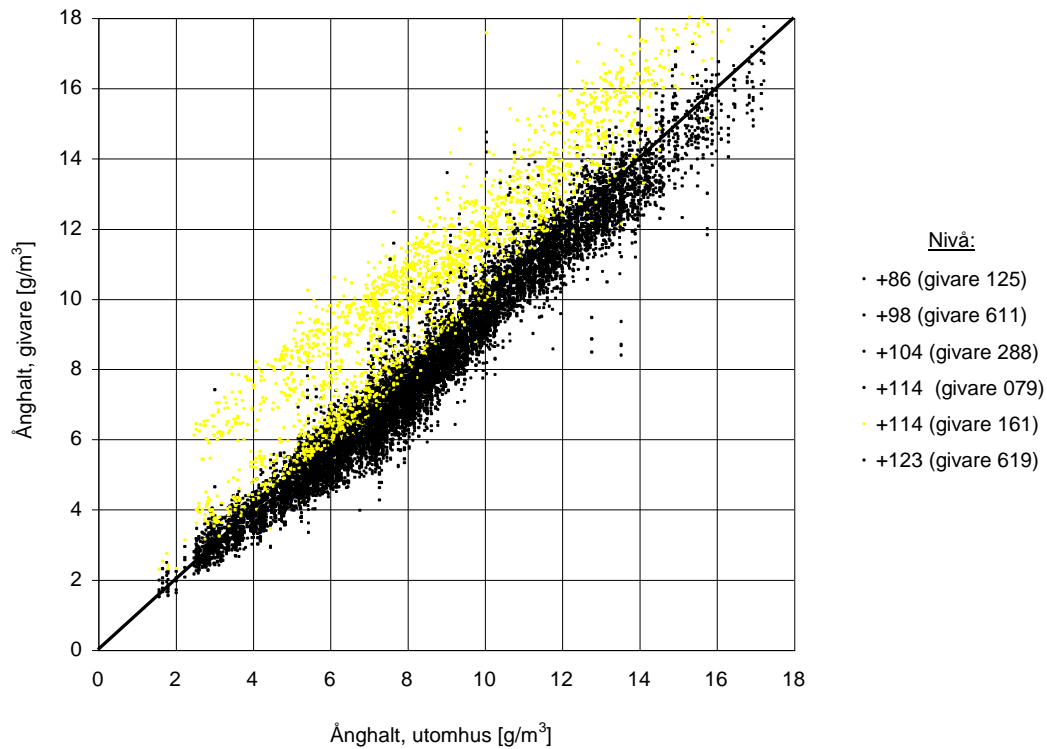
Figur 5.2.19. En jämförelse av temperaturen på de olika nivåerna.

Den relativa fuktigheten vid inneslutningens utsida visade stora variationer med hänsyn till både årstid och orientering, se figur 5.2.20. Under mätperioden på träffades generellt låga relativa fuktigheter och på nivån +114 varierade denna mellan 15 och 30 %. De resterande fyra mätpunkterna uppvisade liknande resultat, där motsvarande RF var 20-40 % vid temperaturen 25-28°C (+98, +123) och 40-60 % vid 20°C (+86).



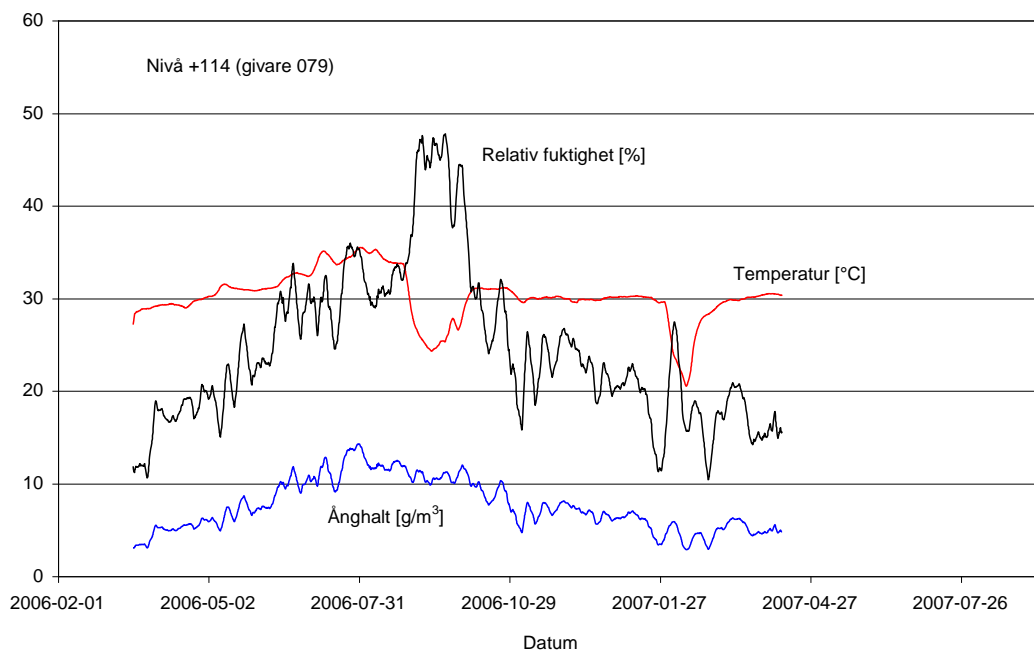
Figur 5.2.20. En jämförelse av RF på de olika nivåerna.

Ånghalten i de olika mätpunkterna har beräknats utifrån uppmätta temperaturer och relativa fuktigheter. I figur 5.2.21 redovisas dessa ånghalter för respektive nivå som funktion av ånghalten i utomhusluften. Resultaten visar att ånghalten i samtliga punkter, utom på nivån +114 (givare 079), följer ånghalten i utomhusluften med en avvikelse som är mindre än  $1\text{g/m}^3$ . I mätpunkten på nivån +114 (givare 079) registrerades ett ungefärligt fukttillskott av  $2\text{g/m}^3$ .



Figur 5.2.21. Ånghalterna på de olika nivåerna.

Resultaten i figur 5.2.22 visar exempel på hur ånghalten varierar som funktion av temperatur och relativ fuktighet på nivån +114 (givare 079). Under mätperioden stoppades reaktorn, med följd att den relativa fuktigheten på nivån +114 (givare 079) ökade till mellan 40-50 % då temperaturen föll till mellan 22-23°C. Ånghalten förblev oförändrad i förhållande till utomhusånghalten trots förändringen i temperatur och relativ fuktighet.



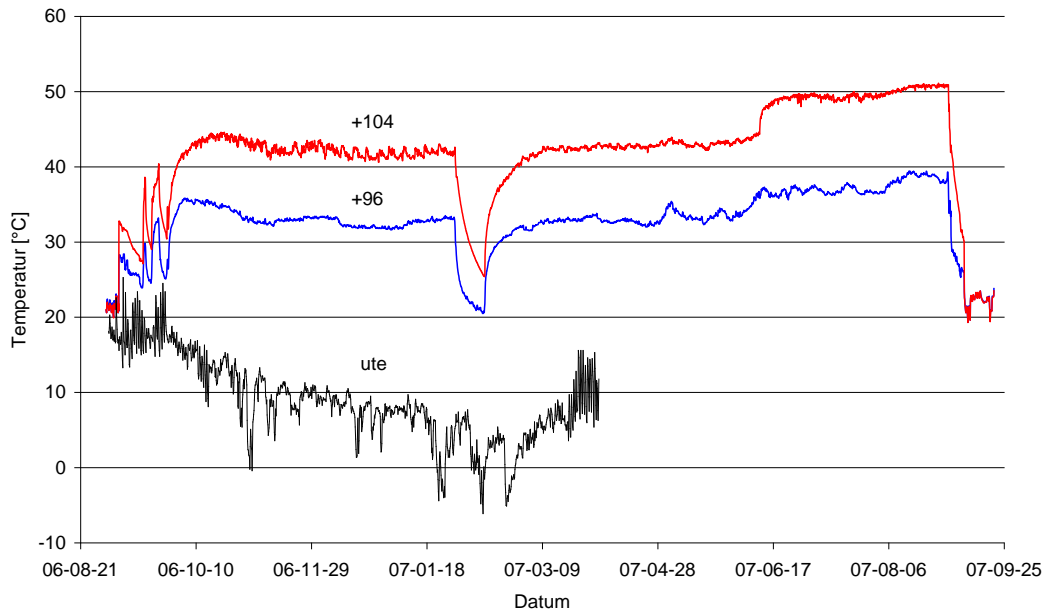
Figur 5.2.22. Relativ fuktighet och temperatur samt beräknad ånghalt på nivån +114 (givare 079).

### 5.2.3 Klimatförhållande på reaktorinneslutningens insida

Temperatur och relativ fuktighet har loggats i två punkter på reaktorinneslutningen, dels i "wet-well" på nivån +96 och dels i "dry-well" på nivån +104. Placeringen av givarna visas i figurerna 5.2.5 samt 5.2.8. Resultat från temperaturmätningen i de båda punkterna redovisas i figur 5.2.23. På nivån +96 registrerades temperaturer mellan 30-35°C och under en kortare del av mätperioden registrerades temperaturer mellan 35-40°C.

I mätpunkten som var placerad på nivån +104 registrerades generellt en högre temperatur som under större delen av mätperioden varierade mellan 40-45°C. Under en kortare del av mätperioden uppgick temperaturen till cirka 50°C. Omkring månadsskiftet januari-februari sjönk temperaturen i de båda mätpunkterna vilket indikerar att reaktorn tagit ur drift.

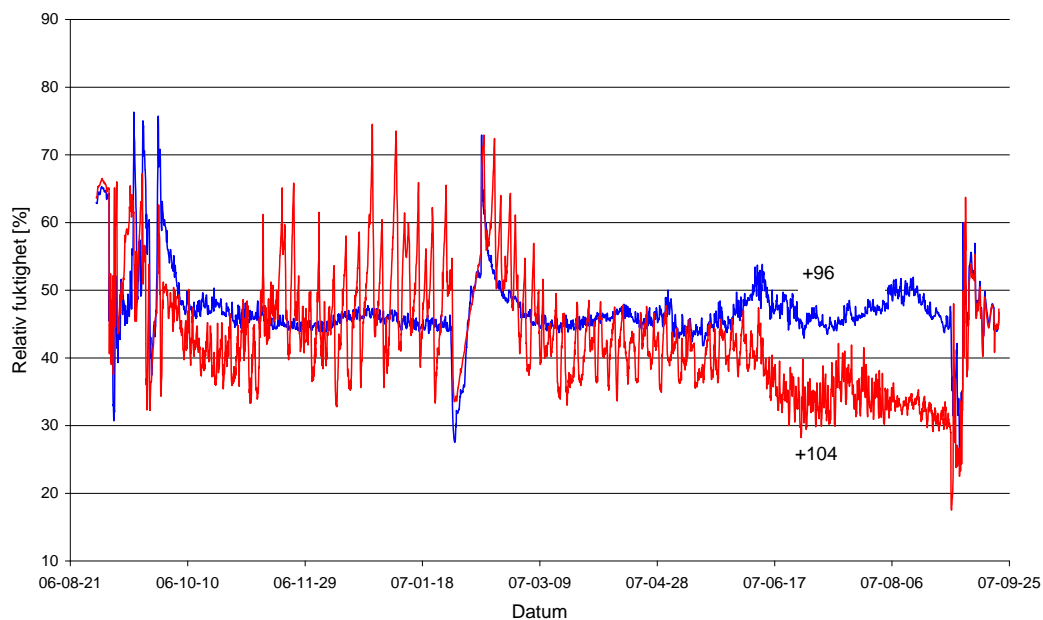
Enligt temperaturmätningarna i övervakningssystemet är temperaturen 50-60°C längst upp i inneslutningen och 20-35°C vid marknivå.



Figur 5.2.23. Resultat av temperaturmätningarna på nivåerna +96 m och +104 jämfört med utomhustemperatur.

Resultat från mätningarna av relativ fuktighet i de båda punkterna redovisas i figur 5.2.24. På nivån +96 registrerades relativa fuktigheter i intervallet 40-50 % under större delen av mätperioden.

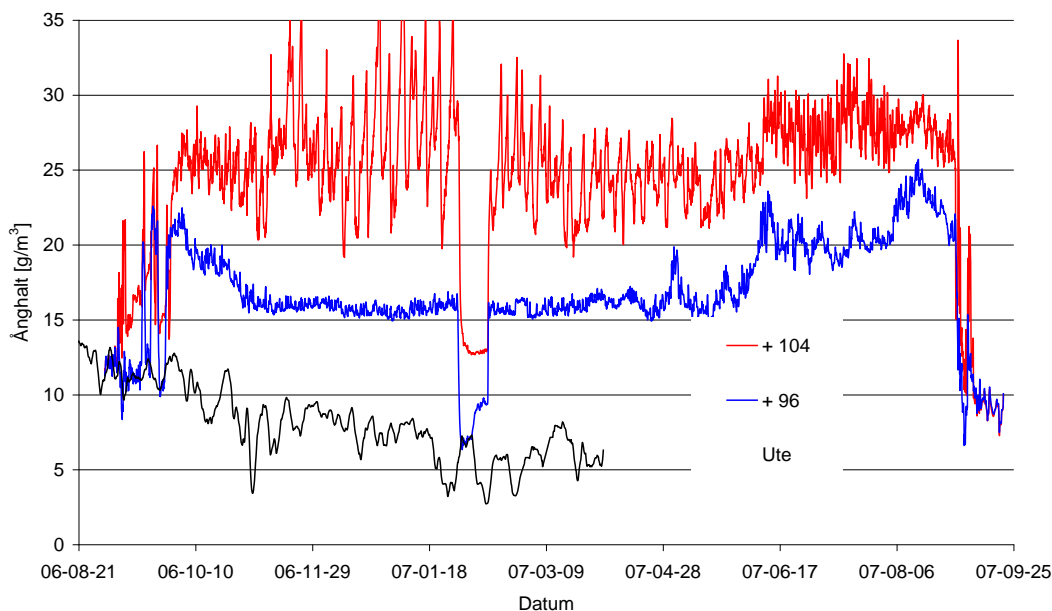
I mätpunkten som var placerad på nivån +104 registrerades stora variationer hos den relativa fuktigheten. Uppskattningsvis var medelvärdet av den relativa fuktigheten likvärdigt med den för mätpunkten på nivån +96. En förklaring till de stora variationerna i relativ fuktighet kan vara att temperaturen uppvisade stora variationer under mätperioden.



Figur 5.2.24. Resultat från mätning av relativ fuktighet på nivåerna +96 m och +104.

Resultat från mätningarna av temperatur och relativ fuktighet, omräknade till ånghalt, redovisas i figur 5.2.25 tillsammans med utomhusluftens ånghalt. På nivån +96 registrerades ånghalter mellan 15-20 g/m<sup>3</sup> under större delen av mätperioden och på nivån +104 mellan 20-30 g/m<sup>3</sup>.

Utomhusluftens ånghalt varierade mellan 5-15 g/m<sup>3</sup> under mätperioden, vilket visar att det finns ett betydande fuktillskott i reaktorinneslutningen.



Figur 5.2.25. Resultat av temperatur- och RF-mätningarna på nivåerna +96 m och +104, omräknade till ånghalt, jämfört med uteluftens ånghalt.

#### 5.2.4 Konklusion

Mätningarna visar att den föreslagna modellen för beräkning av fukttillståndet på inneslutningsväggens utsida fungerar relativt väl, med något undantag.

$$RF_{yta} = \frac{v_{ute}}{v_m(T_{yta})} \quad (5.2.1)$$

Här har den prövats under mer än en hel årscykel och den stämmer bra, särskilt i början av perioden. Det ser faktiskt ut som om ånghalten vid inneslutningsväggen successivt blir något lägre än i uteluften i slutet av perioden, dvs. under vintern. Detta har inte kunnat förklaras.

En mätpunkt utgör ett undantag. Den ena punkten på nivån +114 har en högre ånghalt än i uteluften, upp till ca 3 g/m<sup>3</sup> i slutet av mätperioden. Den är något högre ända från början och ökar sedan successivt under hela perioden. Här finns en lokal fuktkälla av något slag.

Mätresultaten från reaktorinneslutningens utsida enligt avsnitt 5.2.2 bekräftar slutsatserna i en tidigare studie [4]. Den tidigare studien genomfördes också på en BWR-reaktor där inneslutningens utsida var omgiven med uppvärmda och väl ventilerade lokaler med ett fukttillskott på mindre än 1 g/m<sup>3</sup>. En huvudsaklig skillnad mellan de båda studierna var att högre temperaturer påträffades på den övre delen av reaktorinneslutningens utsida i den tidigare studien.

Resultatet av mätningarna på reaktorinneslutningens insida visar att det finns ett tydligt fukttillskott i såväl "wet-well" som i "dry-well". Uppskattningsvis var fukttillskottet i "wet-well" cirka 5-10 g/m<sup>3</sup> och i "dry-well" ännu något högre. Tänkbara förklaringar är, enligt Jan Gustavsson, att fukttillskottet i "wet-well" (sekundärutrymmet) sannolikt härrör från den fria vattenytan i kondensationsbassängen medan det i "dry-well" (primärutrymmet) härrör från interna läckage samt uttorkning av betongkonstruktioner som fortfarande pågår.

### 5.3 Klimatpåverkan på PWR-inneslutningen i R3

Inneslutningsväggen till en PWR utsätts för en helt annan klimatpåverkan än i en BWR-inneslutning (BWR = Boiling Water Reactor, PWR = Pressurized Water Reactor). Här finns ingen byggnad som omger hela inneslutningen som på en BWR. Utsidan är därför exponerad för uteklimat, dvs låga respektive höga temperaturer under vinter respektive sommar samt nederbörd. Detta bör innebära att det blir kraftiga temperaturgradienter genom inneslutningsväggen och att den utvändiga betongytan är något varmare än luften.

Tre loggers (Mitec SatelLite) kopplade till T & RF-givare (Vaisala HMP44) placerades på utsidan av reaktorinneslutningsväggen, i 30 mm djupa hål, i två riktningar och höjder under april 2006 till april 2007. På grund av fel på mätutrustningen redovisas endast mätresultat från två av dessa mätpunkter. Dessutom placerades två loggers för T & RF (Testo 175-H2) på utsidan av inneslutningsväggen dels inne i turbinhall och dels i bergschaktet, under perioden mars 2006 till mars 2007. Utomhusklimatet loggades med en logger för T & RF (Testo 175-H2) som monterades väderskyddat på utsidan av R1s reaktorbyggnad.

Yttemperaturerna på reaktorinneslutningens utsida kontrollerades med termografering några gånger. 17/2 2007 var yttemperaturen maximalt 3°C högre än lufttemperaturen på marknivå. Inga "hotspots" kunde upptäckas.

På reaktorinneslutningsväggens insida placerades tre loggers för T & RF (Testo 175-H2) under perioden juni 2006 till maj 2007. Loggrarna placerades på tre olika nivåer där dessa valdes för att så väl som möjligt överrensstämma med nivån hos mätpunkter på inneslutningsväggens insida.

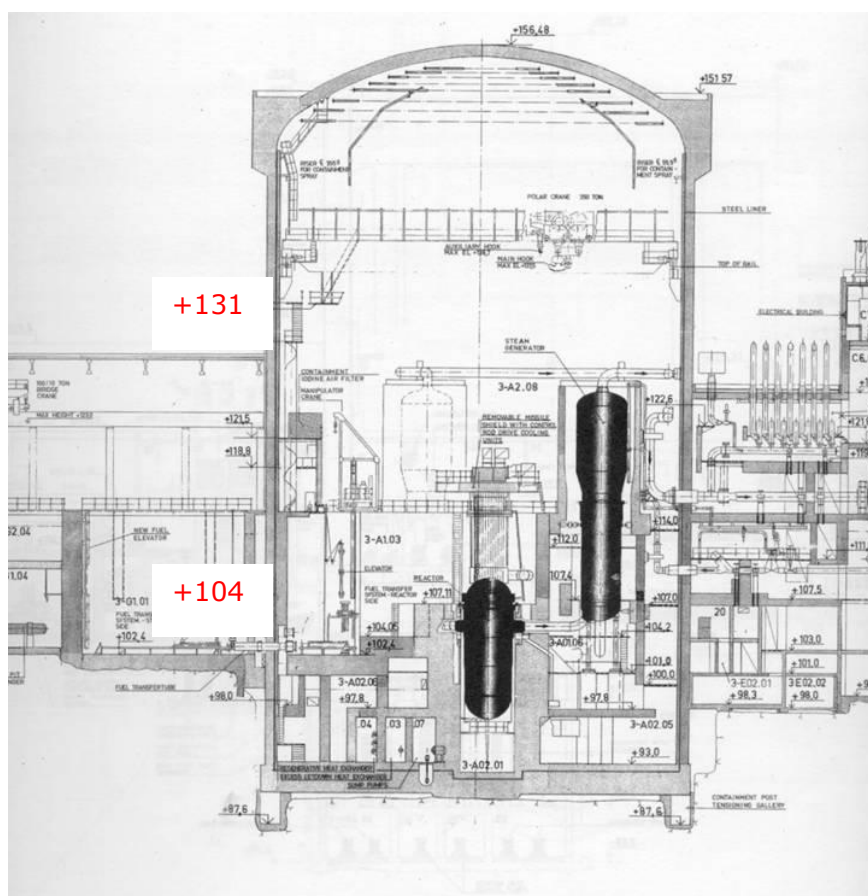
#### 5.3.1 Klimatförhållande på reaktorinneslutningen utsida (del som är exponerad för utomhusklimat)

Klimatförhållande på utsidan av R1 kartlades genom loggning av temperatur och relativ fuktighet i luften utanför reaktorinneslutningen med loggar monterade på inneslutningen (se avsnitt 5.2.1). Eftersom den del av R3s utsida som exponeras för utomhusklimat, därmed också exponerades för regn, kunde mätningen av klimatförhållande på reaktorinneslutningens utsida inte genomföras enligt samma princip som på R1.

Här monterades istället givare för mätning av temperatur och relativ fuktighet i borrhål på 30 mm djup i reaktorinneslutningsväggen, se figur 5.3.4. För att mätningen skulle registrera relativa fuktigheten på det angivna djupet 30 mm, monterades först ett plaströr i borrhålet. Tätning mellan borrhålet och

plaströrets mantel säkerställdes med hjälp av tätningsmassa. RF- och temperaturgivaren monterades därefter i plaströret, där försegling skedde dels med en gummikork och dels med polymerbaserad fogmassa. En del av plaströret exponerades för utomhusklimat, se figur 5.3.3. För att undvika onödig uppvärmning eller avkylning av detta monterades isolering avsedd för rör efter en viss tid av mätperioden. För att kunna kontrollera om det uppträdde en temperaturskillnad mellan RF/temperatur-sensorn monterad i plaströret och betongen så monterades ett termoelement kopplad till en logger (Test 175-T3) för mätning av temperatur direkt mot betongen i borrhålets botten, se figur 5.3.4. Med hjälp av temperaturskillnaden mellan RF/temperatur-sensor och betongen kunde den uppmätta relativa fuktigheten i plaströret räknas om till verklig relativ fuktighet i betongen. Varje temperaturskillnad mellan sensorerna och betongen skulle ge ett fel i uppmätt RF på ca -5 % RF per grads temperaturskillnad.

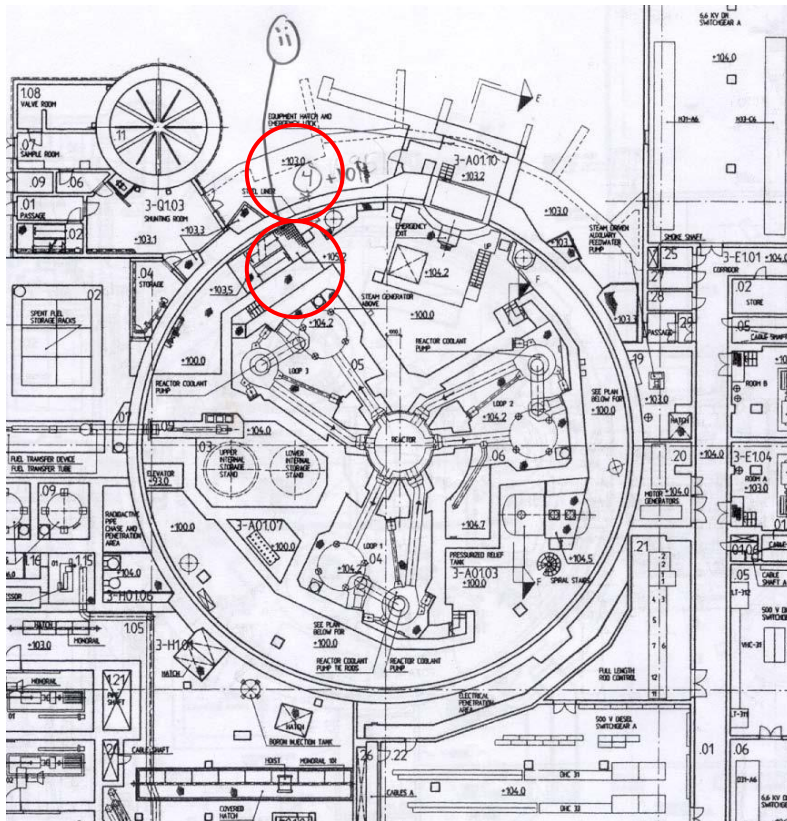
Givarplaceringen i höjddled framgår av figur 5.3.1 och placering i planet på respektive nivå i följande avsnitt.



Figur 5.3.1. En sektion från en PWR-inneslutning (Ringhals 3) med utvändiga mätpunkterna markerade.

### Nivån +104 m

Den utvändiga mätpunktens placering på nivån +104 m i förhållande till intagsslussen på markplan redovisas i figur 5.3.2 nedan. Mät- och loggningsutrustningens montering visas figur 5.3.3 och 5.3.4.

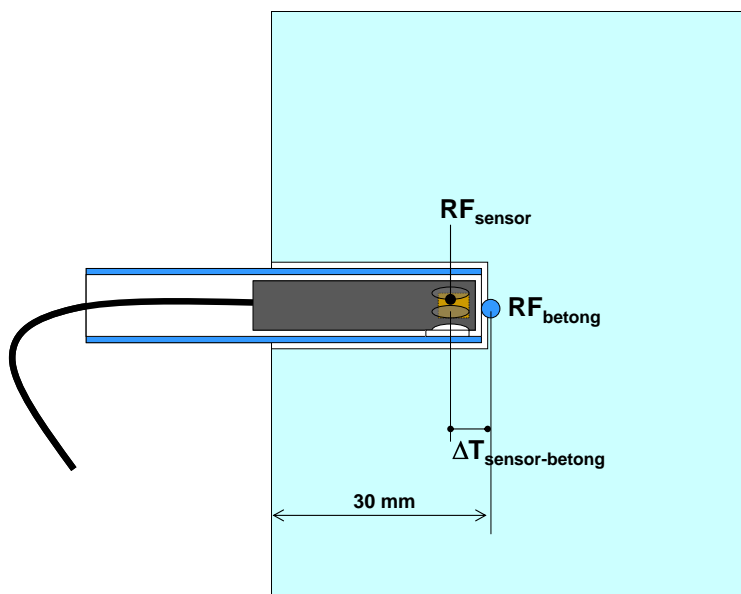


Figur 5.3.2. Placering av mätpunkt vid intagsslussen, dels på inneslutningens utsida och dels på dess insida (nivån +104 m).

Orienteringen hos mätpunkten på nivån +104 är mot NNV.

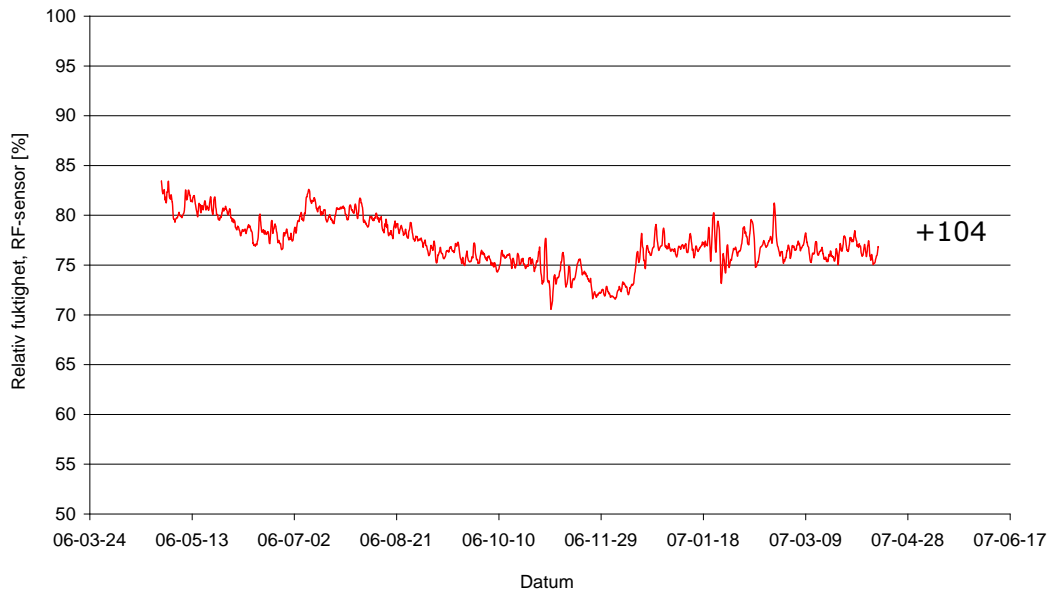


Figur 5.3.3. Placering av mätpunkt i förhållande till intagsslussen, nivå +104 (vänster bild). RF-sensor monterad i plaströr samt termoelement mellan plaströr och betong för temperaturmätning av betongen (höger bild).



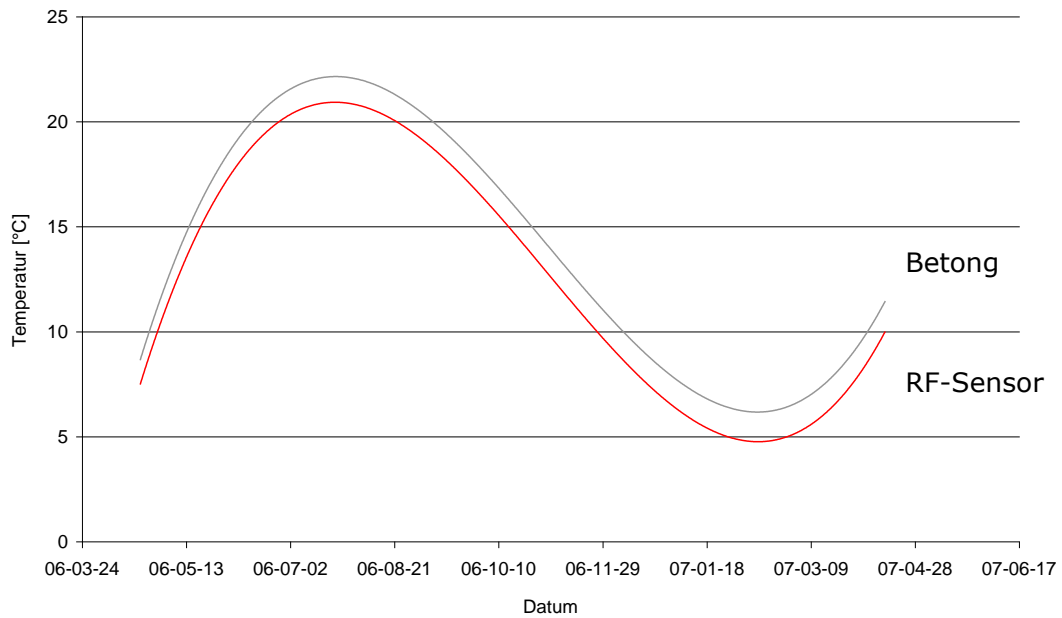
Figur 5.3.4. Principiell skiss av givarens placering i borrhål vid RF-mätning på reaktorinneslutningens utsida, jämför figur 5.3.3. Blå punkt visar termoelementets placering direkt mot betongen.

Den relativa fuktigheten uppmätt med Vaisala-sensor på 30 mm djup i reaktorinneslutningen redovisas i figur 5.3.5. Resultatet är förhållandevis stabilt och varierar mellan 75-80 % under en stor del av mätperioden.



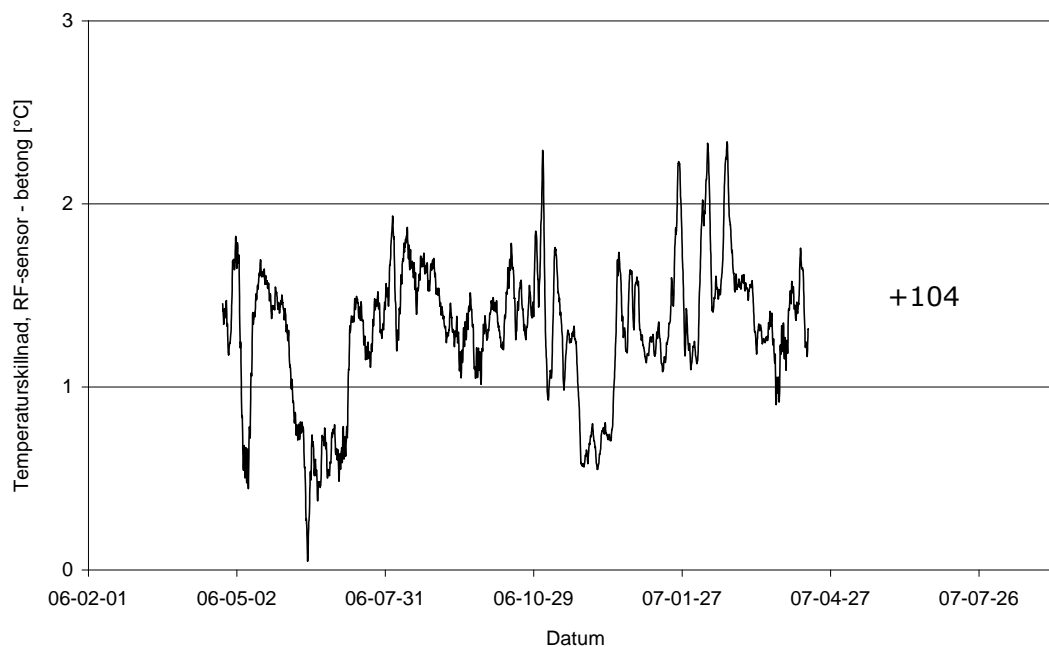
Figur 5.3.5. Resultat från RF-mätning med Vaisala-sensor monterad i borrhål på nivån +104.

Som ett resultat av variationer hos utomhustemperaturen varierade temperaturen på 30 mm djup i reaktorinneslutningen mellan +5 och cirka +20°C, se figur 5.3.6. Figuren visar dels betongens temperatur uppmätt med termoelement på 30 mm djup (grå kurva) och dels temperaturen på samma djup med Vaisala-sensor.



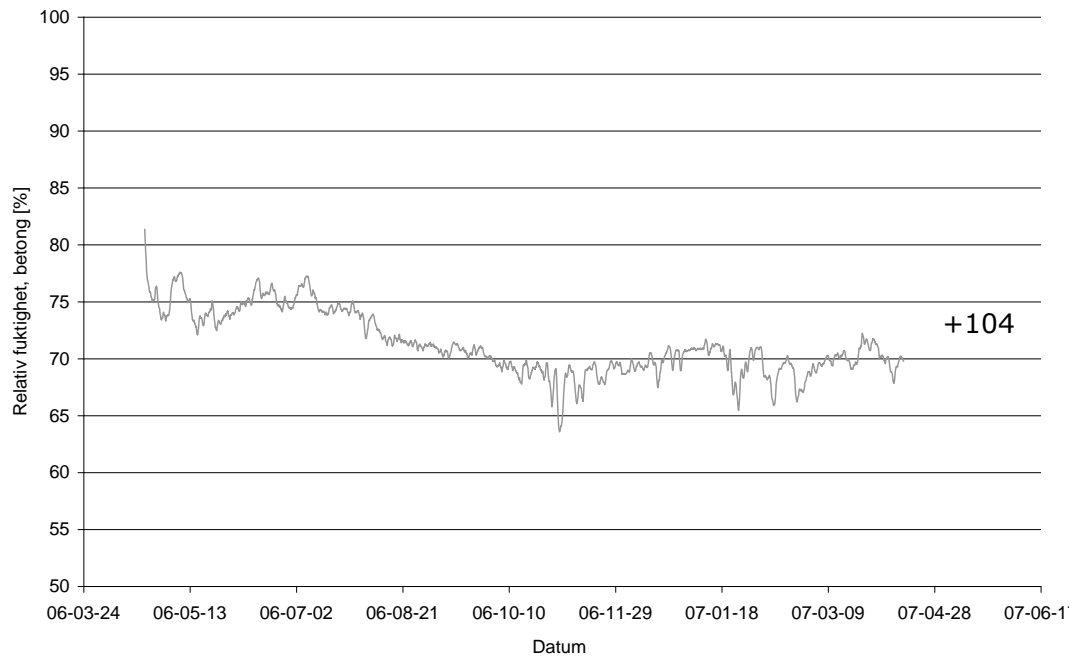
Figur 5.3.6. Temperatur på nivån +104, dels uppmätt med RF/temperatur-sensor i borrhål (röd kurva) och dels med termoelement monterat i kontakt med betongen (grå kurva).

I figur 5.3.7 redovisas temperaturskillnad mellan Vaisala-sensor och termoelement monterat i kontakt med betongen. Under en stor del av mätperioden uppgår temperaturskillnaden till cirka 1.5°C, där termoelementet registrerar en högre temperatur, jämför figur 5.3.6.



Figur 5.3.7. Temperaturskillnad på nivån +104, mellan mätning med RF/temperatur-sensor i borrhål och med termoelement monterat i kontakt med betongen.

I figur 5.3.8 redovisas verklig relativ fuktighet på djupet 30 mm, beräknad med hjälp av uppmätt relativ fuktighet (Vaisala-sensor) enligt figur 5.3.5. och temperaturskillnad mellan betongen och Vaisala-sensor enligt figur 5.3.7. Eftersom betongens temperatur i genomsnitt var något högre än temperaturen hos Vaisala-sensorn, resulterade detta i att betongens verkliga relativa fuktighet på djupet 30 mm, var lägre än den uppmätta. Den verkliga relativa fuktigheten varierade mellan 65-75% under en större del av mätperioden.

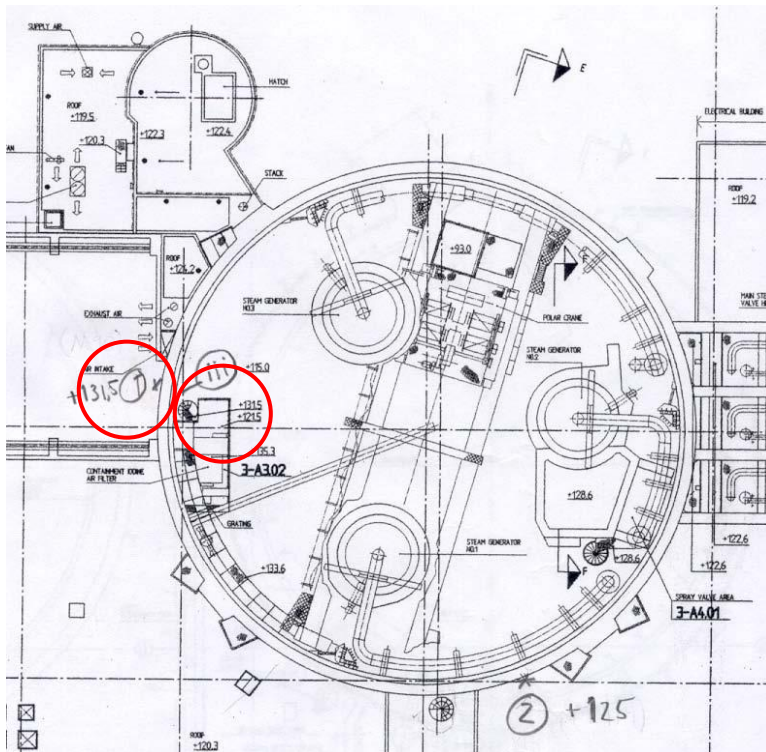


Figur 5.3.8. Beräknad relativ fuktighet i betongen med hjälp av ånghalt från RF/temperatur-sensor och betongens temperatur uppmätt med termoelement, nivån +104.

#### Nivån +131 m

Den utvändiga mätpunktens placering på nivån +131 m i förhållande till bränslebyggnadens tak redovisas i figur 5.3.9 nedan. Mät- och loggningsutrustningens montering visas figur 5.3.10.

Orienteringen hos mätpunkten på nivån +131 är mot VSV.

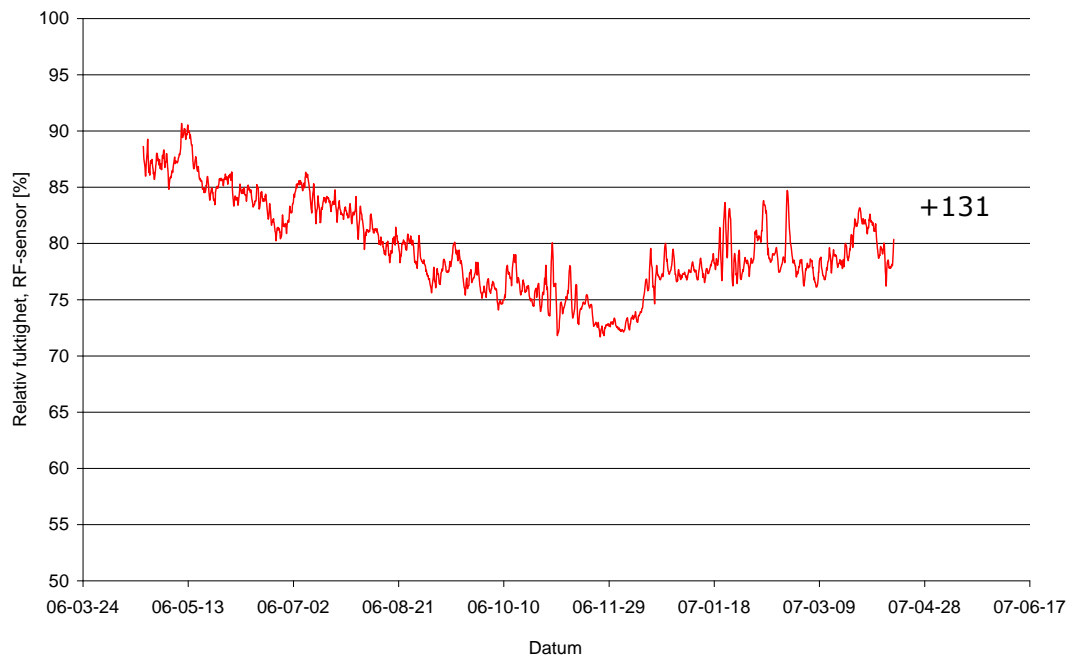


Figur 5.3.9. Placering av mätpunkt över bränslebyggnadens tak på inneslutningens utsida (nivån +131 m) samt på reaktorinneslutningens insida (nivån +132 m).



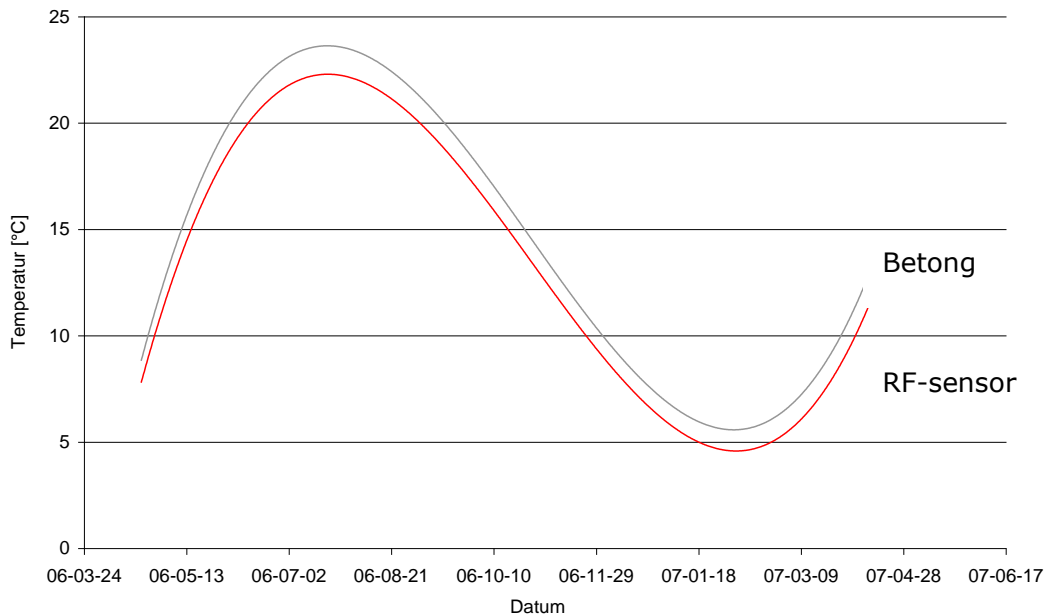
Figur 5.3.10. Placering av mätpunkt i förhållande till anslutning mellan inneslutningsvägg och bränslebyggnadens tak, nivå +131 m.

Den relativa fuktigheten uppmätt med Vaisala-sensor på 30 mm djup i reaktorinneslutningen redovisas i figur 5.3.11. Resultatet varierar förhållandevis mycket över mätperioden jämfört med motsvarande resultat på nivån +104 m. En tänkbar förklaring till detta är att denna mätpunkt, med sin oskyddade placering, är mer frekvent utsatt för vind och slagregn.



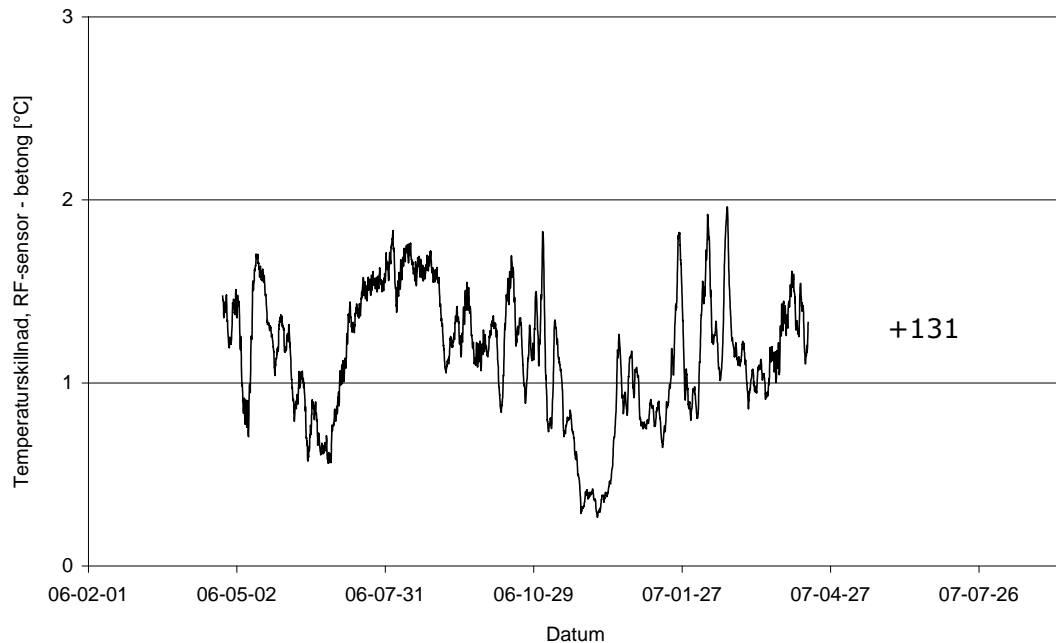
Figur 5.3.11. Resultat från RF-mätning med Vaisala-sensor monterad i borrhål på nivån +131.

Som ett resultat av variationer hos utomhustemperaturen varierade temperaturen på 30 mm djup i reaktorinneslutningen mellan +5 och cirka +20°C, se figur 5.3.12. Figuren visar dels betongens temperatur uppmätt med termoelement på 30 mm djup (grå kurva) och dels temperaturen på samma djup med Vaisala-sensor.



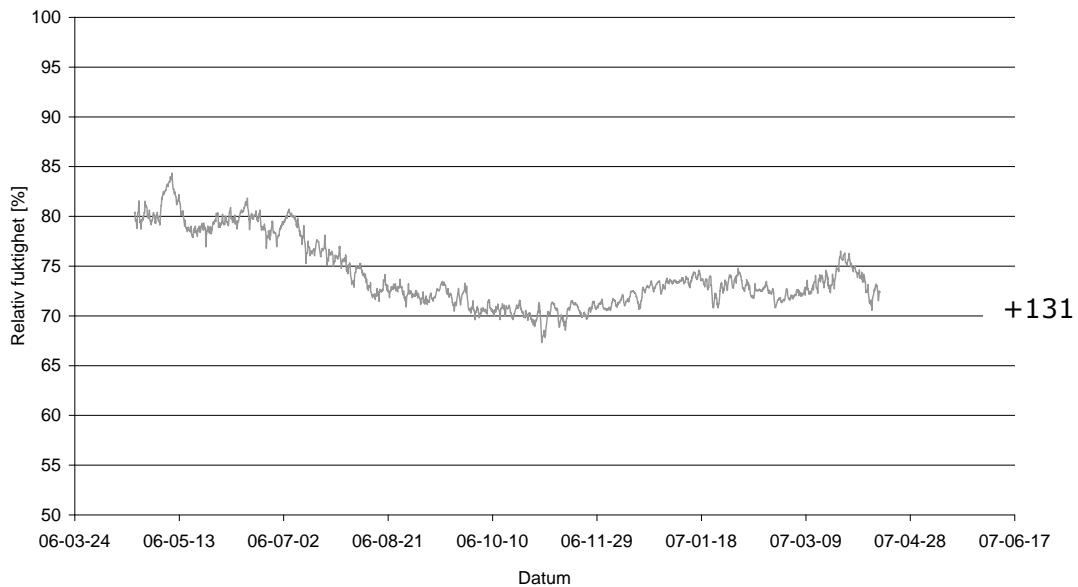
Figur 5.3.12. Temperatur på nivån +131, dels uppmätt med RF/temperatur-sensor i borrhål (röd kurva) och dels med termoelement monterat i kontakt med betongen (grå kurva).

I figur 5.3.13 redovisas temperaturskillnad mellan Vaisala-sensor och termoelement monterat i kontakt med betongen. Under en stor del av mätperioden uppgår temperaturskillnaden till cirka 1.5°C, där termoelementet registrerar en högre temperatur, jämför figur 5.3.12.



Figur 5.3.13. Temperaturskillnad på nivån +131, mellan mätning med RF/temperatur-sensor i borrhål och med termoelement monterat i kontakt med betongen.

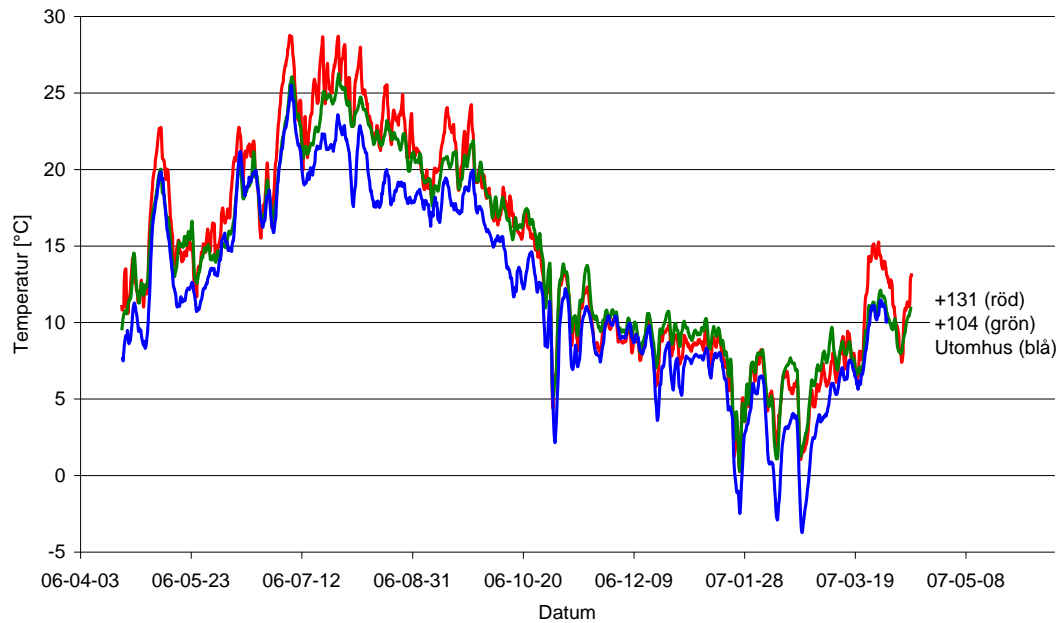
I figur 5.3.14 redovisas verklig relativ fuktighet på djupet 30 mm, beräknad med hjälp av uppmätt relativ fuktighet (Vaisala-sensor) enligt figur 5.3.11. och temperaturskillnad mellan betongen och Vaisala-sensor enligt figur 5.3.13. Eftersom betongens temperatur i genomsnitt var något högre än temperaturen hos Vaisala-sensorn, resulterade detta i att betongens verkliga relativa fuktighet på djupet 30 mm, var lägre än den uppmätta. Den verkliga relativa fuktigheten varierade mellan 70-85% under en större del av mätperioden.



Figur 5.3.14. Beräknad relativ fuktighet i betongen med hjälp av ånghalt från RF/temperatur-sensor och betongens temperatur uppmätt med termoelement, nivån +131.

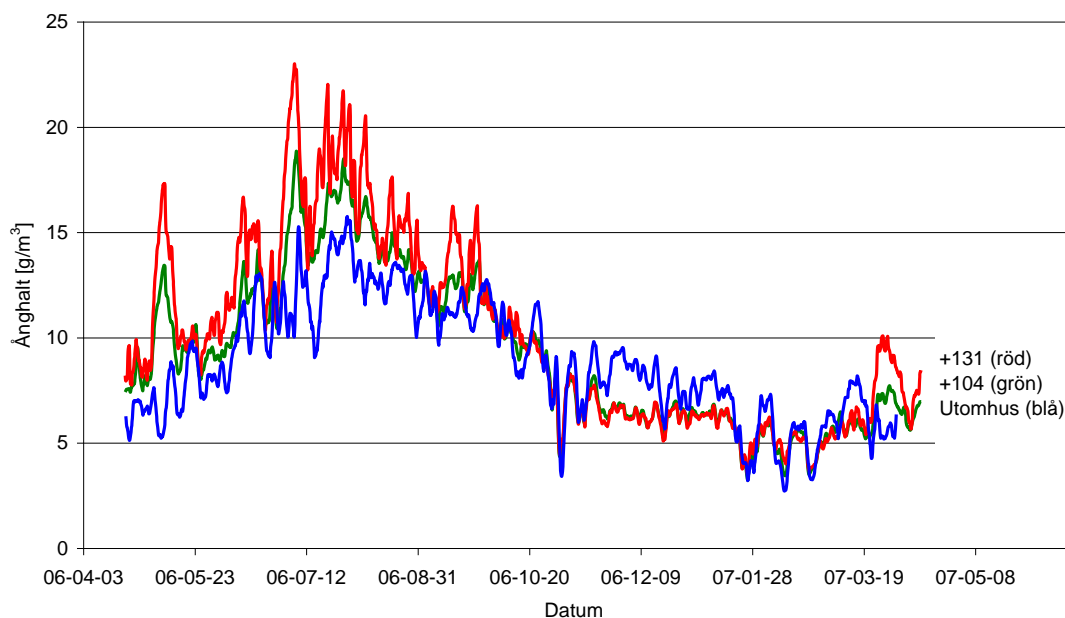
#### Jämförelse mellan nivå +104 och +131

I figuren 5.3.15 visas en jämförelse mellan betongens temperatur på 30 mm djup, uppmätt med termoelement, samt utomhusluftens temperatur. Resultatet i figuren visar att det finns ett tydligt samband mellan utomhusluftens temperatur och betongens temperatur på i de båda mätpunkterna. Under stora delar av mätperioden är betongens temperatur någon grad högre än utomhustemperaturen med undantag under sommarhalvåret då temperaturen på nivån +131 är flera grader högre än utomhustemperaturen. En förklaring till detta skulle kunna vara att mätpunkten vid bränslebyggnadens tak (+131) exponeras för solstrålning i större grad än den mer skyddade mätpunkten vid intagsslussen (+104). Att det generellt över året råder en högre temperatur i de båda mätpunkterna jämfört med utomhustemperaturen beror sannolikt på att det finns en temperaturgradient över reaktorinneslutningen.



Figur 5.3.15. Temperaturer uppmätta i betongen med termoelement (se figur 5.3.4) på reaktorinneslutningens utsida på nivåerna +104 (grön kurva) och +131 (röd kurva). Blå kurva visar utomhustemperaturen.

En jämförelse mellan ånghalten i utomhusluften och i de båda mätpunkterna visas i figur 5.3.16. Resultatet i figuren visar att det råder ett visst samband mellan utomhusluftens ånghalt och ånghalten i de båda mätpunkterna. Under sommarmånaderna är dock betongens ånghalt högre än uteluftens och under vinterhalvåret råder ett omvänt förhållande.

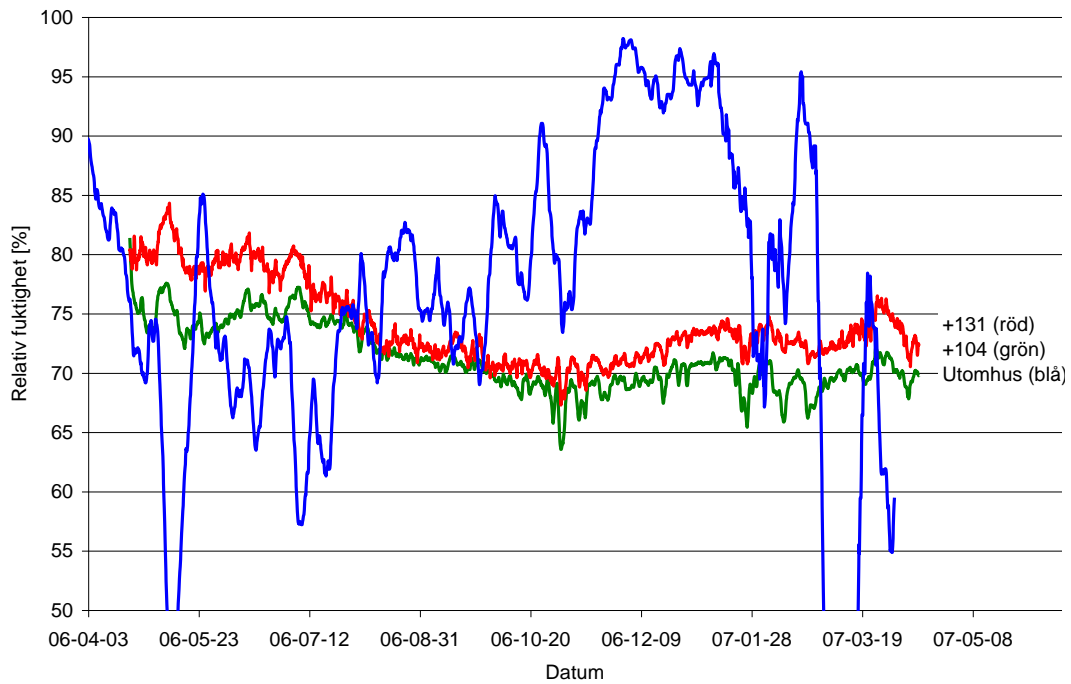


Figur 5.3.16. Beräknade ånghalter med hjälp mätdata från RF/temperatur-sensorer monterade i borrhål (se figur 5.3.4) på reaktorinneslutningens utsida på nivåerna +104 (grön kurva) och +131 (röd kurva). Blå kurva visar utomhusluftens ånghalt.

Den relativa fuktigheten i de båda mätpunkterna har beräknats med hjälp av uppmätta RF och temperatur i borrhål (Vaisala-sensor) samt betongens temperatur (termoelement) enligt ekvation 2.

$$RF_{betong} = \frac{v_{sensor}}{v_m(T_{betong})} = \frac{RF_{sensor} \cdot v_m(T_{sensor})}{v_m(T_{betong})} \quad (5.3.1)$$

Den beräknade relativa fuktigheten i de båda mätpunkterna visas i figur 5.3.17 tillsammans med utomhusluftens relativa fuktighet. Det råder inget tydligt samband mellan relativa fuktigheten hos utomhusluften och de båda mätpunkterna. Att en högre relativ fuktighet registreras för mätpunkten vid bränslebyggnadens tak (nivån +131) jämfört med den vid intagslussen (nivån +104) kan sannolikt förklaras av att den nedre mätpunkten är mer skyddad mot slagregn.

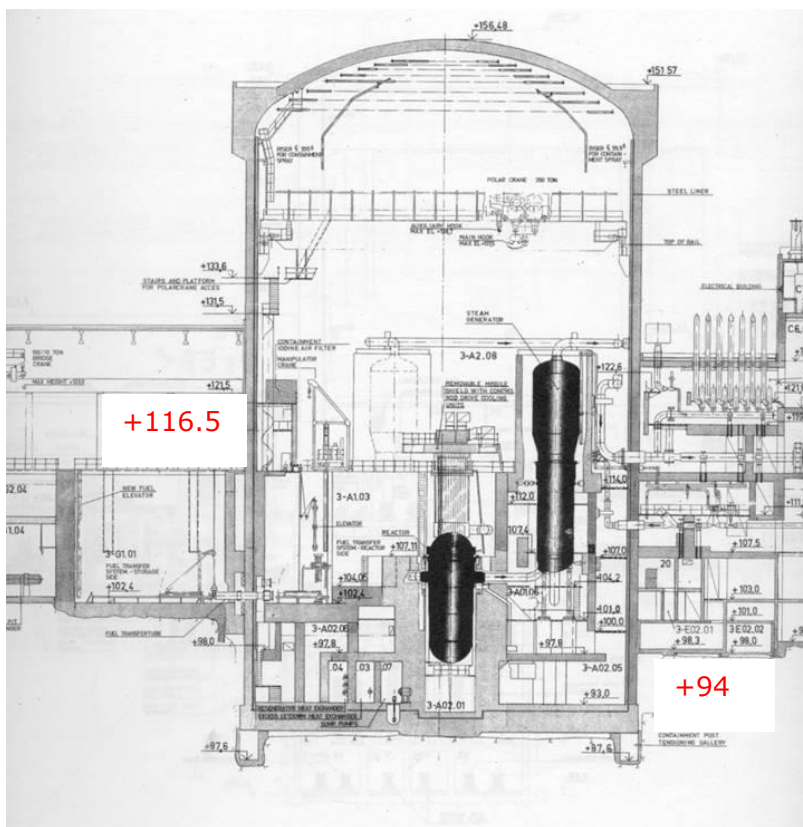


Figur 5.3.17. Beräknade relativa fuktigheter utifrån ånghalter i borrhål (figur 5.3.16) och betongens temperatur på borrhålets botten (figur 5.3.15). Grön kurva visar nivån +104 och röd kurva nivån +131. Blå kurva visar utomhusluftens relativa fuktighet.

### 5.3.2 Klimatförhållande på reaktorinneslutningen utsida (del som inte är exponerad för utomhusklimat)

På den del av inneslutningen som är väderskyddad valdes två så representativa utrymmen som möjligt ut för loggning av T & RF (Testo 175-H2). Loggrarna monterades direkt på inneslutningsväggens utsida, dels i elbyggnad och dels i bergspalten.

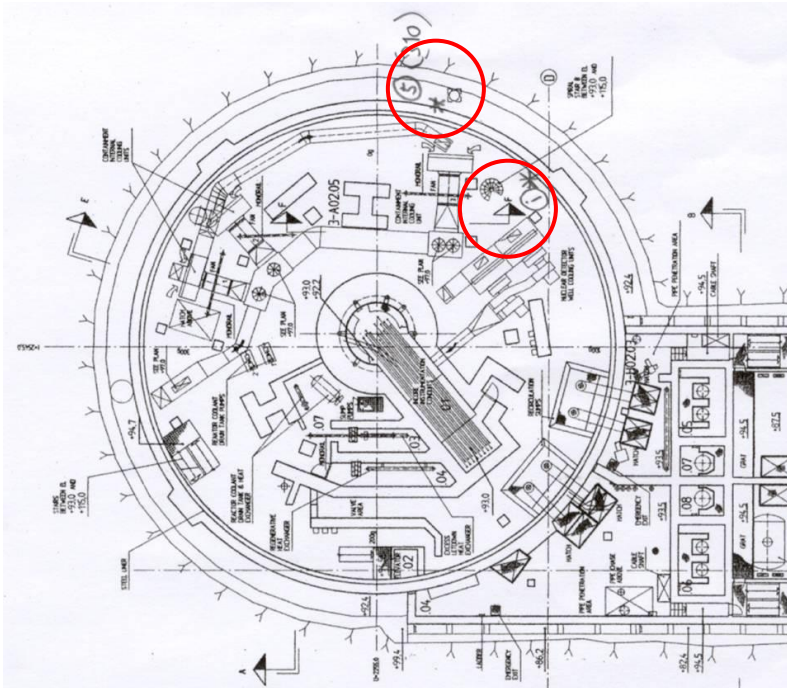
Givarplaceringen i höjddled visas i figur 5.3.18 och dess placering i planet på respektive nivå visas i följande avsnitt.



Figur 5.3.18. Nivåer där givarna placerades.

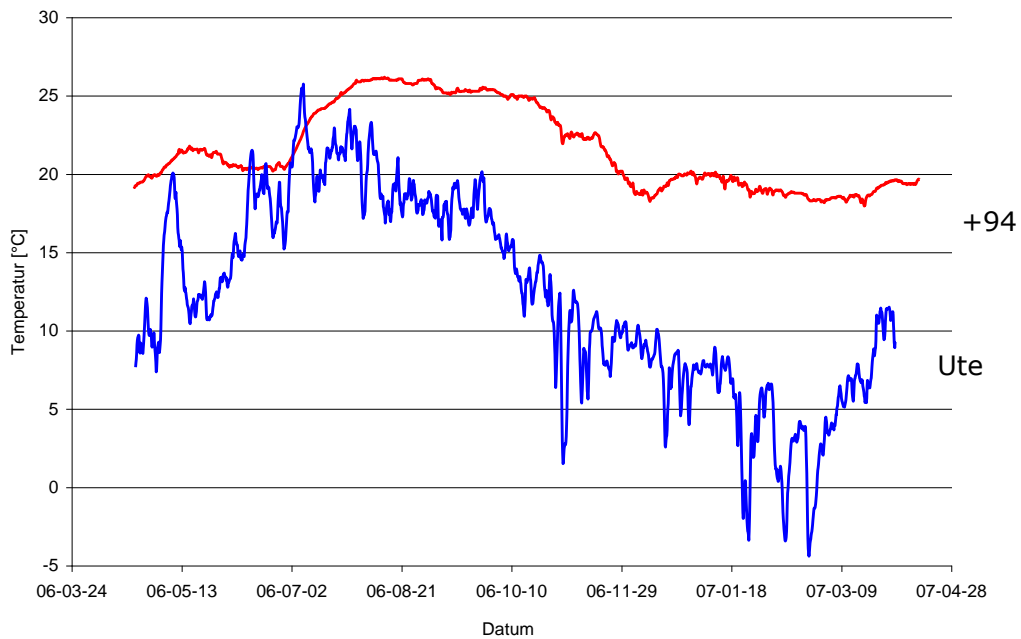
#### Nivån +94 m

Givarens placering på reaktorinneslutningens utsida vid nedstigningslucka i bergspalten redovisas enligt figur 5.3.19 nedan (yttre röd ring).



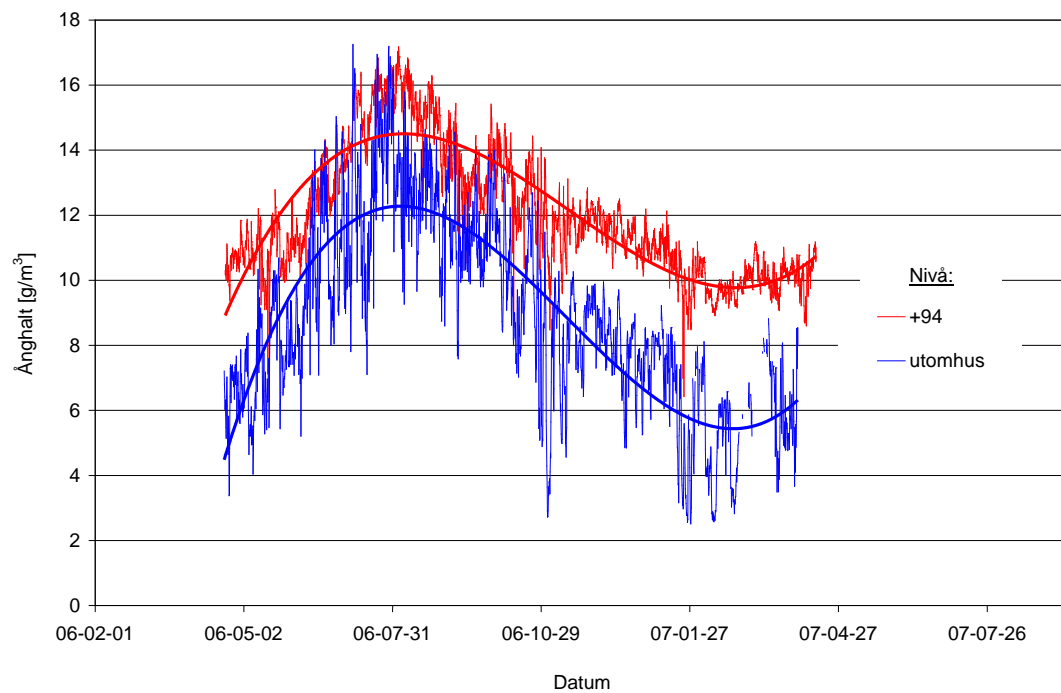
Figur 5.3.19. Placering av givaren på nivån +94 m, på reaktorinneslutningens utsida i bergspalten (yttre röd ring).

I figur 5.3.20 redovisas uppmätt temperatur på nivån +94 tillsammans med utomhusluftens temperatur. Temperaturen på inneslutningsväggen varierade mellan 18-26°C.



Figur 5.3.20. Resultat från temperaturmätningarna på nivån +94 m i bergspalten, jämfört med ute.

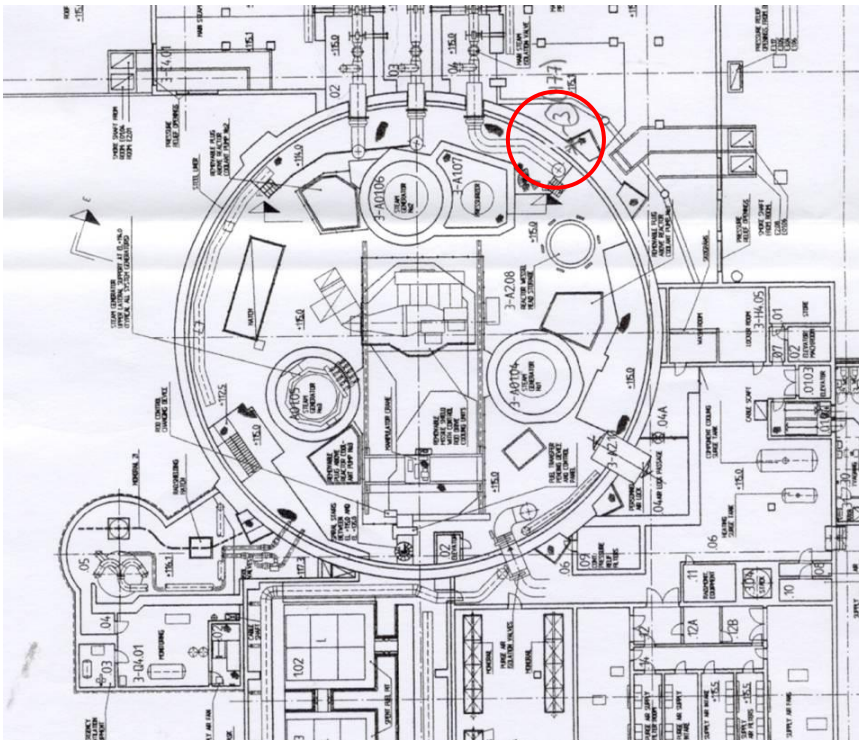
Ånghalten i bergspalten har beräknats med hjälp av uppmätt relativ fuktighet och temperatur och jämförs i figur 5.3.21 med utomhusluftens ånghalt. Fukttillskottet som utgöra av differensen mellan den röda och blåa kurvan uppgår till mellan 2-4 g/m<sup>3</sup>.



Figur 5.3.21. Resultat av temperatur- och RF-mätningarna på nivån +94 m i bergspalten (röd kurva), omräknade till ånghalt, jämfört med uteluftens ånghalt (blå kurva).

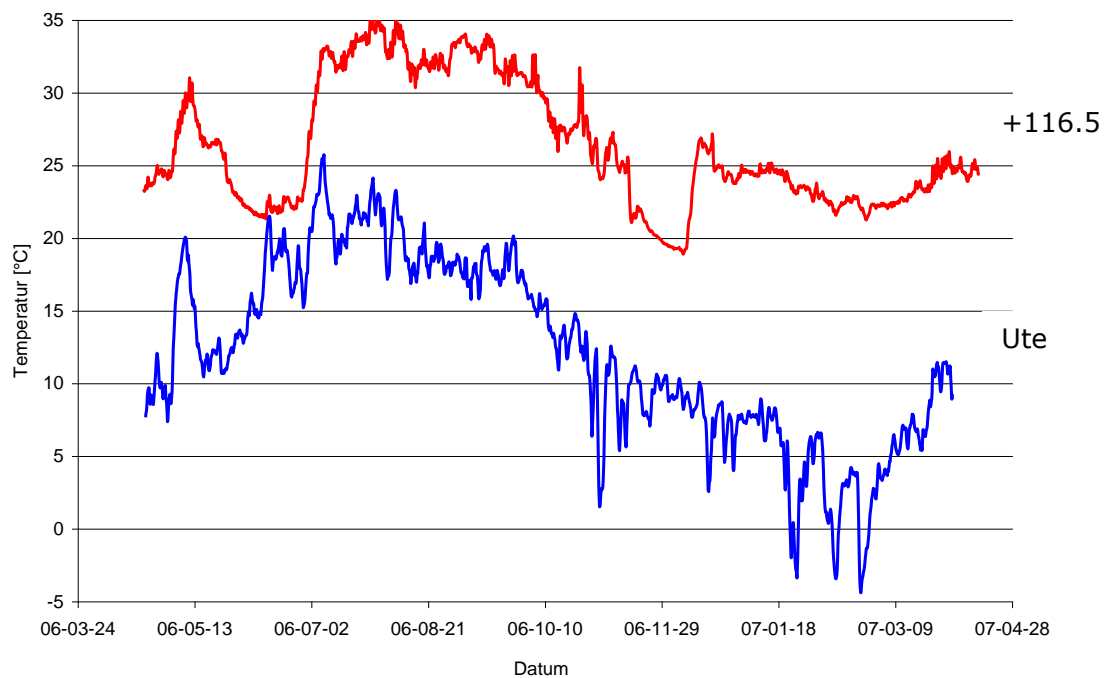
#### Nivån +116.5 m

Givarens placering på reaktorinneslutningens utsida i elbyggnaden redovisas enligt figur 5.3.22 nedan (röd ring).



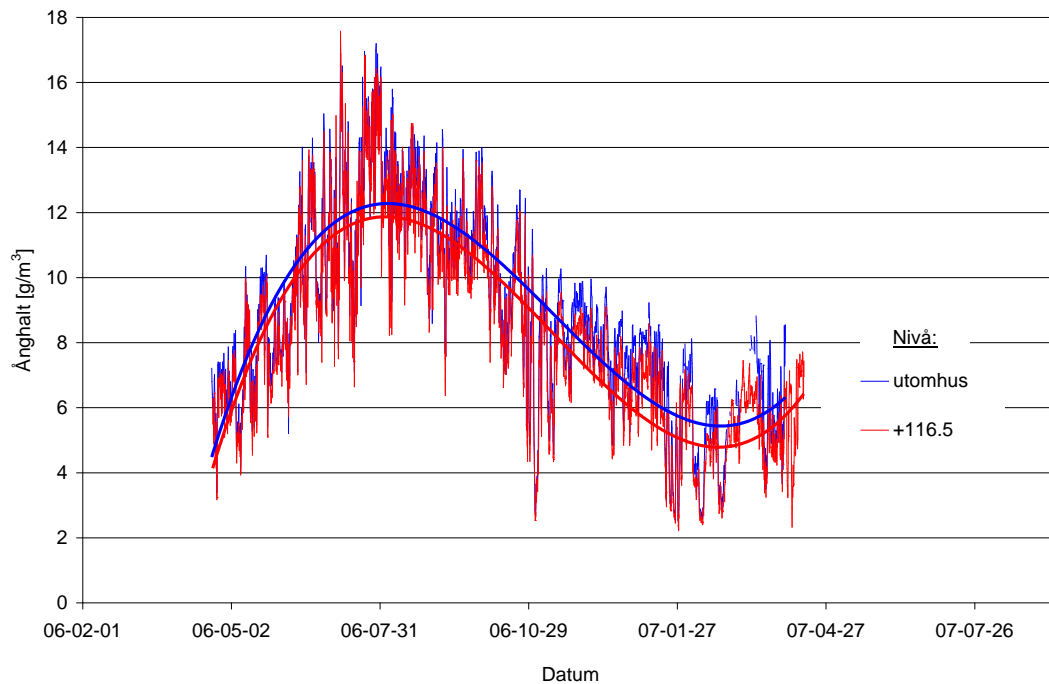
Figur 5.3.22. Placering av givaren på nivån +116.5 m, på reaktorinneslutningens utsida i el-byggnaden.

I figur 5.3.23 redovisas uppmätt temperatur på nivån +116,5 tillsammans med utomhusluftens temperatur. Temperaturen på inneslutningsväggen varierade mellan 20-35°C.



Figur 5.3.23. Resultat från temperaturmätningarna på nivån +116.5 m i el-byggnaden, jämfört med ute.

Ånghalten i el-byggnaden har beräknats med hjälp av uppmätt relativ fuktighet och temperatur och jämförs i figur 5.3.24 med utomhusluftens ånghalt. Fukttillskottet som utgöra av differensen mellan den röda och blåa kurvan understiger  $1 \text{ g/m}^3$ .

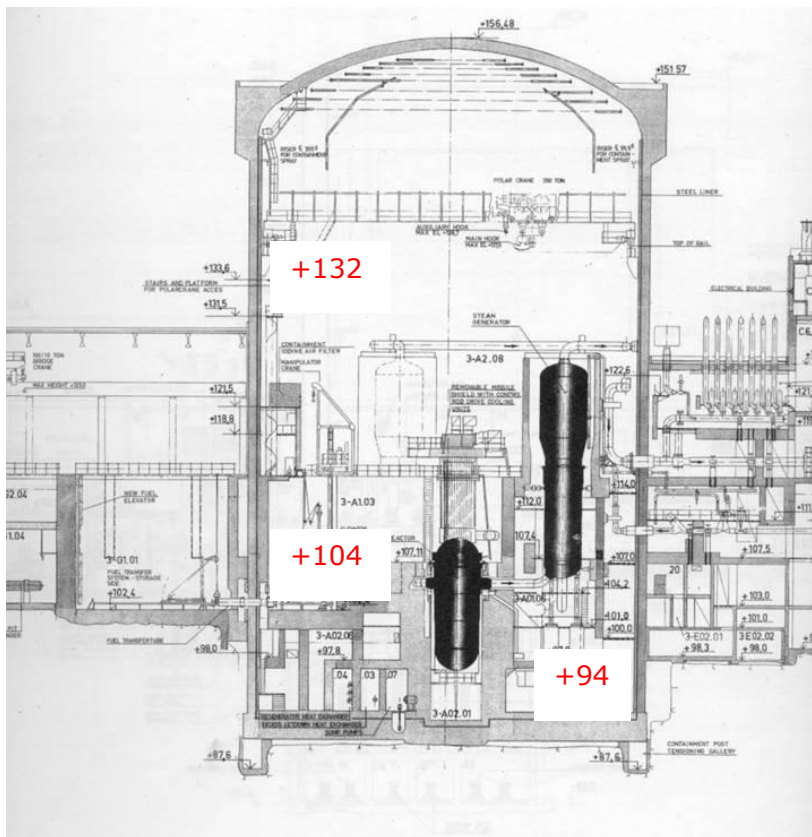


Figur 5.3.24. Resultat av temperatur- och RF-mätningarna på nivån +116.5 m i el-byggnaden (röd kurva), omräknade till ånghalt, jämfört med uteluftens ånghalt (blå kurva).

### 5.3.3 Klimatförhållande på reaktorinneslutningen insida

Temperatur och relativ fuktighet har loggats i tre punkter på reaktorinneslutningens insida. Orienteringen hos dessa mätpunkter valdes, dels i höjdlid och dels i planet, så att dessa så väl som möjligt skulle överensstämma med orienteringen hos de yttre mätpunkterna.

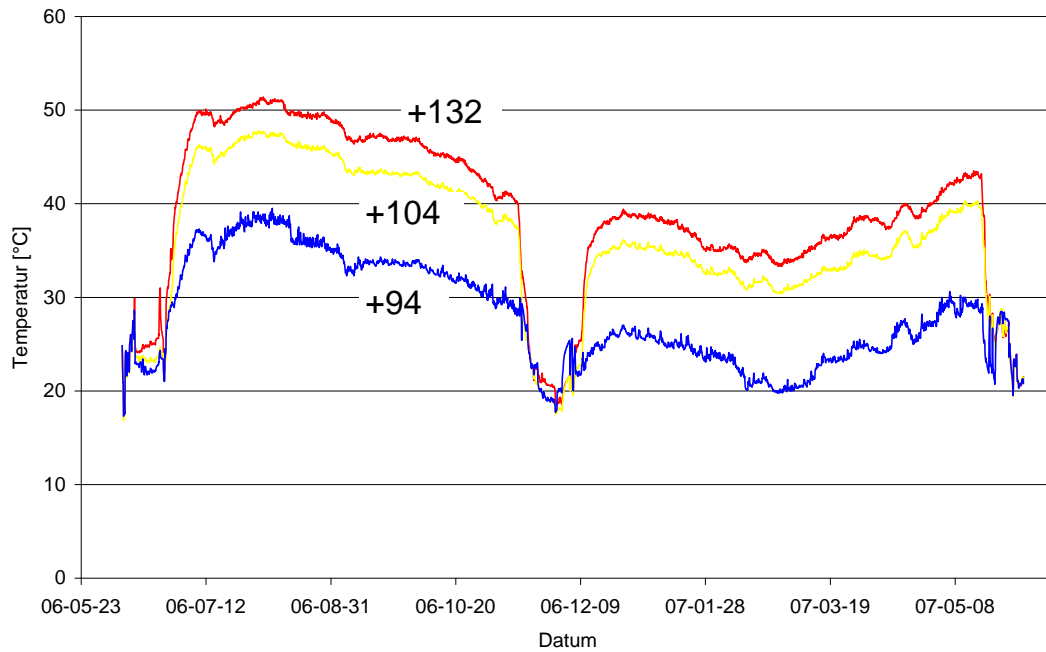
Givarplaceringen i höjdlid visas i figur 5.3.25 och dess placering i planet på respektive nivå visas i följande avsnitt.



Figur 5.3.25. Placering av givaren på olika nivåer i reaktorinneslutningen.

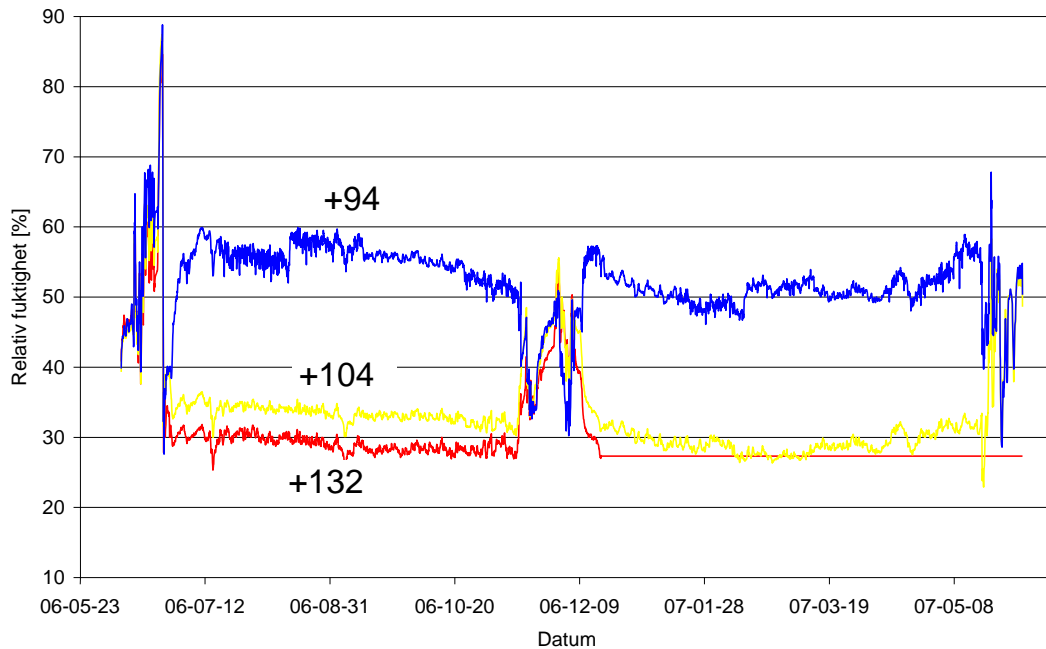
Mätpunktens placering i planet på nivån +94 visas i figur 5.3.19. På samma sätt redovisas placeringen av mätpunkterna på nivåerna +104 och +132 i figur 5.3.2 samt 5.3.9.

Resultat från temperaturmätningen i de tre punkterna redovisas i figur 5.3.26. I mätpunkten som var placerad på nivån +132 registrerades generellt en högre temperatur som under större delen av mätperioden varierade mellan 35-50°C. Temperaturen i mätpunkterna på nivåerna +104 och +94 varierade mellan 30-45°C respektive 20-40°C. Omkring månadskiftet november-december sjönk temperaturen i samtliga mätpunkter vilket indikerar att reaktorn tagit ur drift.



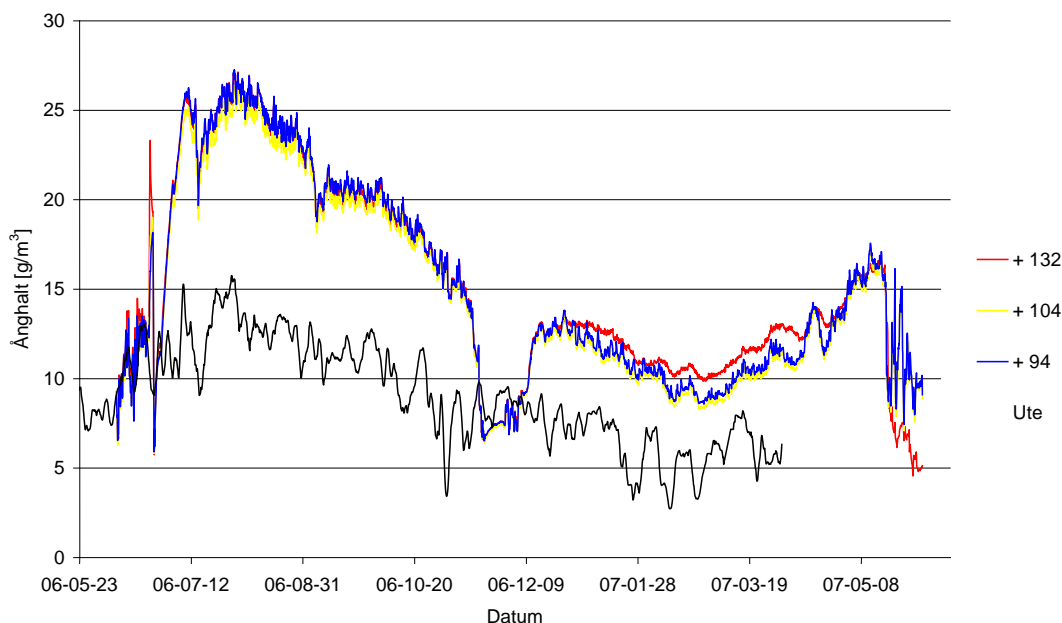
Figur 5.3.26. Resultat från temperaturmätningarna på tre nivåer i reaktorinneslutningen.

Resultat från mätningen av relativ fuktighet redovisas i figur 5.3.27. Generellt noterades en minskad relativ fuktighet med ökad höjd hos mätpunkterna.



Figur 5.3.27. Resultat från mätning av relativ fuktighet på tre nivåer i reaktorinneslutningen.

I figur 5.3.28 redovisas ånghalter på inneslutningen insida, beräknade med hjälp av temperaturer och relativa fuktigheter enligt figur 5.3.26 och 5.3.27, jämfört med utluftens ånghalt. Resultatet visar att ånghalten på de tre nivåerna överensstämmer väl, vilket är förväntat eftersom större delen av reaktorinneslutningen utgör en sammanhängande volym. Under drift av reaktorn noteras ett betydande fuktillskott som varierar mellan 5-10 g/m<sup>3</sup>. En möjlig förklaring till detta fuktillskott kan vara att grova betongkonstruktioner inne i reaktorinneslutningen lämnar ifrån sig byggfukt men också att det förekommer interna läckage som kan ge ett bidrag. Fuktillskottet försvinner när reaktorn tas ur drift, vilket skedde i månadsskiftet november-december.



Figur 5.3.28. Resultat från mätning av relativ fuktighet och temperatur, omräknade till ånghalt, på tre nivåer i reaktorinneslutningen jämfört med uteluftens ånghalt.

#### 5.3.4 Konklusion

##### Klimatförhållande på reaktorinneslutningen utsida (del som är exponerad för utomhusklimat)

Temperaturen på 30 mm djup från ytan följer variationer i utomhusluftens temperatur väl. För den mätpunkt som till största del var placerad i skugga var temperaturen cirka 1-3°C högre än utomhustemperaturen. Under sommarmånaderna var temperaturskillnaden större utomhusluften och betongen hos den övre mätpunkten som var utsatt för solinstrålning.

Yttemperaturerna på reaktorinneslutningens utsida kontrollerades med termografering några gånger. 17/2 2007 var yttemperaturen maximalt 3°C högre än lufttemperaturen på marknivå. Inga "hotspots" kunde upptäckas.

Resultatet från mätningen visar att det råder ett visst samband mellan utomhusluftens ånghalt och ånghalten i de båda mätpunkterna. Under sommarmånaderna är dock betongens ånghalt högre än uteluftens och under vinterhalvåret råder ett omvänt förhållande.

Mätningarna visade att den relativa fuktigheten på djupet 30 mm i inneslutningsväggen är förhållandevis stabil. På relativt väderskyddade delar av inneslutningen kan den relativa fuktigheten där antas variera mellan 65-75% och på väderutsatta delar är den relativa fuktigheten något högre, det vill säga mellan 70-80%.

#### Klimatförhållande på reaktorinneslutningen utsida (del som inte är exponerad för utomhusklimat)

Temperaturen på inneslutningsväggen i bergspalten var relativt stabil under mätperioden och varierade mellan 18-26°C samtidigt som luften hade 2-4 g/m<sup>3</sup> högre fuktinnehåll än utomhusluften. Orsaken till luftens högre fuktinnehåll är sannolikt en kombination av att detta utrymme har begränsad ventilation och att marken/bergrunden står i direkt kontakt med utrymmet.

På inneslutningsväggen i el-byggnaden noterades större variationer hos temperaturen, vilken varierade mellan 20-35°C. I el-byggnaden överrensstämde luftens ånghalt väl med utomhusluftens ånghalt. En sannolik förklaring till detta är att det saknas eller endast finns begränsade fuktkällor i dessa utrymmen.

#### Klimatförhållande på reaktorinneslutningen insida

Temperaturerna på reaktorinneslutningens insida ökade med ökad höjd hos mätpunkten. Mätpunkten i inneslutningens botten visade temperaturer mellan 20-40°C medan mätpunkten som placerades i inneslutningens övre del visade temperaturer i intervallet 35-50°C.

Ånghalten på de tre nivåerna överrensstämde väl, vilket var förväntat eftersom större delen av reaktorinneslutningen utgör en sammanhängande volym. Under drift av reaktorn noterades ett betydande fuktillskott som varierade mellan 5-10 g/m<sup>3</sup>. En möjlig förklaring till detta fuktillskott kan vara att grova betongkonstruktioner inne i reaktorinneslutningen fortfarande avger byggfukt, men avdunstning från vattenytan i kondensationsbassängerna och interna läckage bidrar sannolikt också. Fukttillskottet försvann när reaktorn togs ur drift, vilket skedde i månads-skiftet november-december.

### 5.4 Klimatpåverkan – konklusioner

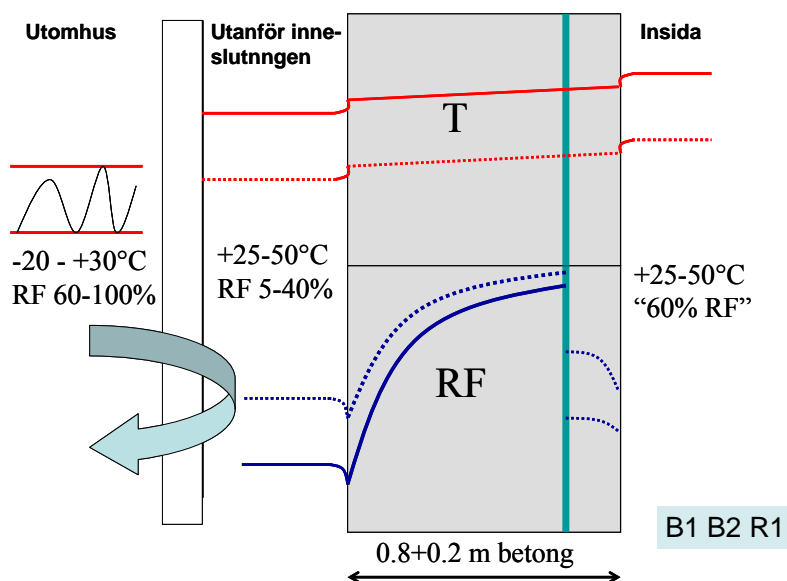
Två huvudsakliga skillnader påträffades hos de olika reaktorerna. Undersökningen visade att det råder en betydande temperaturgradient över reaktorinneslutningsväggen hos en PWR, medan motsvarande temperaturgradient saknas hos en BWR. Detta eftersom inneslutningsväggens utsida hos en PWR till största delen exponeras för utomhusklimat.

Inneslutningen tillhörande en BWR angränsar istället till uppvärmda utrymmen, där temperaturen i många fall endast är något lägre än temperaturen på inneslutningsväggens insida. Temperaturerna på inneslutningens insida varierar med nivå hos båda typer av reaktorer där temperaturen ökar med ökad nivå. Sambandet mellan högre nivå och ökad temperatur gäller också för utsidan hos en BWR samt där utsidan är omsluten av uppvärmda utrymmen hos en PWR.

Eftersom de anslutande utrymmena till en BWR är ventilerade med utomhusluft och fuktkällor generellt saknas, har luften i dessa utrymmen i stort samma ånghalt som utomhusluften. Som ett resultat av den betydande temperaturskillnad som råder mellan olika nivåer hos reaktorn, varierar också den relativa fuktigheten i dessa utrymmen med olika nivåer. Beroende av nivå hos reaktorn kan månadsmedelvärde hos den relativa fuktigheten variera

mellan 10-60% för olika utrymmen. Motsvarande förhållande gäller också för de delar av en PWR, där denna är omsluten av uppvärmda utrymme. Ett undantag hos PWR är bergspalten, där luften hade betydligt högre fuktinnehåll än utomhusluften.

Förväntad temperatur- och fuktfördelning i en inneslutningsvägg hos en BWR åskådliggörs principiellt i nedanstående figur. Det är inte någon större temperaturgradient genom väggen. Det är högre temperatur ju högre upp man kommer. Relativa fuktigheten på utsidan är låg, lägre ju högre temperaturen är. Relativa fuktigheten är direkt kopplad till uteluftens ånghalt och yttemperaturen, med en liten skillnad i ånghalt.

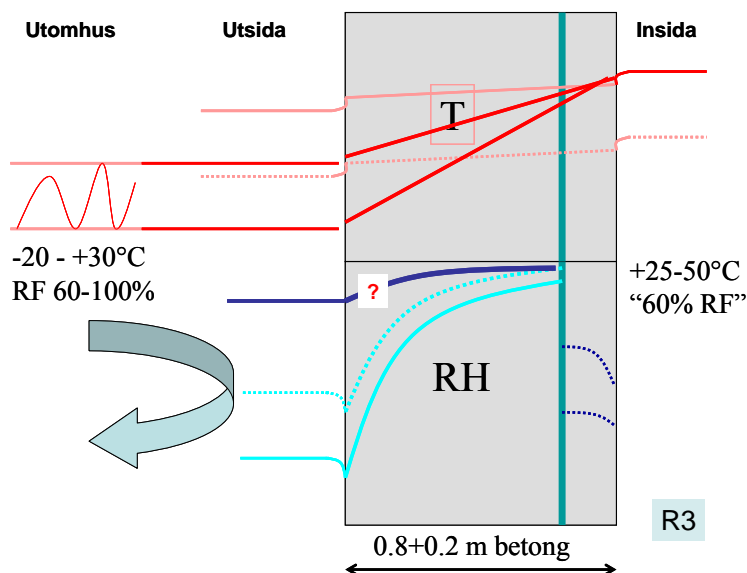


Figur 5.4.1. Förväntad temperatur- och RF-fördelning genom inneslutningsväggen till en BWR. Utsidan är inte exponerad för direkt utomhusklimat, utan "skyddad" av en byggnad som helt omsluter inneslutningen. Därför blir det små temperaturgradienter genom väggen. (Angivna tjocklekar varierar något mellan anläggningarna).

Relativa fuktigheten på utsidan av en PWR är högre jämfört med utsidan hos en BWR. På relativt väderskyddade delar varierar den relativa fuktigheten mellan 65-75% och på väderutsatta delar är den relativa fuktigheten något högre, det vill säga mellan 70-80%. Relativa fuktigheten hos inneslutningens utsida är direkt kopplad till uteluftens ånghalt och yttemperaturen. Eftersom en del av det regn som träffar ytan sugts in och därmed höjer ånghalten något i den yttre delen av inneslutningen i förhållande till uteluftens ånghalt, måste hänsyn tas till uppmätta relativa fuktigheter på 30 mm djup från utsidan.

I figur 5.4.2 åskådliggörs förväntad temperatur- och fuktfördelning i en inneslutningsvägg hos en PWR (del som är utsatt för utomhusklimat). Här råder en markant större temperaturgradient jämfört med en BWR. På insidan

råder högre temperatur ju högre upp man kommer, medan temperaturen på utsidan i stort följer utomhustemperaturen med en ungefärlig avvikelse på 1-3°C.



Figur 5.4.2. Förväntad temperatur- och RF-fördelning genom inneslutningsväggen till en PWR (del som är utsatt för utomhusklimat). Utsidan exponeras för direkt uteklimat, vilket bland annat ger temperaturgradienter genom väggen. (Angivna tjocklekar varierar något mellan anläggningarna).

Under drift av båda reaktortyperna noterades ett betydande fuktillskott i deras inneslutningar. För BWR var fuktillskottet högst i "wet-well" cirka 5-10 g/m<sup>3</sup> och ännu högre i "dry-well". I inneslutningen tillhörande PWR varierade fuktillskottet också mellan 5-10 g/m<sup>3</sup>. Eftersom större delen av PWR-inneslutning utgör en sammanhängande volym var detta fuktillskott rådande på alla nivåer. En möjlig förklaring till dessa fuktillskott kan vara att grova betongkonstruktioner i reaktorinneslutningarna fortfarande avger byggfukt.

## 6 Beräkningar

Uttorkningsberäkningar för betong borde inkludera effekten av kemisk bindning av vatten. Det fanns bara ett beräkningsverktyg som beaktar detta, TorkaS, men detta har begränsningar i vilka tjocklekar som kan behandlas, som är långt mindre än de 800 mm som det är fråga om i reaktorinneslutningsväggar. Källkoden var inte tillgänglig så att detta gick att ändra.

Uttorkningsberäkningar har istället genomförts med hjälp av ett beräkningsverktyg, KFX03, som utvecklats vid institutionen för byggnadsmaterial vid Chalmers. I detta kan man beakta kemiskt bundet vatten genom att beräkna startfukthalten från blandningsvattenmängden och subtrahera det kemiskt bundna vattnet. Fortsatt kemisk bindning av vatten tas sedan inte med i beräkningen. För reaktorinneslutningar är detta sannolikt av mindre betydelse eftersom betongen i sådana har fått härda i flera år innan egentlig uttorkning startar.

KFX03 beskriver fuktberoende fuktkapaciteter genom sorptionsisotermer och fuktberoende fukttransportkoefficienter med ånghalten i betongen som fukttransportpotential. Fukttransportbeskrivningen innehåller bara en term och har därför begränsningar när det finns i en temperaturgradient i materialen. Randvillkoren kan beskrivas som sinusvarierande RF och temperatur, med olika fasförskjutning för att kunna simulera årsvariationer. Beräkningsresultatet ges som tidsvariationer och fördelningsprofiler av temperatur, RF, ånghalt och fukthalt.

En första beräkning har gjorts för Barsebäck 1, där det finns fältmättningsdata att jämföra med. Beräkningsmodellen kalibreras därefter med hjälp av en del av laboratorieundersökningarna och verifieras med de övriga. Efter detta har nya beräkningar gjorts för B1 och sedan också för PWR-inneslutningen av Ringhals R3.

### 6.1 Första beräkningar för B1

De första beräkningarna för Barsebäck B1 gjordes med följande förutsättningar. En betong med vct = 0.5 och cementhalten 380 kg/m<sup>3</sup> valdes, för att efterlikna Barsebäcksbetongen. Hydratationsgraden sattes till konstant 0.80, vilket gav en startfukthalt på 110 kg/m<sup>3</sup>. Fukttransportkoefficienten valdes enligt Hedenblad (1993), vilket stämmer bra med de egenskaper som bestämts experimentellt. Desorptionsisotermer beräknades enligt Nilsson (1980), dvs. enligt figur 3.2.1. Temperatureffekter och fortsatt hydratisering försumrades. Randvillkoren sattes till 40 % RF för en torktemperatur på +25°C och 10 % RF för en temperatur på +50°C.

Resultatet av dessa första beräkningar, för de båda randvillkoren, presenteras i figur 6.1.1, som RF-profiler efter 30 års ensidig uttorkning. Beräknade profiler jämförs med resultatet från de tidigare fältmätningarna i B1.

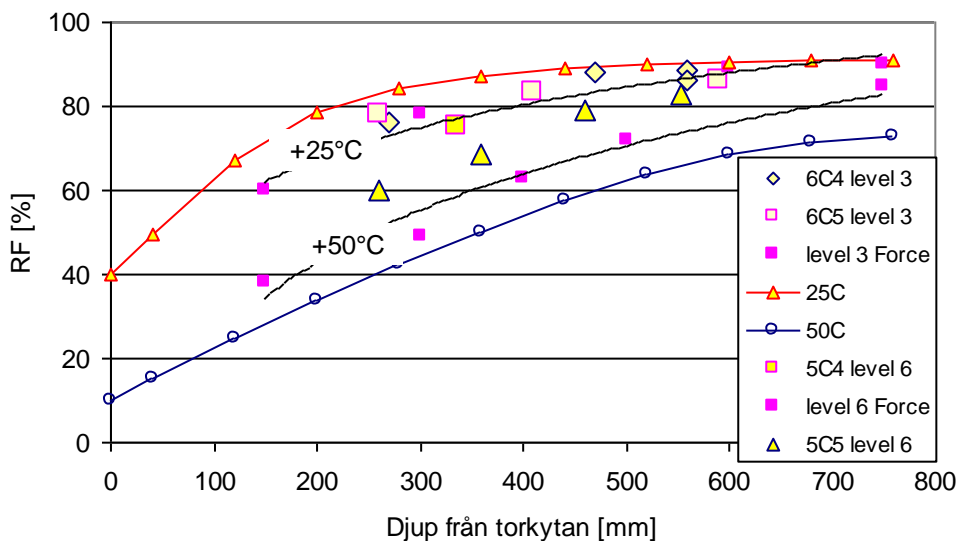


Fig. 6.1.1 Resultaten av de första beräkningarna för Barsebäck 1, som fördelningar av relativ fuktighet, jämförda med fältnätningar, dels i botten och dels i toppen av anläggningen, med temperaturnivåerna +25°C respektive +50°C.

Beräkningarna avspeglar de stora effekterna. Uttorkningen vid den högre temperaturen har nått betydligt längre, men RF på ytan är också antagits mycket lägre vid den högre temperaturen, enligt vad som sagts i kapitel 5.

Jämförelsen med B1-värden från fältnätningar visar avvikelser på upp till 10 % RF, med för hög RF vid +25°C och för låg RF vid +50°C. Det är uppenbart att förenklingarna i beräkningarna är för stora.

## 6.2 Beräkningar – inverkan av sorptionskurvans form

I de tidigare beräkningarna togs inte hänsyn till hur sorptionskurvan ser ut, mer i detalj. Formen på sorptionskurvan ger direkt vilken fuktkapacitet materialet har i olika fuktintervall och detta bör påverka uttorkningsberäkningen. På samma sätt bör en temperatureffekt på sorptionskurvan ha stor betydelse, genom att fukthalterna då är lägre vid samma RF, om temperaturen är högre.

Dessa effekter har prövats i ett antal beräkningar och beräkningsresultatet har jämförts med de mätta viktförlusterna för en av försöksserierna, den med tjockleken 250 mm. Detta visas nedan, med de använda sorptionskurvorna i särskilda figurer.

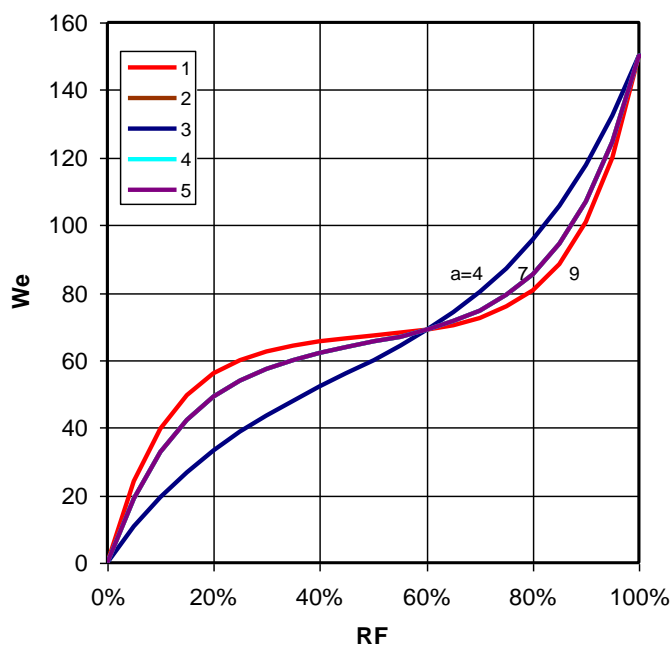


Fig. 6.2.1 Desorptionsisoterm med olika form, prövade i beräkningar.

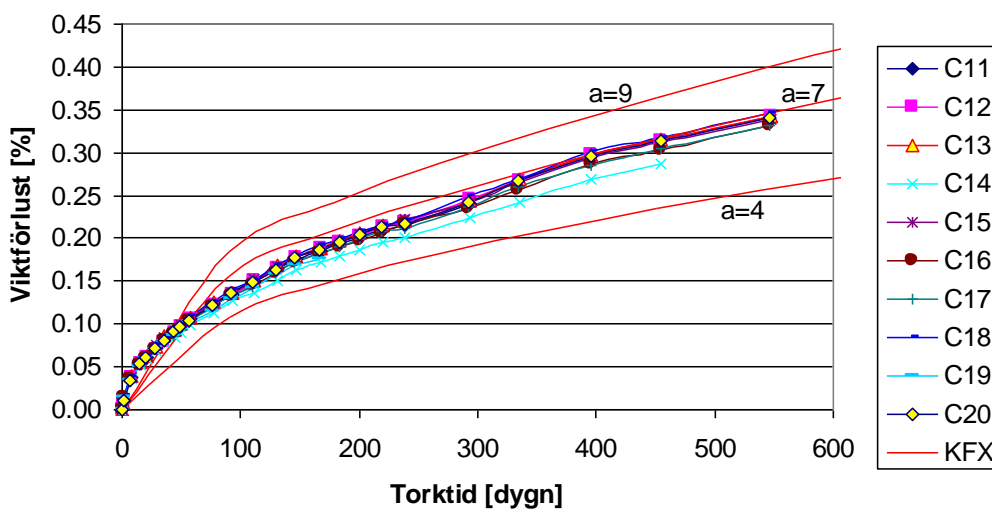


Fig. 6.2.2 Beräkningsresultat (kurvor utan punkter) med olika form på desorptionsisotermerna jämförda med resultat från laboratorieexperimenten vid +20°C med tjockleken 250 mm

Kurvformen som motsvaras av värdet 7 för parametern  $a$  ger uppenbarligen bäst överensstämmelse med mätningarna. Parametern  $a$  har därför låsts till  $a = 7$  i fortsättningen.

Temperatureffekten på sorptionskurvan prövades därefter genom att välja en lägre liggande desorptionsisoterm vid +50°C, se figur 6.2.3. Denna karakteriseras av fukthalten  $w_{60}$  vid 60 % RF. Resultatet visas i figur 6.2.4.

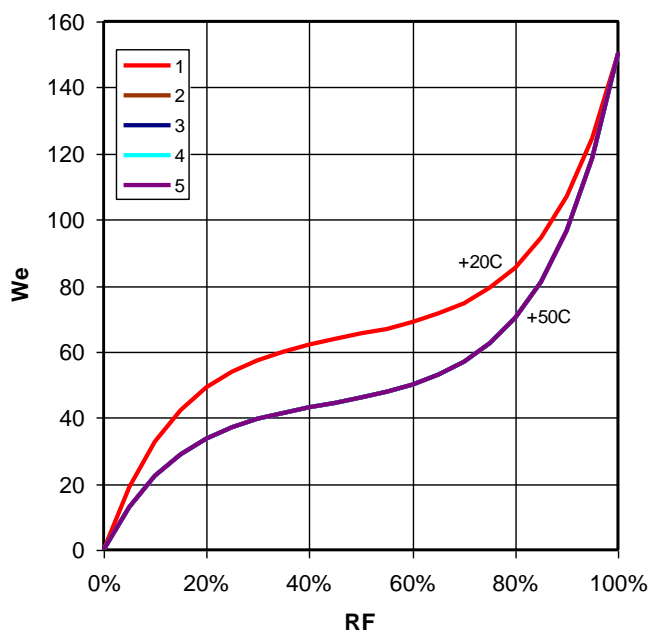


Fig. 6.2.3 Desorptionsisotermers med temperaturberoende, prövade i beräkningar.

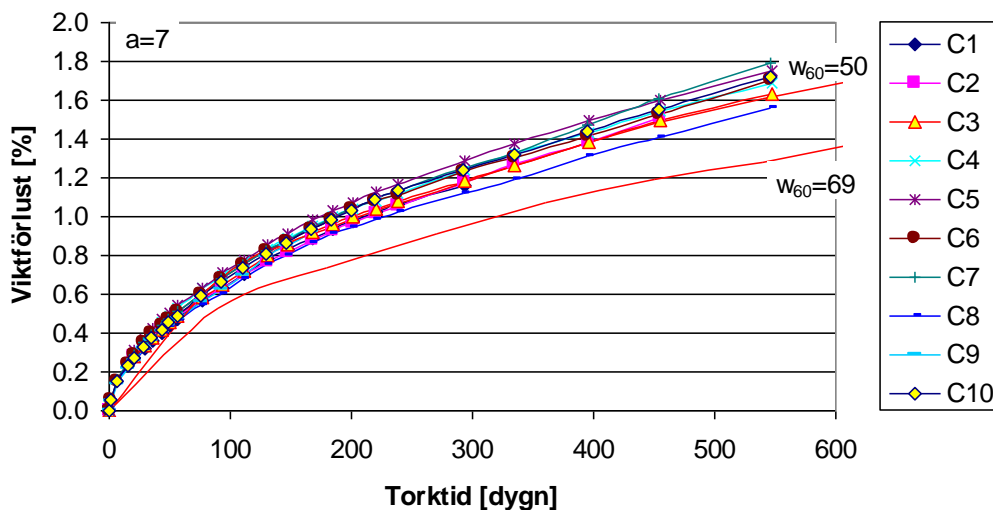


Fig. 6.2.4 Beräkningsresultat (kurvor utan punkter) med temperaturberoende hos desorptionskurvan, dvs olika fukthalt vid 60 % RF, jämförda med resultat från laboratorieexperimenten vid +50°C med tjockleken 250 mm

Av figur 6.2.4 framgår tydligt vilken effekt temperaturberoendet hos sorptionskurvan får. Används samma sorptionskurva som för +20°C, blir viktförlusten alldeles för liten.

För beräkningsmodellen används därför i fortsättningen materialegenskaper som ges av

- desorptionsisoterm med temperaturberoende enligt figur 6.2.3.
- fukttransportkoefficient utan temperaturberoende, med fuktberoende och absolutnivå enligt nedanstående figur.

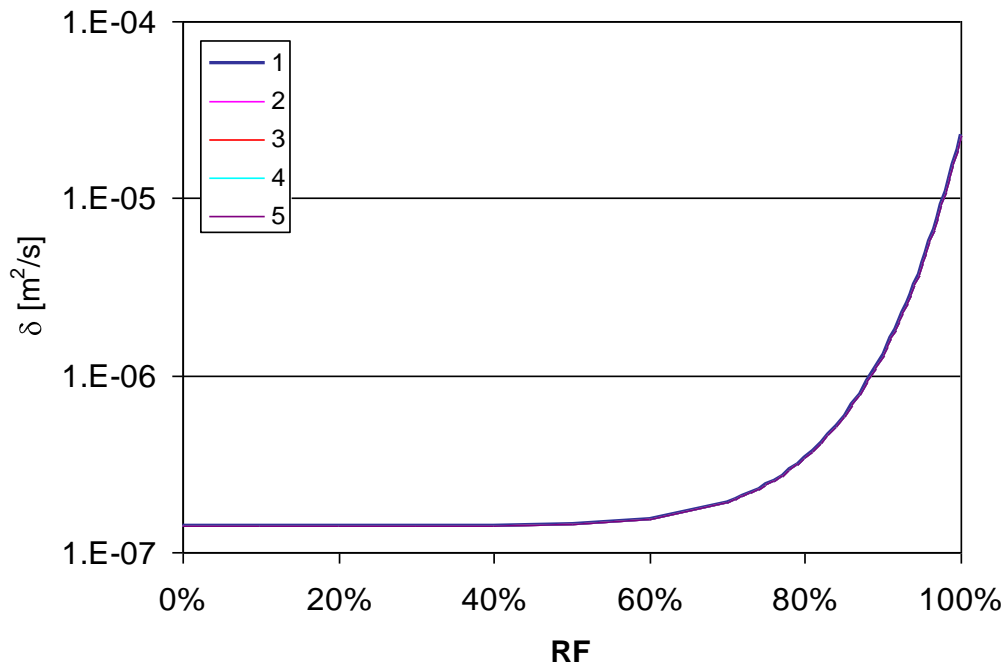


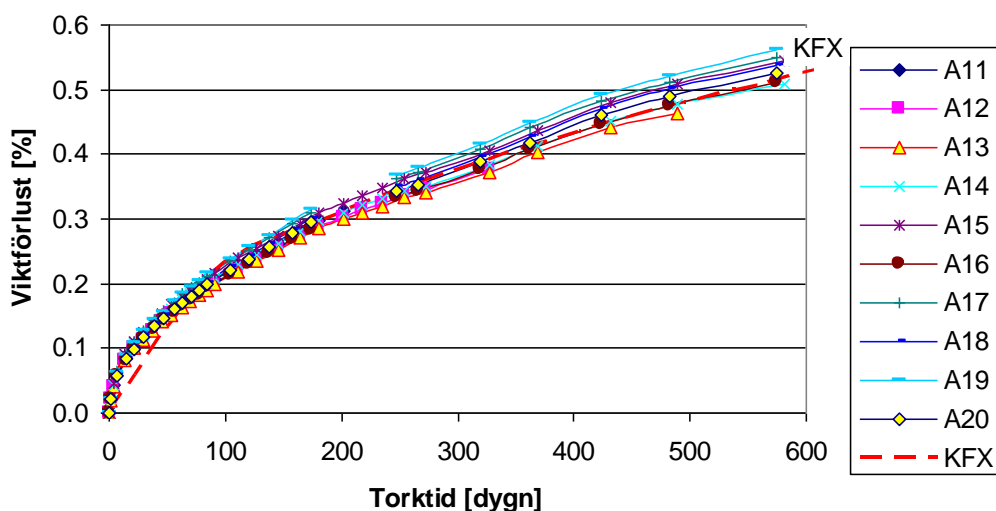
Fig. 6.2.5 Fukttransportkoefficient, utan temperaturberoende, prövad i de tidigare beräkningarna. Baseras på data från Hedenblad (1993) och data i kapitel 3.

Båda dessa materialegenskaper, som ger utmärkt överensstämmelse med en del av laboratorieexperimenten stämmer bra med mätta egenskaper! I nästa avsnitt prövas de mot övriga laboratorieexperiment.

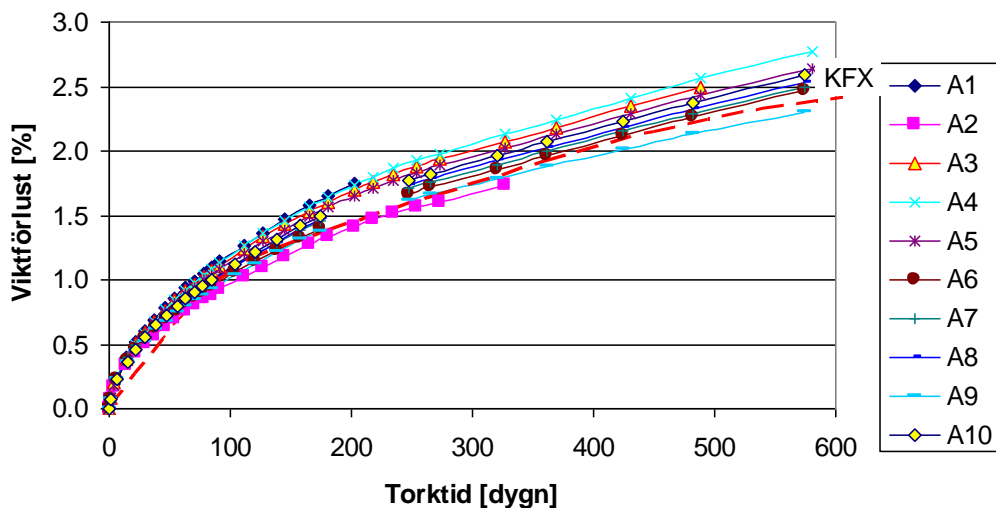
### 6.3 Jämförelser laboriemätningar - beräkningar

Materialegenskaperna "kalibrerades" ovan mot ett par uppmätta viktförluster. Här görs en jämförelse med övriga viktförluster och med uppmätta RF-profiler!

#### 6.3.1 Experiment vs. beräkningar, 170 mm. Viktförluster



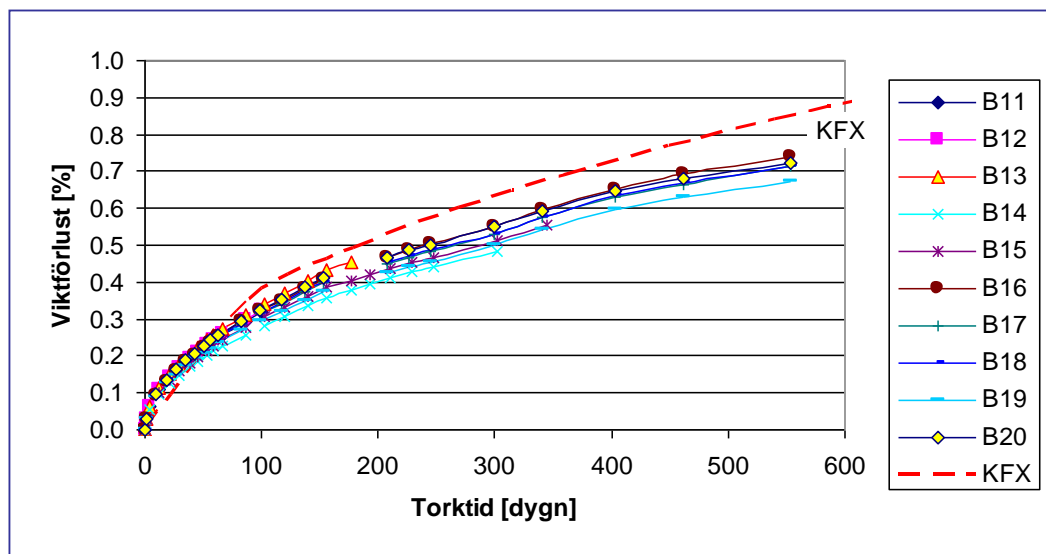
+20°C 170 mm



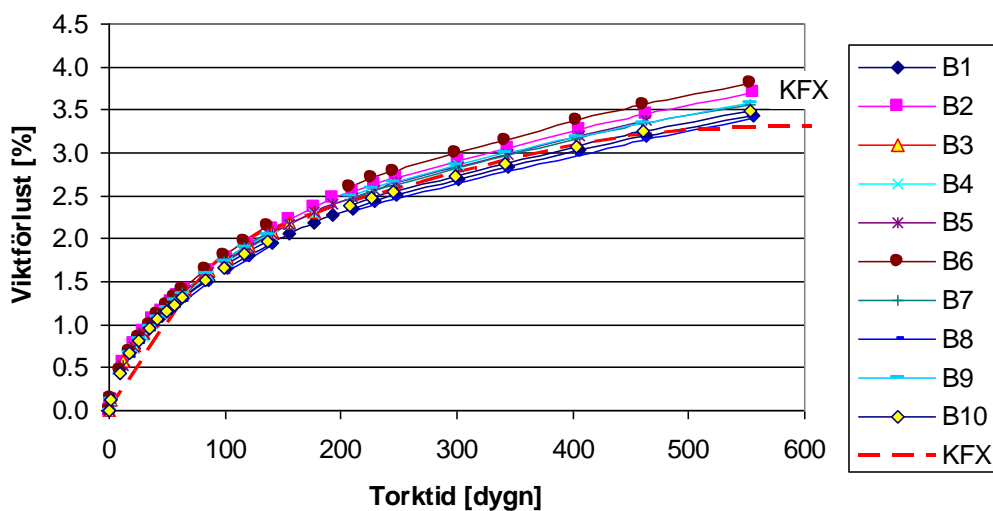
+50°C 170 mm

Fig. 6.3.1 Beräkningsresultat (kurvor utan punkter) jämförda med resultat från laborieexperimenten med tjockleken 170 mm

## 6.3.2 Experiment vs. beräkningar, 100 mm. Viktsförluster



+20°C 100 mm



+50°C 100 mm

Fig. 6.3.2 Beräkningsresultat (kurvor utan punkter) jämförda med resultat från laboratorieexperimenten med tjockleken 10§§0 mm

Beräkningarna för de övriga provkroppsdimensionerna överensstämmer förvånansvärt väl med mätningar av viktsförluster. Avvikelsen är störst för tjockleken 100 mm och temperaturen +20°C, där också kurvformen avviker. Övriga stämmer relativt väl.

### 6.3.3 Experiment vs. beräkningar, RF-profiler

Beräkningarna i 6.3.2 visas i nedanstående figurer som RF-profiler för de tre provkroppsdimensionerna. Beräkningsresultaten jämförs med uppmätta RF-profiler vid en torktid på 165-200 dygn.

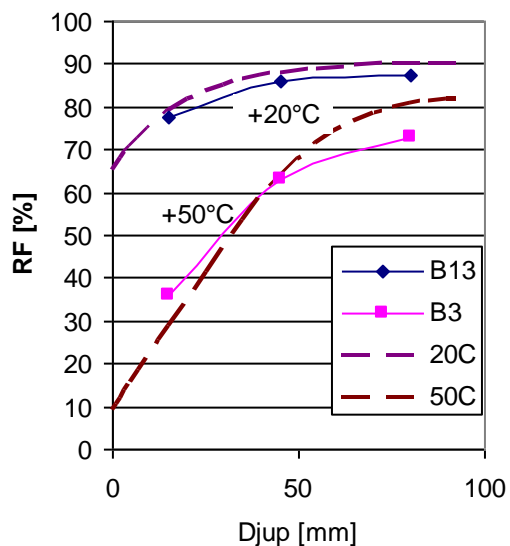


Fig. 6.3.3 Beräkningsresultat (streckade kurvor utan punkter) efter 170 dygns torkning jämförda med RF-resultat från laboratorieexperimenten med tjockleken 100 mm

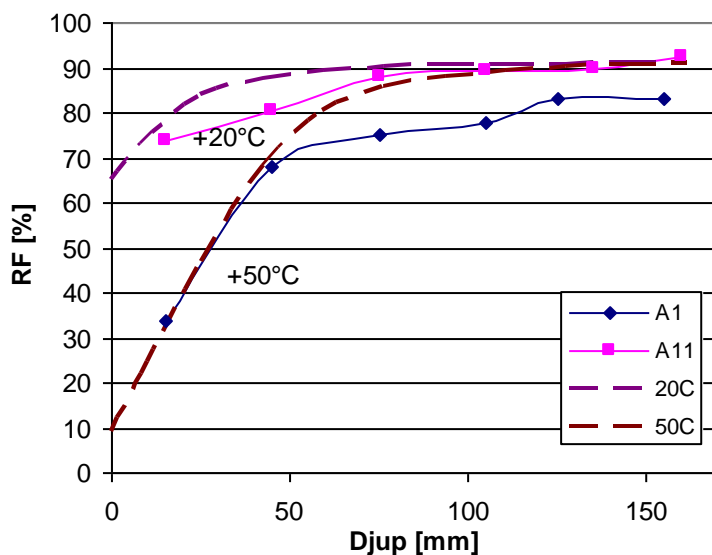


Fig. 6.3.4 Beräkningsresultat (streckade kurvor utan punkter) efter 200 dygns torkning jämförda med RF-resultat från laboratorieexperimenten med tjockleken 170 mm

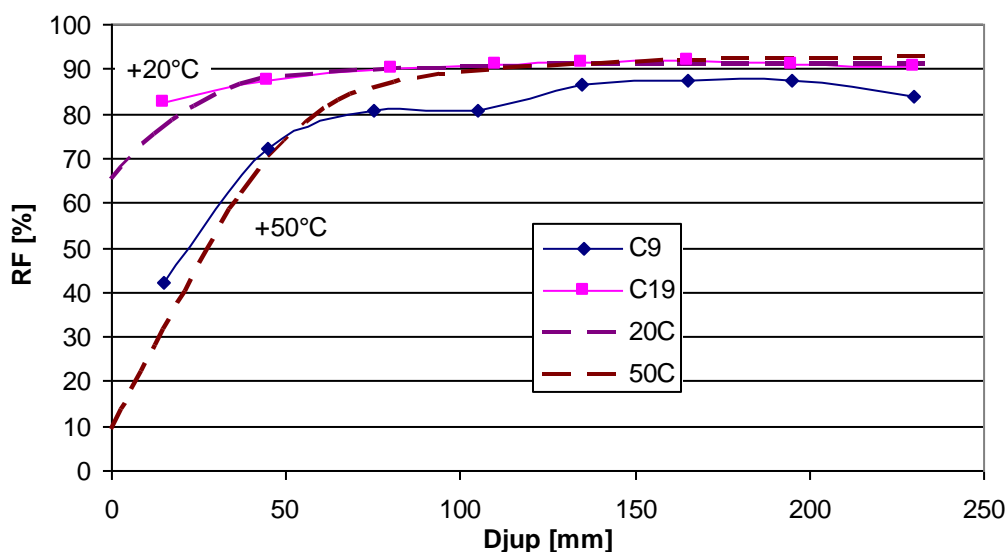


Fig. 6.3.5 Beräkningsresultat (streckade kurvor utan punkter) efter 165 dygns uttorkning jämförda med RF-resultat från laboratorieexperimenten med tjockleken 250 mm

Överensstämmelsen mellan beräkningar och mätningar är inte helt "perfekt", men ändå förvånansvärt god. Med tanke på att beräkningsmodellen prövats för så olika dimensioner, randvillkor och temperaturnivåer måste överensstämmelsen betraktas som mycket god.

Fukttransportkoefficientens fuktberoende är förmodligen något annorlunda än antaget. Vi har egentligen inte så säkert underlag att vi kan ändra på det.

## 6.4 Nya beräkningar för B1

Med de materialegenskaper som använts ovan vid kalibrering och jämförelser med resultaten från laboratorieexperimenten har nu nya beräkningar gjorts för B1. Då finns framför allt ett temperaturberoende hos sorptionskurvan med i beräkningsmodellen.

Nu används också klimatdata enligt modellen i kapitel 5 som randvillkor. Klimatdata från Sturup, som månadsmedelvärden under en 30-årsperiod, har använts tillsammans med ett litet fuktillskott på  $0.5 \text{ g/m}^3$  för att beräkna klimatet på betongytorna på olika nivåer i reaktorinneslutningen. Dessa klimatdata visas i figur 6.4.1 och i Tabell 6.4.1.

För beräkningsmodellen passas dessa klimatdata till en sinusvariation för att få ett medelvärde, en amplitud och en fasförskjutning för RF och temperatur på betongytorna.

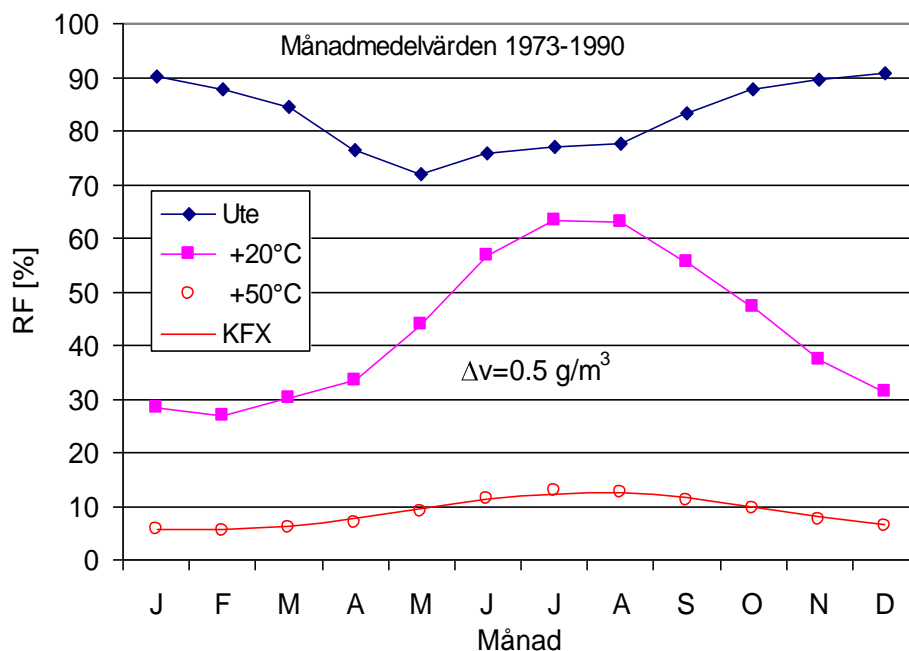


Fig. 6.4.1 Klimatdata som uteluftens RF för Sturup (överst), omräknade till RF på inneslutningens utsida vid olika yttemperaturer.

Tabell 6.4.1 Klimatdata från Sturup omräknade till RF på inneslutningsväggens utsida vid två temperaturnivåer

Dygn	Månad	Ånghalt FT [g/m <sup>3</sup> ]		RF Ute	RF vid +25°C	RF vid +50°C
		Sturup	0.5			
15.5	J	4.40	4.90	90.1	21.3	5.7
46.5	F	4.14	4.64	87.8	20.1	5.4
77.5	M	4.68	5.18	84.6	22.5	6.0
108.5	A	5.26	5.76	76.5	25.0	6.7
139.5	M	7.06	7.56	71.8	32.8	8.8
170.5	J	9.31	9.81	75.9	42.6	11.4
201.5	J	10.43	10.93	77.0	47.4	12.8
232.5	A	10.37	10.87	77.5	47.2	12.7
263.5	S	9.09	9.59	83.3	41.6	11.2
294.5	O	7.65	8.15	87.9	35.4	9.5
325.5	N	5.96	6.46	89.6	28.0	7.5
356.5	D	4.92	5.42	90.7	23.5	6.3
				MV	9.0	34.0
		Fas 145 dygn		Ampl	3.5	14.0

Beräkningsresultaten från dessa beräkningar, vid de två temperaturnivåerna, visas i figur 6.4.2 med en jämförelse med fältmätningarna och mätvärden från uttagna fuktprover.

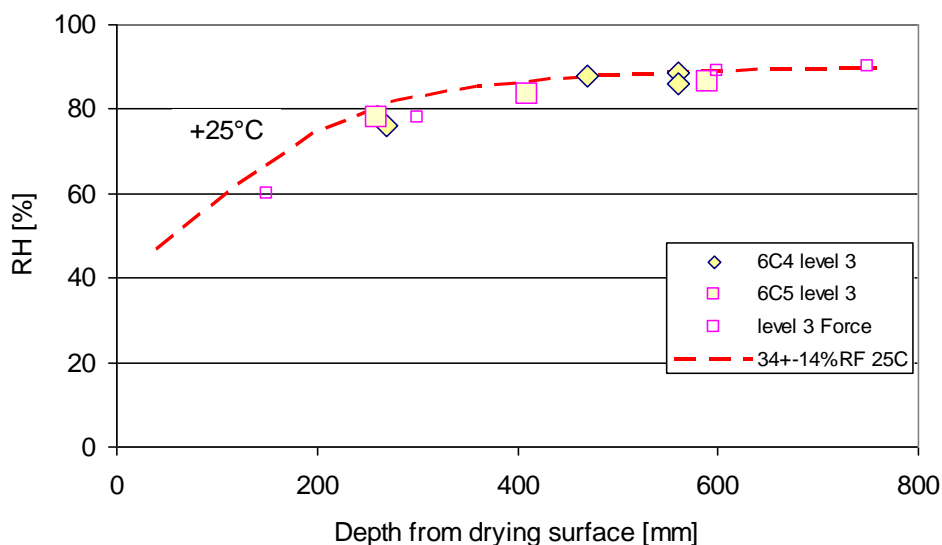


Fig. 6.4.2 Beräkningsresultat som RF-profiler (streckade kurvor) för B1 efter 30 års uttorkning vid temperaturen +25°C jämförda med RF-resultat från mätningarna.

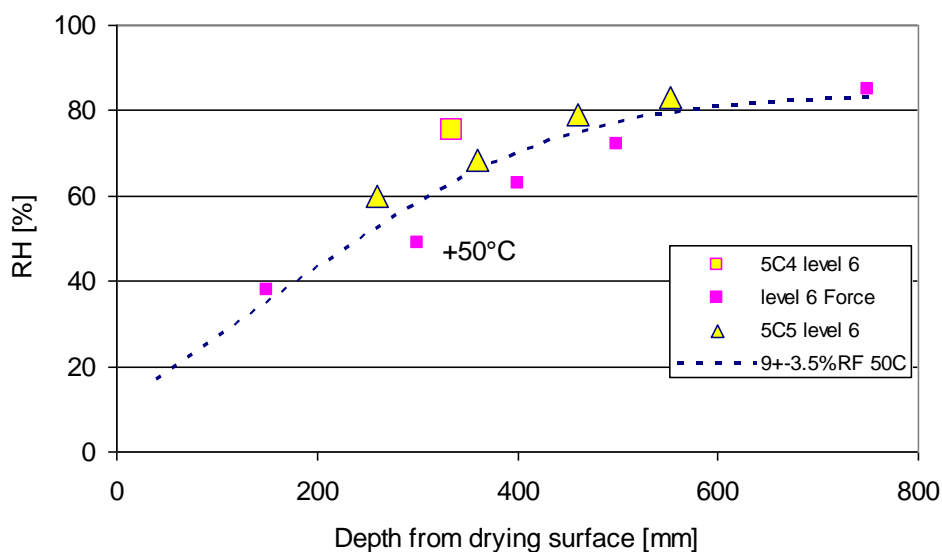


Fig. 6.4.3 Beräkningsresultat som RF-profiler (streckade kurvor) för B1 efter 30 års uttorkning vid temperaturen +50°C jämförda med RF-resultat från mätningarna.

Överensstämmelsen är nu betydligt bättre än i de förra beräkningarna. Avvikelsen mellan mätningar och beräkningar är som högst mindre än 10 % RF från medelvärdet. Detta får anses som tillräckligt bra, med tanke på att RF-mätningarna också har en viss osäkerhet. Beräkningsmodellen borde därför nu vara användbar för extrapolering. Sådana beräkningar visas i nästa avsnitt.

## 6.5 Fortsatta beräkningar för BWR-inneslutningar.

Nya beräkningar ha gjorts, för längre uttorkningstider än de 30 år som gäller för de hittillsvarande beräkningarna. Dessa beräkningar är främst avsedda att ge en viss fingervisning om hur det fortsatta uttorkningsförloppet, och därmed krympningsförloppet borde se ut för de svenska BWR-inneslutningarna. De drifttemperaturer som antas i beräkningarna motsvarar de man hade på Barsebäck 1 och 2. I andra BWR är drifttemperaturerna annorlunda, så t ex visas mätningarna i projektet, se kapitel 5, att drifttemperaturen i R1 är betydligt lägre än i B1 och B2.

Förutsättningarna är desamma som ovan, med samma materialegenskaper och samma randvillkor på ytorna, med årstidsvariationer motsvarande Sturupklimat.

Resultaten visas i nedanstående figurer, på flera olika sätt: som RF-profiler, som fukthaltsprofiler och som medelfukthaltsändringar med tiden.

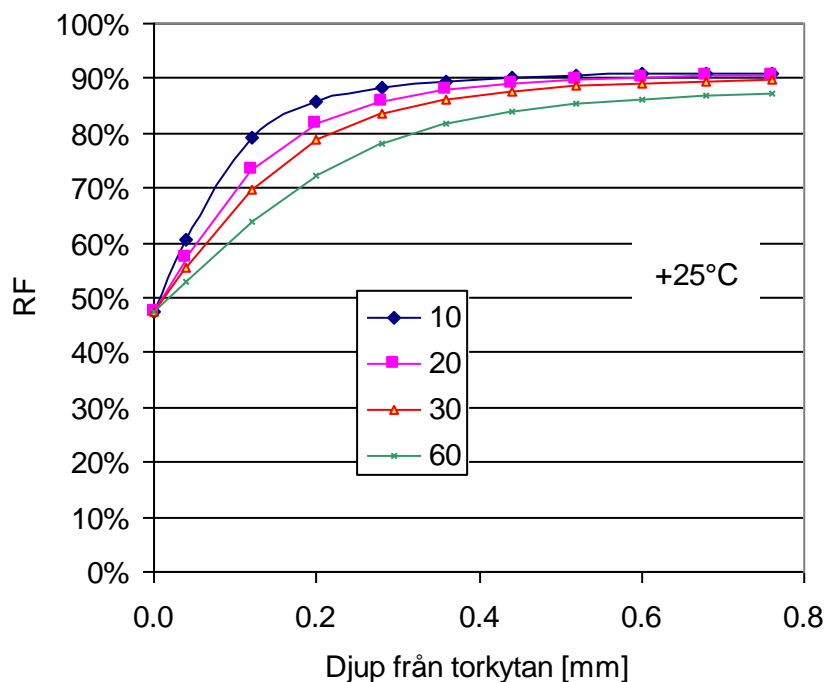


Fig. 6.5.1 Beräkningsresultat som RF-profiler för BWR-inneslutningar, motsvarande B1 & B2 och med Sturupsklimat, under 60 års uttorkning vid temperaturnivån +25°C

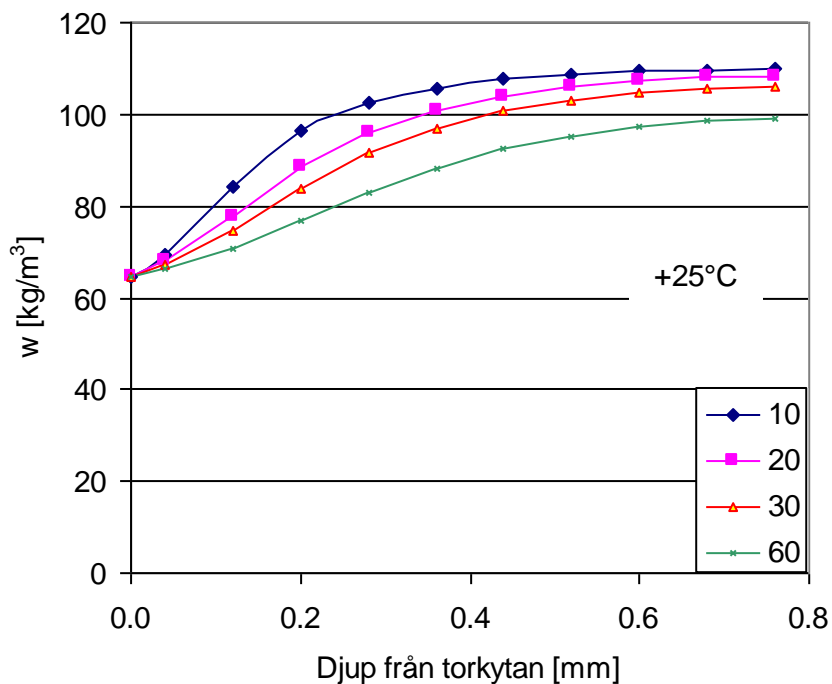


Fig. 6.5.2 Beräkningsresultat som fukthaltsprofiler för BWR-inneslutningar, motsvarande B1 & B2 och med Sturupsklimat, under 60 års uttorkning vid temperaturnivån +25°C

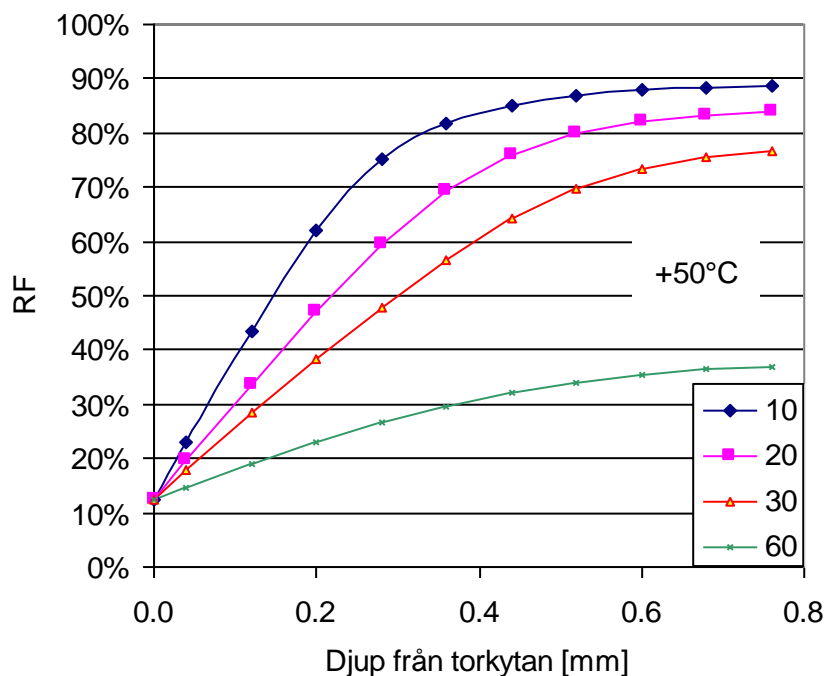


Fig. 6.5.3 Beräkningsresultat som RF-profiler för BWR-inneslutningar, motsvarande B1 & B2 och med Sturupsklimat, under 60 års uttorkning vid temperaturnivån +50°C

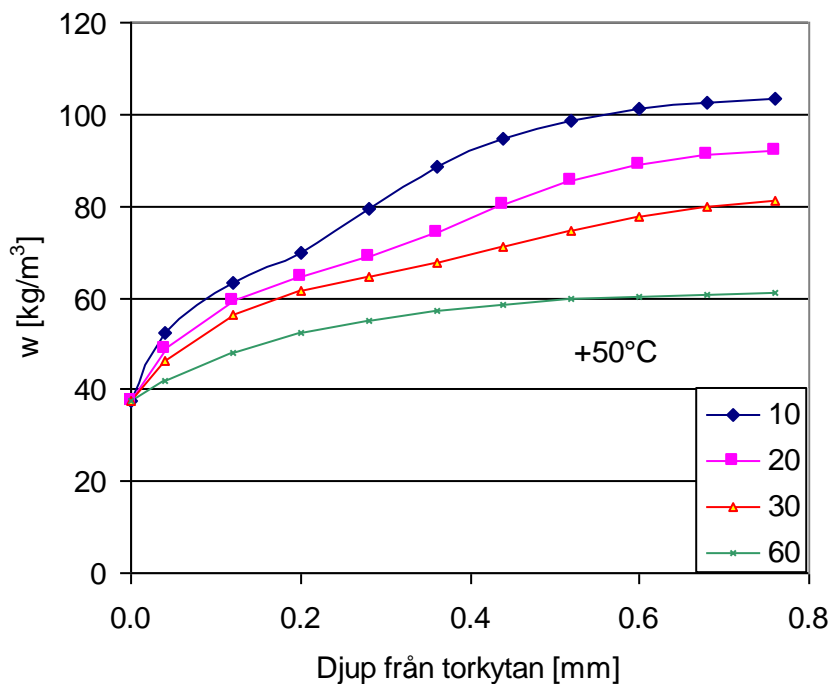


Fig. 6.5.4 Beräkningsresultat som fukthaltsprofiler för BWR-inneslutningar, motsvarande B1 & B2 och med Sturupsklimat, under 60 års uttorkning vid temperaturnivån +50°C

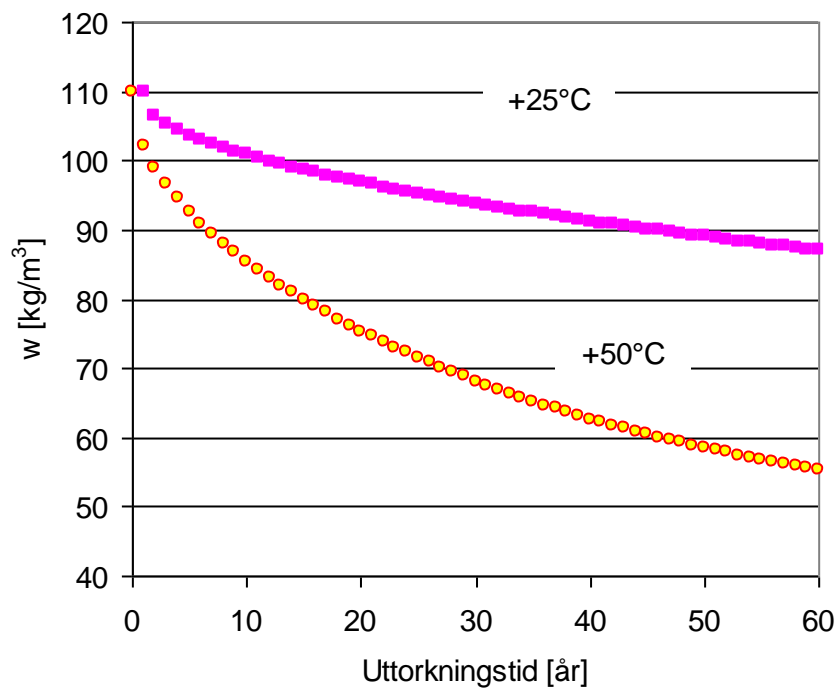


Fig. 6.5.5 Beräkningsresultat som medelfuktsändring med tiden för BWR-inneslutningar, motsvarande B1 & B2 och med Sturupsklimat, under 60 års uttorkning vid temperaturnivåerna +25°C och +50°C

Beräkningsresultaten, som RF-profiler, visar att uttorkningen efter 60 års drift fortfarande är långt från jämvikt med omgivningen, även om RF sjunkit till under 40 % efter 60 år vid den höga temperaturnivån. Vid +25°C är RF fortfarande över 85 % vid tätplåten!

Alla tidigare resultat har redovisats som RF-nivåer och RF-profiler. Nu ges också fukthaltsnivåer och fukthaltsprofiler, se figur 6.5.2 och 6.5.4. Här ses att fukthalten sjunker mycket fortare än RF i början av uttorkningsförloppet. Detta är naturligtvis en följd av sorptionskurvas form; den är mycket brant vid höga RF.

Redovisningen av medelfukthalt ger en bild av hur hela betonginneslutningen krymper och att det är långt kvar i tid tills vi närmar oss slutkrympningen. Skillnaden är stor mellan de kallaste och varmaste delarna av reaktorinneslutningen. En bedömning av krympningen kan göras helt enkelt genom att jämföra medelfukthalter med slutfukthalter, som relativa medelfukthaltsändringar. Vid +25°C har bara ca hälften av krympningen ägt rum efter 30 år. Vid +50°C blir slutkrympningen så mycket större och efter 30 år har ca 60 % av krympningen ägt rum.

## 6.6 Första beräkningar för R3

Beräkningar av de förväntade fuktförhållandena har gjorts för PWR-inneslutningsväggen i Ringhals 3 (R3), med samma beräkningsmodell, samma betong, samma materialegenskaper, men andra randvillkor. Som yttre randvillkor har månadsmedelvärden av lufttemperatur och luftfuktighet från Säve flygplats använts. Dessa har passats med sinuskurvor för att kunna användas som indata till KFX, se tabell 6.6.1 och figurerna 6.6.1 och 6.1.2.

Tabell 6.6.1 Klimatdata för Säve flygplats, passade till sinusvariationer med medelvärden, amplitud och fasförskjutning samt klimat på insidan av inneslutningsväggen

Dygn	Månad	T (°C)	v (g/m <sup>3</sup> )	RF (%)	Insida		
15.5	J	-1.6	3.97	86.6	T (°C)	Mv	40
46.5	F	-1.7	3.83	84.7		Ampl	8
77.5	M	1.1	4.36	81.3		fas	-5
108.5	A	5.2	5.26	76.2	RF (%)	Mv	30
139.5	M	10.9	7.09	71.9		Ampl	3.5
170.5	J	14.9	9.29	73.5		fas	90
201.5	J	16.2	10.36	75.9			
232.5	A	15.7	10.42	78.4			
263.5	S	12.2	8.81	81			
294.5	O	8.4	7.36	84.8			
325.5	N	3.7	5.55	85.9			
356.5	D	0.3	4.52	87.2			
	MV	7		80			
	Ampl	9		8			
	Fas	-5	(dygn)	200			

I tabellen framgår också klimatet på insidan av inneslutningsväggen. Dessa uppgifter härstammar från klimatmätningarna som redovisades i kapitel 5.

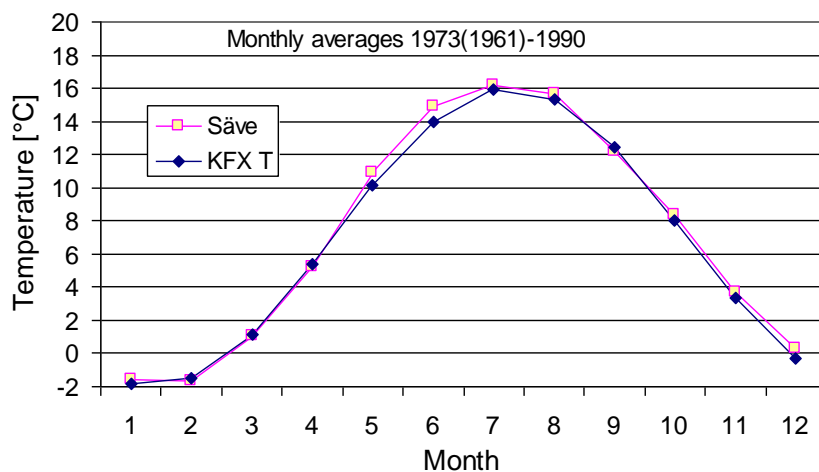


Fig. 6.6.1 Månadsmedelvärden av ca 20 års lufttemperaturer vid Säve flygplats, passade med en sinuskurva som indata till KFX.

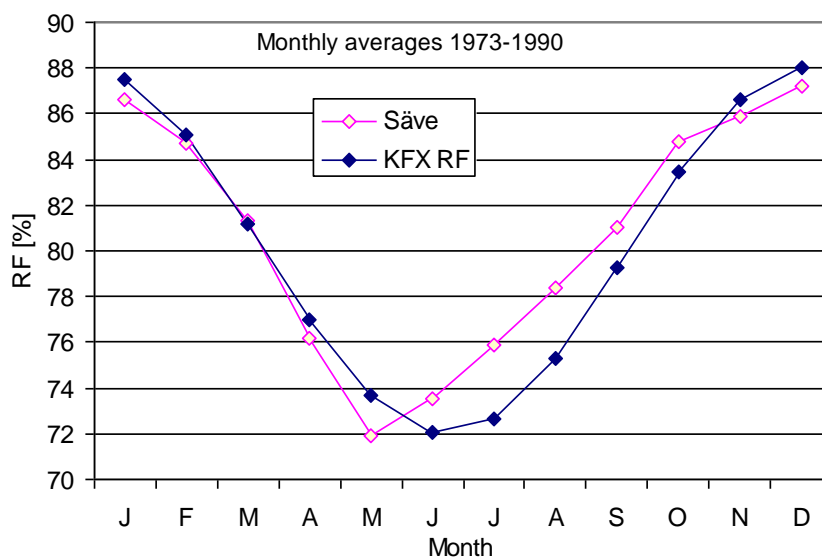


Fig. 6.6.2 Månadsmedelvärden av ca 20 års luftfuktigheter vid Säve flygplats, passade med en sinuskurva som indata till KFX.

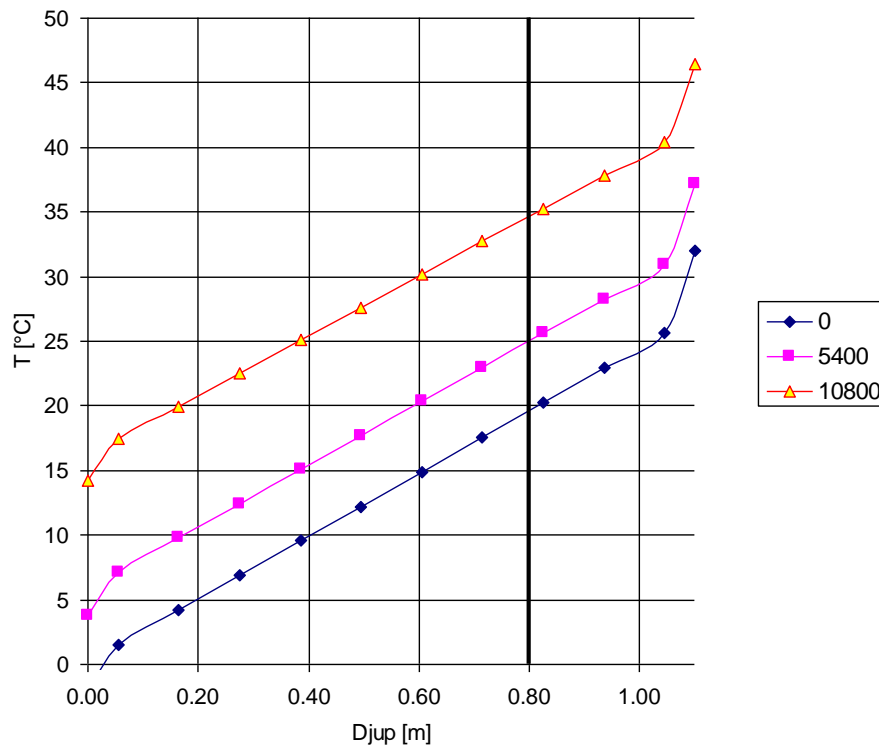


Fig. 6.6.3 Temperaturfördelningar genom inneslutningsväggen hos R3, under en årscykel.

Temperaturen varierar under en årscykel enligt figur 6.6.3. Temperaturvariationen på ut- och insida följer varandra eftersom de har samma fasförskjutning i förhållande till 1/1. Det är dock en temperaturgradient genom väggen under hela året, men något mindre sommartid naturligtvis. Observera att temperaturerna som visas på ytorna egentligen är i luften alldeles utanför ytorna. Temperaturprofilerna genom väggen är helt linjära, eftersom värmekonduktiviteten antagits vara konstant.

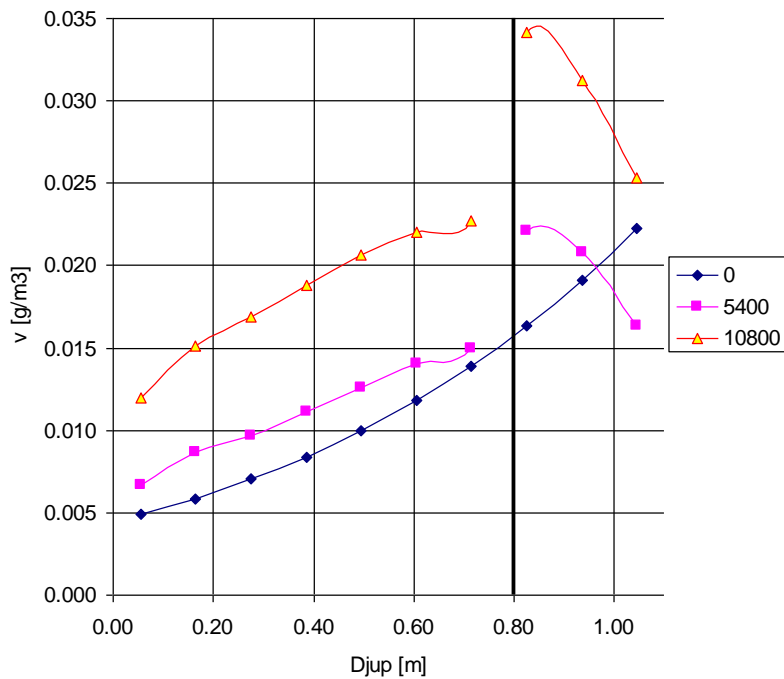


Fig. 6.6.4 Beräknade ånghaltsfördelningar i R3-inneslutningen vid olika uttorkningstider (0, 15 respektive 30 år)

Ånghalten genom väggen är till att börja med styrd av mättnadsånghalten och därmed av temperaturfördelningen. Det innebär att fukten vandrar utåt, dvs. inneslutningsväggen torkar ut utåt med hjälp av en temperaturgradient medan i missilskyddet vandrar fukten mot tätplåten. Så småningom "vänder" ånghaltsprofilen i missilskyddet så att detta torkar ut inåt. Denna uttorkning sker mot temperaturgradienten, vilket förklarar att den inte kommit så långt trots att missilskyddet är betydligt tunnare än inneslutningsväggen.

Uttorkningen av inneslutningsväggen utåt innebär att fukthalten, och därmed RF, sjunker vid tätplåten, se figur 6.6.5. På utsidan är det högre RF, vilket styrs av uteklimatet.

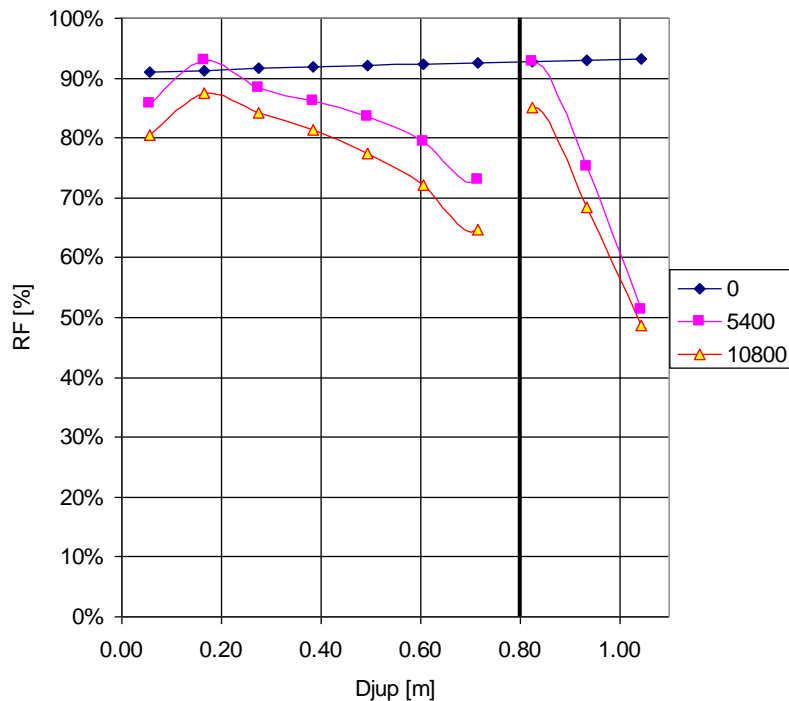


Fig. 6.6.5 Beräknade RF-fördelningar i R3-inneslutningern efter olika uttorkningstider (0, 15 respektive 30 år)

## 6.7 Slutsatser angående beräkningar

Beräkningsmodellen som tagits fram i projektet verkar stämma relativt väl, både med laboriemätningar och mätningar i Barsebäck 1 efter ca 30 års uttorkning. En styrka med modellen är att den baseras på indata som kvantifierats med oberoende mätningar. Det har inte behövts någon större passning av alla parametrar. Randvillkoren har kvantifierats med modellerna i kapitel 5 som baseras på fältmätningar under en årscykel. Materialegenskaperna har kvantifierats med separata mätningar av sorptionskurvor och fukttransportkoefficienter och deras temperaturberoende.

Modellen kan naturligtvis förbättras; det finns vissa frågetecken, särskilt rörande fukttransport under en temperaturgradient som i PWR-inneslutningarna. Om möjligt borde modellen verifieras mot data från PWR-verken. Den fortsatta kemiska bindningen av vatten till cementet har också beskrivits på ett förenklat sätt. Här behövs en betydligt mer komplicerad beräkningsmodell för att kunna beakta detta på ett helt korrekt sätt.

Modellen skulle sedan kunna användas på hela inneslutningar, och beskriva hur hela inneslutningen torkat/krympt hittills och kommer att torka/krympa i framtiden och därmed hur olika spännkablar tappat/tappar spännkraft med tiden.

## 7 Slutsatser

Uttorkning av betonginneslutningar för kärnkraftreaktorer är en extremt långsam process, beroende på dels att den aktuella betongen är relativt tät mot fukttransport och dels på grund av de grova dimensionerna, ca 0.8 m, med ensidig uttorkning. Inte ens i toppen av inneslutningsväggarna där drifttemperaturen kan nå upp till +50°C har uttorkningen kommit särskilt långt efter 30 år!

Uttorkningen styrs av temperaturnivå och temperaturgradienter. Här är det fundamentala skillnader mellan de två typerna av reaktorer. Temperaturnivån i en BWR påverkar relativa fuktigheten på betongytan på utsidan av inneslutningsväggen så att uttorkningen sker i så låga RF som ner mot 10%! Detta förekommer inte alls i PWR-inneslutningar, men där är det stället stora temperaturgradienter genom väggen. Utsidan står i nära jämvikt med uteklimatet. För dessa klimatförhållanden har klimatmodeller tagits fram som duger för prognoser både bakåt och framåt i tiden.

Beräkningsmodellen för uttorkning som tagits fram i projektet verkar stämma relativt väl, både med laboratoriemätningar och mätningar i Barsebäck 1 efter ca 30 års uttorkning. En styrka med modellen är att den baseras på indata som kvantifierats med oberoende mätningar. Det har inte behövts någon större passning av alla parametrar. Randvillkoren har kvantifierats med klimatmodeller som baseras på fältmätningar under en årscykel. Materialegenskaperna har kvantifierats med separata mätningar av sorptionskurvor och fukttransportkoefficienter och deras temperaturberoende. Det är naturligtvis en stor fördel att det funnits bra fältmätningssdata att jämföra med.

Modellen kan naturligtvis förbättras; det finns vissa frågetecken, särskilt rörande fukttransport under en temperaturgradient som i PWR-inneslutningarna. Om möjligt borde modellen verifieras mot data från PWR-verken. Den fortsatta kemiska bindningen av vatten till cementet har också beskrivits på ett förenklat sätt. Här behövs en betydligt mer komplicerad beräkningsmodell för att kunna beakta detta på ett helt korrekt sätt.

Det finns stora möjligheter att använda beräkningsmodellen för att kvantifiera uttorkning och krympning mera noggrant för de svenska BWR- och PWR-inneslutningarna. Med hjälp av klimatmodellerna, uppgifter om drifttemperaturer och det lokala klimatet kan klimatförhållandena på betongytorna förutsägas. Med detta som randvillkor och kunskap om aktuell betongsammansättning bör uttorkningen kunna förutsägas relativt väl. Den största begränsningen ligger i kunskapsbristen rörande den fukttransport under temperaturgradient som äger rum i PWR-inneslutningarna.

Modellen skulle sedan kunna användas på hela inneslutningar, och beskriva hur hela inneslutningen torkat/krympt hittills och kommer att torka/krympa i framtiden och därmed hur olika spännkablar tappat/tappar spännkraft med tiden.

## 8 Publikationer, referenser, litteratur

### 8.1 Projektpublikationer internationellt

Inom projektet har nedanstående artiklar publicerats.

1. **The moisture conditions of nuclear reactor concrete containment walls – an example for a BWR reactor.** NUCPERF 2006 – EFC Event n° 284: Workshop on "Corrosion and Long Term Performance of Concrete in NPP and Waste Facilities", 27-30 March 2006 - Cadarache – France. (L-O Nilsson & P Johansson)
2. **The moisture conditions of nuclear reactor concrete containment walls – an example for a BWR reactor.** J. Phys. IV France 136 (2006) 141-150 (L-O Nilsson & P Johansson)
3. **Climatic conditions at the surfaces of concrete containments – examples for two BWR and PWR reactors.** The 19th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 19), August 12-17, Toronto, Canada (P. Johansson & L-O Nilsson)
4. **Drying of reactor containment walls of concrete during past and future decades.** The 19th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 19), August 12-17, Toronto, Canada (L-O Nilsson)
5. **Climatic conditions at the surfaces of concrete containments – examples for two BWR and PWR reactors.** Nuclear Engineering and Design (under publicering) (P. Johansson & L-O Nilsson)
6. **Drying of reactor containment walls of concrete during past and future decades.** Nuclear Engineering and Design (under publicering) (L-O Nilsson)

### 8.2 Referenser

Anderson, P. Thirty years of measured prestress at Swedish nuclear reactor containments. Nuclear Engineering and Design, Volume 235, Issue 21, October 2005, Pages 2323-2336

DMI.dk (2008), Danmarks Meteorologiske Institut, 2008-05-25, <http://www.dmi.dk/dmi/index/danmark/oversigter/klimanormaler.htm>

Fredin, H. & Skoog, H. "Moisture measurement in concrete – Temperature effects and the correction procedure at RH-measurement". Report TVBM-5057, Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund 2005

Harderup, E (1999) "Klimatdata för fuktberäkningar", Byggnadsfysik, LTH, Lund

Hedenblad, G. "Moisture permeability of mature concrete, cement mortar and cement paste". Report TVBM-1014, Laboratory of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund 1993

Helsing Atlassi, E. "A quantitative thermogravimetric study on the non-evaporable water in mature silica fume concrete". Publication P-93:6, Building Materials, Chalmers University of Technology, Göteborg 1993

Hilsdorf, H.K. "A method to estimate the water content of concrete shields". Nuclear Engineering 6 (1967)

Janz M., (2000), Moisture transport and fixation in porous materials at high moisture levels. Doktorsavhandling, Avd Byggnadsmaterial, LTH, Lund.

Nilsson, L-O (2005) "Materialanalyser av prover från reaktorinneslutningen", B1. Resultatredovisning 2004-09-22. Avd Byggnadsmaterial, LTH

Nilsson, L.-O. "Hygroscopic moisture in concrete – drying, measurements and related material properties", report TVBM-1003, Laboratory of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund 1980

Nilsson, L.-O. "Temperature effects in relative humidity measurements on concrete - Some preliminary studies". Contribution to the Nordic Symposium on Building Physics, Lund, August 1987. Document D13:1988, Swedish Council for Building Research, Stockholm, Sweden 1988.

Nilsson, L.-O. "Durability concept; Pore structure and transport processes". Chapter for Advanced Concrete Technology Book, Vol 2 – Durability, Butterworth Heinemann, London 2002.

Nilsson, L.-O. "On the role of moisture in degradation of concrete structures". Keynote paper in Theme 1: Degradation of Concrete Structures, Event 5: Repair & Renovation of Concrete Structures, Global Construction: Ultimate Concrete Opportunities, July 5-7, 2005, Dundee, Scotland

Nilsson, L-O & Mjörnell, K (2005) "A macro-model for self-desiccation in high performance concrete", Fourth International Research Seminar on Self-desiccation and its importance in concrete technology, Gaithersburg, Maryland, USA, June 20, 2005

Nilsson, L.-O. & Johansson, P. "The moisture conditions of nuclear reactor concrete containment walls – an example for a BWR reactor". NUCPERF 2006 – EFC Event n° 284: Workshop on "Corrosion and Long Term Performance of Concrete in NPP and Waste Facilities", 27-30 March 2006 - Cadarache – France.

Nilsson, L.-O. "Modelling moisture conditions in cementitious materials – some present challenges". Keynote paper at 2nd International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering, September 11-13, 2006, Quebec City, Canada.

Norling-Mjörnell, K. (1997) "Moisture Conditions in High Performance Concrete", doktorsavhandling, publikation P:97.3, Institutionen för Byggnadsmaterial, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg

Qin, M (2007) Study of the hygrothermal transfer phenomenon in building envelopes. PhD-avhandling, Université La Rochelle.

Shaw, P. "Material testing project at Barsebäck 1, Description of material testing" (in Swedish), Force Technology, Denmark 2003-10-29.

### 8.3 Litteraturlista

Inom projektet har en litteratursökning gjorts inom området "Fukttransport i betong vid höga temperaturer och vid temperaturgradient". Den gav följande

- [1] H.K. Hilsdorf. **A method to estimate the water content of concrete shields.** Nuclear Engineering 6 (1967)
- [2] R.L.Yuan, H.K. Hilsdorf & Kesler. **Effect of temperature on the drying of concrete.** TAM report No. 316, University of Illinois, Urbana 1968
- [3] I.R.G. Lowe, B.P. Hughes & J. Walker. **The diffusion of water in concrete at 30°C.** Cement & Concrete Research 1 (1971) 547-557
- [4] Z. P. Bažant & L.J. Najjar. **Non-linear water diffusion in non-saturated concrete.** Materials & Structures, 5 (1972), No. 25, 3-20
- [5] W.H. Bray & E.J. Sellevold. **Water sorption properties of hardened cement paste cured or stored at elevated temperatures.** Cement & Concrete Research 3(1973) 723-728
- [6] G.L. England & M.E. Skipper. **On the prediction of moisture movement in heated concrete.** 2nd Int Conf on Struct Mech in Reactor Technology, H 6/2 Berlin 10-14 Sept.1973, vol. 3 Reactor Vessels
- [7] J.Hundt & P. Schimmelwitz. **Heat and moisture transfer in concrete under effect of a temperature gradient.** Paper H 6/1, 2nd International Conference on Reactor Technology, Berlin, 1973
- [8] J. Hundt. **Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles.** Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 256, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn kG, Berlin 1975
- [9] J.E. McDonald. **Moisture migration in concrete.** Technical Report C-75-1, Concrete Laboratory, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg 1975
- [10] A. Zeilinger & R. Hübner. **Moisture transport in a concrete of the SNR-300 investigated by neutron transmission.** Kerntechnik 18 (1976) No. 3 119-125
- [11] O. Beijer. **Drying of concrete specimens at excess temperature** (in Swedish). Swedish Cement & Concrete Research Institute, Research Report 5:76 1976
- [12] K. Kiessl & K. Gertis. **Nichtisothermer Feuchtetransport in dickwandigen Betonteilen von Reaktordruckbehältern.** # 280 Beuth 1977
- [13] J. Hundt. **Zur Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton.** Ibid
- [14] J. Hundt. **Heat and moisture transfer in concrete under the influence of temperature.** H 1/3, referens saknas ≥1978, 1-8
- [15] Z. P. Bažant & S. H. Fistedis. **Dried hot concrete vessel for nuclear reactors: Proposal of a new design concept.** Nuclear Engineering and Design 47 (1978) 317-324.
- [16] Z. P. Bažant, J-C Chern, W Thonguthai **Finite element program for moisture and heat transfer in heated concrete.** Nuclear Engineering and Design 68 (1981) 61-70.
- [17] A. Dayan & E. L. Gluekler. **Heat and mass transfer within an intensely heated concrete slab.** Int. J. Heat Mass Transfer 25 (1982) No. 10, 1461-1467
- [18] C.L. Kamp, P.E. Roelfstra & F.H. Wittmann. **Mechanisms of moisture transfer through porous materials.** Transactions of the 9th Int Conf on Structural Mechanics in Reactor Technology, Lausanne 17-21 August 1987, 157-184
- [19] W. Manns & B. Neubert. **Wassergehalt von Beton bei Temperaturen von 100°C bis 500°C im Bereich des Wasserdampfpartialdruckes von 0 bis 5,0 MPa.** Heft 403 Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin 1989
- [20] U. Schneider & H. J. Herbst. **Permeabilität und Porosität von Beton bei hohen Temperaturen.** Ibid.

- [21] G.L. England. **Moisture migration in thick concrete walls for temperatures above 100°C**. 3rd Int Workshop on "Behaviour of Concrete Elements Under Thermal and Hygral Gradients", Weimar 8-9 October 1992
- [22] G.L. England, N. Khoylou. **Moisture flow in concrete under steady state non-uniform temperature states: experimental observations and theoretical modelling**. Nuclear Engineering and Design 155 (1995) 83-107.
- [23] H.-P. Lien, F.H. Wittmann. **Coupled heat and mass transfer in concrete elements at elevated temperatures**. Nuclear Engineering and Design 156 (1995) 109-119.
- [24] T Numao, H Mihashi, K Fukuzawa. **Moisture migration and drying properties of hardened cement paste and mortar**. Nuclear Engineering and Design 156 (1995) 139-146.
- [25] P. Majumdar, A. Gupta, A. Marchertas. **Moisture propagation and resulting stress in heated concrete walls**. Nuclear Engineering and Design 156 (1995) 147- 158.
- [26] H-W Reinhardt & M. Jooss. **Permeability, diffusion and capillary absorption of concrete at elevated temperature in the service range**. Otto-Graf Journal 9 (1998) 34-47
- [27] H.-P. Lien, F.H. Wittmann. **Mass transfer in inhomogeneous porous media under thermal gradients**. Nuclear Engineering and Design 179 (1998) 179–189.
- [28] J. Sercombe, C. Gallé, S. Durand & P. Bouniol. **On the importance of thermal gradients in the spalling of high-strength concrete**, Proc. of the 14th Engineering Mechanics Conference, ASCE, Austin, Texas, USA, 21-24 May, 2000.
- [29] M. Shekarchi, G. Debicki, Y. Billard and R. Briot. **Nondestructive Monitoring Technique Based on Electrical Resistivity for Moisture Condition in Containment Structures**. Paper # 1409, Transactions, SMiRT 16, Washington DC, August 2001
- [30] G. Ranc, J. Sercombe & C. Imbert. **Pore pressure and thermo-hydro-mechanical behavior of concrete submitted to high temperatures: structural experiments and material properties**, Proc. of the 2nd Biot Conference on Poromechanics (Poromechanics II), Auriault et al (eds.), pp. 293-298, Grenoble, France, 26 –28 August, 2002.
- [31] W. Dridi, B. Sudret & T. Lassabatere. **Experimental and numerical analysis of transport in a containment vessel**. Ibid.
- [32] C. Chavant, S: Granet & D Le Boulch. **Modeling of a nuclear waste disposal: Numerical and practical aspects**. Ibid. 145-150
- [33] M. Shekarchi, G. Debicki, L. Granger, Y. Billard. **Study of leaktightness integrity of containment wall without liner in high performance concrete under accidental conditions—I. Experimentation** Nuclear Engineering and Design 213 (2002) 1–9.
- [34] Y. Ichikawa, G.L. England. **Prediction of moisture migration and pore pressure build-up in concrete at high temperatures**. Nuclear Engineering and Design 228 (2004) 245–259.
- [35] Y. Billard, M. Shekarchi, G. Debicki, L. Granger, D. Chauvel. **Heat and mass transfers in a concrete wall with composite liner under accidental conditions**. Nuclear Engineering and Design 228 (2004) 261–272.
- [36] H. Colina and J. Sercombe. **Transient thermal creep of concrete in service conditions at temperatures up to 300°C**. Magazine of Concrete Research (2004), 56, No. 10, December, 559–574.
- [37] I. Janotka, T. Nürnbergerová. **Effect of temperature on structural quality of the cement paste and high-strength concrete with silica fume**. Nuclear Engineering and Design 235 (2005) 2019–2032.
- [38] V. Leivo & J. Rantala. **Moisture behaviour of a massive concrete slab with a low temperature floor heating system during the initial drying period**. Construction and Building Materials 19 (2005) 297-305.