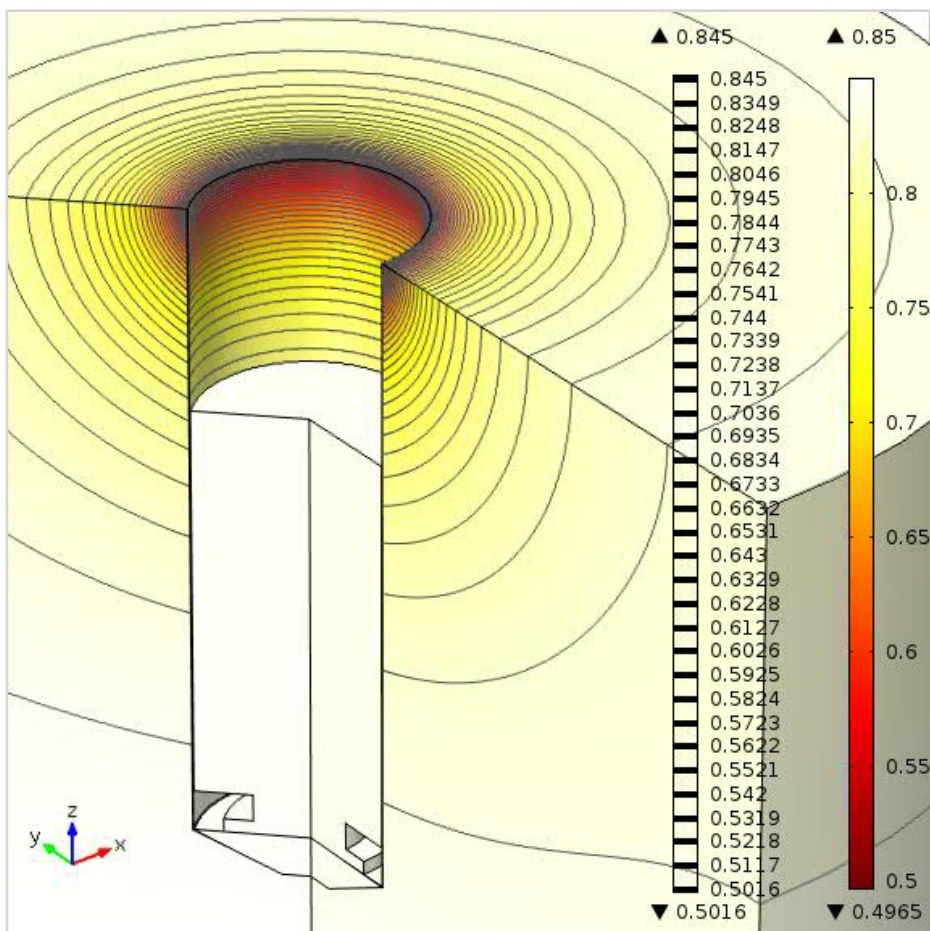


SIMULERAD UTTORKNING AV BETONG I REAKTORINNESLUTNINGAR

RAPPORT 2017:464



BETONGTEKNIK
KÄRNKRAFT



Energiforsk

Simulerad uttorkning av betong i reaktorinneslutningar

Jämförande studie av två simuleringsverktyg samt
utvärdering av uttorkningens effekter

MIKAEL OXFALL

ISBN 978-91-7673-464-3 | © Energiforsk december 2017

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

Förord

Mikael Oxfall har tidigare mätt och modellerat fuktnivåerna i reaktorinneslutningar i drift. Studien visade att uttorkningen gått betydligt långsammare än förväntat, och därmed är fukthalterna djupt in i konstruktionen högre än man tidigare antagit.

Det är viktigt att ha kännedom om fukthalter och kunna modellera dessa i olika konstruktionsdelar och på olika djup, detta för att kunna bedöma risken för att korrosion kan uppstå i den ingjutna tätplåten. I denna studie har två simuleringsverktyg jämförts, för att utvärdera hur det verktyg som tagits fram av Oxfall står sig i förhållande till den kommersiella mjukvaran WUFI.

Studien har genomförts av Mikael Oxfall, teknologie doktor verksam vid Vattenfalls forskningslaboratorium i Älvkarleby under projektets genomförande. Detta projekt ingår i Energiforsk Betongtekniskt 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).

Monika Adsten, Energiforsk

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

Sammanfattning

Uttorkningshastigheten för reaktorinneslutningarnas betong är en långsam process och generellt kommer betongen fortsätta att torka fram till dess att verken tas ur drift, även om 60 års drift beaktas. Med tiden kommer dock uttorkningshastigheten oh fuktillskottet att bli mindre, och i vissa zoner upphöra. I och med detta kommer även dess inverkan på inneklimatet att minska.

I föreliggande studie har två simuleringsverktyg jämförts, delvis för att utvärdera hur mjukvaran WUFI står sig mot modellen tidigare presenterad av Oxfall, vilken var designad för att simulera förhållanden i kokvattenreaktorer. Studien syftar delvis också till att utvärdera om WUFI, som är ett mer användaranpassat verktyg, är lämpligt att använda för olika typer av fuktanalyser av betongen i reaktorinneslutningarna, samt om den även kan användas för de icke-isoterma förhållanden som råder för vissa konstruktionselement.

Sammanfattningsvis kan sägas att simuleringarna med WUFI gav en god överensstämmelse med tidigare fältmätningar vid Ringhals 1 samt med de simulerade resultaten med Oxfall's modell. Tillgängliga materialdata för betongen var dock inte direkt anpassad för de svenska kärnkraftverken och det antas att detta var en av anledningarna till en bättre överensstämmelse mellan Oxfall's modell och fältmätningarna vid Ringhals 1. Bäst överensstämmelse mellan uppmätta fuktnivåer och simulerade gavs då betongen benämnd vct 0.5 användes. Materialdatan tillhandahölls av Fraunhofer-IBP men baserades på mätdata från Hedenblad.

Inga tidigare simuleringar av fukttransportprocessen vid Ringhals 4 har tidigare gjorts utan i föreliggande studie jämfördes endast de simulerade resultaten med de uppmätta resultaten från fältmätningarna vid Ringhals 4 under 2012–2013. Samma materialdata som för simuleringarna vid Ringhals 1 användes och resultaten gav goda resultat med bäst överensstämmelse mot de uppmätta nivåerna då betongen benämnd vct 0.5 användes.

För både Ringhals 1 och Ringhals 4 kunde konstateras att WUFI med tillgängliga materialdata var möjlig att använda för att simulera de processer som sker. En ökad överensstämmelse mot de tidigare uppmätta resultaten bör dock nås om nya materialdata implementeras samt att förhållanden under byggnationstiden beaktas. Modellen som presenterades av Oxfall bedöms dock som mer överensstämmande mot Ringhals 1. Oxfall's modell möjliggör även en enklare påbyggnad av ytterligare fenomen i modelleringen, t.ex. hysteresis av betongens sorptionsisotermer.

Baserat på resultaten från simuleringarna erhöles simulerade resultat kring vilket fuktillskott som betongen i de olika verken gav upphov till. Storleken på dessa fuktillskott har inte kunnat valideras mot några fältmätningar. Trots en god överensstämmelse mellan de simulerade fuktprofilerna från WUFI respektive Oxfall's modell var dock skillnaden i fuktillskott hälften så stort vid WUFI simuleringarna för Ringhals 1. Anledningen till detta antas vara att betongen var

något torrare från WUFI simuleringarna, skillnaden i materialegenskaper mellan modellerna samt temperaturgradientens inverkan.

För Ringhals 4 genomfördes en jämförelse mellan de simulerade fukttillskotten under 2010–2011 med data som beskrev hur stor avfuktningen av inneslutningens luft var under samma period. Resultaten visade att de övre 60 % av inre cylinderväggen totalt bidrog med ca 811 kg vatten, 6 % av den totala avfuktade vattenmängden under ett driftår. Med antaganden om att detta fukttillskott var samma för alla betongytor i reaktorinneslutningen så motsvarade detta ca 1/3 av allt vatten som avfuktades under ett driftår, vilket var ca 12 500 kg.

Simuleringarna och de tidigare mätningarna har visat att betongen fortsatt är mycket fuktig i flera olika betong komponenter i de svenska reaktorinneslutningarna. Vilken effekt detta har på betongkonstruktionernas beständighet är dock ej helt utrett. I flera fall är fortfarande betongen fuktigare än ca 80 % RF, vilket är den nivå som för många korrosionsprocesser är en brytpunkt för när risk föreligger. Om det finns förhållanden där t.ex. korrosion av tätplåten är möjlig kräver dock fortsatt utredning, detta då dessa processer är beroende på att ett antal parametrar är uppfyllda.

Summary

The drying of the concrete within a nuclear reactor containment is a slow process that most likely will continue until the power plant is taken out of businesses. This even if 60-year operation time is considered. The drying rate will however decrease with time and the moisture contribution to the ambient air likewise. Due to this decrease the impact in the climatic conditions will get lower with time

In this study two simulation tools were compared, partly to evaluate if the software WUFI was suitable to use and if it was compatible to the model earlier presented by Oxfall. Oxfalls model was designed for the conditions relevant for the BWR reactor conditions. The aim was further to evaluate if the non-isothermal conditions was possible to evaluate using the WUFI software.

The study showed that the WUFI simulations was compatible to the in-situ measurements earlier presents, as well with the simulations using Oxfalls model. It was however concluded that the accessible concrete material data was not adapted to the concrete used at the nuclear facilities. This was assumed to be one of the reasons for the better correlations between Oxfalls model and the in-situ measurements for Ringhals 1. Best results for WUFI was obtained when using the material called w/c 0.5 from the Fraunhofer-IBP database. The material properties were based on the earlier results presented by Göran Hedenblad.

No previous simulations of the drying rate of the concrete in Ringhals 4 has been done. In this study the WUFI simulated results was thereby only compared to the in-situ measurements. The same material properties as for Ringhals 1 was used and good correlation between the simulations and the measured conditions was met using the w/c 0.5 concrete.

It was concluded that for both Ringhals 1 and 4 WUFI was possible to use for the specific conditions relevant to the nuclear facilities. In order to increase the accuracy, it was however suggested to revise the material properties as well as to include the drying process during constructions phase in the simulations. The model earlier presented by Oxfall was concluded to have the best correspondence to the Ringhals 1 and that the model was also easier to include more advanced material models e.g. to include the hysteresis of the moisture fixation.

The simulations presented showed calculated results of the moisture contribution that could be expected from the concrete structures. These simulations were however not validated to field measurements of the flux. Even though the similarities in moisture history for the WUFI and Oxfall simulations there was a large deviation in outflow for Ringhals 1 where the WUFI had about half the flux. This deviation was believed to be dependent on the material properties, temperature gradients and dryer concrete at the time for the comparison.

A comparison between the calculated moisture contribution from the WUFI simulations on Ringhals 4 and the amount of dehumidified water from the reactor containment was done. The comparison showed that, if the top 60 % of the inner

cylinder wall was considered this part contributed with ca 811 kg water during operation one year. This corresponds to ca 6 % of the total dehumidified water the same period. It was further assumed that this concrete fraction was representable for the entire reactor containment. Through this assumption, it was shown that approximately 1/3 of the total amount water that was dehumidified (12 850 l) came from the concrete within the containment.

From the simulations and from the earlier in situ measurements it has been shown that the concrete still has a high humidity. The effect of this humidity with regards to durability is not fully evaluated. Several areas with humidity levels over 80 % RF has been found. Above this level the risk of corrosion processes is increased. However, other conditions must be fulfilled for the corrosion processes to start. Further research and studies is needed to evaluate these risks.

Innehåll

1	Bakgrund/Problemställning	9
2	Inneklimat i reaktorinneslutningar	11
2.1	Fältnätningar	11
2.1.1	Ringhals 1	12
2.1.2	Ringhals 4	13
3	Simulering av betongkonstruktionernas uttorkning	15
3.1	Matlabsimulering, Oxfall's modell	16
3.1.1	Bakgrund	16
3.1.2	Simuleringar	17
3.1.3	Resultat	18
3.2	WUFI	19
3.2.1	Bakgrund	19
3.2.2	Simuleringar	22
3.3	Jämförelse: Oxfall's modell/WUFI	24
4	Betongens inverkan på inneklimatet	27
4.1	Avfuktning av inneslutningens luft	27
5	Processer som kan orsaka korrosion av tätplåt	30
5.1	Korrosion av metall i fuktig miljö	31
5.2	Korrosion av metall i vattenlinjen	31
6	Slutsats	33
7	Förslag på fortsatt arbete	34
Bilaga A:	Simulerade fruktprofiler, WUFI	37
Bilaga B:	Material	44

1 Bakgrund/Problemställning

Reaktorinneslutningen är den sista barriären för att förhindra ett läckage av radioaktiva partiklar vid ett kärnkraftverk och är således en av dess viktigaste säkerhetsrelaterade konstruktioner. De övriga barriärerna finns i reaktorns inre system genom t.ex. bränsleelementens uppbyggnad samt reaktortanken.

Kärnkraftverken är designade att i första hand förhindra olyckor samt att minimera effekten av en eventuell oförutsedd händelse. Reaktorinneslutningen är designad för att begränsa och kontrollera effekten av dessa händelser genom att motstå inre och yttre påfrestningar under drift samt i händelse av en incident. Reaktorinneslutningen skall begränsa läckage av kontaminerad gas samt minimera påverkan av omgivningen i möjligaste mån. Gastätheten erhålls primärt genom tätplåt i inneslutningens väggar, tak och i bottenplattan. För att förstå och identifiera potentiella förändringar, samt effekter från åldring, av barriären behövs en fördjupad förståelse för hur ingående material ändras över tid

En fullständig genomgång av potentiella korrosionsrisker för tätplåten vid nordiska kärnkraftverk saknas i dagsläget. Tidigare analyser har baserat sina resultat på historiska antaganden om fuktförhållanden i betongen. I ljuset av de senaste upptäckterna inom området kan vissa tidigare slutsatser behöva revideras.

För att möjliggöra en analys av riskerna för korrosion krävs detaljerade kunskaper för de specifika konstruktionerna och dess specifika förhållanden. Generellt för korrosion gäller att vid en för låg syretillgång avstannar korrosionsprocessen, detta sker t.ex. vid en för hög fukthalt. Vid en för låg fuktnivå avstannar dock processen på grund av bl.a. försämrad ledningsförmåga mellan anod och katod. Då fukten har en sådan tydlig roll i korrosionsprocessen är det därför viktigt att i analyser för korrosionsrisk även ha en god uppfattning om rådande fuktförhållanden, fukthistoriken samt en uppfattning om framtida fuktförhållanden. För att erhålla denna typ av kännedom kring fuktförhållanden krävs både relevanta mätningar av fuktnivåerna samt en modell för att simulera processen. Simuleringar kan aldrig ersätta fältmätningar men de kan användas för en fördjupad analys samt för framtida prediktioner och fukthistoriken. Simuleringar bör dock valideras mot fältmätningar för att möjliggöra en mer tillförlitlig framtida prediktion.

Inom ramen för det tidigare doktorandprojektet [1] genomfördes fältmätningar och en modell som beskriver fuktomfördelningen i kokvattenreaktorernas betongkonstruktioner över tid framarbetades. Modellen implementerades sedan i en Matlabrutin. Simuleringsrutinen visade på goda egenskaper och god överensstämmelse med fältmätningarna, dock kräver verktyget förkunskap och är mindre användarvänlig än andra tillgängliga kommersiella beräkningsverktyg. Ett av de beräkningsverktyg som kan vara aktuellt som ett komplement eller ersättare till Matlabrutinen är WUFI, vilket är designat för byggfysik. Vidare hävdas av WUFI's utvecklare att även icke isoterma beräkningar är möjliga. Om icke-isoterma förhållanden kan beaktas öppnar detta upp för att även studera

reaktorinneslutningen vid tryckvattenreaktorer samt andra komponenter som exponeras för icke isoterma förhållanden, t.ex. biologiska skärmen.

Ett av syftena med föreliggande projekt var att utreda om simuleringsverktyget WUFI var lämpligt att användas inom kraftindustrin som verktyg för simuleringar av uttorkningsförloppen i reaktorinneslutningar eller snarliga konstruktioner. Detta för att vidare studier kring riskerna för att ofördelaktiga fuktförhållanden förekommer eller uppstår, vilka kan leda till korrosion av t.ex. tätplåten i reaktorinneslutningarna. En förståelse kring uttorkningshastigheten möjliggör bättre prediktioner kring vilka fuktförhållanden som råder i betongen och primärt kring ingjutna metallobjekt och hur dessa kommer förändras över tid. Inom ramen för projektet gjordes även ytterligare försök att kvantifiera hur stor andel av den totala fuktnivån i reaktorinneslutningarna som förorsakats av uttorkning av betongkonstruktionerna. Detta var en fråga som ej besvarades till fullo i samband med det tidigare doktorandprojektet. Kännedom om eventuella fuktkällors storlek är vidare av signifikans vid analyser av fuktberoende processer, t.ex. risk för ytkondensation och korrosion

Detta projekt är en förstudie till fortsatt tillämpad forskning och utveckling inom ramen för Energiforsk kring identifiering och utredning av eventuella korrosionsrisker av ingjuten metall i de olika klimaten som är aktuella i reaktorinneslutningar. Studien syftar till att delge sådan kunskap som kan användas vid "long term operation" (LTO) utredningar av de nordiska kärnkraftverken.

2 Inneklimat i reaktorinneslutningar

2.1 FÄLTMÄTNINGAR

Direkt efter att en betong har gjutits och börjat härda är betongen mycket fuktig. En stor del av denna fukt binds sedan upp i betongen, i och med hydratationen av betongens cement. Detta kemiskt bundna vatten är hårt bundet i materialet och beaktas som icke förångningsbart. Den resterande mängden vatten är dock förångningsbart och består av det fysiskt bundna vattnet och i vissa fall även fritt vatten. Det förångningsbara vatten finns i betongens porstruktur och börjar torka ut när materialet utsätts för ett torrare klimat. Hur lång tid det tar för en konstruktion att uppnå jämnvikt med omkringliggande klimat beror på betongens förmåga att binda fukt, dess täthet samt det aktuella exponeringsklimatet. För att förstå denna process behövs således både kunskap om det aktuella materialet samt klimatet som det utsätts för.

I ett tidigare genomfört doktorandprojekt [1] studerades fuktförhållanden i reaktorinneslutningarnas betongkonstruktioner. Studiens mål var att beskriva konstruktionernas fukthistorik samt dess fuktbidraget till omkringliggande utrymmen. Inga likdanande studier hade tidigare gjorts och för att möjliggöra analysen designades en mätuppställning för långtidsfältmätningar av fukt och temperatur i betong. Utrustningen installerades i sammanlagt fyra olika reaktorinneslutningar och mätningar genomfördes under vartdera ett driftår.

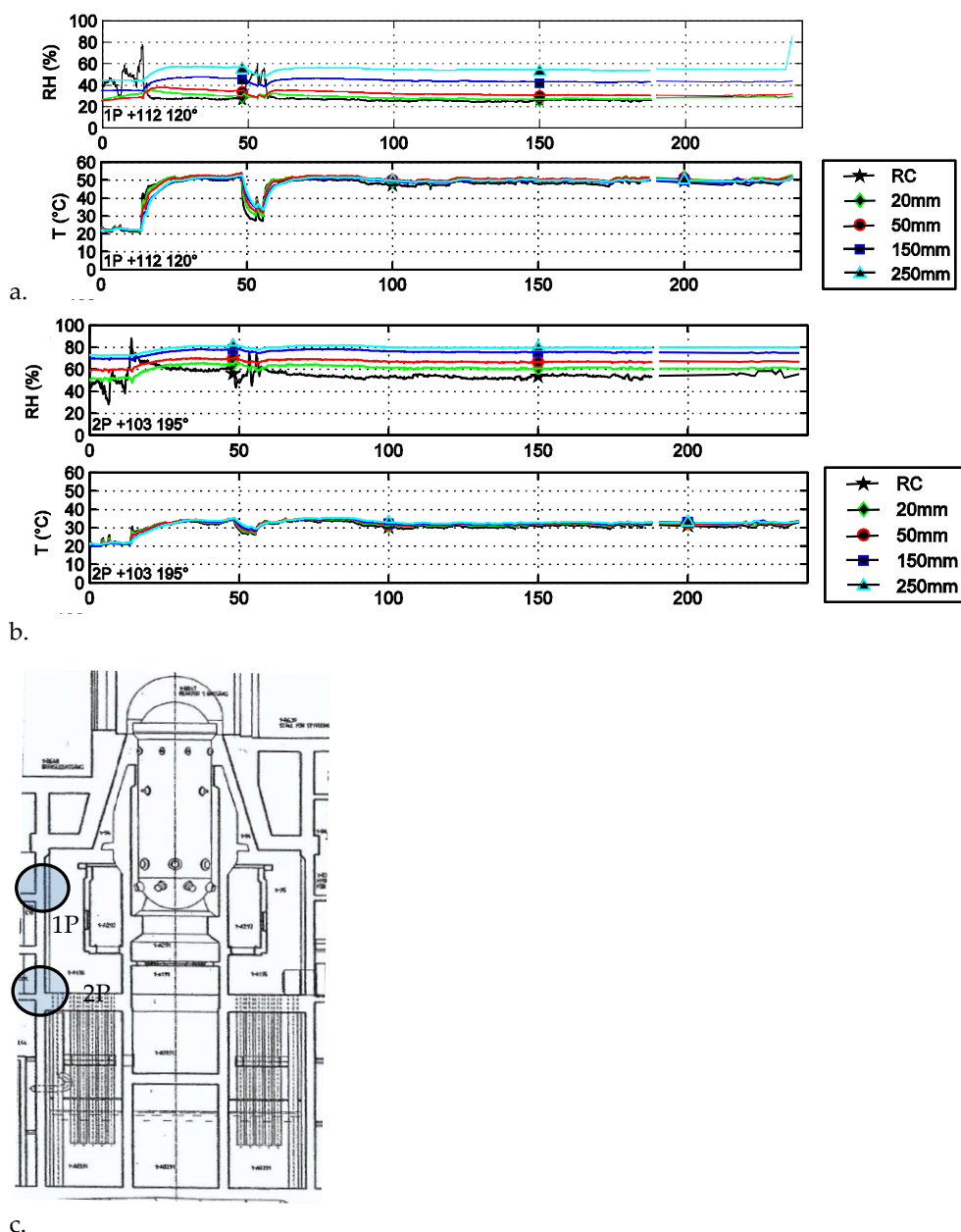
Resultaten från doktorandprojektet visade att till övervägande del så var betongen inne i reaktorinneslutningarna fortsatt mycket fuktig med en relativ fuktighet (RF) i flera fall över 80 %, framför allt i närheten av tätplåten. Klimatet inne i olika inneslutningarna skilde sig något men generellt var temperaturen runt 40 °C och ett RF under 50 %, i flera fall även runt 30 %. Resultaten visade således att även efter över 30 års drift hade betongen inte nått jämnvikt med omgivningen och i vissa fall hade endast RF sjunkit med 10–20 procentenheter långt in i betongen. Orsaken till detta antogs bero på betongens täthet, konstruktionernas tjocklek samt det epoxitåtskikt som samtliga ytor var målat med. Resultaten från tidigare simuleringar presenteras vidare i avsnitt 3.1.

I vissa tidigare analyser av betongens fuktnivåer samt vid analyser av fuktberoende processer, t.ex. krympning och risk för korrosion, har det ofta antagits att betongen redan uppnått jämnvikt med omkringliggande luft, ett sådant resonemang framlyfts t.ex. i SKI rapport 2007:13 [2]. Resultaten som erhållits från doktorandprojektet visar på att detta inte stämmer [1]. En konsekvens av detta är att tidigare analyser om korrosionsrisk av ingjuten i reaktorinneslutningarnas betong inte längre är helt uppdaterade. Tidigare analyser har bland annat baserat sina konklusioner på att betongen varit så torr så att korrosion av metall i ej är aktuell, detta kräver dock är lägre fuktnivå än vad som uppmätts i ett antal fall och är således ej längre ett helt korrekt antagande.

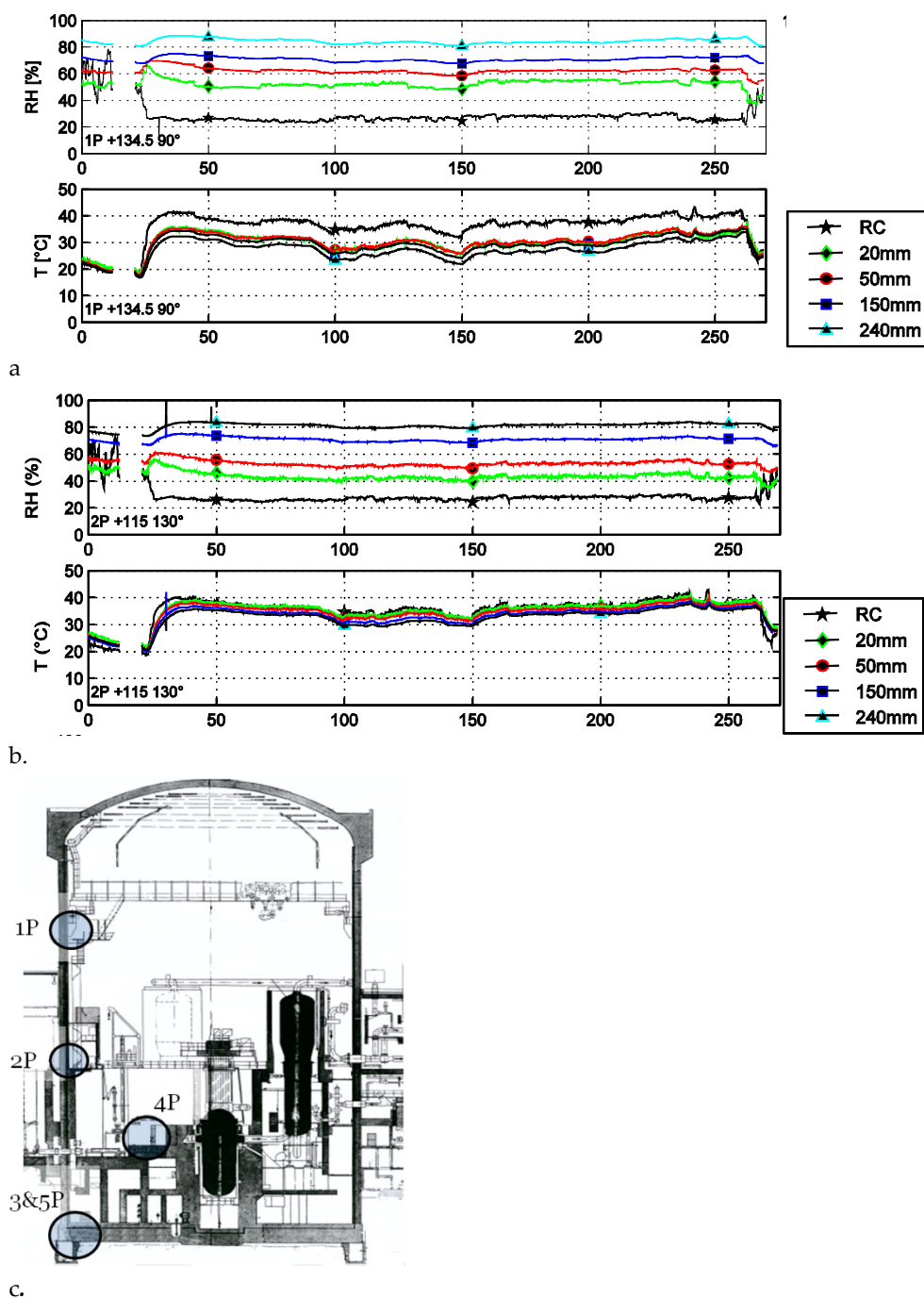
I avsnitt 2.1.1 och 2.1.2 presenteras resultaten av fältmätningarna som genomfördes under doktorandprojektet. Det är dessa uppmätta resultat som ligger till grund för

valideringen av simuleringar och jämförelsen mellan de olika modellerna med verkligheten.

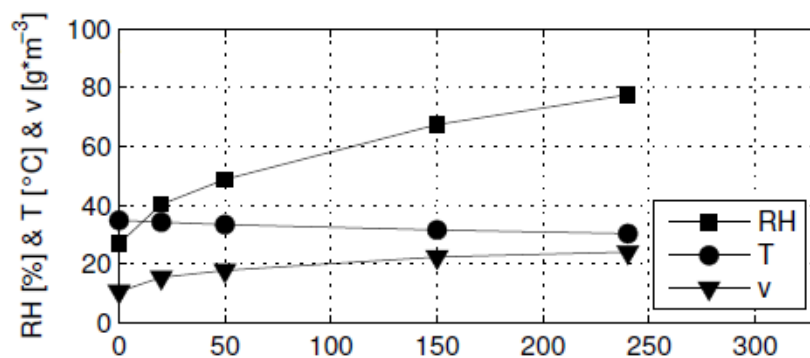
2.1.1 Ringhals 1



2.1.2 Ringhals 4



Figur 2. a, b och c. Diagrammen visar mätresultaten från fältmätningarna vid Ringhals 4 under ca 275 dagar under driftår 2012/2013, ca 29 år efter att kärnkraftverket tog i bruk. Mätningarna har genomförts på två nivåer inne i utrymmet, Zon 1P +134 (a) och zon 2P +115 (b). I vardera område har temperatur (T) och relativ fuktighet (RH) mätts på fem olika djup i betongen (20, 50, 150 och 240 mm) samt i angränsande luft (RC). [1] (c) Principiell placering av mätzoner i Ringhals 4. Endast mätresultat från zon 1P och 2P presenteras i föreliggande rapport.



Figur 3. Figuren illustrera ånghalt, temperatur och relativfuktighetsprofilen i Ringhals 4 inre cylinderväggen på nivå +115 (Zon 2P) i december 2012. Värdena motsvarar medelförhållandet under en dag 104 dagar in i mätperioden. [3]

3 Simulering av betongkonstruktionernas uttorkning

Modellering av fukt och temperaturförändringar i en konstruktion är ett verktyg för att addera och utvidga resultat som erhållits från fältmätningar och laborativa studier. Simuleringarna möjliggör t.ex. prediktioner av framtida förhållanden samt kan användas som verktyg för att förklara och utvärdera experimentella resultat. En modell är dock aldrig starkare än de värden de validerats mot samt den ingående materialdata och de gränsvärden som ansätts.

I dagsläget finns ingen generellt accepterad ickelinjär modell eller metod för att simulera uttorkningsprocessen av porösa material som befinner sig i naturliga förhållanden. Ett flertal modeller har presenterats över tidens lopp men samtliga modeller har sina för och nackdelar. En anpassad modell med avsikt att beskriva uttorkningsförloppen av kokvattenreaktorer har dock tidigare tagits fram i och med det tidigare doktorandprojektet [4]. Modellen är ickelinjär och beaktar kvasi-konstanta temperaturförhållanden. Modellen visade på god överensstämmelse till fältmätningar vid tre svenska kärnkraftverk, dock var den inte möjlig att använda vid tryckvattenreaktorer på grund av en stor temperaturgradient i dess betongkomponenter. Den tidigare modellen användes för att upprätta en Matlabrutin med avsikt att erhålla ett verktyg för fortsatta simuleringar i liknande miljöer. Modellen kräver dock viss förkunskap och visst handpålägg av användaren.

År 1995 framarbetade Künzle [5] en hygrotermisk modell för simuleringar av fukt och temperaturrörelser i flerskiktsbyggnadshöljen. Künzle's modell användes sedan för att upprätta simuleringsverktyget WUFI (Wärme und Feuchte Instationär – i.e. heat and moisture transiency). Simuleringsverktyget framarbetades av Fraunhofer IBP och är ett kommersiellt verktyg designat för materialtillverkare, konsulter, arkitekter och experter inom byggfysik. Den svenska versionen av WUFI är framarbetad tillsammans med avdelningen för byggnadsfysik vid Lunds tekniska högskola.

Till skillnad från Oxfall's modell är WUFI inte direkt anpassat till förhållanden som råder vid kärnkraftverk utan anpassat för bostäder och andra lokaler med naturliga klimatvariationer och klimatpåverkan. På grund av WUFI's hygrotermiska modell tillåts dock även ickeisoterma förhållanden och egen definierade klimatförhållanden. Vilket således öppnar upp för simuleringar av kärnkraftverk. Dessutom möjliggör modellen simuleringar av ickeisoterma konstruktioner, däribland cylinderväggen vid tryckvattenreaktorer.

Kapitel 3 redovisar en kort genomgång av de båda modellerna samt en jämförelse mellan simuleringarna som genomfördes med Oxfall's modell [4], samt med nya simuleringar där WUFI använts. Samtliga simuleringar jämförs även mot de tidigare uppmätta resultaten från fältmätningarna vid Ringhals 1 och Ringhals 4.

3.1 MATLABSIMULERING, OXFALL'S MODELL

3.1.1 Bakgrund

För att möjliggöra en prediktion av framtida fuktförhållanden samt beskriva konstruktionernas fukthistorik, framarbetades en modell inom ramen för det tidigare doktorandprojektet. Modellen baserades primärt på en tidigare modellen av Bazant and Najjar [6]. Ursprungsmodellen beaktade isoterma kvasi-konstanta temperaturförhållanden. Vilket även är en möjlig beskrivning av förhållandena vid de nordiska kokvattenreaktorerna. Med isoterma kvasi-konstant temperaturförhållanden menas att modellen är möjlig att använda vid klimatförhållanden som endast medför små kontinuerliga temperaturvariationer samt större temperatursprång. För kokvattenreaktorerna inkluderar detta de olika klimaten vid drift och under revision. För tryckvattenreaktorerna är dock förhållandena icke-isoterma med stora temperaturvariationer vilka följer utomhustemperaturen samt har betydande temperaturgradienter i konstruktionerna [7]. För att validera den nya modellen jämfördes de simulerade resultat med uppmätta mätvärdena från fältmätningarna vid Ringhals 1, Forsmark 2 och Forsmark 3 [1].

Modellen som användes för simuleringarna beaktade olika temperaturnivåer vilket således krävde temperaturberoende materialparametrar. De parametrar som var nödvändiga för simuleringarna var fukttransportkoefficient och betongens fuktfixering. Modellen beaktade även den temperaturberoende transportpotentialen samt momentana RF variationer beroende på temperaturvariationer, vilka var aktuella i stegen mellan drift och revision.

För simuleringarna antogs att betongen var fullt hydratiserad innan de första beräkningarna samt att den initial RF nivån var 90 % i konstruktionerna. Den initiala nivån på RF baserades på en antagen initial självuttorkning från dess att betongen gjutits till kommersiell drift.

Ekvation 1, visar den nya modell vilken sedan användes för att konstruera den Matlabrutin som sedermera användes för att simulera uttorkningen av inre cylinderväggarna vid tre olika kokvattenreaktorer.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = k(T, \phi) \nabla \left(\delta(T, \phi) \nabla \left(\phi + K(\phi) \frac{\partial T}{\partial t} \right) \right) + K(\phi) \frac{\partial T}{\partial t} \quad [1]$$

där:

ϕ	[-]	Relativ fuktighet
t	[s]	Tid
$k(T, \phi)$	[m ³ kg ⁻¹]	Inv. derivatan för mtrl. sorptionsisotermen
$\delta(T, \phi)$	[kg m ⁻¹ s ⁻¹]	Fukttransportkoefficient
$K(\phi)$	[°C ⁻¹]	Hygrotermisk koefficient
T	[°C]	Temperatur

3.1.2 Simuleringar

Simuleringarna som gjordes med den tidigare framarbetade Matlabrutinen beskrivs i sin helhet i tidigare publicerat doktorsavhandlingen [1, 4]. Simuleringarna genomfördes för vardera kraftverket med gränsvärden erhållna från tidigare fältnätningar. Simuleringarna var isoterma och således förekom inga temperaturgradienter i väggarna, dock beaktade simuleringarna de stora temperatur och RF variationen mellan drift och revision. Simuleringarna beaktade tidsspannet från kommersiell driftstart samt till 60 års drift. Simuleringarna presenterar även resultat vid 36års drift, den tidpunkt som motsvarar aktuell drifttid vid fältnätningarna.

Perioden från det att betongen gjutits och fram tills det att verken togs i drift har ej beaktats. Startvärden för samtliga simuleringar har varit 20 °C och 90 % RF. Den initiala perioden var exkluderad på grund av avsaknad data kring förhållanden i inneslutningen under denna period.

Baserat på fältnätningarna delades driftåret för Ringhals 1 in i två delar, revision en månad och drift elva månader. Uppdelningen baserades på de stabila klimatförhållanden som rådde under respektive period. Exponeringsklimatet kunde på grund av denna stabilitet sättas som konstant vid respektive period för de två zoner som analyserades. Samtliga indata för simuleringarna återfinns i Tabell 1.

Tabell 1: Indata för simuleringar av uttorkningen av Ringhals 1 med Matlabrutinen baserad på Oxfall's modell. Övre motsvarar den övre halvan av övre primärutrymmet (zon 1P i figur 1c igår i övre halvan) och Undre den lägre nivån (zon 2P i figur 1c ingår i den undre halvan).

	Ringhals 1	
	Övre	Undre
Tot, Tid [år]	60	60
Tidsteg [timmar]	3	3
Revision / Drift [månad]	1 / 11	1 / 11
Väggjocklek [mm]	330	330
Väggarea [m ²]	475	475
RF/T - Outage	45%RH/21.5°C	45%RH/21°C
RF/T - Operation	26 %RH/48°C	53%RH/31°C
Epoxyiskt (Z_v) [$s\ m^{-1}$]	$1.25 \cdot 10^5$	$1.25 \cdot 10^5$
Btg. $\delta_v < 65\%RH$ [$m^2\ s^{-1}$]	$0.56 \cdot 10^{-7}$	$0.56 \cdot 10^{-7}$
Fukttinhåll 100 %RH [$kg\ m^{-3}$]	105	105

Materialdatan till simuleringarna baserades på materialstudien som genomfördes inom ramen för doktorandprojektet. Materialstudien gjordes på betong extraherat från inre cylinderväggen vid Ringhals 4 men antogs vara adekvat till betongen som användes vid samtliga svenska kärnkraftverk. Antagandet baserades på jämförelser av betongens sammansättning, vilken visade på god överensstämmelse [1]. Änggenomgångsmotståndet (Z_v) för betongytornas epoxifärg sattes till 125 000 s/m motsvarande 3 m stillastående luft vid 20 °C (sd). Det ansatta värdet baseras

på resultaten av mätningar av en epoxi- och betongkomposit, studien presenteras i doktorsavhandlingen.

3.1.3 Resultat

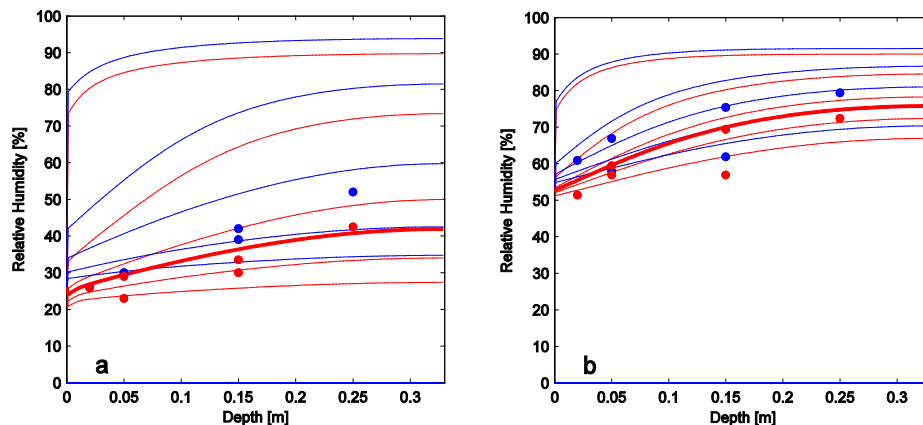
Erhållna resultat från de tidigare simuleringarna visade att den pågående uttorkning av inneslutningarnas betong bidrar med en signifikant mängd vatten till omgivningen. Enkom från inneslutningsväggen i övre primärutrymmet i Ringhals 1 så har ca tolv kubikmeter vatten torkats ut sedan kärnkraftverket togs i drift. Mängden betong som detta fukttillskott kommer från motsvarar ca 16 % av den totala mängden betong i inneslutningarna [1, 4].

Generellt visade simuleringarna på god överensstämmelse med de tidigare uppmätta fuktnivåerna. Baserat på simuleringar och mätresultaten är det dock ej möjligt att utvärdera till vilken grad de framtida prediktionerna är sanna. Det bedöms dock som att framtidsprediktionerna är goda uppskattningar men att uppföljande mätningar är nödvändiga inom 5 till 15 år.

Ringhals1

De samlade resultaten från de tidigare simuleringarna och mätningarna visade att uttorkning av reaktorinneslutningarnas betong fortfarande pågår efter runt 36 år i drift. Betongen kommer även i fortsättningen att bidra med fukt till inneslutningens utrymmen, enligt simuleringarna, även efter det att verket tas ur drift efter 60 driftår. Den sammanlagda uttorkningen fram till de utförda mätningarna motsvarar i storleksordningen 35–45 % av betongens initiala förångningsbara vatten [4]. Motsvarande värde vid 60 års drift förutspås vara 45–55 %. Huvuddelen av betongkonstruktionernas uttorkning har således redan inträffat och fukttillskottet till inneslutningens luft kommer att ytterligare att avta med tiden.

Figur 4 a och b presenterar den simulerade fruktprofilen vid olika tidpunkter samt de uppmätta profilerna efter 36 års drift.



Figur 4 a and b. Simulerade och uppmätta resultat från Ringhals 1 där a representerar den övre delen av primärutrymmet och b den nedre delen. Diagrammen visar de simulerade resultaten av inneslutningsväggs RF-profiler efter 1, 15, 30, 45, 60 år. Blå linje motsvarar RF under drift och röd motsvarar förhållandena under revision. Den tjockare röda linjen motsvarar RF under revision efter 36 års drift. De röda och blåa prickarna visar motsvarande uppmätta RF nivåerna vid de olika mät djupen under drift respektive revision.

Från de tidigare simuleringarna kan utläsas med vilken hastighet uttorkningshastigheten avstannade. Simuleringarna visade att redan efter 10 år så hade flödet reducerats till en tredjedel respektive en femtedel, av det initiala flödet, för den övre respektive nedre delen av primär utrymmet vid Ringhals 1. Resultaten visar ytterligare kraftig reduktion av flödet för den övre delen av primärutrymme med ytterligares en halvering av flödet till 30 års drift medan en mer sakta avklingning för den lägre nivån observeras.

Medelflödet från betongen i den övre delen av primärutrymme efter 36 års drift beräknades till $0.67 \text{ g}/(\text{m}^2\text{dag})$, motsvarande för den lägre regionen var $0.55 \text{ g}/(\text{m}^2\text{dag})$ [4]. Totalt är den aktuella väggen 950 m^2 , om det förutsätts att de två simuleringarna motsvarar vardera 50 % av väggen ger detta ett totalt dagsflöde på $0.58 \text{ kg}/\text{dag}$. Under ett driftår, då en revisionsperiod på 1 månad är borträknad, motsvarar detta ett totalt fuktillskott på ca 194 kg vatten.

Inre cylinderväggen i övre primärutrymme består av totalt ca 317 m^3 betong, vilket motsvarar ca 16 % av den totala betongmängd innanför tätplåten vid Ringhals 1. Vilken effekt resterande betong har är dock ej möjligt att utvärdera utan kompletterande simuleringar. Från övriga uppmätta resultat som presenteras i avhandlingen går dock att utläsa att övriga uppmätta zoner inte än nått jämnvikt med omgivning och ett visst fuktillskott kan därav vara väntat.

3.2 WUFI

3.2.1 Bakgrund

Simuleringsverktyget WUFI är ett operativsystemsbaserat datorprogram som bygger på en hygrotermisk modell som presenterades av Kunzel 1995 [5]. Programmet och modellen var designat för att användas av bland annat arkitekter

och konstruktörer. Programvaran är ett menybaserat program vilket kan ge specialanpassade lösningar för fuktprojektering och skadeutredningar av olika typer av byggnadshöljessystem.

Künzel's modellen är en icke statisk, endimensionell värme- och fukttransport modell som kan beakta hygrotermiska förhållanden för ett flertal olika byggnadsmaterialstyper, som påverkas av simulerade representativa klimatförhållanden. Modellen och programmet är konstruerat för simuleringar av byggnadshöljen placerade i olika geografiska områden. Specifika program med nationella materialdata finns för flera olika marknader, t.ex. USA eller Sverige [8]. I Sverige är programvaran framarbetad och anpassad för svenska förhållandena i samarbete med avdelningen för byggnadsfysik vid Lunds tekniska högskola.

Modellen baseras på den allmänna förståelsen att fukttransport i porösa material till största del är en kombination av ångdiffusion, ytdiffusion och kapillärtransport [8]. Inom byggfysiken anses ångdiffusionen samt den vätsketransport som sker genom kapillära krafter vara de dominerande [5]. Då dessa transporttyper drivs av olika potentialer kan detta medföra att i vissa förhållanden så motverka de varandra. I isoterma förhållanden blir detta aldrig ett problem men för en vägg som på ena sidan exponeras för vinterklimat och insidan exponeras ett varmt inomhus klimat kan detta uppstå. Anledningen till detta är då diffusionen, vilken styrs av ångtrycksgradienten, ger ett utåtgående flöde medan ytdiffusionen och kapillärtransporten, vilka beror på molekyllär densiteten och därigenom RF, ger ett flöde åt motsatt håll. I teorin kan dessa transportfenomen till och med ta ut varandra så att inget nettoflöde sker. Kapillärflödet sker primärt i höga fuktintervall och drivs av kapillärtrycket, denna potential kan dock via Kelvins lag omskrivas till RF.

I modellen har temperaturen endast en liten effekt på vätsketransporten genom en mindre influens på viskositet och där genom på vätsketransportkoefficienten. Däremot så är ångtransporten starkt beroende på temperaturvariationer då den drivande potentialen, ångtrycket, är exponentiellt beroenden med temperatur [8]. I övrigt anses att eventuella effekter från temperatur kan bortses från, inom ramen för byggfysiken [5], detta gäller även de facto att RF i ett poröst material påverkas av ändrad temperatur. I Oxfall's modell så inkluderas detta genom implementering av den hygrotermiska koefficienten, något som ej inkluderas i WUFI.

I Künzel's modell används relativ fuktighet (RF) och ångtryck för att beskriva den kombinerade fukttransporten. Ekvation 2 och 3 nedan visar fukttransport och energiflödes modellerna som används i WUFI. De sammanlänkade transportekvationerna löses i WUFI numeriskt genom ett implicit finita volym system [8].

Fukttransport:

$$\frac{\partial w}{\partial \phi} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{\phi} \nabla \phi + \delta_p \nabla (\phi p_{sat})) \quad [2]$$

Värmetransfer:

$$\frac{\partial H}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + h_v \nabla \cdot (\delta_p \nabla (\phi p_{sat})) \quad [3]$$

c=	specifik värmekapacitet, J/kgK
D ϕ =	vätsketransportkoefficient, kg/ms
H=	Total entalpi, J/m ³
h _v =	Latent värme från fasförändring, J/kg
k=	Termisk konduktivitet, J/kg
p _{sat} =	Mättnadsångtryck, Pa
t=	Tid, s
T=	Temperatur, K
w=	Fukthalt, kg/m ³
δ_p =	Ångpermeabilitet, kg/(msPa)
ϕ =	Relativ fuktighet

För att genomföra simuleringar med WUFI krävs som minst fem olika materialparametrar, värmekapacitet, termiskkonduktivitet, densitet, porositet och ångdiffusionsmotsståndsfaktorn. Om simuleringarna även avses beakta hygroskopisitet och det kapillära funktområdet då skall även materialates fuktfixering och vätskekonduktivitet inkluderas [8]. Vad gäller fuktfixeringen så beaktas inte hysteresis i modellen av Kunzel utan ett medel mellan absorptions- och desorptions-isotermen anses vara tillräckligt noggrann för simuleringar inom byggfysikaliska området [5].

Som för alla fukttransportmodeller är även WUFI starkt beroende på tillgängliga materialdata. WUFI använde materialdata från olika källor däribland, LTH och Fraunhofer-IBP för Europa och ASHRAE 2000 för Nordamerika. Icke tillförlitlig materialkännedom har historiskt varit ett av de största hindren för att genomföra simuleringar med hög noggrannhet [8]. För en ökad simuleringsnoggrannhet krävs således specifika materialstudier. Det bör dock beaktas att i många fall kan tabulerade materialdata ge ett tillräckligt gott resultat för att studera generella frågeställningar.

En av de materialparametrarna som är av stor betydelse för simuleringarnas noggrannhet och bör väljas eller bestämmas med omsorg är ångdiffusionsmotsståndsfaktorn, μ . Denna faktor är en omräkningsfaktor som möjliggör en omräkning av ångdiffusionskoefficienten i luft till ångdiffusionskoefficienter för det specifika materialet. I WUFI används tabellerade ångdiffusionsmotsståndsfaktorn för flera byggmaterial från den tyska standarden DIN 4108. Ångdiffusionsmotsståndsfaktorn för andra material kan bestämmas genom steady-state diffusion mätningar, DIN 52 615, eller för homogena material via transient diffusion mätningar. Utöver ångtransporten bör även vätsketransport beaktas. Vätsketransportkoefficienten är dock svårare att bestämma men kan bestämmas via en fiktiv ångmotsståndsfaktor för relativa fuktigheter upp till ca 95 % i enlighet med DIN 52 615 [5].

För att simulera hur en konstruktion påverkas av omgivningen så har WUFI inkluderat olika möjligheter att beskriva gränsvärden. Omkringliggande klimat kan beskrivas med stationära nivåer, sinusvariationer samt varierande klimat baserat på det genomsnittliga förhållandena som råder för olika geografiska områden. Utöver detta går det även att inkludera egen definierade klimatvariationer. WUFI erbjuder även verktyg för att inkludera effekter från solstrålning samt regn.

3.2.2 Simuleringar

Simuleringarna som gjordes i WUFI motsvarade den exponeringstiden som gått sedan respektive reaktorerna togs i kommersiell drift och fram till datum för fältmätningarna som genomfördes 2012–2013. Eventuella effekter från det att betongen gjutits och fram tills det att verken togs i drift har ej beaktats. Startvärden för samtliga simuleringar har varit 20 °C och 90 % RF, i enlighet med tidigare utförda simuleringar.

För både Ringhals 1 och Ringhals 4 delades varje år in i två faser, drift och revision. Revisionen för Ringhals 1 placerades under juni månad för varje år och med en månads varaktighet. För Ringhals 4 lades revisionen mellan den 23/8 till 23/9, vilket till stor del motsvarar revisionsperioden 2012 och därav möjliggjorde gränsvärden från fältmätningarna.

Klimatförhållanden i reaktorinneslutningen under revision och under drift baserades på tidigare mätningar. För Ringhals 1 har konstanta nivåer använts vid drift och revision, detta i likhet med tidigare presenterade simuleringar [1]. Nivåerna avser medeltemperaturer i inneslutningen under respektive drift och revision. Tidigare mätningar visade på endast mindre variationer, varav följande approach ansågs adekvat. För Ringhals 4 har samtliga år loopats med samma förhållanden som uppmättes 2012–2013.

Klimat som påverkar utsidan av Ringhals 1 cylindervägg beskrivs med en sinusvariation och baseras på erhållen klimatdata som presenterats i tidigare Energiforskrapport 09:100 [9]. För Ringhals 4 användes klimatdata från en av SMHI:s närliggande stationer, med data för samma år som fältmätningarna genomfördes. Det har således antagits att det aktuella årets temperaturförhållanden är representativa för hela simuleringsperioden. Anledningen till den valda approachen var då inneklimatet hade en direkt korrelation till uteklimatet [7].

Samtliga simuleringar som genomfördes med programvaran WUFI gjordes med materialparameterar definierade i tillhörande materialdatabas. Materialdatan var framtagen av Lunds Tekniska högskola respektive Fraunhofer-IBP. Aktuella materialegenskaper återfinns i Bilaga B, de tre betonger som inkluderats i denna studie valdes utifrån mest överensstämmelse med faktiskt material som användes vid de svenska verken. Betongerna benämns som, LTH vct 0.4 välhydratiserad (data från [10]), Concrete C35/45, Fraunhofer-IBP, samt Concrete vct 0.5, Fraunhofer-IBP (baserat på data från [10]). Den största skillnaden mellan de tre olika materialen var att materialdatan från den tyska databasen innehöll både ett konstant diffusionsmotståndstal samt en fuktberoende

vätsketransportkoefficienten, medan endast ett fuktberoende diffusionsmotståndstal delgavs för materialet från LTH.

Ingen av de använda materialen är direkt överensstämmande med den betongen som användes vid de olika kärnkraftverken. Den tidigare studien visade på att fuktegenskaperna för betongen definierad av Hedenblad [10] är i storleksordningen 2-3 gånger så permeabel som den betongen som användes vid Ringhals 4 [1]. Data från Hedenblad har använts både för betongen som benämns vct 0.4 LTH samt vct 0.5.

För att inkludera effekten av betongytornas epoxiskikt så har ett ytmotstånd (sd) på 3 m ansatts. Det ansatta värdet baseras på tidigare mätningar på epoxikompositprovkroppar från Ringhals 4, bestående av 10 mm betong och dess epoxiytskikt. Dessa mätningar gav ett ånggenomgångsmotstånd på 125 000 s/m i höga fuktintervall [1], vilket motsvarar 3 m stillastående luft vid 20 °C (sd). Även ett ytmotstånd på 15 m användes vid ett antal simuleringar för jämförelse och att visualisera ytskiktets inverkan.

Ringhals 1

Simuleringar av övre och nedre delen i övre primärutrymme för Ringhals 1 genomfördes. Tabell 2 presenterar det aktuella medelflödet efter 36 års drift för de olika materialvalen i övre respektive nedre zonen i Ringhals 1.

Tabell 2. Erhållet fuktillskott från övre och undre halvan av den inre cylinderväggen vid Ringhals 1 från simuleringar med WUFI för olika materialdata. Resultaten motsvarar det erhållna flödet efter 36 års drift.

	Betong: C35/45 Epoxi: 3 m sd	Betong: vct 0.4 LTH Epoxi: 3 m sd	Betong vct 0.5 Epoxi: 3 m sd	Betong vct 0.5 Epoxi: 15 m sd
Ringhals 1 övre zon	0.044 g/(m ² dygn) 7.03 kg/year	0.14 g/(m ² dygn) 22.25 kg/year	0.14 g/(m ² dygn) 22.14 kg/year	0.28 g/(m ² dygn) 45.23 kg/year
Ringhals 1 undre zon	0.26 g/(m ² dygn) 40.87 kg/year	0.26 g/(m ² dygn) 41.38 kg/year	0.41 g/(m ² dygn) 65.30 kg/year	0.55 g/(m ² dygn) 87.18 kg/year

I Bilaga A, figurerna A:1 - A:8 visar fukt och temperaturprofilerna för de olika simuleringarna i betongkonstruktionerna precis innan revision. Figurerna visar förhållandena efter 36 års drift. Den skuggade zonen visar temperatur och fuktintervallens förändring sedan start. Vid jämförelse mellan de simulerade profilerna och fältmätningarna, överensstämde modellen bäst när betongen vct 0.5 användes. Resultatet från simuleringen visade dock på en något för låg nivå varav extra simulering med ett motstånd på 15 m gjordes. Dessa simuleringar gav en bättre överensstämmelse vid tätplåten men något mer avvikande vid ytan.

Resultaten från simuleringarna visar på en spridning mellan fruktprofilerna tillika en variation av storleken på det medelflöde som sker från väggen under ett år. Från jämförelsen med fältmätningarna erhöles den bästa överensstämmelsen vct 0.5 betongen och 3 respektive 15 m ytmotstånd. Det totala fuktillskottet under det aktuella året var 87.4 kg/år för sd 3 m respektive 132.4 kg/år för sd 15 m.

Ringhals 4

Då inga simuleringar tidigare gjorts för Ringhals 4 har endast en jämförelse med de uppmätta resultaten från fältmätningarna genomförts. Tre fördefinierade material från WUFI databas användes för jämförelse. Tabell 3 presenterar erhållna flödesresultat från simuleringarna för driftperioden 2010–2011 och i Bilaga A figur A:9 – 2:12 presenteras de slutliga fruktprofilerna som erhållits efter 30 års drift, i.e. 2013. Driftåret 2012 - 2013 motsvarar tidpunkten för fältmätningarna och 2010–2011 motsvarar perioden från vilken data för avfuktning erhållits. Skillnaderna mellan de två perioderna är dock marginella. En analys av avfuktningen presenteras vidare i avsnitt 4.

Tabell 3. Erhållet fukttillskott från de översta 60 % av den inre cylinderväggen vid Ringhals 4 från simuleringar med WUFI för olika materialdata. Resultaten motsvarar det erhållna flödet efter 28 års drift.

	Betong: C35/45 Epoxy: 3 m sd	Betong: vct 0.4 LTH Epoxy: 3 m sd	Betong vct 0.5 Epoxy: 3 m sd
Ringhals 4 övre zon	0.57 g/(m ² dygn) 684.51 kg/år	0.61 g/(m ² dygn) 733.96 kg/år	0.78 g/(m ² dygn) 811.28 kg/år

Totalt sedan reaktorn togs i kommersiell drift och med givna antaganden för simuleringarna med betongen vct 0.5 och 3 m sd har det totala fukttillskottet från de övre 60 % av inre cylinderväggen varit 43.7 m³ vatten. Totalt så motsvarar denna del av konstruktionen ca 1200 m³ betong med en exponerad yta på ca 3500 m².

3.3 JÄMFÖRELSE: OXFALL'S MODELL/WUFI

Vid en jämförelse mellan modellerna är det tydligt att val av materialdata har en signifikant inverkan på slutresultaten. Utöver material har även initiala förhållanden samt gränsvärden en mycket stor inverkan. För simuleringarna av Ringhals 1 sattes initiala förhållanden till det samma som med Oxfall's modell. Olika gränsvärden ansattas dock då WUFI möjliggjorde att en varierande temperatur på konstruktionens yttersida, och då en temperaturgradient var möjlig. I simuleringarna med Oxfalls modell antogs konstant temperatur i betongen vilket medförde att en transport på grund av temperaturgradienter i betongen ej beaktades.

Vid en jämförelse mellan fruktprofilerna som presenterats i Bilaga A figur A:1-A:8, vilka visar inre och yttre cylinderväggen för Ringhals 1 övre och undre del, så framgår att bäst överensstämmelse med de tidigare uppmätta resultaten, tillika de simulerade resultaten från Oxfall's modell, erhöles med betongen vct 0.5. Kompletterande försök med simuleringar där ytmotståndet (sd) ökades från 3 m till 15 m genomfördes för att belysa tätskiktets inverkan, figur A:4 och A:8. Resultaten från dessa simuleringar gav både en högre inre och yttre nivå yttre nivå samt en planare profil, jämfört med tidigare. För simuleringarna med sed 3m är RH något högre vid ytan och relativt lika på stort djup. Detta tydliggjorde att betongen vid de svenska kärnkraftverken är något tätare än materialmodellerna som fanns att tillgå i WUFI.

En jämförelse av uppmätta och simulerade RF värden på samma mätdjup som för mätkampanjen presenteras i Tabell 4. Jämförelsen görs mellan betongen vct 0.5 ytmotstånd SD 3 m samt SD 15 m för WUFI simuleringarna. Oxfalls modell samt uppmätta förhållandena motsvarar slutet av revisionen medan WUFI motsvarar precis innan. Anledningen till detta val beror på att WUFI ej beaktar den hygrotermiska effekten vilket behöver RF under drift. Skillnaden mellan början och slutet av revisionen är mycket liten förutom för mätningarna vid 20 mm vilka kan påverkas av uppfuktning under revision.

Tabell 4. Uppmätta och simulerade RF i inrecylinderväggen på Ringhals 1 efter 36 års drift. Simuleringarna från Oxfalls modell och fältmätningarna (primärmätningarna) motsvarar revisionsslut och WUFI motsvarar en tidpunkt precis innan revision. Eventuella skillnader berör primärt nivåerna på 20 mm djup.

		R1 Topp				R1 Bott			
		20	50	150	250	20	50	150	250
Mätning	%-RF	26.0	29.0	33.5	42.5	51.5	59.5	69.5	72.5
Oxfall	%-RF	27.0	29.3	36.5	40.8	55.8	59.9	70.3	75.0
WUFI sd 3m	%-RF	31.1	32.8	38.0	42.6	58.9	61.2	68.3	72.3
WUFI sd 15m	%-RF	35.5	37.9	45.5	51.1	64.1	66.7	73.0	74.4

Skillnaden mellan de båda modellerna är dock tydligast vid en jämförelse av det totala fukttillskottet under driftperioden 2012 till 2013. Från simuleringarna i Oxfall's modell erhöles ett utflöde på ca 194 kg vatten och drift år. Motsvarande från WUFI var 87 kg. Anledningen till skillnaderna kan sannolikt kopplas till både skillnader i fuktfixering i betongen, dess transportmotstånd, temperaturgradienterna samt RF förändringarna på grund av temperaturvariationer. Utifrån givna data är det dock ej möjligt att avgöra vilken av dessa faktorer som har störst inverkan.

Från simuleringarna av uttorkningen av cylinderväggen i Ringhals 4 kunde slutsatsen dras att liksom för Ringhals 1 var betongen vct 0.5 den som gav bäst överensstämmelse med de uppmätta resultaten. Även för Ringhals 4 var fuktnivån på stort djup något lägre än de uppmätta nivåerna och detta kan antas bero på att betongen är tätare. Simuleringarna visade att betongen vct 0.4 LTH var den som avvek mest från både de uppmätta nivåerna. Anledningen till detta var att materialparametrarna inte beaktar väsketransporten separat, och således ej temperatur gradienten.

Vilken av de två modellerna som är den som ger det mest sanna framtidsprediktionen eller som beskriver den historiska förändringen bäst är inte möjligt att svara på med givna data. Båda modellerna gav dock en god överensstämmelse med de uppmätta resultaten. Från den teoretiska genomgången framgår att modellerna är mycket lika varandra i grunderna med de skillnader att WUFI även beaktar temperaturgradienter. Dock saknar WUFI möjligheten till hygrotermisk effekt samt möjligheten att addera mer avancerade materialparametermodeller inklusive t.ex. hysteresis, till skillnad från Oxfall's modell och Matlab rutin.

Sammantaget visade jämförelsen mellan simuleringar att WUFI är ett verktyg som kan användas till ändamålet men dock bör relevant materialdata användas för ett än bättre resultat. Bäst överensstämmelse med Ringhals 1 erhöles dock med Oxfall's modell om en med liten marginal. För en mer komplett jämförelse som även möjliggör jämförelse mellan modellernas exakthet över tid krävs kompletterande fältmätningar inom 5–10 år. Detta är avgörande för att möjliggöra en utvärdering av modellernas framtidsprediktioner samt dess förmåga att beskriva historiska förhållanden.

Med rådande databaser är betongen som benämns vct 0.5 och som återfinns i materialdatabasen från Fraunhofer-IBP den som ger bäst resultat. För ett än mer verklig simulering bör även påverkan från de första åren beaktas. För detta behövs dock kännedom om klimatförhållanden under byggnationsperioden av kärnkraftverken.

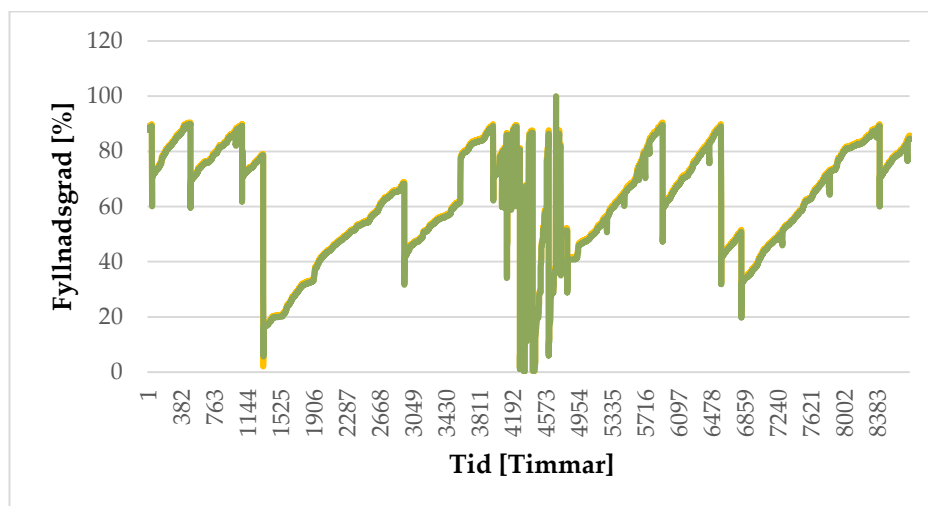
4 Betongens inverkan på inneklimatet

4.1 AVFUKTNING AV INNESLUTNINGENS LUFT

En reaktorinneslutning är till stor del ett slutet system med ingen direkt koppling till omgivande klimat. Den fukt som tas upp av luften inne i reaktorinneslutningen under drift måste således på något sätt regleras. För både tryckvattenreaktorer och kokvattenreaktorer sker detta med hjälp av avfuktningssystem.

Avfuktningen görs för att hålla inneslutnings luftfuktighet på sådan nivå att den inte påverkar känslig utrustning eller andra komponenter. Utan en avfuktning skulle sannolikt luftfuktigheten inne i inneslutningen när på nå ångmättnad under drift. Avfuktningen sker genom avfuktningssystem som via kondensation torkar luften. För kokvattenreaktorerna sker detta i ett system som är kopplat till kondensationsbassängen i sekundärutrymmet och mängden som avfuktas mäts inte och kan därför inte kvantifieras.

Tryckvattenreaktorerna saknar en tillgänglig vattenreservoar inne i reaktorinneslutningen och det avfuktade vattnet samlas istället upp i en sump i botten av inneslutningen. Sumpen i Ringhals 4 har dimensionerna 1.2*1.8*2 m och rymmer således totalt 4.32 m³ vatten. Vattenvolymen regleras via pumpar som tömmer bassängen partiellt vid behov. Figur 5 visar fyllnadsgraden av sumpen under 2010. Diagrammet visar en kontinuerlig påfyllning av vatten under hela driftåret och från mätningarna fås en genomsnittlig fyllnadshastighet på 0.037 höjd-%/h, vilket motsvarar 38.4 kg/dygn och 12 850 kg/driftår. Det kan antas att detta värde även är representativt för omkringliggande år då fukttillskottet under drift sker kontinuerligt under åren och ej på grund av särskilda händelser. Vidare antas att övriga fuktkällor är de samma från år till år.



Figur 5. Fyllnadsgradsutvecklingen av uppsamling av kondensvatten för Ringhals 4 under 2010. Vattnet samlas i en sump med dimensionerna 1.2*1.8*2 m och sumpen töms vid vissa intervall, eller nivåer, med hjälp av två pumpar. Perioden mellan ca 4000 h och 4700 h motsvarar revisionsperioden, vilken ej beaktas i denna studie.

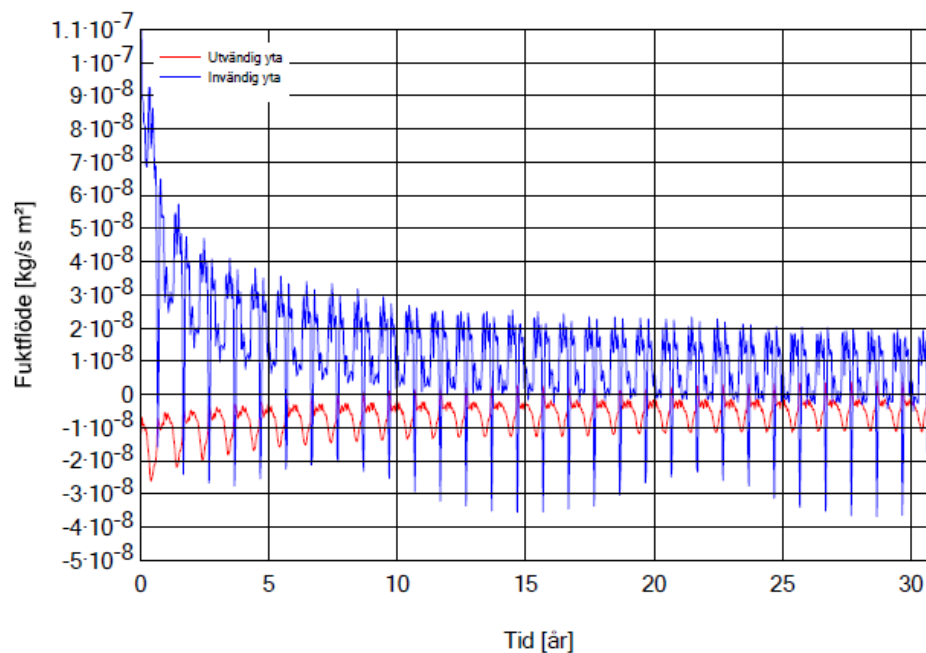
I en reaktorinneslutning finns ett antal olika potentiella fuktkällor. Läckage av ånga från processen är sannolikt den dominerande. Det är dock ej klarlagt om detta stämmer eller vilka andra källor som kan ha en signifikant inverkan. En tidigare forskningsfråga, vilket var ett av upphoven till det tidigare genomförda doktorandprojektet, var att inneslutnignes betong var en potentiell signifikant fuktkälla.

De genomförda simuleringarna, både med Oxfall's modell samt WUFI, visar att en viss mängd vatten lämnar betongen dagligen. För Ringhals 1 visar simuleringar att flödet från inre cylinderväggen i primärutrymmet är i storleksordningen 100 - 200 kg vatten per år. Då den totala mängden avfuktat vatten ej är känt går det dock ej att utvärdera om detta är en märkbar andel eller perifert. Cylinderväggen i övre primärutrymme består av ca 315 m³ betong, vilket skall sättas i paritet till de ca 2000 m³ som finns innanför tätplåten vid Ringhals 1.

Motsvarande flöden från den övre delen av inre cylinderväggen, över nivå +115, vid Ringhals 4 var enligt WUFI simuleringarna 811 kg per år, när den bäst överensstämmande materialdata användes. Av de ca 12 850 liter vatten som årligen avfuktats från luften inne i Ringhals 4 visar simuleringarna således att ca 6.3 % var från den övre delen (60 %) av inrecylinderväggen. Den inre cylinderväggen över nivå +115 består av ca 1200 m³ betong vilket motsvarar 15 % av den totala betongmängden i reaktorinneslutningen. Denna del motsvarar också ca 20 % (3600 m²) av den totala betongytan.

Om det förutsätts att fukttillskottet var samma för alla betongytor i inneslutningen skulle detta då, baserat på WUFI simuleringarna, motsvara ett totalt tillskott på ca 4120 kg/år, vilket motsvarar 32 % av allt avfuktat vatten under driftperioden vid driftår 2010–2011. Detta antagande baseras dock på att samma temperatur och fuktförhållanden råder för samtliga betongytor. Mätningarna från Ringhals 4 [1] visar att skillnaderna över konstruktionen inte är allt för stor och att både betongen och gränsvärdena är snarlika varav antagandet inte är orealistiskt. Vad som gäller för övriga konstruktioner och förhållanden kan dock inte med säkerhet bedömas utan ytterligare mätningar och simuleringar.

Figur 6 visar hur fuktflödet från inre respektive yttre cylinderväggen har ändrats sedan reaktors togs i drift 1983 samt hur det ändras under varje år. Diagrammet visar medelflöden från WUFI simuleringarna för vardera tvåveckorsperioder, då även revisionsperioden är inkluderad, till skillnad från analysen ovan. Tydligt är att uttorkningshastigheten minskade mycket snabbt under de första åren för att sedan klinga av. Baserat på simuleringarna kan antas att tillskottet från betongen kommer sakta att sjuka till dess att jämnvikt uppstått eller att verket tas ur drift. Diagrammet visar även att under vissa perioder under driftåret så sker en uppfuktning av betongen. Primärt sker detta under revisionsperioden men även under vissa perioder under drift så sker en viss uppfuktning.



Figur 6: Simulerat fuktförflöde från inrecylinderväggen vid Rindhals 4 presenterat som ett 14-dagars medelförflöde. Invärdig yta motsvarar den inre cylinderväggen. Positiv förflöde motsvarar förflöde från väggens utsida till insida varav fukttransporten ut från den yttre cylinderväggen presenteras som negativt förflöde.

Resultaten från simuleringarna visar att betongen inte är den enda fuktkällan inne i reaktorinneslutningarna, men inte heller att den är osignifikant. Om det antas att övriga fuktkällor har varit konstanta sedan start kan vidare konstaterats att under de första ca 5–10 åren då fukttillskottet var minst dubbelt så stort än det nuvarande, så var betongen den dominerande fuktkälla. Efter 30 års drift visar simuleringarna, med givna antaganden, att fukttillskottet fortsatt var ca en tredjedel av totala tillskottet. Detta antagande förutsätter docka att det var samma fukt och temperaturnivåer i hela inneslutningen sedan driftstart och att övriga läckage varit samma. Hur långt från sanningen detta antagande är går ej att med säkerhet bestämma men allt jämt kan ses att betongen har haft en signifikant inverkan på mängden tillfört vatten till inneslutningen.

5 Processer som kan orsaka korrosion av tätplåt

En frågeställning som tidigare identifierats, men inte än till fullo utretts, är hur stor är risken för korrosion av reaktorinneslutningarnas ingjutna tätplåtar. Betong har en hög alkalitet vilket passiviserar ingjuten metall och risken för korrosion blir därav försumbar i en felfri konstruktion. För att korrosion skall uppstå behövs denna passivering brytas. De två generellt dominerande orsakerna för att bryta passiviseringen för en traditionell betongkonstruktion är karbonatisering av betongen alternativt tillförsel av klorider. Risken för att någon av dessa två processer skall bryta passiviseringen för en oskadad betong kring tätplåten bedöms dock som liten då:

- Karbonatisering av en tät betong är en mycket långsam process och tiden som krävs för att karbonatiseringsfronten skall nå hela vägen in till tätplåten vida överskrider den tekniska livslängden på kärnkraftverken, även med 80 års drift. Utöver detta så är luften i kokvattenreaktorerna ersatt med kvävgas under drift vilket endast ger CO₂ exponering ca 1 mån per år.
- Betongen är ej utsatt för sådan exponeringsmiljö som medför att klorider kan tränga in i betongen och nå tätplåten, varav förekommen nedbrytning ej är möjlig. Detta gäller ej för vissa delar av yttre cylinderväggen vid tryckvattenreaktorerna vilka är exponerade för salthaltiga aerosoler. Dessa väggar är dock mycket tjocka så risken för att klorider skall tränga in till plåten är försumbar, förutsatt att inga större sprickor eller delamineringar förekommer.

Frånsett dessa huvud-orsaker till korrosion av ingjuten metall så kan det förekomma avvikelser i konstruktionen som kan medföra att metallen korroderar. Den avvikelse som bedöms som mest relevant för en ökad korrosionsrisk av tätplåt är förekomst av hålrum mellan plåt och betong. Ett hålrum mellan betongen och plåten skulle innebära att plåten i denna zon ej längre är passiviserad och att denna då har en större sannolikhet att korrodera i ogynnsamma klimatförhållanden. Ett hålrum kan ha olika dimension, ursprung och utformning, allt från stora spalter till mindre kaviteter. Uppkomna hålrum i anslutning till tätplåten i reaktorinneslutningar kan förorsakats av t.ex. gjutdefekter, ingjutna objekt, specifika konstruktionsutformningar alternativt om delaminering uppstått mellan tätplåt och betong.

Det finns ett antal nationella och internationella fall där korrosion i varierande omfattning har uppstått i tätplåten. Exempel samt resonemang kring dessa skadar återges bland annat i SKI rapport 23:58 samt 2007:13 [2, 11]. I flertalet av de observerade fallen har orsaken kopplats till ingjutna defekter i form av kvarglömda produkter från byggskedet eller från detaljlösningar med ingjutna material med hög porositet. Baserat på dessa avvikelser bör minst två potentiella fenomen beaktas vidare, korrosion av metall i fuktig miljö samt korrosion i vattenlinje. Dessa två processer presenteras i korthet i nästkommande avsnitt tillsammans med en an koppling till erhållna fuktresultat från föreliggande studie.

I avsnittet sker även en första rimlighetsbedömning av risken för dessa processer generellt för tätplåten samt vilka frågeställningar som bör beaktas vidare.

Utöver de ovan nämnda processerna kan även t.ex. makrocell, mikrobiologisk-, galvanisk- eller bimetallkorrosion vara aktuella för t.ex. tätplåten, men detta beaktas inte i föreliggande studie.

5.1 KORROSION AV METALL I FUKTIG MILJÖ

Atmosfärisk korrosion åsyftar den korrosion som uppstår på en metallyta som exponeras för luft i vanliga temperaturspann. Liksom för andra korrosionsprocesser är detta en elektrokemisk process och förutsätter en elektrolyt och således en fuktfilm med tillräcklig tjocklek. För en stålyta i inomhusklimat bör fuktnivån vara över ca 60 %RF för att processen skall kunna pågå [12].

Korrosionshastigheten ökar sedan med ökad fukt, förutsatt god syretillgång. Den nivå vid vilken korrosion startar benämns kritisk fuktighet och den är starkt beroende på metallytans renhet. I utomhusklimat brukar den kritiska fuktigheten ofta vara 80 % till skillnad från inneklimatets 60 %RF [12]. En av de faktorer till detta är att förekomsten av svaveloxider i luften bildar en skyddade film på metallen som skyddar metallen. Korrosionshastigheten är dock generellt låg vid dessa nivåer. Först över ca 85 %RF sker en drastisk ökning av korrosionshastigheten i ren atmosfärsluft och högsta nivån nås vid 100 %RF eller högre, förutsatt tillgång på syre [13]. Dessa gränsvärden ligger även i samma storleksordning som för armering i karbonatiserad betong där generellt ingen korrosion pågår under ca 80 %RF [13]. Likheter beror sannolikt till viss del på att den karbonatiserade betongen fortfarande ger en viss skyddande effekt av stålytan i jämförelse med en ren stålyta som exponerad för ren luft.

För flera områden i reaktorinneslutningarna har fuktnivåer över 80 % RF uppmätts i betongen. Detta innebär att om hålrum finns mellan betong och plåt i någon av dessa områden, samt att det finns tillgängligt syre, finns risk för korrosion. Risken för korrosion finns även i detaljlösningar i vilket porösa material är i kontakt med plåten och där syre finns tillgängligt. Ett exempel på ingjutet poröst material är mineralull.

5.2 KORROSION AV METALL I VATTENLINJEN

I kokvattenreaktorers sekundärutrymme finns en plåtbeklädd kondensationsbassäng av betong. Plåtarna är sammansvetsade och således föreligger det en viss risk för läckage av bassängvatten till betongen via skadade eller felaktiga svetsfogar. Eftersom betongkonstruktionen är förhindra att torka så medför detta att denna betong skulle kunna bli vattenmättad över tid. Om det dessutom skulle finnas en spalt mellan betongen och tätplåten finns det risk att denna på samma sätt fylls med vatten. Skulle detta ske så finns det förutsättningar för vattenlinjekorrosion, dock försätts även tillgång till syre för att processen skall fortgå.

Generellt för vattenlinjekorrosion gäller att om en metall till viss del är nedsänkt i vatten och det är god syretillgång i luften sker en kraftigare korrosion direkt under vattenytan. Anledningen till detta är att en katod med syrgasrik lösning kommer i

nära kontakt med en anod med syrgasfattig lösning [12]. Denna typ av korrosion är temperaturberoende med en ökad korrosionshastighet vid en förhöjd temperatur, vilket kan vara aktuellt för kokvattenreaktorerna. I de nordiska kärnkraftverken skiljer sig temperaturen från olika zoner men ligger generellt mellan 20 och 50 °C. Generellt med de lägre temperaturerna på låga nivåer i inneslutningen samt i sekundärutrymmet. Processen är också starkt beroende förekomst av kalkutfällning i vattnet. Vid rätt kalknivå i vattnet så bildar kalken tillsammans med korrosionsprodukter en skyddande beläggning på metallytan vilket minskar korrosionshastigheten. Rätt kalknivå innebär att den så kallade kalkfällningspunkten är uppnådd. Kalkfällningshalten är temperaturberoende, och beror på halten Ca^{2+} , HCO_3^- samt totala salthalten [12]. För kokvattenreaktorernas fall, t.ex. för betongen runt kondensationsbassängen vid ett eventuellt läckage, är det möjligt att kalkfällningspunkten har uppnåtts då vattnet är i konstant kontakt med betong. Detta förutsätter dock att det inte sker ett kontinuerligt utbyte av detta spaltvatten på grund av läckage längst med tätplåten.

Det finns risk att kaviteter som till viss del är fyllda med vatten finns vid tätplåten, det är dock ej möjligt med för projektet tillgänglig information utvärdera vattnets kemi samt syretillgången är tillräcklig för processen.

6 Slutsats

- Studien visar att simuleringsverktyget WUFI återger trovärdiga resultat vid simulering av betongens uttorkning av betongen i reaktorinneslutningarna. De simulerade resultaten för inre cylinderväggen i primärutrymmet vid Ringhals 1 överensstämmer väl med de tidigare simuleringarna med Oxfall's modell samt med de tidigare fältmättningsresultaten. Simuleringarna visar vidare att materialdatan som används har en mycket stor inverkan och för högre noggrannhet bör materialdatan mer likna den för de aktuella konstruktionerna. I föreliggande studie har inte konstruktionsfasen samt perioden fram till drift beaktas till fullo, vilket krävs för en än bättre simulering.
- Simuleringarna med WUFI för Ringhals 4 gav en god överensstämmelse med de uppmätta resultaten från fältstudien. Den goda överensstämmelsen återfinns således även för ickeisoterma förhållanden vilket visar att WUFI även kan användas för dessa fall i kärnkraftverken. I likhet med simuleringarna för Ringhals 1 krävs dock bättre materialdata samt att den initiala perioden efter konstruktion beaktas för att än mer öka noggrannheten på simuleringarna.
- Beräkningar på vilken effekt den pågående uttorkningen har på inneklimatet, och till vilken grad som betongen i reaktorinneslutningarna korresponderar till det totala fukttillskottet i inneslutningen under drift presenteras för Ringhals 4. Baserat på data på mängden avfuktat vatten av luften i Ringhals 4 och via jämförelse med de simulerade fukttillskotte från de övre 60 % av inre cylinderväggen visades att 6 % av den totala avfuktade vattnet kom från denna betong mängd. Den aktuella konstruktionen motsvarade ca 15 % av total betongmängden, eller 20 % av den totala betongytan som exponeras mot inneslutningen. Om det vidare antogs att all betong i inneslutningen utsattes för samma klimat och bidrog med samma fukttillskott kunde vidare visas att betongen totalt bidrog med ca 1/3 av den totala mängden vatten som avfuktades. Antagandet är något konservativt men att betongen har en snarlik fukthistorik i större delar av inneslutningen bekräftas delvis via fältmätningarna som presenteras i Oxfall's avhandling.
- Simuleringarna och de tidigare mätningarna har visat att betongen fortsatt är mycket fuktig i flera olika betongkomponenter i de svenska reaktorinneslutningarna. Vilken effekt detta har på betongkonstruktionernas beständighet är dock ej helt utrett. I flera fall är betongen fortfarande fuktigare än ca 80 % RF, vilket är den nivå som för många korrosionsprocesser är en brytpunkt för där risk föreligger. Detta visar på att förekomst av olika typer av hålrum eller konstruktionslösningar där plåten är i kontakt med syre och fukt så föreligger risk för korrosion. Den initiala sammanställningen av korrosionsrisker visar även på att det även finns en viss risk att vattenlinjekorrosion kan uppstå vid tätplåten, förutsatt att rätt förhållanden råder. Hur många områden som finns där förhållanden för korrosion av tätplåten är möjlig går ej att besvara enkom på erhållen information i föreliggande studie. Detta kräver fortsatt utredning med kartläggning av riskzoner samt identifiering av potentiella processer och dess styrande parametrar.

7 Förslag på fortsatt arbete

Förslag på fortsatta projekt med fokus mot korrosionsrisker. Föreliggande förslag skall ses som en upptrappning då endast nästkommande steg skall tas om föregående uppfyller förbestämda krav.

- 1.a För att möjliggöra en analys av vilka risker som finns för korrosion av den ingjutna tätplåten krävs en förståelse vilka korrosionsprocesser som är möjlig att uppstå i ett kärnkraftverk. Ett första steg för att göra en sådan analys är genom ett systematiskt arbete identifiera samtliga tillgängliga tidigare observerade internationella och nationella fall av korrosion av tätplåt eller motsvarande konstruktioner. För de fall som identifieras bör orsak och rådande förhållanden dokumenteras. Erhållen information ger en första indikation på vilka förutsättningar som krävs för att korrosionsskador skall uppstå samt vilka parametrar som styr dess hastighet.
- 1.b Utöver de observerade korrosionsprocesserna bör övriga risker belysas genom en litteraturstudie kring samtliga potentiella korrosionsprocesser aktuella för tätplåten. Studien bör visa på vilka processer som finns och vilka förutsättningar som krävs för att dessa skall initieras eller fortgå. Studien bör identifiera samtliga processer som har potential att initieras, och fortgå, samt de parametrar som styr dessa processer. De korrosionsprocesser som ej är aktuella bör tydligt avskrivas med motivering.
- 1.c Baserat på de två tidigare delarna i steg 1 skall samtliga riskzoner /konstruktionsdetaljer i reaktorinneslutningar identifieras och dess klimatförhållanden bestämmas. Identifieringen bör göras genom att systematisk genomgång av dokument och underlag i vilka förutsättningar för att någon av de tidigare ogynnsamma förhållandena kan uppstå. Denna identifiering kan vidare stärkas med tidigare resultat presenterade i föreliggande studie, det tidigare doktorandprojektet, arbetet inom NOG eller likdanande projekt. WUFI eller Oxfalls modell kan vidare användas för validering av riskzoner m.a.p. kritiska fuktnivåer. Rådande klimatförhållanden samt andra parametrar som är, kan vara, aktuella för de tidigare identifierade korrosionsprocesserna dokumenteras. Genomgången bör även identifiera de korrosionsprocesser som kan avskrivas baserat på avsaknad av styrande parameter, t.ex. avsaknad av syre eller fukt.
- 2 Baserat på erhållen information från steg 1 identifieras de korrosionsprocesser för de olika riskzonerna som fortsatt kan vara aktuella. Samtliga parametrar som är kända, för varje specifikt fall summeras, och de okända bestäms via mätningar, väldokumenterade och argumenterade antaganden eller modellering (t.ex. syrediffusion till en håligheter). Baserat på summerade data genomförs sedan modellering (med tillgängliga modeller) av de identifierade korrosionsprocesser som bedöms

som sannolika eller som kan vara en framtida risk i någon av tidigare identifierade riskzonerna. Baserat på simuleringarna sammanställs vilka processer som fortsatt är sannolika och vilka parametrar som är avgörande för dem.

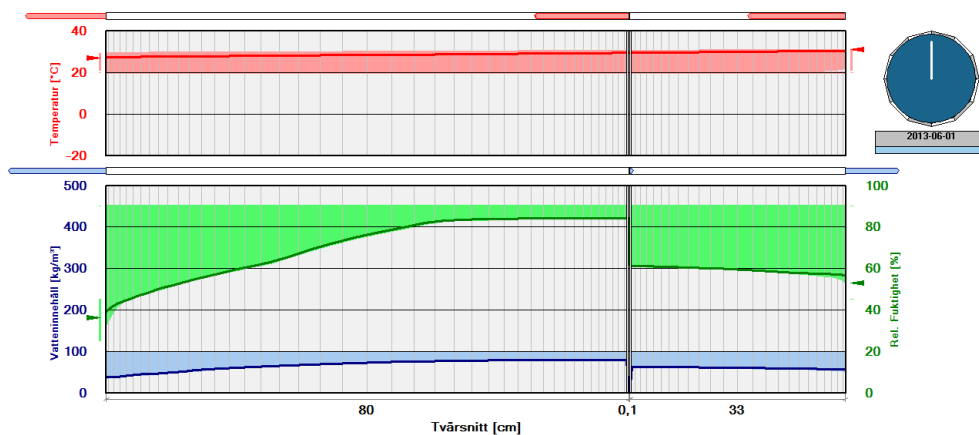
- 3 I de tidigare stegen har de korrosionsprocesser som fortsatt bedöms som sannolika att inträffa i olika riskzonerna identifierats och en bedömning av vilka parametrar som är avgörande för processerna har identifierats. Baserat på denna sammanställning genomförs en genomgång och identifiering av preventiva åtgärder för dessa processer samt identifiering av metoder för att detektera dessa processer.

8 Referenser

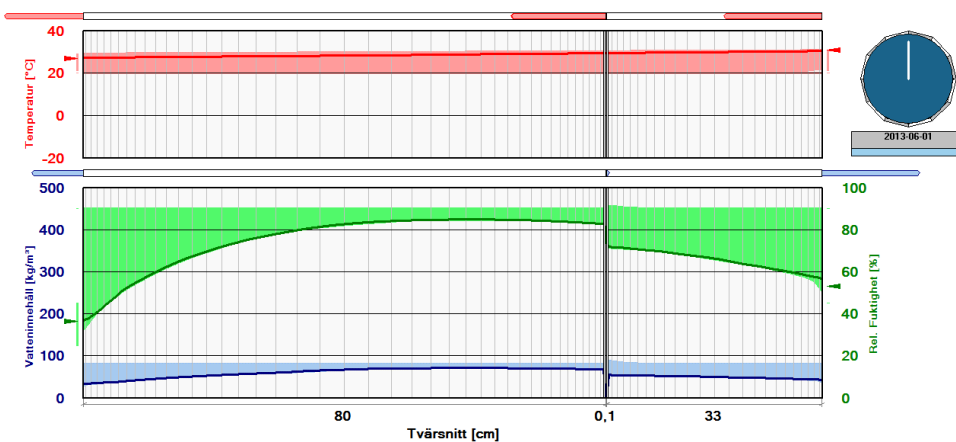
- [1] M. Oxfall, 2016. *Climatic conditions inside nuclear reactor containments - Evaluation of moisture condition in the concrete within reactor containments and interaction with the ambient compartments*, Doctoral Thesis. Lund University, Lund, Sweden
- [2] M. Ullberg, *Elektrokemiska aspekter på korrosion i svenska reaktorinneslutningar*, in *SKI rapport 2007:13*. 2007.
- [3] M. Oxfall, M. Hassanzadeh, and P. Johansson. 2016. *Long-term hygrothermal performance of nuclear reactor concrete containments – Laboratory evaluations of measurement setup, in situ sampling, and moisture flux calculations*. *Cement and Concrete Composites*. **65**: p. 128-138.
- [4] M. Oxfall, M. Hassanzadeh, and P. Johansson, *A model to predict moisture distribution in concrete structures inside nuclear reactor containments and their contribution to the interior moisture condition*. **Manuscript**. 2016
- [5] H.M. Künzle, *Simultaneous heat and moisture transport in building components - One- and two-dimensional calculation using simple parameters* 1995, Fraunhofer Institute of Building Physics: Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart. p. 65.
- [6] Z. Bažant and L. Najjar. 1972. *Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete*. *Materials and Structures*. **5**(1): p. 3-20.
- [7] M. Oxfall, P. Johansson, and M. Hassanzadeh, *Assesment of factors that may affect the moisture- and temperature variations in the concrete structures inside nuclear reactor containments*, in *Fontevraud 8, Contribution of materials investigations and operating experience to LWRs' safety, performance and reliability*. 2014, SFEN: Avignon, France.
- [8] A. Karagiozis, H. Künzle, and A. Holm. *WUFI-ORNL/IBP - A north american hygrothermal model*. in *Performance of exterior envelopes of whole buildings VIII*. 2001. Atlanta, US: ASHRED.
- [9] L.-O. Nilsson and P. Johansson, *Changes in reactor containments - The drying and climatic conditions in the concrete walls (In Swedish)*, in *Elforsk rapport 09:100*. 2009, Lund University, Division of Building Materials: Lund, Sweden.
- [10] G. Hedenblad, 1993. *Moisture permeability of mature concrete, cement mortar and cement paste*, Doctoral Thesis. Lund University, Lund, Sweden
- [11] G. Barslivo, E. Österberg, and B. Aghili, *Uttredning kring reaktorinneslutningar - konstruktion, skador samt kontroller och provning*, in *SKI Rapport 02:58*. 2003.
- [12] E. Mattson, *Elektrokemi och korrosionslära*. 1987, Korrosionsinstitutet. p. 157.
- [13] K. Tuutti, 1982. *Corrosion of steel in concrete*, KTH, CBI cement och betonginstitutet

Bilaga A: Simulerade fruktprofiler, WUFI

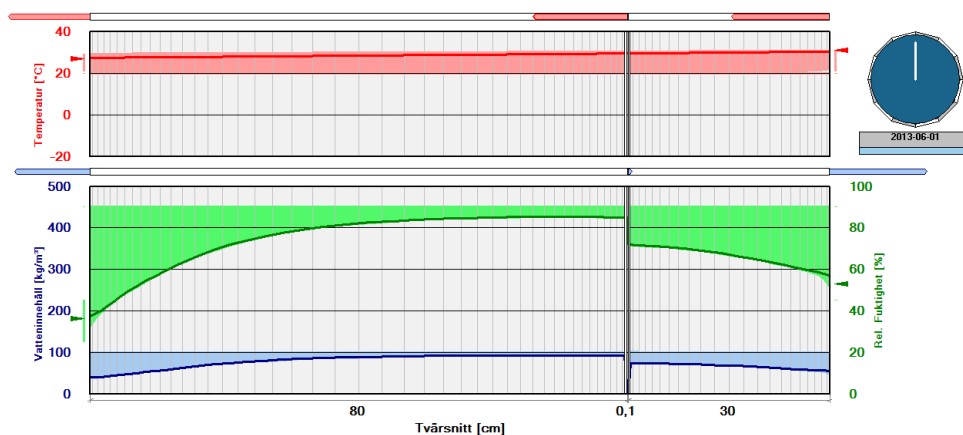
RINGHALS 1



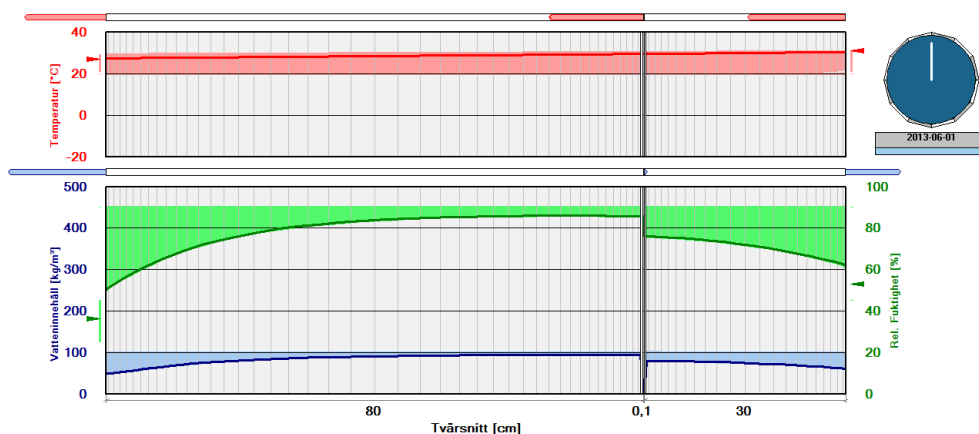
Figur A:1. Simulerad uttorkning nedre halvan över övre primärutrymme vid Ringhals 1. Betong vct c35/45, ytmotstånd (sd) 3 m. Den nedre halvan består ca 160 m³ betong med en exponerad yta på 475 m². Inre gränsvärden baseras på de tidigare uppmätta resultaten från Ringhals 1 under drift mellan 2012 till 2013 tidigare presenterat av Oxfall [1]. De yttre gränsvärdena är erhållna från [9].



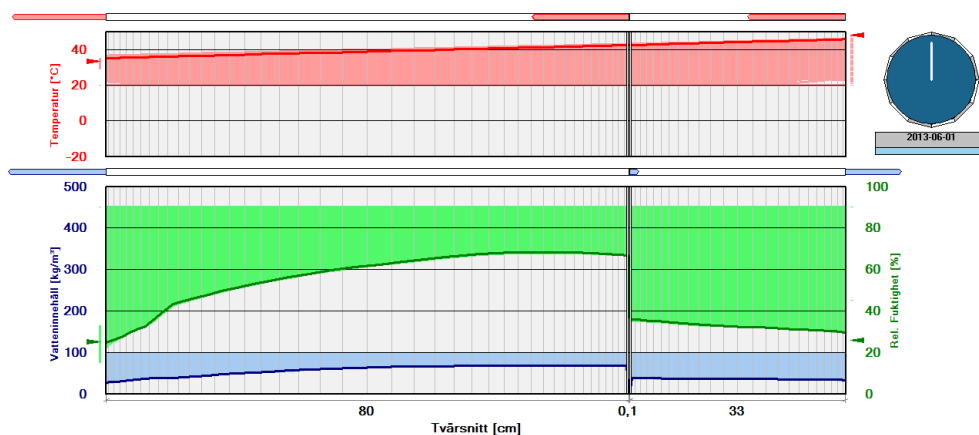
Figur A:2. Simulerad uttorkning nedre halvan över övre primärutrymme vid Ringhals 1. Betong vct 0.4 LTH, ytmotstånd (sd) 3 m. Den nedre halvan består ca 160 m³ betong med en exponerad yta på 475 m². Inre gränsvärden baseras på de tidigare uppmätta resultaten från Ringhals 1 under drift mellan 2012 till 2013 tidigare presenterat av Oxfall [1]. De yttre gränsvärdena är erhållna från [9].



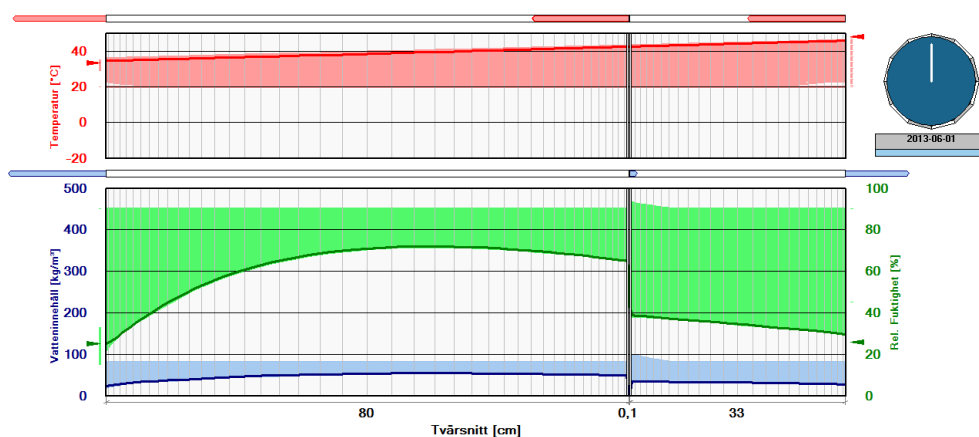
Figur A:3. Simulerad uttorkning nedre halvan över övre primärutrymme vid Ringhals 1. Betong vct 0.5, ytmotstånd (sd) 3 m. Den nedre halvan består ca 160 m³ betong med en exponerad yta på 475 m². Inre gränsvärden baseras på de tidigare uppmätta resultaten från Ringhals 1 under drift mellan 2012 till 2013 tidigare presenterat av Oxfall [1]. De yttre gränsvärdena är erhållna från [9].



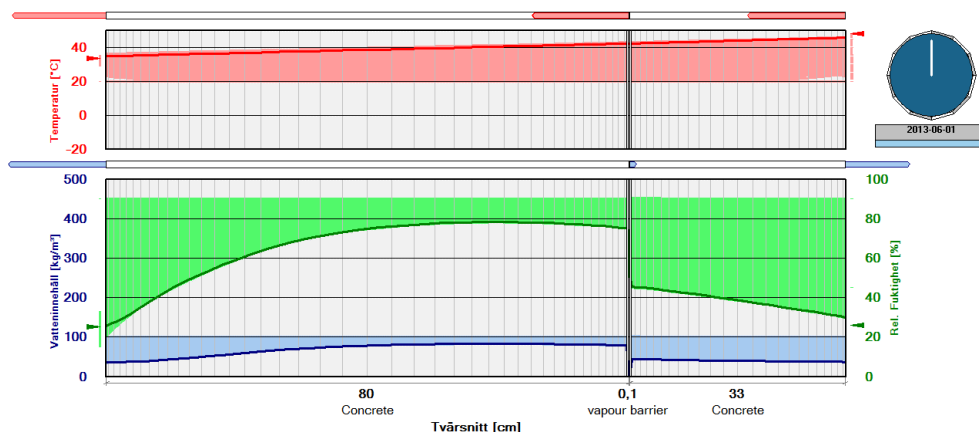
Figur A:4. Simulerad uttorkning nedre halvan över övre primärutrymme vid Ringhals 1. Betong vct 0.5, ytmotstånd (sd) 15 m. Den nedre halvan består ca 160 m³ betong med en exponerad yta på 475 m². Inre gränsvärden baseras på de tidigare uppmätta resultaten från Ringhals 1 under drift mellan 2012 till 2013 tidigare presenterat av Oxfall [1]. De yttre gränsvärdena är erhållna från [9].



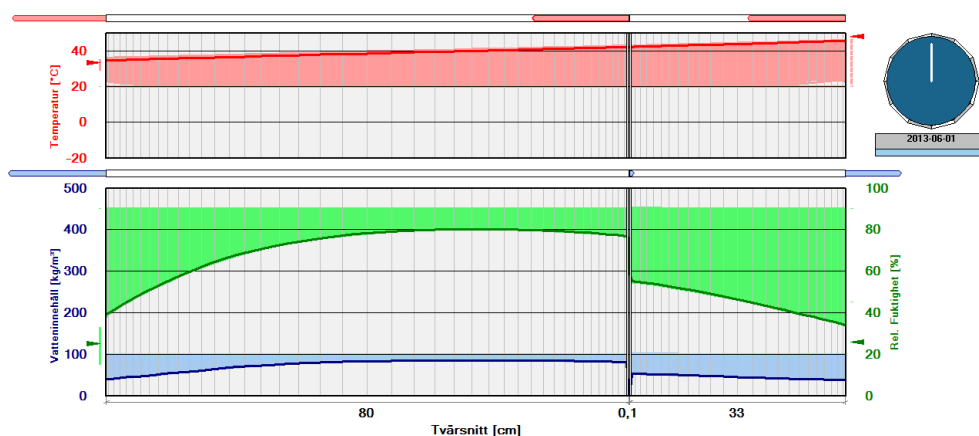
Figur A:5. Simulerad uttorkning övre halvan över övre primärutrymme vid Ringhals 1. Betong c35/45, ytmotstånd (sd) 3 m. Den nedre halvan består ca 160 m³ betong med en exponerad yta på 475 m². Inre gränsvärden baseras på de tidigare uppmätta resultaten från Ringhals 1 under drift mellan 2012 till 2013 tidigare presenterat av Oxfall [1]. De yttre gränsvärdena är erhållna från [Elforsk]



Figur A:6. Simulerad uttorkning övre halvan över övre primärutrymme vid Ringhals 1. Betong vct 0.4 LTH, ytmotstånd (sd) 3 m. Den nedre halvan består ca 160 m³ betong med en exponerad yta på 475 m². Inre gränsvärden baseras på de tidigare uppmätta resultaten från Ringhals 1 under drift mellan 2012 till 2013 tidigare presenterat av Oxfall [1]. De yttre gränsvärdena är erhållna från [9].

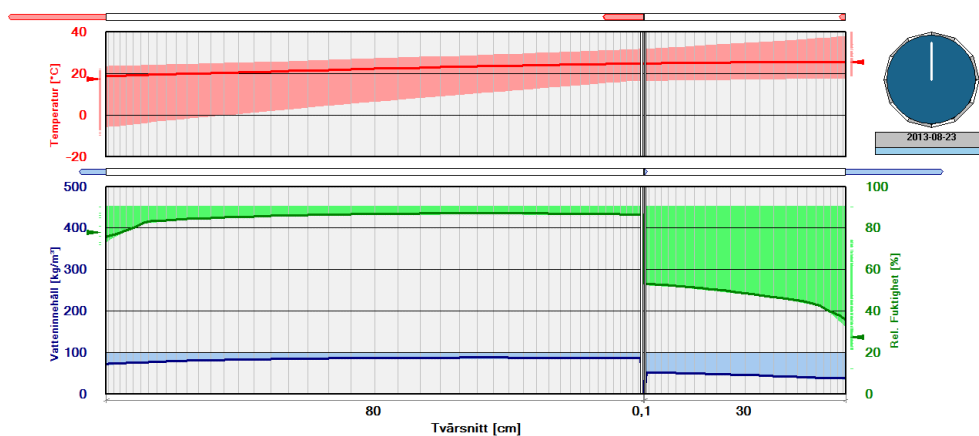


Figur A:7. Simulerad uttorkning övre halvan över övre primärutrymme vid Ringhals 1. Betong vct 0.5, ytmotstånd (sd) 3 m. Den nedre halvan består ca 160 m³ betong med en exponerad yta på 475 m². Inre gränsvärden baseras på de tidigare uppmätta resultaten från Ringhals 1 under drift mellan 2012 till 2013 tidigare presenterat av Oxfall [1]. De yttre gränsvärdena är erhållna från [9].

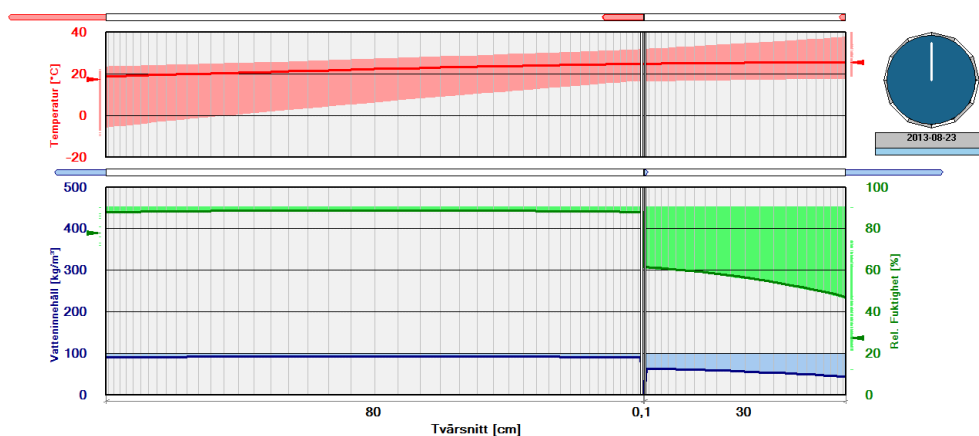


Figur A:8. Simulerad uttorkning övre halvan över övre primärutrymme vid Ringhals 1. Betong vct 0.5, ytmotstånd (sd) 15 m. Den nedre halvan består ca 160 m³ betong med en exponerad yta på 475 m². Inre gränsvärden baseras på de tidigare uppmätta resultaten från Ringhals 1 under drift mellan 2012 till 2013 tidigare presenterat av Oxfall [1]. De yttre gränsvärdena är erhållna från [9].

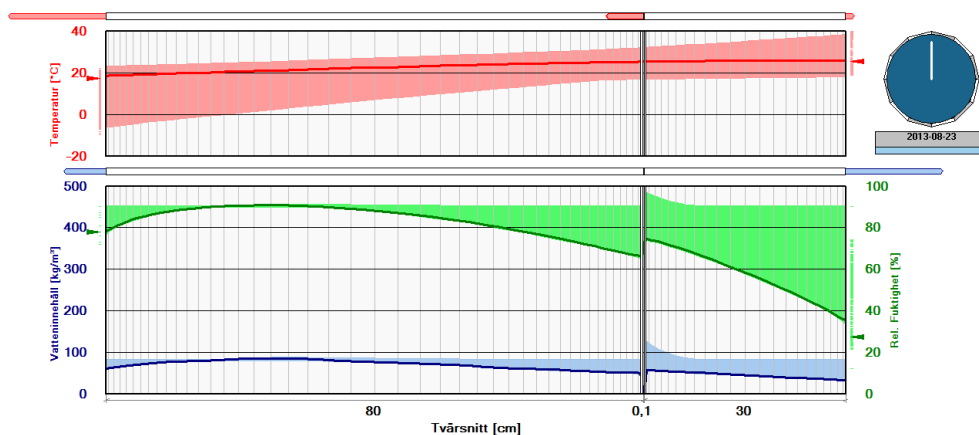
RINGHALS 4



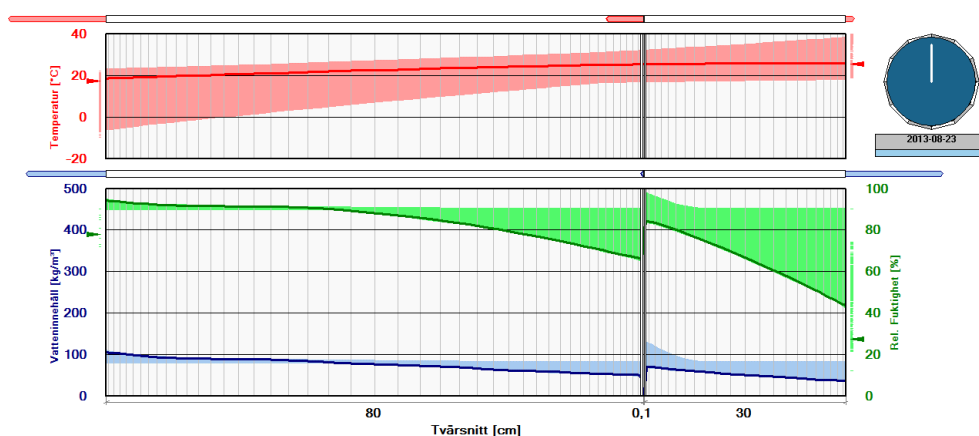
Figur A:9. Simulerad uttorkning av cylinderväggen vid Ringhals 4 från nivå +115. Betong c35/45, ytmotstånd (sd) 3 m. Den inrecylinderväggen över nivå +115 är ca 35 m hög och består av totalt ca 1175 m³ betong med en exponerad yta på 3575 m². Inre gränsvärden baseras på de tidigare uppmätta resultaten från Ringhals 4 under drift mellan 2012 till 2013 tidigare presenterat av Oxfall [1]. De yttre gränsvärdena är erhållna från SMHI.



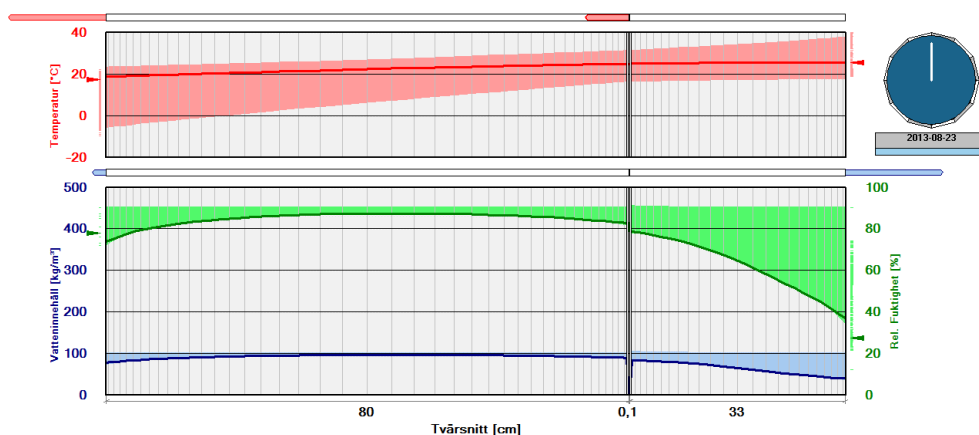
Figur A:10. Simulerad uttorkning av cylinderväggen vid Ringhals 4 från nivå +115. Betong c35/45, ytmotstånd (sd) 15 m. Den inrecylinderväggen över nivå +115 är ca 35 m hög och består av totalt ca 1175 m³ betong med en exponerad yta på 3575 m². Inre gränsvärden baseras på de tidigare uppmätta resultaten från Ringhals 4 under drift mellan 2012 till 2013 tidigare presenterat av Oxfall [1]. De yttre gränsvärdena är erhållna från SMHI.



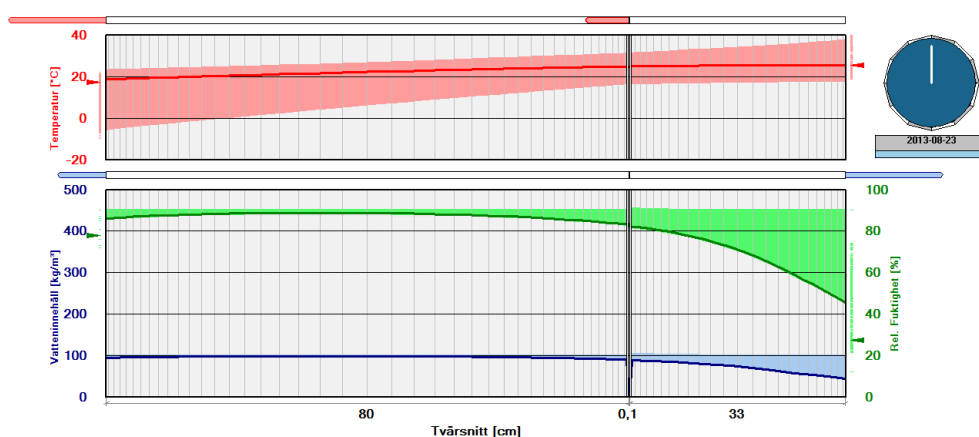
Figur A:11. Simulerad uttorkning av cylinderväggen vid Ringhals 4 från nivå +115. Betong vct 0.4 LTH, ytmotstånd (sd) 3 m. Den inrecylinderväggen över nivå +115 är ca 35 m hög och består av totalt ca 1175 m³ betong med en exponerad yta på 3575 m². Inre gränsvärden baseras på de tidigare uppmätta resultaten från Ringhals 4 under drift mellan 2012 till 2013 tidigare presenterat av Oxfall [1]. De yttre gränsvärdena är erhållna från SMHI.



Figur A:12. Simulerad uttorkning av cylinderväggen vid Ringhals 4 från nivå +115. Betong vct 0.4 LTH, ytmotstånd (sd) 15 m. Den inrecylinderväggen över nivå +115 är ca 35 m hög och består av totalt ca 1175 m³ betong med en exponerad yta på 3575 m². Inre gränsvärden baseras på de tidigare uppmätta resultaten från Ringhals 4 under drift mellan 2012 till 2013 tidigare presenterat av Oxfall [1]. De yttre gränsvärdena är erhållna från SMHI.



Figur A:13. Simulerad uttorkning av cylinderväggen vid Ringhals 4 från nivå +115. Betong vct 0.5, ytmostånd (sd) 3 m. Den inrecylinderväggen över nivå +115 är ca 35 m hög och består av totalt ca 1175 m³ betong med en exponerad yta på 3575 m². Inre gränsvärden baseras på de tidigare uppmätta resultaten från Ringhals 4 under drift mellan 2012 till 2013 tidigare presenterat av Oxfall [1]. De yttre gränsvärdena är erhållna från SMHI.



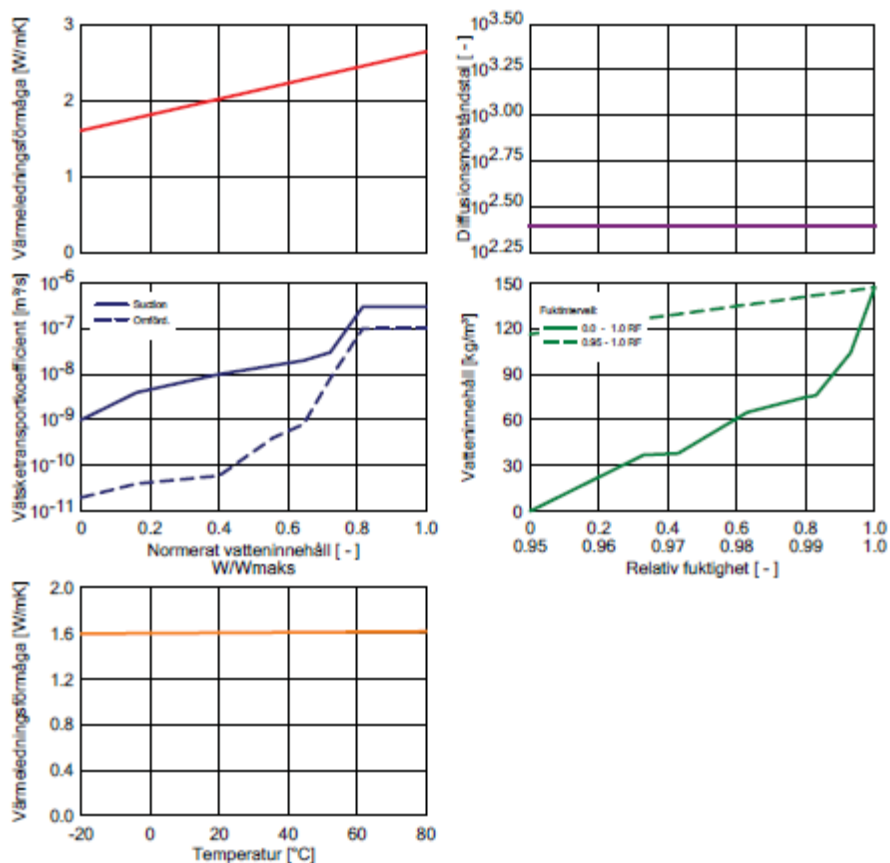
Figur A:14. Simulerad uttorkning av cylinderväggen vid Ringhals 4 från nivå +115. Betong vct 0.5, ytmostånd (sd) 15 m. Den inrecylinderväggen över nivå +115 är ca 35 m hög och består av totalt ca 1175 m³ betong med en exponerad yta på 3575 m². Inre gränsvärden baseras på de tidigare uppmätta resultaten från Ringhals 4 under drift mellan 2012 till 2013 tidigare presenterat av Oxfall [1]. De yttre gränsvärdena är erhållna från SMHI.

Bilaga B: Material

WUFI® Pro 6.1

Material: Concrete, C35/45

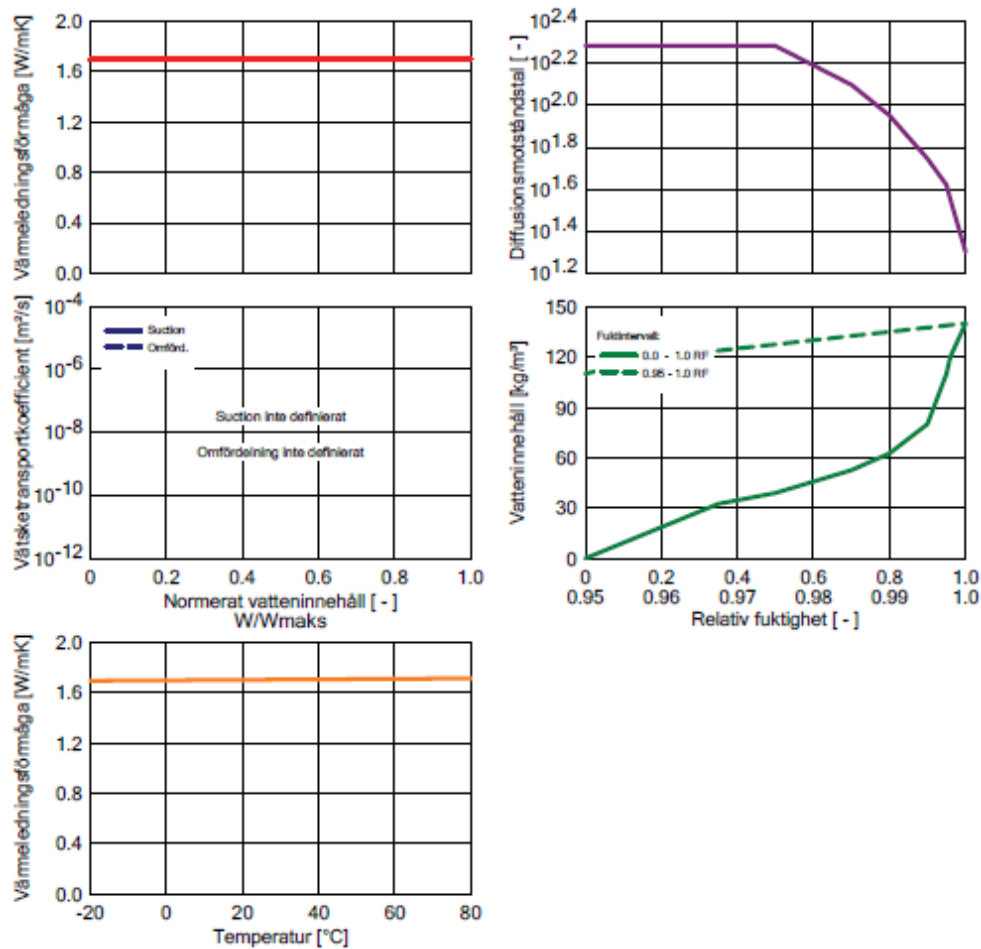
Egenskaper	Enhet	Värde
Skrymdensitet	[kg/m³]	2220.0
Porositet	[m³/m³]	0.18
Specifik värmekapacitet, torr	[J/kgK]	850.0
Värmeledningsförmåga torr, 10°C	[W/mK]	1.6
Diffusionsmotstånd för vattenånga	[-]	248.0
Fuktkberoende värmeledn. Tillägg	[%/M.-%]	8.0
Temp-ber. Värmeledning. Tillägg	[W/mK²]	0.0002



Figur B.1. Materialdata för betong C35/45 från WUFI materialdatabas Fraunhofer-IBP.

Material: Betong VCT 0,4, välhydratiserad

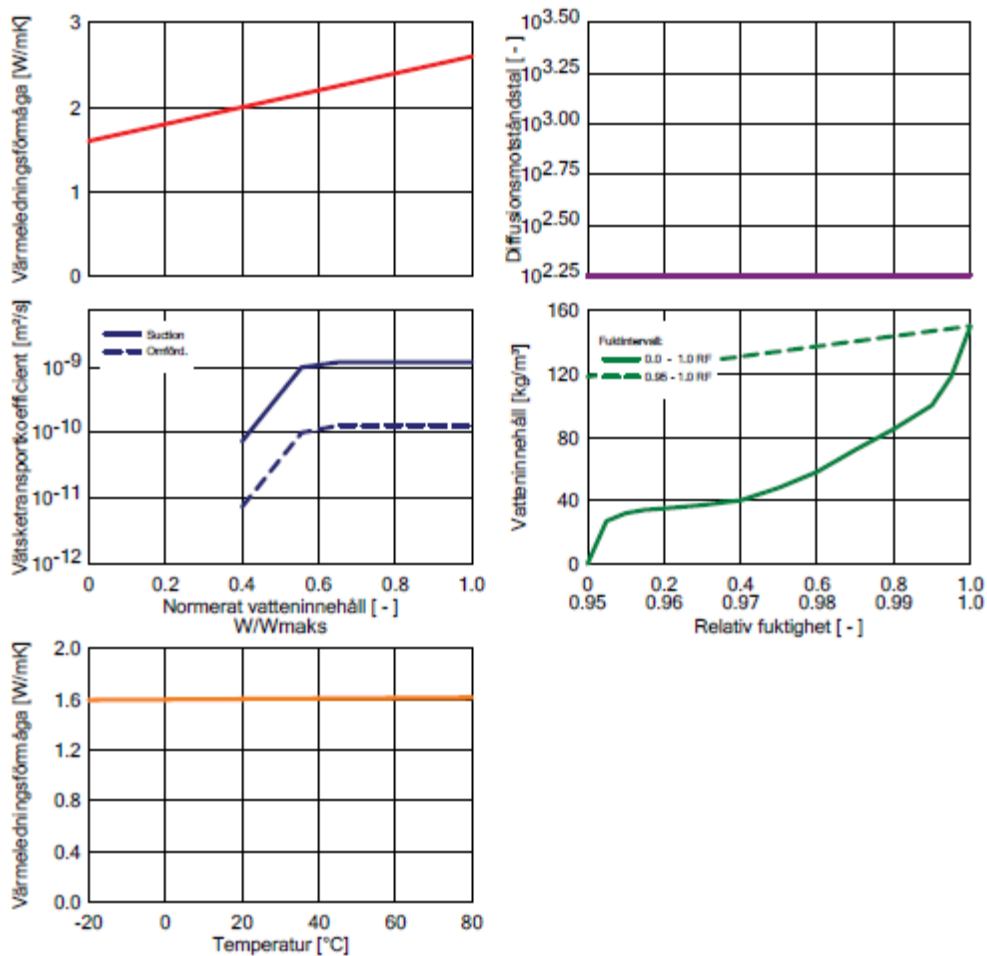
Egenskaper	Enhet	Värde
Skrymdensitet	[kg/m ³]	2322.0
Porositet	[m ³ /m ³]	0.15
Specifik värmekapacitet, torr	[J/kgK]	850.0
Värmeledningsförmåga torr, 10°C	[W/mK]	1.7
Diffusionsmotstånd för vattenånga	[-]	192.0
Temp-ber. Värmeledning. Tillägg	[W/mK ²]	0.0002



Figur B:2. Materialdata för betong vct 0.4 LTH från WUFI materialdatabas LTH.

Material: Concrete, w/c=0.5

Egenskaper	Enhet	Värde
Skrymdensitet	[kg/m ³]	2300.0
Porositet	[m ³ /m ³]	0.18
Specifik värmekapacitet, torr	[J/kgK]	850.0
Värmeledningsförmåga torr, 10°C	[W/mK]	1.6
Diffusionsmotstånd för vattenånga	[-]	180.0
Fuktberoende värmeledn. Tillägg	[%/M.-%]	8.0
Temp-ber. Värmeledning. Tillägg	[W/mK ²]	0.0002



Figur B:3. Materialdata för betong vct 0.5 från WUFI materialdatabas Fraunhofer-IBP.

SIMULERAD UTTORKNING AV BETONG I REAKTORINNESLUTNINGAR

För att kunna bedöma risken för att korrosion kan uppstå i den ingjutna tätplåten i reaktorinneslutningen är det viktigt att känna till olika fukthalter och att kunna modellera dem i olika konstruktionsdelar och på olika djup.

Här har två simuleringsverktyg jämförts, för att utvärdera hur den modell som tagits fram av Oxfall i ett tidigare projekt står sig i förhållande till den kommersiella mjukvaran WUFI.

Sammanfattningsvis kan sägas att simuleringarna med WUFI gav en god överensstämmelse med tidigare fältmätningar vid Ringhals 1 samt med de simulerade resultaten med Oxfall's modell.

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



Energiforsk