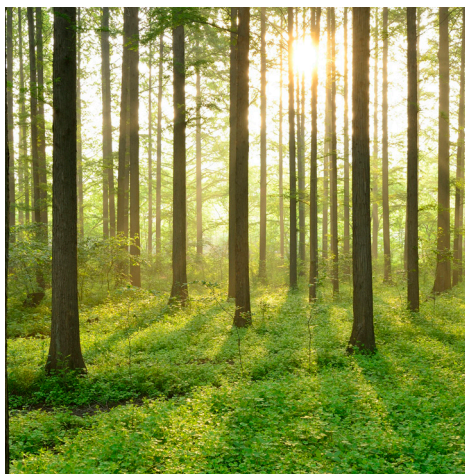


UTVÄRDERING AV UTVECKLINGSSTATUS FÖR FUKTANALYSMETODER I BETONG

RAPPORT 2016:242



BETONGTEKNISKT PROGRAM
KÄRNKRAFT



Utvärdering av utvecklingsstatus för fuktanalysmetoder

Utvärdering och uppföljning av projektet CONMOD del II

MAGNUS ÅHS OCH LARS-OLOF NILSSON, LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA

ISBN 978-91-7673-242-7 | © 2016 ENERGIFORSK

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Betongens egenskaper är starkt kopplade till den fukthalt som råder i konstruktionen, och exempelvis risken för armeringskorrosion och betongens strålskyddande förmåga påverkas. Det är därför viktigt att ha kännedom om hur snabbt uttorkningen sker i reaktorinneslutningen. Kunskapen om hur reaktorinneslutningen, som är en mycket tjock betongkonstruktion och som dessutom innehåller en ingjuten stålplåt, torkar ut har varit begränsad.

Inom ramen för EU-projektet CONMOD (2002-2005) genomfördes olika typer av provningar och modelleringar på Barsebäck, däribland tester av ett antal modeller för uttorkning av reaktorinneslutningen. I denna rapport redovisas en genomlysning av dessa fuktanalysmodeller, för att undersöka hur dessa modeller har utvecklats sedan det CONMOD-projektet genomfördes och om det finns skäl för att initiera nya fullskaletester i Barsebäck.

Detta projekt ingår i Energiforsks betongtekniska program Kärnkraft, som driver forskning kring betongkonstruktioner inom kärnkraftverk. Det övergripande målet med det betongtekniska programmet är att säkerställa avsedd livslängd och hög tillgänglighet för svenska kärnkraftverk med bibehållen säkerhet och för att kunna driva en effektiv förvaltning. Intressenterna bakom Betongtekniskt program kärnkraft är Vattenfall, Uniper, Fortum, Teollisuuden Voima Oy (TVO) i Finland, Skellefteå Kraft, Karlstads Energi samt Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM).

Sammanfattning

Rapporten avser följa upp och utvärdera de resultat som kom från projektet CONMOD rörande fuktanalyser. I de sju rapporterna som har utgjort underlag för denna undersökning har står det generellt sett väldigt lite om fukt med två undantag. De två rapporter där det står mest om fukt och fuktmodellering, är dels i bilaga A5.4, i rapporten "Barsebäck NPP- Material testing project", Materialanalyser av prover från reaktorinneslutningen B1 och dels i rapporten "Förändringsprocesser i reaktorinneslutningar". I den här rapporten belyses vilka mätningar som är utförda och var på reaktorinneslutningen dessa mätningar är utförda. Ett antal olika fuktanalysmetoder har tillämpats, bland annat har relativ fuktighet mätts i borrade mätthål, på uttagna provbitar från borrkärnor, kapillär mättnadsgrad har mätts på provbitar, mängden kemiskt bundet vatten har bestämts genom kemiska analyser och fukttransportegenskaper har bestämts på utsågade skivor från borrkärnor.

I rapporten Förändringsprocesser i reaktorinneslutningar beskrivs en beräkningsmodell för uttorkning av betong. Dessutom redovisas vilka randvillkor som gäller för en reaktorinneslutning av Barsebäcks typ, randvillkoren mättes upp på ett antal platser i reaktorinneslutningen i en fältstudie.

Positionen på alla prover är redovisade enligt den precision som rapporterna medger i ett separat kapitel.

I den här rapporten presenteras också en kort översikt över de fall där ovanstående fuktanalysmetoder tillämpats i projekt efter CONMOD-projektet.

Dessutom redovisas vilken utvecklingspotential som finns för fuktanalysmetoder. Den stora utvecklingspotentialen hos fuktanalysmetoder för uttorkning av reaktorinneslutningar ligger i hanteringen av uttorkning av inneslutningar med temperaturgradienter över inneslutningsväggen.

Till detta har en liten del ägnats åt att beskriva behovet av en förnyad likartad undersökning i likhet med CONMOD projektet. För att kunna kalibrera fuktanalysmetoder krävs att man kan jämföra med ett tidsförlopp genom att detaljinformation om den exakta tidplanen över inneslutningsväggens randvillkor tas fram, dvs. driftförhållanden och uteklimatförhållanden. I Barsebäck finns unika möjligheter att studera effekterna av temperaturgradienter på fukttransport dels i den biologiska skärmen närmast reaktorerna, dels på provkroppar av relevant betong som annars är svår att få tillgång till.

Summary

The report is meant to summarize and evaluate the results from the earlier project CONMOD concerning moisture analyses. In the seven reports that is the base for this evaluation, the contents that concerns moisture is very limited, with two exceptions. The two reports where moisture and moisture modelling are covered are the Appendix A5.4 to the report "Barsebäck NPP- Material testing project", "Material analyses of samples from the reactor containment B1" (in Swedish) and the report "Deterioration processes in reactor containments" (in Swedish).

In this report measurements done and the locations where they were done or samples were taken are described. A number of different moisture analysis methods have been applied, e.g. measurements of relative humidity RH in drilled holes and on samples taken from cores. The degree of capillary saturation DCS has been measured on larger samples, chemically bound water has been determined by chemical analyses and moisture transport properties have been determined on slices sawn from drilled cores.

In the report "Deterioration processes in reactor containments" a calculation model for drying of concrete is described. In addition, the boundary conditions that are relevant for reactor containments are described. The boundary conditions were measured in a number of locations in a field study.

The position of all sampling points are described in a separate chapter with the precision that is possible from the information in the reports.

In this report a brief overview is given over cases where the moisture analysis methods are applied in projects after the CONMOD-project.

In addition, the potential for development of the moisture analysis methods is described. The main potential for improvement of the methods for describing drying of reactor containments lies in the treatment of drying of containments with temperature gradients over the containment wall.

Finally, in a small chapter the need for a similar investigation as the CONMOD-project is described. To be able to calibrate moisture calculation methods it must be possible to compare with a time dependent process with detailed information on the exact timetable of the boundary conditions, i.e. the conditions during service and the outdoor climate. In Barsebäck there are unique opportunities to study the effects of temperature gradients in the biological shield and on specimens of relevant concrete that is difficult to find elsewhere.

Innehåll

1	Projektbeskrivning	9
2	Genomgång och sammanfattning av CONMOD projektet	10
2.1	Rapporter med litet innehåll om fukt och uttorkning	10
2.2	“Materialanalyser av prover från reaktorinneslutningen, B1”	13
2.2.1	Relativ fuktighet, RF	13
2.2.2	Kapillär mättnadsgrad, KMG	14
2.2.3	Kemiska analyser	15
2.2.4	Sorptionskurvor	15
2.2.5	Fukttransportegenskaper	15
2.2.6	Kloridtransportegenskaper	16
2.2.7	Mekaniska egenskaper	16
2.2.8	Bilagor 16	
2.3	“Förändringsprocesser i reaktorinneslutningar”	18
3	Lokalisering av provningar och provtagningar	21
4	Sammanställning av de fall där fuktanalysetoder har tillämpats	23
5	Utvecklingspotential hos fuktanalysetoder	25
6	Behov av en förnyad likartad undersökning	26

1 Projektbeskrivning

Avdelning Byggnadsmaterial vid LTH har fått i uppdrag att läsa igenom och summera rapporterna som beskriver resultatet av projektet CONMOD rörande fuktmodeller/uttorkningsmodeller för betong. Underlaget som finns tillgängligt är samtliga rapporter från projektet. Uppdraget har utförts av Magnus Åhs i nära samarbete med Lars-Olof Nilsson. Denna rapport utgör resultatet av en fullständig analys av samtliga rapporter.

De aktuella rapporterna är:

- **CONMOD main report**
 - Namn på fil "01- CONMOD_final_report.pdf"
- **CONMOD- Preliminary results of NDT investigations at Barsebäck 1.**
 - Namn på fil "02- Preliminary_results_of_NDT_investigations_at_Barsebäck.pdf"
- **CONMOD-UVÄRDERING AV INNESLUTNINGEN VID BARSEBÄCK 1, STEG 1: FÖRBEREDANDE STRUKTURANSLYSER.**
 - Namn på fil "02-scte_02401_utg1_sv.pdf"
- **Barsebäck NPP - Reactor containment, Material testing project: Summary report**
 - Namn på fil "04_SCTE_02423_TR_01_ed1.pdf"
- **Förändringsprocesser i reaktorinneslutningar, Betongväggarnas klimatförhållanden och uttorkning, Elforsk rapport 09:100**
 - Namn på fil "09_100_rapport_Förändringsprocesser.pdf"
- **Assessment of material property data for structural analysis of nuclear containments**
 - Namn på fil "Assessment_of_material_properties-part_1"
 - Namn på fil "Assessment_of_material_properties-part_2"
- **Barsebäck NPP - Material Testing Project**
 - Namn på fil "Material_testing_project-part_1"
 - Namn på fil "Material_testing_project-part_2"
 - Namn på fil "Material_testing_project-part_3"
 - Namn på fil "Material_testing_project-part_4"
 - Namn på fil "Material_testing_project-part_5"
 - Namn på fil "Material_testing_project-part_6"
 - Namn på fil "Material_testing_project-part_7"

Sex av rapporterna innehåller väldigt sparsamt om fuktrelaterade frågor. Dessa rapporter refereras i avsnitt 2.1. De två sista rapporterna refereras i avsnitt 2.2 respektive 2.3.

2 Genomgång och sammanfattning av CONMOD projektet

I det här kapitlet ges en kortfattad men fullständig beskrivning av innehållet i samtliga CONMOD-rapporter som berör uttorkning, fuktmätning samt fuktanalysmetoder och uttorkningsmodeller. I avsnitt 2.1 behandlas de rapporter som knappast, eller inte alls, inkluderar något om fukt. I avsnitt 2.2-2.3 görs en genomgång av de två rapporter som mera ingående beskriver fukt- och uttorkningsundersökningar.

2.1 RAPPORTER MED LITET INNEHÅLL OM FUKT OCH UTTORKNING

I rapporten "CONMOD-Main report" finns det några få rader skrivna om fukt. På sidan 23 ges en kort information om att tjockleken på en reaktorinneslutning och dess eventuella avvikelser från ritningen påverkar uttorkningen och att ökning av hållfasthet sker under lång tid. På sidan 83 står det att fuktinnehållet påverkar betongkonstruktionens krympning. Därför kan en detaljerad beräkning som visar hur fuktinnehållet förändras över tiden krävas för att göra en detaljerad strukturmekanisk analys. Vidare tas fuktmodellering upp när modellering av fenomenen krypning och krympning behandlas på sidan 118 i samma rapport. Detta föreslås ske vid speciella situationer genom att använda sig av en temperatur- och fuktmechanisk modell där dessa modeller är kopplade till varandra. Hur den fukt och temperaturmekaniken ska modelleras tas inte upp. Detta är allt som innefattar modellering av fukt.

Rapporten "CONMOD- Preliminary results of NDT investigations" innehåller inte något som berör fukt förutom att olika fuktig betong påverkar synligheten av inbäddad armering.

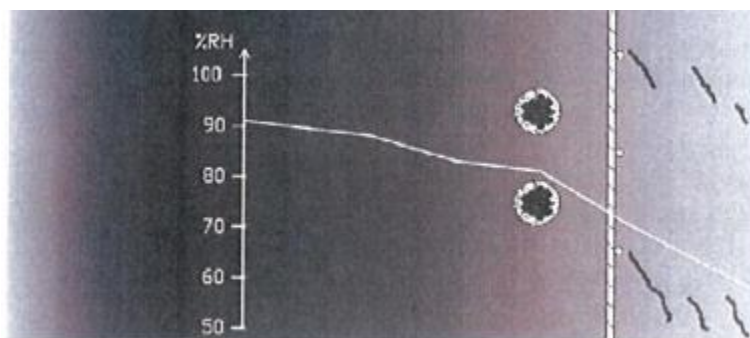
I rapporten "CONMOD- Utvärdering av inneslutningen vid Barsebäck 1, Steg 1: Förberedande strukturanalyser" finns det ingen information som kan kopplas till materialmodeller rörande fukt. Rapporten avhandlar till stor del hur strukturmekaniska beräkningar kan utföras och hur en reaktorinneslutning kan delas in i finita element på olika detaljeringsnivå och i olika typer av två- och tredimensionella geometriska avbildningar. Dessutom redovisas resultatet av ett flertal olika beräkningar som har utförts och hur laster fördelas över inneslutningen. Dessutom visas hur stora deformationerna blir vid olika belastning. Det enda som nämns om fukt är att det vid materialprovning går att bestämma grundläggande materialegenskaper som till exempel en fuktprofil, på sidan 140. Detta uttalande är i sig felaktigt. En fuktprofil är inte en materialegenskap, fuktprofilen är däremot ett resultat av fukttegenskaperna, och det går att utvärdera en del fukttegenskaperna från den uppmätta fuktprofilen, till exempel fukttransporttegenskaperna.

I den tekniska rapporten "Barsebäck NPP- reactor containment Material testing project: summary report" står inget speciellt att läsa om fuktighet och fuktmodellering. Det enda som nämns är att fuktigheten är uppmätt i ett underprojekt och att fuktigheten i betongen är uppmätt på ett antal olika lokaliseringar i Barsebäckreaktorn. Dessa lokaliseringar är angivna

Vid en genomläsning av rapporten "Assessment of material property data for structural analysis of nuclear containments" har fukt omnämnts som en faktor som

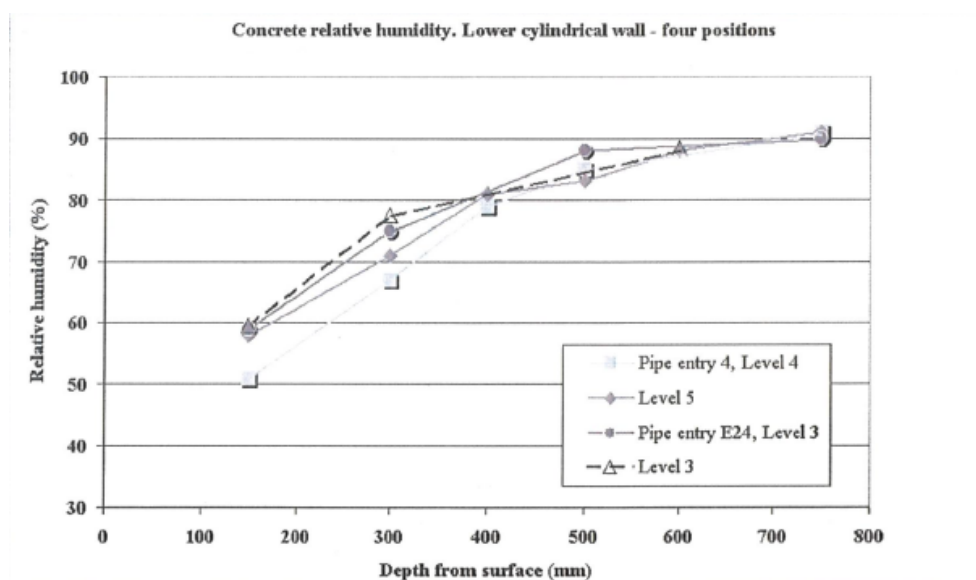
påverkar dels hydratationsutvecklingen och dels att fuktigheten i ett prov påverkar hållfastheten vid en provning. Detta är i sig inget nytt. Kopplingen mellan hydratationstillväxten och fukt är nödvändig för att kunna modellera hållfasthetstillväxt där fuktigheten i betongen har en påverkan.

Rapporten "Barsebäck NPP- Material testing project", pdf fil part 1, finns en figur på sidan 3, som visar ett diagram av fuktighetsfördelningen i en relativt tjock betongvägg, cirka 800 mm se Figur 2-1. Läget eller lokaliseringen av provtagningen är angiven som "lower cylindrical wall".



Figur 2-1. Den här bilden visar en fuktprofil uppmätt i lower cylindrical wall Fig 1 i originalrapporten.

Rapporten "Barsebäck NPP- Material testing project", pdf fil part 2, finns redovisat en hel del fuktprofiler/fuktfördelningar från och med sidan 33-37. Här visas ett exempel av de uppmätta fuktprofilerna se Figur 2-2.



Figur 2-2. Fuktprofiler som är uppmätta på ett antal olika positioner i Barsebäck 1, Figur A4.13 i originalrapporten.

Dessa profiler kan vara intressanta för att en verifiera en uttorkningsmodell. Positionen för dessa provtagningar är angivna i tabell benämnd Table A4.1, här visad som ett urklipp i Figur 2-3. Tabellen finns att hitta på sidan 32 i originalrapporten.

Table A4.1: Test positions

Reference position	Co-ordinates (°/+ m)	Depth (mm)
1.		
2. (Level 4, Pipe entry 4)	345/ 112	150, 300, 400, 500, 600
3.		
4. (Level 2, Cable duct entry E 24)		150, 300, 500, 750
5. (Level 6, R6.13)	270/ 123	150, 300, 400, 500, 750
6. (Level 3)	270/ 106	150, 300, 600
7. (Level 1)	180/ 92.67	150, 400
	180/ 93.9	150, 400
8. (Upper Cylindrical wall)	130/ 132	150, 300, 400, 500, 750
9.		
10. (Conical roof)	260/ 126.5	150, 400
11. (Level 5)	270/ 117	150, 300, 400, 500, 600, 750
12. (Base slab side)	180/ 91	150, 300, 600
13.	157/ 110	
14. (Inner liner wall)	115/ 112.5	150, 200

All of the tests have been made in the outer pre-stressed wall of the containment with the exception of no. 12 and 14, which were made in the inner containment wall (dry well) and side of base slab respectively.

Figur 2-3 Tabell som visar positionen för fuktprofiler tagna på Barsebäck 1.

I samma rapport finns också fuktigheten redovisad för några olika mätpunkter och dessutom finns också en kartering med fuktindikation utförd detta redovisas på sidan 37-39. Fuktindikationen är till huvudparten utförd med en Gann-hydromette och resultatet redovisas på sidan 39.

För att kunna göra en ordentlig validering är det viktigt att veta randvillkoren på platsen i fråga under hela uttorkningsförloppet. Dessa står inte att finna i rapporten.

Rapporten "Barsebäck NPP- Material testing project", pdf fil part 3, står att fuktigheten i en hålighet i betongväggen är uppmätt till 82 % RF vid en temperatur av 22.9 °C, sidan 54. Den tunna håligheten upptäcktes vid en radiografisk analys och var lokaliserad till "the electrical duct entry E24 and Pipe entry P4". På en av dessa lokaliseringar uppmättes fuktigheten. Detta är allt som berör fukt.

Rapporten "Barsebäck NPP- Material testing project", pdf fil part 4, beskriver resultatet från tunnslipanalyser. Det vill säga inget om fukt.

Rapporten "Barsebäck NPP- Material testing project", pdf fil part 5 är skriven av Lars-Olof Nilsson och avhandlas under kapitel 2.2.

Rapporten "Barsebäck NPP- Material testing project", pdf fil part 6 är skriven av Lars-Olof Nilsson och avhandlas under kapitel 2.2.

Rapporten "Barsebäck NPP- Material testing project", pdf fil part 7 står inget om fukt eller fuktmodeller.

Förändringsprocesser i reaktorinneslutningar -Betongväggarnas klimatförhållanden och uttorkning, Elforsk rapport 09:100 av Lars Olof Nilsson och Peter Johansson, och avhandlas under kapitel 2.3.

2.2 "MATERIALANALYSER AV PROVER FRÅN REAKTORINNESLUTNINGEN, B1"

Rapporten "Materialanalyser av prover från reaktorinneslutningen, B1" är kapitel A5 i Conmodrapporten "Barsebäck NPP- Material testing project". Den är uppdelad i flera pdf-filer: "Barsebäck NPP- Material testing project, part 5", "Barsebäck NPP- Material testing project, part 6" och de första sidorna av "Barsebäck NPP- Material testing project, part 7". En sida (sidan 2) i bilaga 7 saknas i pdf-filen "Barsebäck NPP- Material testing project, part 7".

Rapporten är en 25-sidig rapport på svenska, med 28 sidor bilagor 1-7, över resultaten av materialanalyser av prover från Barsebäck 1 inom Conmod. Rapporten är daterad 2004-09-22 och är skriven av Lars-Olof Nilsson vid Avd Byggnadsmaterial vid LTH.

Analyserna gjordes på fyra stycken 80 cm långa borrhärlor uttagna från "position 6" och "position 5" utifrån och in mot tätplåten. Exakt var borrhärlorna togs ut redovisas i kapitel 3 i den här rapporten.

Prover togs ur kärnorna på olika sätt, dels genom att såga ut skivor och cylinderbitar och dels genom att ta ut mindre provbitar för fuktmätning. Borrhärlorna med sina sprickor, visas i detalj i rapporten, se Figur 2-4.

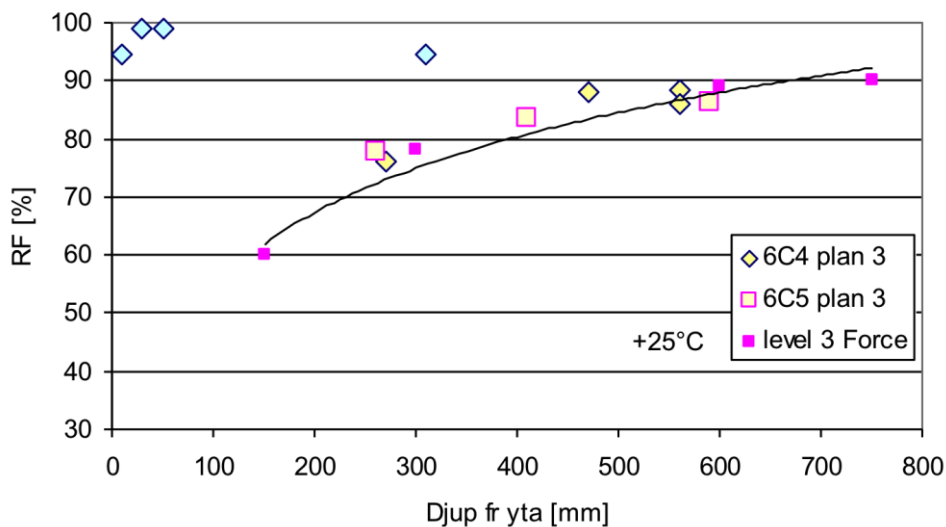


Figur 2-4 Exempel på borrhärla, från pos 6 C4, med sprickor och utsågade skivor

Fuktmätningarna försvårades av att kylvatten vid utborrningen blötte ner kärnorna dels från mantelytan och ändarna och dels från sprickytor eftersom kärna sprack sönder i ett antal mindre delar vid kärnborrningen.

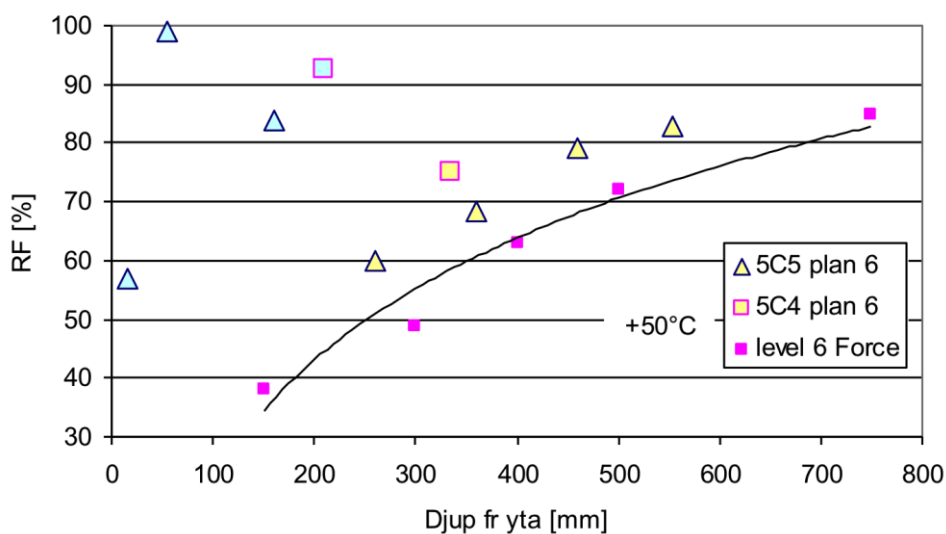
2.2.1 Relativ fuktighet, RF

På uttagna provbitar ur borrhärlorna mättes relativ fuktighet, RF, på olika djup från den yttre ytan, se Figur 2-5 och 2-6. Resultaten visade att uttorkningen bara nått cirka 85-95 % RF inne vid tätplåten, trots att reaktorinneslutningen torkat i mer än 30 år vid +25/+50°C.



Värdena över 90 % RF är osannolika; prover förmodligen uppfuktade av kylvatten

Figur 2-5. Rapportens figur 5: RF-mätvärden från provplats 6, på plan 3



Värdena i övre vänstra hörnet är osannolika; prover förmodligen uppfuktade av kylvatten

Figur 2-6 Rapportens figur 6: RF-mätvärden från provplats 5, på plan 6

Kommentar: Den i rapporten använda metoden för RF-mätning på uttagna prover har senare (under 2014-2015) visat sig kunna ge systematiskt för låga värden vid mätning på låg-vct-betong. Idag skulle man istället mäta i borrhål.

2.2.2 Kapillär mättnadsgrad, KMG

På andra provbitar ur borrhämnarna bestämdes kapillär mättnadsgrad som funktion av djupet. Värden upp mot 0.8 erhöles i de inre delarna, vilket normalt är högt för den aktuella betongsammansättningen, men kan förklaras av det långt gångna härdningen av betongen.

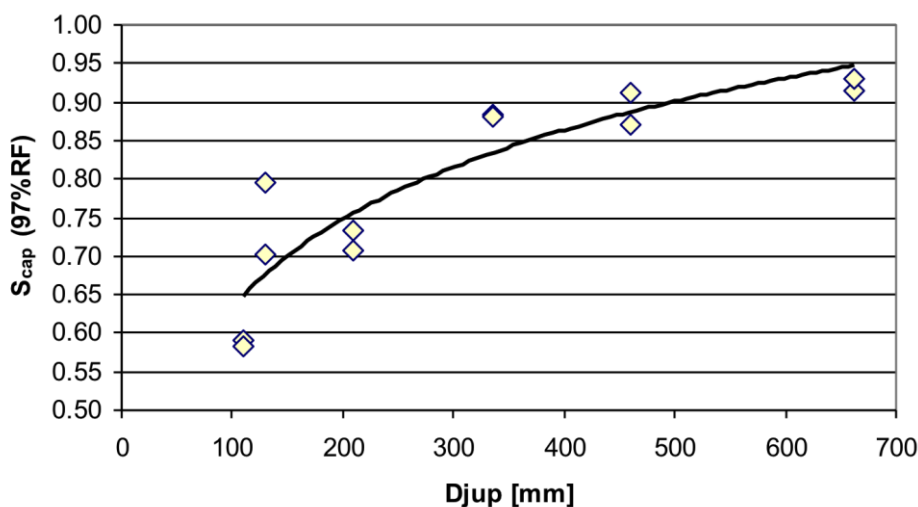
2.2.3 Kemiska analyser

Flera olika typer av kemiska analyser gjordes på provbitar från olika djup. Syftet var att bestämma mängden kemiskt bundet vatten och därmed få en uppfattning om hur långt cementreaktionerna gått i det extrem klimat som rått under lång tid. Mängden kemiskt bundet vatten var oförklarligt högt jämfört med man förväntar sig. Man fann ett visst djupberoende med högre mängd på större djup.

2.2.4 Sorptionskurvor

På utsågade skivor ur borrhärnorna mättes fuktkvoter och KMG vid ett antal RF i klimatboxar. På så sätt erhöles punkter på desorptionsisotermer för den aktuella betongen. Fuktkvoterna hade mycket stor spridning eftersom materialmängden i respektive skiva var liten och ballastandelen i varje skiva hade stora variationer. KMG gav mycket mindre osäkerhet.

Totalporositeten, exklusive luftporerna, varierande något förvånande inte med djupet. Däremot fann man ett tydligt djupberoende hos andra punkter på sorptionskurvorna, t ex vid 97 % och 33 % RF, se exemplet i Figur 2-7, med högre KMG på större djup från utsidan in mot tättplåten.



Figur 2-7 Rapportens figur 24: Exempel på djupberoendet hos sorptionskurvor

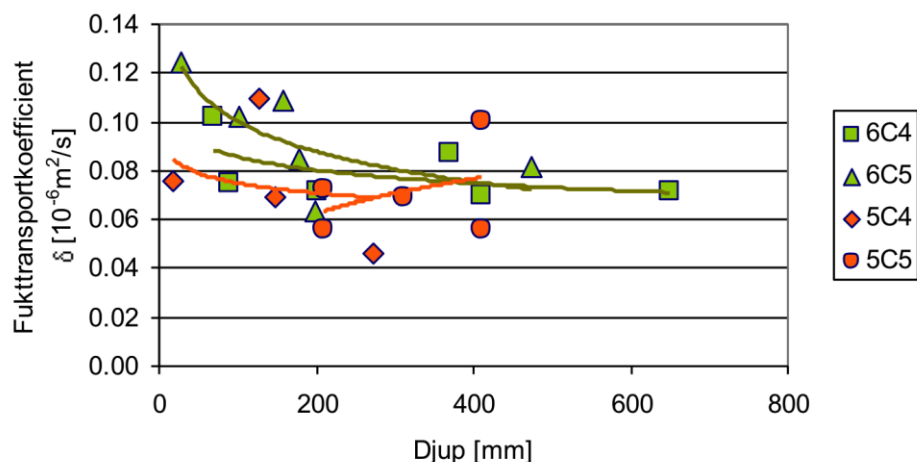
Djupberoendet hos sorptionskurvorna i punkten 33 % RF förklaras med en större hydratationsgrad med djupet. Att totalporositeten inte varierar med djupet, men att den gör det också vid 97 % RF ges ingen förklaring. Detta är alltså kvarstående frågetecken.

2.2.5 Fuktransportegenskaper

Fuktransportegenskaper hos utsågade skivor från borrhärnorna mättes med koppmetoden. På grund av att mängden provmaterial var liten, dvs antal skivor var begränsat, kunde fuktransportegenskaperna bara bestämmas i ett RF-intervall. Man valde 50-85 % RF.

Spridningen i mätvärden blev stor och ingen tydlig skillnad kunde upptäckas mellan de olika borrkärnorna. Däremot indikerades ett visst djupberoende, med högre fukttransportförmåga närmast utsidan, se Figur 2-8.

Absolutvärdena hos fukttransportförmågan var ca hälften så stora som för motsvarande "modern" betong med fem års härdning, ca 0.08 jämfört med $0.17 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.



Figur 2-8 Rapportens figur 32: Djupberoendet hos fukttransportkoefficienten

2.2.6 Kloridtransportegenskaper

Som ett annat mått på tätheten hos betongen bestämdes kloriddiffusionskoefficienten med en elektrisk migrationsmetod på 50 mm tjocka skivor utsågade ur borrkärnorna. Bara några få (= fem) så tjocka skivor kunde erhållas ur de fyra borrkärnorna.

Kloriddiffusionskoefficienten var ca fem gånger så stor nära utsidan som på större djup än 30 cm, ca 25 jämfört med ca $5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

2.2.7 Mekaniska egenskaper

På prover ur borrkärnorna bestämdes också en del mekaniska egenskaper men de tas inte upp här.

2.2.8 Bilagor

I bilagor till rapporten beskrivs i detalj

1. Provtagningspunkter – borrpositioner och beskrivning av uttagningen av borrkärnorna.
2. Borrkärnorna
 - a. provtagningsdjup för RF och KMG
 - b. utsågning av skivor för mekaniska och fysikaliska provningar
 - c. primära resultat av RF-mätningar och KMG-mätningar
3. Fuktmättningsresultat – RF & KMG från olika djup.
4. Kemiska analyser – Termogravimetrisk analys med TGA & bestämning av CaO-halt.

5. Fuktmekaniska egenskaper
 - a. Sorptionskurvor
 - b. Fuktransportkoefficienter
6. Kloridtäthet – kloridmigrationskoefficienter
7. Mekaniska egenskaper – inklusive två RF på provbitar ur tryckprovade cylindrar. I pdf-filen "part 6" ingår bara första sidan av bilaga 7! I pdf-filen "part 7" ingår fortsättningen på bilaga 7 ovan; dock saknas sidan 2! På den saknade sidan finns resultatet av två mätningar av RF.

Efter denna bilaga 7 ingår delar (sid 144-172) av fortsättningen av rapporten Barsebäck NPP – Material Testing Project med kapitel A6 "In-situ material tests B2 (2003)". I detta ingår ingenting om fukt eller uttorkning.

2.3 "FÖRÄNDRINGSPROCESSER I REAKTORINNESLUTNINGAR"

Rapporten "Förändringsprocesser i reaktorinneslutningar - Betongväggarnas klimatförhållanden och uttorkning", Elforsk rapport 09:100, är skriven på svenska 2009 av Lars-Olof Nilsson och Peter Johansson vid Avdelningen för Byggnadsmaterial vid LTH. Den beskriver, på 137 sidor, i detalj genomförandet och resultaten från ett flerårsprojekt med samma titel som rapporten.

Projektet, och rapporten, har rubriken "Förändringsprocesser i reaktorinneslutningar" men i praktiken behandlade projektet de huvudsakliga förändringarna i form av fuktförhållanden och uttorkning.

Projektet byggde på de materialprovningar som gjordes i projektet Conmod, som beskrivs i avsnitt 2.2. Resultatet av detta sammanfattas i början av rapporten.

I kapitel 2 beskrivs en beräkningsmodell för uttorkning av betong. Modellbeskrivningen var allmänt hållen och inkluderade det som var traditionellt 2009. I beskrivningen ingick inte detaljer om t ex vilka fukttransportpotentialer som borde väljas eller hur detaljerat man borde beskriva sorptionskurvor. Avsikten vara att dessa detaljer skulle fastställas i projektet. Detta behandlas i följande kapitel.

I kapitel 3 beskrivs kunskapsläget när det gäller de tre materialegenskaper som ingår i beräkningsmodellen: kemisk bindning av vatten, jämviktsfuktkurvor och fukttransportegenskaper. I kunskapssammanställningen sätts resultaten från Conmod in i sitt sammanhang.

I kapitel 3 redovisas också en, vid det tillfället ny, undersökning av fukttransport under temperaturgradient; dock inte på betong utan sandsten.

Kapitel 4 beskriver en omfattande laboratorieundersökning av uttorkning av relevant, nytillverkad betong. I Conmod fanns bara mycket små materialmängder av aktuell betong tillgänglig. Här tillverkades istället nya betongprovkroppar med så lika betongsammansättning som i Barsebäck B1 och B2 som möjligt. Stora betongcylindrar med flera, stora tjocklekar tillverkades och fick härda under lång tid för att så långt som möjligt efterlikna den välhårdade Barsebäcksbetongen. Uttorkningsförsök genomfördes därefter vid +20°C respektive +50°C. Försöken pågick under hela projekttiden och resultat erhöles från mer än 550 dygns uttorkning.

De huvudsakliga resultaten var viktsförluster, dvs uttorkad fuktmängd, som funktion av tiden. Vid några tillfällen togs prover från olika djup från ett antal provkroppar för bestämning av fuktprofiler i form av KMG-profiler och RF-profiler.

I kapitel 5 beskrivs en omfattande fältstudie av ytklimatet som råder på de yttre betongytorna, dvs randvillkoren för uttorkningsberäkningar. Barsebäcksverkets egna data granskades och klimatet loggades på betongytorna på några ställen runt reaktorinneslutningen på B2 som då fortfarande var i reguljär drift. Klimatloggningen pågick under ca fyra månader varefter erhållna data analyserades.

Analysen utmynnade i en beräkningsmodell som ansågs vara tillämplig på BWR-inneslutningar. Yttertemperaturerna och hur dessa varierar med höjden och runt om inneslutningen kan alltid kartläggas på en reaktorinneslutningsvägg som är i drift. Med hjälp av historiska klimatdata från regionen där anläggningen finns kan sedan naturliga ånghaltsvariationer i luften kvantifieras eftersom byggnaden runt en reaktorinneslutning normalt är välventilerad och har ungefär samma ånghalt som

utomhusluften. Med dessa ånghalter och uppmätta yttemperaturer kan sedan betongytans RF beräknas på reaktorinneslutningens olika delar.

För Barsebäck 2 kunde man konstatera att

- det knappast var någon temperaturgradient över inneslutningsväggen,
- att RF på betongytan kunde vara så låg som ca 10 % RF vintertid i toppen av inneslutningsväggen,
- att beräknade RF på betongytorna stämde väl med de RF-profiler som uppmätts i Conmodprojektet.

I kapitel 5, avsnitt 5.2, beskrivs också en motsvarande studie på BWR-inneslutningen vid Ringhals 1. Här gjordes klimatloggningar under ett helt år och mätvärdena analyserades med den framtagna modellen för ytklimat. Den modellen visade sig fungera relativt väl också på Ringhals 1. En loggningspunkt utgjorde ett undantag. I denna fanns en, okänd, fuktkälla som medförde att ånghalten var högre än i uteluften.

I kapitel 5, avsnitt 5.3, beskrivs också en studie av ytklimatet på en PWR-reaktorinneslutning, vid Ringhals 3. Här är ytklimatförhållandena helt annorlunda, med en temperaturgradient över inneslutningsväggen som skapar en skillnad i temperatur mellan betongytan och omgivande luft. Betongytan utsätts för direkt exponering för uteklimat, med sol, regn och vind.

I Ringhals 3 kartlades yttemperaturernas variation med värmekamera. Ytfuktigheten loggades med RF-givare i 30 mm djupa hål. Analysen visade att ånghalten i betongytan var högre än i omgivande luft under sommaren medan det var tvärtom under vintern. RF var relativt stabil 30 mm in i betongen, ca 65-75 % RF i de delar som är väderskyddade och 70-80 % RF i de delar som är väderutsatta.

Ytklimatet loggades även på insidan, i tre punkter. Där var ånghalterna i det närmaste lika i de tre punkterna.

I kapitel 6 beskrivs de beräkningar av uttorkning som gjorts för de olika reaktorinneslutningarna och för laboratorieundersökningarna.

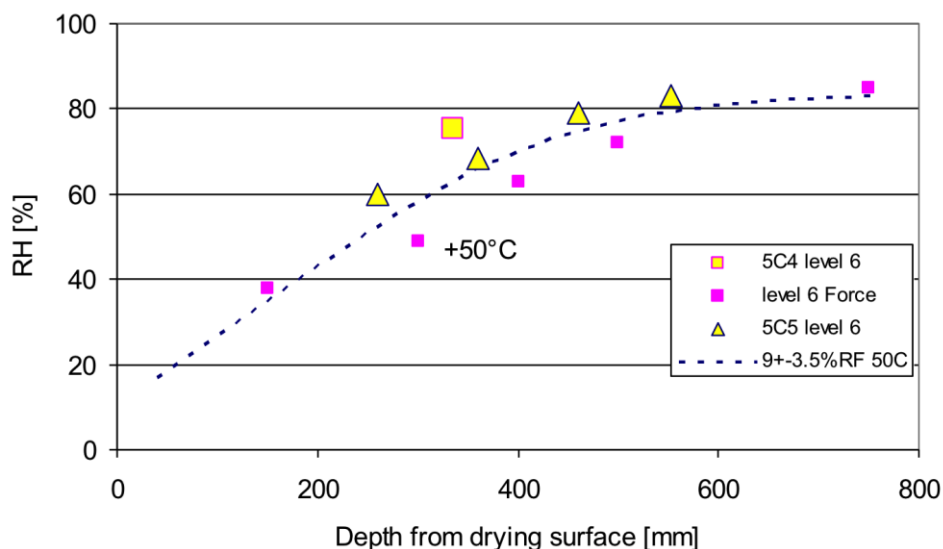
De första beräkningarna för Barsebäck 1 visade på relativt stor skillnad mot uppmätta fuktprofiler efter 30 år, upp till ca 10 % RF för höga i de undre, kallare delarna och ca 10 % RF för lågt i de över, varmare delarna. Klimatdata från Malmö-Sturup flygplats användes som randvillkor, men dessa påverkar bara ytfuktförhållandena.

Då varierades sorptionskurvans form och beräkningar gjordes först för laboratorieförsöken. Sorptionskurvans form visade sig ha stor betydelse och en kalibrering gjordes mot en del av laboratorieförsöken. Därefter prövades effekten av temperaturnivån på sorptionskurvan och ett temperaturberoende kalibrerades mot en del av laboratorieförsöken. Fuktransportegenskaper beskrevs enligt litteraturdata och mätningar i Conmod.

Jämförelser gjordes sedan, i avsnitt 6.3, mellan beräkningar och övriga laboratorieresultat, både vikt förluster och uppmätta RF-profiler. Beräkningarna för de olika provkroppstjocklekarna stämde förvånansvärt väl med experimenten.

Därefter upprepades beräkningarna för Barsebäck 1, med de materialegenskaper som kalibrerats mot laboratorieförsöken. Nu blev överensstämmelse betydligt bättre, med mindre än 10 % RF i avvikelser från medelvärdet, se Figur 2-9.

Med dessa parametrar nu fastlästa gjordes prognoser för fortsatt uttorkning under 30-60 års total uttorkningstid.



Figur 2-9 Rapportens figur 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.

Slutligen, i avsnitt 6.6, gjordes beräkningar för PWR-inneslutningen i Ringhals 3. Klimatdata från Säve flygplats användes som randvillkor. I övrigt användes samma beräkningsmodell och samma materialegenskaper som för Barsebäcksbetongen. Den stora skillnaden är att i Ringhals 3 är det en stor temperaturgradient över inneslutningsväggen under hela året, ca 30°C. Med den använda fukttransportmodellen, med ånghalten som fukttransportpotential, erhöles nu en uttorkning från betongen närmast tätplåten där fukten, i beräkningarna, drevs ut av temperatur- och ånghaltsgradienten. Eftersom inga mätvärden fanns att jämföra med kunde detta inte ifrågasättas.

I kapitel 7 redovisas slutsatserna i projektet. Randvillkoren för uttorkningsberäkningar verkar kunna kvantifieras väl från fältmätningar under en årscykel. Beräkningsmodellen har kalibrerats mot oberoende laboratoriemätningar och visat sig ge relativt bra överensstämmelse med fältmätningar på BWR-inneslutningarna. Frågetecken reste kring PWR-inneslutningar med temperaturgradient över inneslutningsväggen.

I sista kapitlet redovisas publikationer inom projektet, referenser till litteratur som använts och en lista över annan litteratur inom ämnesområdet.

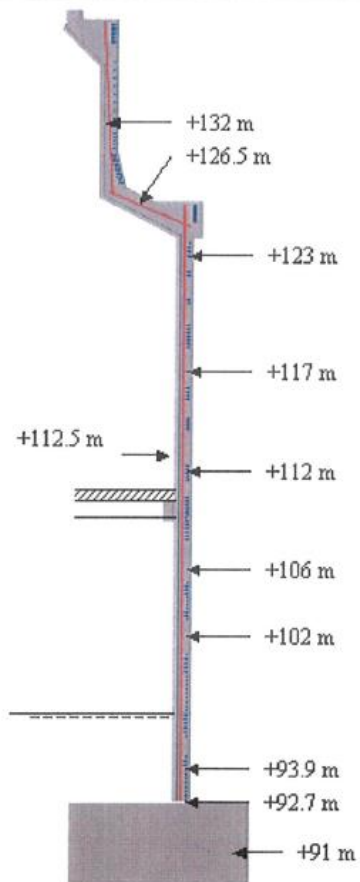
3 Lokalisering av provningar och provtagningar

Lokaliseringen av de utförda provningarna finns beskrivna i de olika rapporterna med olika detaljeringsgrad. Dels kan beskrivningen vara i form av att provet är taget i en viss konstruktionsdel men inte exakt var i den konstruktionsdelen. Följande lokaliseringar är beskrivna med den noggrannhet som står i originalrapporten. De olika lokaliseringarna är uppdelade på olika typer av mätningar så som enstaka fuktmätningar, fuktprofiler, fuktindikationer och fuktegenskaper.

Enstaka fuktmätning av relativ fuktighet har utförts i en ihållighet i anslutning till "the electrical duct entry E24 and Pipe entry P4". Detta står omnämnt i rapport Barsebäck NPP –Material testing project".

I botten på "lower cylindrical wall", LCW, har några två mätningar vardera utförts, på nivån +92.67 m, och nivån +93.87 m, på djupet 150 mm och 400 mm djup. På den koniska delen av taket har också två fuktmätningar utförts på 150 och 400 mm djup var exakt står inte beskrivet.

En fuktprofil är bestämd på en konstruktionsdel som benämns "lower cylindrical wall", denna visas i rapporten "Barsebäck NPP - Material testing project". Andra fuktprofiler är uppmätta på tio positioner i den förspända ytterväggen och på en position på innerväggen på olika höjdnivå, dessa positioner är välbeskrivna. Positionen står angiven på sidan 32 i tabell A4.1 i form av höjd över havet samt i grader (°) vinkel, och mätresultatet är dokumenterat i tabell A4.2. De elva fuktprofilerna uppmättes med Vaisala fuktsensorer för relativ fuktighet. Fuktsensorn var i mätposition under en tid av minst 3 dygn men på vissa positioner upp till flera veckor. Figur 3-1 visar dessa ungefär den nivå där fuktprofilerna uppmättes.



Figur 3-1. Markering av ungefärlig nivå där borrkärnor togs ut för att bestämma relativ fuktighetsprofil i yttre cylinderväggen, Figur A4.1 i originalrapporten.

Materialegenskaper uppmättes på borrkärnor i position 5 (+123 m) och 6 (+106 m, nedre cylindervägg) dessa var lokaliserade enligt figur A4.2, sida 28, respektive figur A4.9, sid a29, i rapporten "Barsebäck NPP- Material testing project".

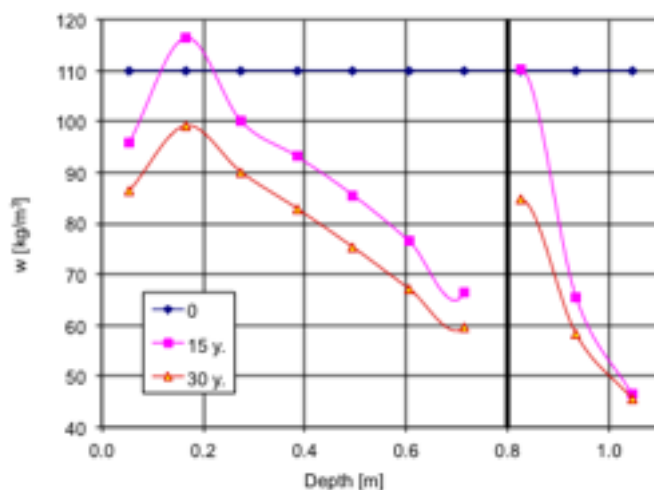
4 Sammanställning av de fall där fuktanalysmetoder har tillämpats

De fuktanalysmetoder som togs fram i projektet "Förändringsprocesser ..", som beskrivs i avsnitt 2.5, användes inom projektet för

- BWR-inneslutningarna i Barsebäck B1 och Ringhals R1, där jämförelser kunde göras mot fältmätningar,
- PWR-inneslutningen i Ringhals R3, utan möjligheter till jämförelser med mätningar.

Efter projektet har samma beräkningsmodell använts för prognoser över uttorkning i BWR-inneslutningarna för samtliga reaktorer i Forsmark (F1-F3) samt för Ringhals 2-4 för ett doktorandprojekt om spännkraftförluster, publicerade av Lundqvist & Nilsson (2011)¹. Uttorkningsberäkningar användes som underlag för att beräkna krympning och, i kombination med krypning samt relaxation av spännstålet, uppskatta spännkraftsförluster.

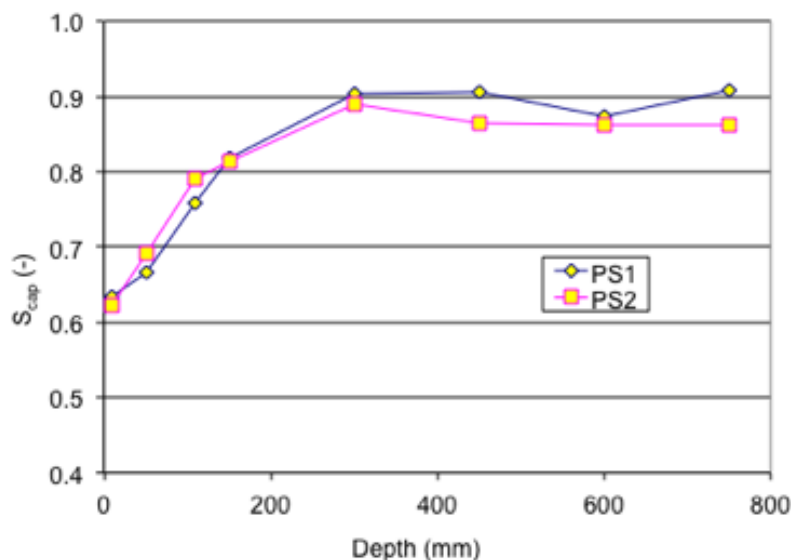
När tillfälle gavs att göra fuktmätningar i en PWR-inneslutningsvägg i Ringhals kunde resultaten lätt jämföras med de prognoser som beräkningsmodellen gett för inneslutningsväggar med temperaturgradient. Mikael Oxfall genomförde dessa mätningar och publicerade dem, Oxfall (2013)². Det stod omgående klart att beräkningsmodellen inte duger om man har en temperaturgradient! Av Oxfall (2013) uppmätta fuktprofiler, se Figur 4-2, stämmer inte alls med de beräknade, se Figur 4-1.



Figur 4-1 Beräknade fuktprofiler med den ursprungliga fuktanalysmetoden för en reaktorinneslutningsvägg med temperaturgradient, Nilsson & Johansson (2006).

¹ Peter Lundqvist & L.-O. Nilsson. *Evaluation of prestress losses in nuclear reactor containments*. Nuclear Engineering and Design. Volume 241, Issue 1, January 2011, pp. 168-176

² Oxfall, M., Climatic conditions inside nuclear reactor containments - Monitoring campaign, 2013, Div of Building Materials, LTH, Lund University.



Figur 4-2 Uppmätt fuktprofil i en reaktorinneslutningsvägg med temperaturgradient, Oxfall (2013).

En fukttransportbeskrivning med ånghalten som fukttransportpotential ger en stor fukttransport i temperaturgradientens riktning, även om fukthaltsgradienten och RF-gradienten är noll eller till och med något negativ, se figur 4-1. I figuren ses att beräkningen gett uttorkning så att fukthalten sjunkit inne vid tätplåten, dvs fukttransport mot fukthaltsgradienten och RF-gradienten. Mätningarna i figur 4-2 visar däremot att uttorkningen skett utan någon negativ fukthaltsgradient; mätnadsgradsgradienten är nära noll i den inre hälften av inneslutningsväggen. Den stora ånghaltsgradienten man haft under trettio år har inte gett någon signifikant fukttransport/uttorkning inne vid tätplåten.

En helt annan fukttransportbeskrivning än den använda med ånghalten som enda fukttransportpotential måste alltså användas.

Inom ett nytt projekt inom EU, Nugenia-ACCEPPT, har beräkningar gjorts för en PWR-reaktorinneslutning i Frankrike. Eftersom Oxfalls mätningar var kända var det klart att fukttransportbeskrivningen måste revideras. I det projektet användes en fukttransportekvation med RF som enda fukttransportpotential, Åhs (2015)³. Detta ger fuktprofiler som påminner om den som Oxfall mätt i Ringhals. Några mätningar att kalibrera mot kunde dock inte göras.

³ Åhs, M., The prediction of moisture and temperature distribution in a concrete reactor containment, 2015, Div of Building Materials, LTH, Lund University.

5 Utvecklingspotential hos fuktanalysmetoder

Den stora utvecklingspotentialen hos fuktanalysmetoder för uttorkning av reaktorinneslutningar ligger i hanteringen av uttorkning av inneslutningar med temperaturgradienter över inneslutningsväggen. Här har vi fortfarande inte kunnat göra några uttorkningsberäkningar med helt korrekta indata och fått möjlighet att jämföra beräkningar och mätvärden.

Det krävs då att man har tillgång till exakt tidplan över inneslutningens hela historia, exakta klimatuppgifter under inneslutningens livstid, egenskaper hos den använda betongen samt klimatdata för inneslutningens närmaste omgivning och en kartläggning av ytklimatförhållandena hos den aktuella inneslutningen. Mätningarna av Oxfall (2013) är det bästa som finns att tillgå för närvarande när det gäller uppmätta fuktprofiler att jämföra med beräkningar.

Användningen av fuktanalysmetoder för prognoser över framtida uttorkning för sådana verk som är i drift kräver tillgång till bättre kunskap om materialegenskaper hos de aktuella betongerna. I Nugenia-ACCEPPT-projektet visade det sig vara extremt svårt att få tillgång till materialprover från de historiska betonger som har använts. Att tillverka nya betonger med liknande sammansättning som de gamla visade sig också vara svårt. En bättre kartläggning av de äldre betongernas verkliga egenskaper och hur dessa varierar med olika parametrar skulle kunna medföra att fuktanalysmetoderna ger mycket säkrare prognoser i framtiden.

6 Behov av en förnyad likartad undersökning

Den undersökning som gjordes inom projektet "Förändringsprocesser .." innebar ett stort steg framåt hos möjligheterna att göra tillförlitliga uttorkningsberäkningar. De modeller för beskrivning av randvillkor och för uttorkning som användes där behöver emellertid förbättras och revideras. Detta är av stort värde för framtida beräkningar av uttorkning av reaktorinneslutningar som underlag för bedömning av krympning och krypning av inneslutningsväggen och för beräkningar av uttorkning av missilskyddet på insidan av tätplåten och hur detta fuktmechaniskt samverkar med klimatet inne i en inneslutning.

Det största behovet bedöms vara att kunna beskriva fukttransport under en temperaturgradient och kunna göra det för betonger som är relevanta för de verk som är i drift, i Sverige och andra länder. För väggarna i PWR-inneslutningar och i den biologiska skärmen i alla reaktortyper sker fukttransporten mer eller mindre konstant under temperaturgradienter. Här är kunskaperna fortfarande ytterst bristfälliga.

Alla möjligheter att göra den typ av mätningar som Oxfall (2013) gjorde måste tas tillvara när tillfälle ges. Sådana mätningar kan ge en ögonblicksbild av hur en fuktprofil ser ut. För att kunna kalibrera fuktanalysmetoder krävs dock att man också kan jämföra med ett tidsförlopp genom att detaljinformation om den exakta tidplanen över inneslutningsväggens randvillkor tas fram, dvs driftförhållanden och uteklimatförhållanden.

I Barsebäck finns unika möjligheter att studera effekterna av temperaturgradienter på fukttransport. Inneslutningsväggen har inte haft några temperaturskillnader under drift men den biologiska skärmen närmast reaktorerna har haft det. Även om det är några år sedan det fanns temperaturgradienter i betongkonstruktionerna i den biologiska skärmen är konsekvenserna av de gradienter som fanns under ca 30 års drift fortfarande fullt mätbara. Konkret innebär dessa konsekvenser att fuktfördelningarna, där man haft mer eller mindre stabila temperaturgradienter under lång tid, eventuellt visar att ånghalten inte varit en drivande potential för fukttransporten alls eller hur stor dess andel varit, kvantitativt.

Med tillgång till relevant betong för att tillverka provkroppar, som t ex i Barsebäck, kan också laboratorieexperiment sättas upp där man kan följa uttorkningsförloppet under en temperaturgradient. Detta måste naturligtvis göras på så tunna provkroppar att fuktförändringarna hinner ske under projektiden.

Uttorkningsberäkningarnas kvantitativa resultat är helt beroende av ett antal materialegenskaper. Dessa materialegenskaper måste vara kända för den betong som är aktuell, vilket har visat sig svårt att uppnå. I projektet "Förändringsprocesser .." var tillgången till betong för att tillverka provkroppar ytterst liten. I projektet Nugenia-ACCEPPT fanns ingen sådan betong att tillgå överhuvudtaget. De betonger som idag kan nytillverkas blir inte desamma och hur stora skillnaderna blir i materialegenskaper kommer alltid att vara en källa till osäkerheter. I Barsebäck B1 och B2 finns "obegränsad" tillgång till betong som är relevant inte bara för de svenska verken utan också för många utländska verk från samma tidsperiod.

För att kunna bedöma uttorkning av betongen i inneslutningsväggen innanför tätplåten, det s k missilskyddet, krävs samma verktyg som för betongen utanför

tätplåten. Även här sker fukttransporten under temperaturgradient i PWR-inneslutningar och det är ungefär samma betongsammansättning på denna betong.

Det som är speciellt och som kräver förnyade undersökningar här är fukttransportegenskaperna hos den epoxibeläggning som man applicerat på så gott som alla invändiga ytor. Epoxiskikt är normalt mycket täta mot fukttransport men i jämförelse med tätheten hos de grova betongkonstruktionerna i reaktorinneslutningar har de en mindre täthet. Hur stor denna täthet är måste kvantifieras för att korrekt kunna beskriva uttorkningen genom detta ytskikt. Prover kan tas från olika delar av missilskydden i Barsebäcksverken och fukttransportegenskaperna kan mätas upp. Inverkan av fuktnivån, tjocklek/underhållsintervall etc kan då undersökas i detalj.

UTVÄRDERING AV UTVECKLINGS- STATUS FÖR FUKTANALYSMETODER I BETONG

Betongens egenskaper är starkt kopplade till den fukthalt som råder i konstruktionen, och exempelvis risken för armeringskorrosion och betongens strålskyddande förmåga påverkas. Det är därför viktigt att ha kännedom om hur snabbt uttorkningen sker i reaktorinneslutningen. Kunskapen har varit begränsad om hur reaktorinneslutningen, som är en mycket tjock betongkonstruktion och som dessutom innehåller en ingjuten stålplåt, torkar ut.

Här har en äldre sammanfattande studie av olika fuktanalysmodeller genomlysts, för att undersöka hur dessa modeller har utvecklats sedan studien avslutades 2005. Resultaten pekar på att det finns ett behov av att studera effekterna av temperaturgradienter på fukttransport i tjocka betongkonstruktioner.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se