VERIFIERING AV STRUKTUR- OCH FUKTMEKANISKA BERÄKNINGSVERKTYG

RAPPORT 2017:432





Verifiering av struktur- och fuktmekaniska beräkningsverktyg

Tillämpning på reaktorinneslutningars betongkonstruktioner, Vercors Fas 1

CHRISTIAN BERNSTONE, TOBIAS GASCH, MAGNUS ÅHS OCH RICHARD MALM

ISBN 978-91-7673-432-2 | © Energiforsk september 2017 Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Beräkningar är ett viktigt verktyg för att förutsäga olika strukturer och komponenters hållbarhet, åldringsmekanismer och egenskaper i samband med kärnkraftverkens åldringsarbete. För att säkerställa att beräkningarna är giltiga så behöver de verifieras, vilket kan göras dels genom att jämföra olika beräkningsmetoder från olika parter och dels genom experiment.

I det internationella projektet Vercors så byggs en skalenlig modell av en reaktorinneslutning upp. Ett flertal internationella forskare och konsulter genomför olika typer av beräkningar på inneslutningen i etapper för att simulera olika delar av konstruktionens livscykel. Projektet avslutas med att inneslutningen trycks till brott för att simulera en svår haverisituation. I denna rapport presenteras resultat från den första etappen av projektet från en grupp bestående av Christian Bernstone och Tobias Gasch, forskare på Vattenfall samt seniorforskarna Magnus Åhs på Lunds tekniska högskola och Richard Malm på Kungliga Tekniska högskolan.

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).

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet och publiceringen innebär inte att Energiforsk har tagit ställning till innehållet.



Sammanfattning

Électricité de France har utanför Paris byggt en 1/3 skalmodell av en reaktorinneslutning motsvarande en fransk fullskalereaktor modell P4. Anläggningen möjliggör studier av hur åldringsprocesser påverkar förspända reaktorinneslutningar. Syftet är att efter de 7 år som ett övergripande forskningsprojektet vid på anläggningen pågår, uppnå påverkan motsvarande den åldring som en fullskalereaktor har utsatts för efter 60 års drift.

Konstruktionen har försetts med ett omfattande instrumenteringsprogram som gör det möjligt att följa konstruktionens beteende i tidigt skede och över tid. Ett av anläggningens forskningsprojekt omfattar en benchmark av olika beräkningsverktygs möjlighet att kunna förutse konstruktionens beteende i tidigt skede och under själva åldrandet, dess täthet till följd av åldrandet och beteende under svåra haveriförhållanden. Denna benchmark har genomförts via en öppen inbjudning till intresserade experter att delta. I projektet, benämnt VeRCoRs , bidrar deltagande organisationer med egna modelleringsarbeten utifrån de tre olika teman. Arbetet med det första temat startade 2015 (tidigt skede), därefter följer den åldrade konstruktionen (2017) och svåra haverisituationer (2021). Denna rapport redovisar det arbete som har gjorts för det första temat (Tema 1) inom ramen för ett Energiforskuppdrag.

Modelleringsarbetet har till största delen genomförts av LTH i nära samarbete med KTH och Vattenfall. Simuleringar har gjorts för den unga betongens beteende under den ett år långa byggfasen, med hänsyn tagen till betongens hydratation (temperaturberäkningar/värmeutveckling), uttorkning (självuttorkning och fukttransport) och deformationer (temperatur-, fukt-, kryp-, och spänningsrelaterade deformationer). Resultatet har jämförts mot data från anläggningens instrumentering. Dessutom så har en genomgång gjorts av resultaten från övriga deltagares arbeten i Tema 1.

Sammanfattningsvis så visar resultaten på de fördelar som finns med att genom avancerade beräkningar verifiera designparametrar och prognostisering av reaktorinneslutningars funktion, men också på utmaningar. Med hjälp av FEmodellering så kan det tidiga skedet efter färdigställd konstruktion beskrivas både vad gäller temperatur- och deformationer med rimlig tillförlitlighet. Det finns dock potential till förbättringar. Även om betongens temperatur kan predikteras noggrant så kan det skilja kraftigt i uppskattningen av inducerade påkänningar. En viktig orsak till dessa skillnader beror på osäkerheter i bestämning av krypning och krympning i betongen tidiga skede.



Summary

Électricité de France S.A. has built a 1/3 scale model of a reactor containment at their facilities outside Paris, equivalent to a French fullscale nuclear power plant reactor model P4. This large mockup enables the research of the aging processes affecting pre-stressed reactor containments. The aim is that after the 7 years of testing under way, the achieving ageing will correspond to the ageing of a full-scale reactor during 60 years of operation.

The structure is finely instrumented making it possible to monitor its behavior from the beginning of the construction and over time. The overall research project has as one part a benchmark of advanced finite element modelling tools ability to predict structural behavior at early stages and during the ageing process, and finally under severe accident conditions.

The benchmark has had an open invitation to interested parties to participate. The project, with the acronym VeRCoRs, offers participating organizations to contribute with their own modeling work based on three themes. Work on the first theme started in 2015 (early stage), then follow the aged structure (2017) and difficult severe accidents (2021). This report details the work that has been done with support from Energiforsk for Theme 1.

The modelling work has largely been carried out by Lund University of Technology in close collaboration with the Royal Institute of Technology and Vattenfall AB.

Simulations have been made using a multiphysics model, taking into account the concrete hydration (temperature development), dehydration (self-desiccation and moisture transport) and deformations (temperature-, moisture-, creep-, and stress-related). The results were validated at a number of points corresponding to the plant instrumentation. In addition, a review was made of the results of the other participants' work in Theme 1.

In summary, the results show both advantages and disadvantages of using advanced calculations to verify design parameters and forecasting of the behavior of the reactor containment. The calculated temperatures and deformation are of reasonable accuracy. However, there is potential for improvement, especially on the capability to calculate induced stresses. This is partly due to uncertainties in the determination of creep and shrinkage of the young concrete.



Innehåll

1	Inledn	ing	7	
	1.1	Benchmarkprojektet Vercors	7	
	1.2	Syfte och mål	8	
	1.3	Projektgrupp	8	
	1.4	Omfattning och avgränsningar	9	
2	Verco	/ercors försöksreaktorinneslutning		
	2.1	Inledning	10	
	2.2	Konstruktionens utformning	10	
	2.3	Material	14	
	2.4	Instrumentering	15	
	2.5	Geometrisk modell	17	
	2.6	Randvillkor	18	
	2.7	Studerade frågeställningar	19	
3	Metod	t i i i i i i i i i i i i i i i i i i i	21	
	3.1	Inledning	21	
	3.2	Beräkningsverktyg	21	
	3.3	Solidmodell och elementnät	22	
	3.4	Betongens hydratation	24	
	3.5	Betongens temperaturutveckling	25	
	3.6	Betongens fuktinnehåll	25	
	3.7	Betongens hållfasthetsutveckling	26	
	3.8	Betongens krympning	27	
	3.9	Spännkablarnas förspänning	28	
	3.10	Betongens krypning	28	
4	Result	at egna beräkningar	29	
	4.1	Temperaturutveckling	29	
	4.2	Relativ fuktighet	31	
	4.3	Spänningar och töjningar	32	
5	Kollek	tiva resultat från Vercors-projektet	35	
	5.1	Bakgrund	35	
	5.2	Preliminära resultat	37	
		5.2.1 Temperatur	37	
	5.3	Resultat efter release av mätdata	39	
		5.3.1 Temperatur	40	
		5.3.2 Töjning	41	
	5.4	Slutsatser	44	
6	Slutsa	tser och diskussion	46	
7	Referenser			



1 Inledning

1.1 BENCHMARKPROJEKTET VERCORS

EDF har utanför Paris byggt en 1/3 skalmodell av en reaktorinneslutning motsvarande en s.k. P4 reaktor (1300 MWe). Försöksanläggningen möjliggör studier av hur åldringsprocesser påverkar förspända reaktorinneslutningar. Syftet¹ är att efter de 7 år som försök pågår, uppnå påverkan motsvarande den åldring som en fullskalereaktor har utsatts för efter 60 års drift [1].

Konstruktionen, som har både injekterade och icke-injekterade spännkablar, har försetts med ett omfattande instrumenteringsprogram som gör det möjligt att följa konstruktionens beteende i tidigt skede och över tid.

Som en del av det övergripande forskningsprojektet för anläggningen så görs en benchmark av beräkningsverktygs² möjlighet att kunna förutse:

- 1. Konstruktionens beteende i tidigt skede och under själva åldrandet (Tema 1)
- 2. Konstruktionens täthet till följd av åldrandet (Tema 2).
- 3. Konstruktionens beteende under svåra haveriförhållanden (Tema 3).

För Tema 1, som är i fokus för denna utredning, så är syftet att prediktera temperatur- och töjningsutvecklingen för referenspunkter i reaktorinneslutningskonstruktionen.

Benchmarken har genomförts via en öppen inbjudning till intresserade experter att delta. I projektet, benämnt VeRCoRs³, bidrar deltagande organisationer med egna modelleringsarbeten utifrån de tre olika temana. Arbetet med det första temat startade 2015 (tidigt skede), därefter följer den åldrade konstruktionen (2017) och svåra haversituationer (2021). Respektive tema följs upp genom gemensamma workshoppar. Den första workshopen arrangerades av EDF i Les Renardières 7-9 mars 2016, med Magnus Åhs som deltagande från Energiforskuppdraget [26].

Vattenfall och OKG har prioriterat arbetet som viktig utifrån det pågående arbetet med långtidsdrift (LTO) vid Forsmark, Ringhals och Oskarshamn. Arbetet ansluter dessutom väl till de pågående verksamhetsområdena inom Energiforsks Betongprogram Kärnkraft, dvs. spännkablars spännkraft, fukt- och temperaturtillstånd, oförstörande provningsmetoder (konstruktionsövervakning), materialegenskaper och avancerade beräkningsmetoder. Fortsatt arbete är motiverat utifrån att det behövs bättre förståelse för beräkningsverktygs styrkor och svagheter genom verifieringar. Den mycket ambitiösa skalmodell som EDF har uppfört och själva benchmark-projektet i sig, utgör tillsammans ett unikt tillfälle för just verifieringsstudier. Ett brett aktivt deltagande från de kraftbolag som medverkar i Energiforsks Betongprogram Kärnkraft, tillsammans med akademin, medför en nationell kompetensuppbyggnad som genom fortsatt branschgemensam samverkan kommer att bli allmänt tillgänglig.



¹ Det finns även andra syften med försöksanläggningen, t.ex. förbättrad bedömning av risker och radiologiska konsekvenser för säkerhetsredovisningar

² Beräkningsverktyg baserade på finita elementmetoden

³ Vérification Réaliste du Confinement des Réacteurs

1.2 SYFTE OCH MÅL

Denna rapport omfattar arbete för Vercors-projektets första benchmarkövning 2015-2016 för Vercors Tema 1.

Projektets syfte är förstärkt kompetensbas om hur osäkerheter kopplade till beräkningsmetoders giltighet kan hanteras. Därigenom ges förutsättningar för en bredare användning av metoderna än vad som är fallet idag.

Målet är att tillvarata det unika tillfälle som EDF:s skalmodell erbjuder och genom det bygga kunskap och kompetens om beräkningsmetoders giltighet, och därmed bidra till förstärkt kärnteknisk säkerhet.

Målet kopplar till det övergripande målet för Energiforsks Betongprogram Kärnkraft⁴ att säkerställa avsedd livslängd och hög tillgänglighet med bibehållen säkerhet för kärnkraftverk i Sverige och Finland.

1.3 PROJEKTGRUPP

Projektet har varit organiserat som nedan:



Vattenfalls del av uppdraget har genomförts av:

- Personal från enhet Bygg- och Bergteknik, Vattenfall AB. Uppdragsledare och ansvarig för detta uppdrag har varit tekn. dr. Christian Bernstone. Övrig personal har varit tekn. lic. Tobias Gasch och civ. ing. Torbjörn Nia.
- Personal från beräkningsavdelningar vid Forsmark, Ringhals och SKB (stödresurser från respektive linjeorganisation som finns tillgängliga i mån av tid), samt från OKG:s teknikavdelning.
- Lunds Tekniska Högskola (LTH) och Kungliga Tekniska Högskolan (KTH) har bidragit med expertkompetens genom tekn. dr. Magnus Åhs vid avd. för



⁴ Programperiod 2013-2015

Byggnadsmaterial respektive tekn. dr. Richard Malm, vid avd. Betongbyggnad.

Arbetet har finansierats av Energiforsk, dock inte licenskostnader för FEM-verktyg. Dessa bekostas av medverkande organisationer, samt även med stöd från SKB AB.

1.4 OMFATTNING OCH AVGRÄNSNINGAR

Arbetet är indelat i två etapper:

- Etapp 1: Den första etappen omfattar att ta fram preliminära förutsägande beräkningsresultat för temperaturutvecklingen med start från gjutningstillfället till det tidiga skedet (10 månader). Beräkningar görs också för utvecklingen av deformationer och spänningar, liksom för deformationer som skapas vid dels förspänning av spännkablar, dels i samband med trycktester.
- Etapp 2: Vercors projektledning förser deltagande organisationer med de resultat som finns från genomförda provningar och mätningar. Fortsatt arbete görs med förbättringar av tidigare gjorda modellantaganden, och förnyade modelleringar.



2 Vercors försöksreaktorinneslutning

2.1 INLEDNING

Den skalmodell över en typisk fransk reaktorinneslutning som EDF uppförde 2014-2015 ligger i anslutning till deras forskningslaboratorium sydöst om Paris (Figur 1). I detta kapitel beskrivs översiktligt konstruktionsutformningen (avsnitt 2.2), materialval (avsnitt 2.3), inbyggd instrumentering (avsnitt 2.4), av EDF etablerad CAD-modell (avsnitt 2.5), och relevanta randvillkor (avsnitt 2.6).



Figur 1. Vercors reaktorinneslutning ligger i anslitning till EDF-Lab Les Renardières.

2.2 KONSTRUKTIONENS UTFORMNING

Reaktorinneslutningen inklusive dess yttre klimatskyddskonstruktion är cirka 22 m hög med ytterdiameter 15 meter. I full skala motsvaras detta av en klimatskyddskonstruktion som är 65 meter hög och 45 meter i ytterdiameter. Ett medvetet avsteg är att inneslutningen har konstruerats utan tätplåt (vilket för den här typen av inneslutning hade varit en friliggande tätplåt på insidan av inneslutningen). Inneslutningen är förspänd på ett sätt som innebär att hänsyn är tagen till skalenligheten.

Alla delar utom själva bottenplattan är nerskalade vilket innebär att t.ex. både armeringsjärn och spännkabelsystem har klenare dimensioner.

Betongarbetena för inneslutningens cylinder har utförts i 15 etapper med ett klätterformsystem, där var etapp motsvarar ungefär 1,2 meters höjd (Figur 2). Omgivande klimatskal har gjutits i sju etapper. Bottenplattan är grundlagd cirka fem meter under omgivande markyta.



Byggnationen påbörjades sommaren 2015, och färdigställdes under senvintern 2016. Figur 2-5 visar ett antal fotografier från olika byggskeden under perioden, och efter färdigställandet, se Figur 6- Figur 8.



Figur 2. Exempel på visualisering av de olika gjutetapperna, i det här fallet cylinderväggens sjätte lyft (källa Vercors).



Figur 3. Gjutning av inneslutningskonstruktionens sockel (gausset). Augusti 2015 (Fotografi EDF).





Figur 4. Formsättning av den inre kupolkonstruktionen februari 2015 (Fotografi EDF).



Figur 5. Gjutning av kupolen, december 2015 (Fotografi EDF).





Figur 6. Reaktorbyggnadens utsida mars 2016 (Fotografi Magnus Åhs).



Figur 7. Undersida av reaktorbyggnadens kupol av stål, ovanför inneslutningskonstruktionen kupol av betong, mars 2016 (Fotografi Magnus Åhs).





Figur 8. Undersida av reaktorinneslutningens kupol, mars 2016 (Fotografi Magnus Åhs).

2.3 MATERIAL

Konstruktionen har byggts med betongrecept enligt Tabell 1. För kunna göra mekaniska linjärelastiska beräkningar av betongen så krävs data för ett antal av dess materialegenskaper (se t.ex. [14]). Dessa materialegenskaper listas i Tabell 2, tillsammans med en kommentar om på vilket sätt som data har tillhandahållits av Vercors. Data från provning av elasticitetsmodul presenteras i Tabell 3.

Utöver data som är grundläggande för beräkningar så finns kompletterande data från Vercors rörande:

- Specifik värmekapacitet
- Betongtemperatur vid leverans
- Konvektiv värmeövergångskoefficient
- Mognadsgrad
- Tryckhållfasthet (Tabell 3)
- Krypning och krympning
- Viktminskning på grund av avdunstning av vatten

Reaktorinneslutningen har totalt 294 stycken ingjutna⁵ Freyssinet spännkablar (system C, 4C15), med två lager horisontella kablar (cc 133 mm) och ett lager vertikala kablar (cc 290 mm) i cylinderväggen och två lager i kupolen. Maximal spännkraft vid ankarplatta är 1488 MPa.



⁵ Sex av kablarna har lämnats utan ingjutning.

Tabell 1. Betongrecept och materialegensaker för använd betong.

Material	Proportioner (kg/m ³)
Cement (CEM I 52,5 N CE CP2 NF Gaurain)	320
Sand (torr)	830
Grus (mättad) 4/11 R GSM LGP1	445
Grus (mättad) 8/11 R Balloy	550
Plastiserare Sicaplast Techno 80	2,4
Vatten	170,9
Index	
Effektiv vattenmängd	0,52

Tabell 2. Centrala materialegenskaper hos betong för statiska konstruktionsberäkningar, och Vercors hantering av dessa.

Materialegenskap	Data från Vercors	
Elasticitetsmodul	Har mätts i labb, se Tabell 3.	
Tvärkontraktionstal	Har inte levererats av Vercors. För hårdnad betong så anses tvärkontraktionsalet normalt ligga inom intervallet 0,1 till 0,2 [14].	
Densitet	Har mätts vid betongleveranser. I medeltal 2395 ±25 kg/m ³ .	
Värmeutvidgningskoefficient	Har inte levererats av Vercors. Kan variera med betongens materialsammansättning, och med betongens hårdnande. Ligger vanligtvis i intervallet $0.74 \cdot 10^{-5} \le \alpha \le 1.3 \cdot 10^{-5}$ [K ⁻¹] för betong med Portlandcement [14].	

Tabell 3. Resultatet från Vercors provning av elasticitetsmodulen (motsvarande SS-EN 12390-13:2013) och tryckhållfasthet (motsvarande SS-EN 12390-3).

Tid	Elasticitetsmodul [MPa]	Tryckhållfasthet [MPa]
20 h	21900	14,6
21 h	22800	16,1
22 h	23400	17,4
24 h	24600	19,3
48 h	28200	29,2
7 dygn	31900	41,3
28 dygn	33800	50,4

2.4 INSTRUMENTERING

Reaktorinneslutningen har försetts med ett omfattande instrumenteringsprogram (Figur 9). Valet av parametrar som följs upp med givare är motsvarande vad som finns installerade på franska reaktorinneslutningar⁶ (se t.ex. [11]), och bidrar på olika sätt till att beskriva sådana konstruktioners bärförmåga, täthet och geometri över tid. Totalt har över 500 givare installerats och drygt 2000 meter optisk fiber, se Tabell 4.

De fiberoptiska givarna är ingjutna i överkant utmed inneslutningens dom, "kupol", och i betongen längs med cylinderns omkrets (165 m) på två höjder, på



⁶ EDF:s Westinghouse tryckvattenreaktorer.

nivåerna +24 m och +45 m. Mätresultaten kan jämföras med resultatet från intilliggande konventionella givare (vibrerande sträng och PT100).

Inneslutningens deformationer övervakas i horisontalled med lodlinjegivare, och i vertikalled av konvergensgivare.



Figur 9. Placering av installerade givare [18].



Parameter	Givartyp	Mängd
Temperatur	PT100 givare	200 st.
Geometri: Diameter Höjd	Lodlinje Konvergensgivare (Invar-tråd)	4 st. 4 st.
Töjning	Töjningsgivare (vibrerande sträng) Tre typer av optiska fibergivare ⁷	>300 st. >2000 m.
Töjning armering	Töjningsgivare	80 st.
Spännkraft	Dynamometer	4 st.
Fukthalt	Time domain reflectometry (TDR) Pulsgivare	20 st. 20 st.

Tabell 4. Sammanställning över installerade givare i reaktorinneslutningen [1] [18].

Givarna har lästs av varje timme med start från byggskedet (under gjutning och betongens hårdnande), och fortlöpande därefter [18].

Det har inte funnits någon väderstation för mätning av det rådande klimatet. Däremot så har utomhustemperaturen kontinuerligt registrerats under byggtiden.

2.5 GEOMETRISK MODELL

Den digitala information av anläggningens geometri som fanns tillgänglig för deltagarna i Vercors var en tredimensionell modell över reaktorinneslutningskonstruktionen i Autocad (format IGES). Förutom betongkonstruktionen så fanns separata filer för dels spännkablarnas position och dels håltagningar och genomföringar.

CAD-modellen över betongkonstruktionens kontinuerliga domän bestod av över 2000 delar. Denna detaljrikedom är inte hanterbar för FE-modellering. För att skapa en bra förutsättningar för beräkningsmodellen så reducerades detaljeringsgraden motsvarande en beskrivning utifrån sju separata konstruktionsdelar (se Figur 10). Den reducerade CAD-modellen omvandlades till Comsol format, vilken sedan användes i beräkningsprogrammet Comsol Multiphysics för elementindelning (meshning).

⁷ i) Eftergivlig temperatur- och töjningsgivare, ii) styv töjningsgivare med rå yta, och iii) temperaturgivare där fibern ligger lös inuti ett skyddshölje.





Figur 10. Vald representation av reaktorinneslutningen i FE-programvaran.

2.6 RANDVILLKOR

Som beskrevs i avsnitt 2.2 så pågick betongarbetena under perioden april 2014 till juli 2015. Reaktorinneslutningen göts i 15 etapper, där varje etapp formsattes med träformar (tjocklek 36 mm). Formen revs cirka en dag efter gjutning. Omgivande klimatskal göts samtidigt i sju etapper. Bottenplattan är grundlagd cirka fem meter under omgivande markyta.

Vid gjutning av den nedre delen av cylinderväggen, dvs. för den första (och andra) gjutetappen så användes luftvärmare under 36 timmar (27 augusti kl. 23:00 till 29 augusti kl. 07:00).

Arbetena pågick utan väderskydd, dvs. det är de rådande temperatur- och fuktförhållandena som skall betraktas som övergripande randvillkor för betongens hårdnande. Mätningar visar att medeltemperaturen för perioden var 12,4°C, med dygnsmedelvärden som Figur 11. Mätserien utgör randvillkor vid modellering av värmetransportförloppen. Marken antas ha en konstant temperatur på 12 °C.



Figur 11. Medeltemperaturvariationen i anslutning till arbetena under byggperioden (data från Vercors).



För respektive gjutetapp så ansattes som randvillkor ett konvektivt värmeflöde för de vertikala betongytorna. För de inledande 24 timmarna så finns även gjutformen med som ett skikt mellan betongen och omgivande luft.

Det finns inga lokala mätningar av relativa fuktighet (RF). Byggnaden runt en reaktorinneslutning är normalt välventilerad vilket betyder att dess luft har ungefär samma relativa fuktighet som utomhusluften. Som randvillkor har därför mätningar från Parisregionen i stort använts som randvillkor, vilket betyder 80% RF med en amplitud om ± 10% RF.

De materialegenskaper som har använts som indata till beräkningarna sammanfattas i Tabell 5 (jämför med avsnitt 2.3). Som framgår av sammanställningen så har i flera fall andra antaganden gjorts än vad som levererats av Vercors. En av anledningarna till detta är att dessa data vanligtvis inte är tillgängliga då beräkningar görs. Genom att använda generella antaganden för materialegenskaperna ges en möjlighet att jämföra beräkningsresultatet med beräkningar utförda där de uppmätta materialegenskaperna har använts. Dessutom går båda dessa beräkningsresultat att jämföra mot de faktiska förloppen både ur temperatur- och deformationshänseende.

Materialegenskap	Värde	Beteckning	Enhet	Kommentar
Elasticitetsmodul	32,3	E	GPa	Från Vercors
Tvärkontraktionstal	0,2	ν	-	Ej dokumenterat av Vercors. Eget antagande
Densitet (medelvärde)	2322	Р	kg/m³	Från Vercors ⁸
Värmeutvidgningskoefficient	1,1•10 ⁻⁵	α	K-1	Ej dokumenterat av Vercors. Eget antagande
Specifik värmekapacitet	880	Cp	J/kg•K	Från Vercors
Betongtemperatur vid leverans	7,7-27,0	Т	°C	Från Vercors
Konvektiv värmeövergångskoefficient	25	h	W/m²•K	Betonghandboken [23]
Värmeledningsförmåga	1,8	k	W/m•K	Ej dokumenterat av Vercors. Eget antagande
Maximal värmeavgivning för använd cementtyp	376	qu	kJ/kg	Från Vercors

Tabell 5. Sammanställning av i FE-modelleringen använda materialegenskaper.

2.7 STUDERADE FRÅGESTÄLLNINGAR

De åldringsprocesser som påverkar anläggningens funktion över tid studeras utifrån de teman som beskrevs inledningsvis (Kapitel 1). Eftersom det inte är en anläggning som utsätts för processbundna påfrestningar från kraftproduktion så motsvaras åldringen istället av att:

⁸ Olika uppgifter förekommer. En högre densitet redovisas även med i medeltal 2495 kg/m³



- konstruktionen och dess grundläggning efter färdigställande anpassar sig till de mekaniska påkänningar som kombinationen av egenvikt och uppspänningskrafter innebär.
- en efterliknad produktionsfas med påkänningar i form av säsongsvariationer och variationer i klimatparametrar där konstruktionen i takt med åldrandet anpassar sig till eventuella förändringar i last, vilket främst här innebär de laster som uppstår vid täthetsprovning. Någon accelererad åldring sker inte, förutom att trycktester genomförs ofta (en gång per år).

Resultatet från mätprogrammet visar fortlöpande hur konstruktionens beteende påverkas av inre och yttre laster. Möjligheten till att påvisa motsvarande förändringar utifrån beräkningar undersöks genom att modellera:

- 1. Beteendet över tid i givna punkter i reaktorinneslutningens sockel från gjutning till månad 10, utifrån parametrarna temperatur, rörelse och töjning.
- Beteendet av reaktorinneslutningens cylindervägg före och efter uppspänning av spännkablar, respektive inför och direkt efter ett trycktest, utifrån parametrarna rörelse, spänning och sprickor.
- 3. Luftläckaget vid slutet av ett trycktest (innan tryckavlastning påbörjas), del genom lokala konstruktionsdelar och dels genom inneslutningen som helhet (globalt).

De positioner i konstruktionen som den faktiska benchmarken mot mätdata görs för framgår av Figur 12. Det finns temperatur- och töjningsgivare i positionerna F1, F2, G1 och G2 (sockeln), och töjningsgivare i positionerna H1, H2, H5, H6, K1, I1 och I2.



Figur 12. Modelleringsresultaten jämförs med mätdata för de givarpositioner som märkts ut. För sockeln (gausset) så har både temperatur- och töjningsgivare installerats i samtliga numrerade positioner.



3 Metod

3.1 INLEDNING

Betongens egenskaper utvecklas mycket i det tidiga skedet, och vilket tas hänsyn till i den modellen som har tagits fram. Betong kan betraktas, och därmed också modelleras, som ett multifysiskt material där hänsyn tas till flera fysikaliska och kemiska processer i en och samma modell med hänsyn till deras inbördes kopplingar (kopplade modeller), se t.ex. [9].

De fysikaliska och kemiska processer⁹, och därmed matematiska modeller, som ingår i vårt bidrag till Vercors benchmark beskrivs i detta kapitel, tillsammans med den modelleringsprogramvara som har använts. Processerna är:

- Betongens hydratation (avsnitt 3.4)
- Betongens temperaturutveckling (avsnitt 3.5)
- Betongens fuktinnehåll (avsnitt 3.6)
- Betongens hållfasthetstillväxt (avsnitt 3.7)
- Betongens krympning (avsnitt 3.8)
- Spännkablarnas förspänning (3.9)
- Betongens krypning (avsnitt 3.10)

I och med användandet av finita elementmetoden så kan kopplade modeller implementerats och användas. Det kan dock vara något besvärligt att tränga igenom på vilket sätt som de olika processerna ovan interagerar. Kopplingen finns dock i de ekvationer som presenteras.

3.2 BERÄKNINGSVERKTYG

Verktyget för FE-modelleringen har varit Comsol Multiphysics (version 5.2) [4]. Detta är en programvara som kan användas för att simulera komplexa ingenjörsoch fysikbaserade problem utifrån flera fysikaliska modeller eller flera samtidiga fysikaliska fenomen.

Det finns ett flertal andra FE-program som kan göra motsvarande beräkningar (vilket också kan ses i den sammanställning som göras av övriga deltagare i Vercors i kapitel 5). Att valet föll på Comsol beror dels på projektgruppens tillgång till licenser, och dels på den möjlighet som har funnits till att bygga vidare på metodik och resultat från tidigare genomförda FoU-projekt (se t.ex. Gasch [9] och Lundqvist [13]).

⁹ Det finns ett stort antal matamatiska modeller i litteraturen för att analysera olika aspekter betongs egenskaper. De val av modeller som projektet har gjorts här baseras på erfarenhet och tidigare forskningsresultat.



3.3 SOLIDMODELL OCH ELEMENTNÄT

Den - som tidigare beskrivits - till sju konstruktionsdelar reducerade geometriska modellen i CAD importerades till Comsol via programmets egna importmodul¹⁰. Vercors-modellen visade sig inte vara städad från de stödlinjer som ritaren använt sig av. Dessas städades bort, men även ett flertal av de linjer som representerar domänen visade sig vara slarvigt arrangerade i knutpunkter och korsningar. Efter ytterligare korrigeringar så förenklades den slutliga solidmodellen till en geometri med 19 enskilda element, se Figur 13.

Reaktorinneslutningsväggens nedre del är utformad med en förstyvning i sockeln, vilket för den första gjutetappen innebär en formsättning där väggtjockleken i den nedre delen är cirka 60 cm, och i den övre delen 40 cm. Solidmodellen har här av tidsskäl, förenklats så att förstyvningen inte är med, dvs. väggen har samma tjocklek över hela gjutetappens höjd. Detta innebär att referenspunkterna F1 och F2 inte ligger rätt, vilket däremot punkterna G1 och G2 gör, se Figur 13.



Figur 13. Etablerad 2D-axialsymetrisk solidmodell i Comsol Multiphysics, uppdelad i 19 delar utifrån reaktorinneslutningens gjutetapper.

Den solidmodell som har använts för beräkning av temperaturer och relativ fuktighet är en 3D-geometri, och för rörelseberäkningarna en 2D-axialsymmetrisk geometri. Diskretiseringen har gjorts med andra ordningens triangulära element i Comsols modul "Solid". Valet har gjorts utifrån tidigare erfarenheter. Det är särskilt viktigt att högupplöst elementindelning används för

¹⁰ Filformatet har konverterats till FE-programmets filformat från filformatet IGS (standardfilformat för överföring av 3D-modell filer mellan olika CAD programvarupaket).



spänningsberäkningar, och speciellt på ställen där det förekommer stora spänningsgradienter¹¹. Den elementindelning som vi har valt för den lägre delen av konstruktionen visas i Figur 14. Antalet element var i den axialsymmetriska 2Dgeometrin 10 300 st, där sidlängden på de största triangulära elementen var 0.3 m, och antalet frihetsgrader var 221 000 för temperatur- och fuktberäkningen där även hydratationen och mognadsgraden ingår. För den solidmekaniska beräkningen användes samma elementindelning, och antalet frihetsgrader cirka 62 000. Det totala antalet frihetsgrader var således 283 000. I 3D-modellen är antalet element 59 600 av typen tetraheder, antalet frihetsgrader för temperatur och relativ fuktighet samt hydratationsgrad och mognadsgrad var cirka 547 000, i hela modellen. Storleken på de största elementen var 2.5 m.

Styrningen av gjutetapperna för reaktorinneslutningen har i Comsol lagts in korrekt i tid, där gjutning av respektive etapp har antagits ske vid en diskret tidpunkt, så att tiden för gjutning av etappen satts till noll (0).

Flera konvergenstest har utförts där resultatet från beräkningar med grövre elementindelning jämförts med en finare elementindelning. Beräkningsresultatet har också jämförts med enklare fal och på enklare geometrier så att responsen i den matematiska modellen är rimliga.



Figur 14. 2D-vy som visar de nedre delarna av FE-modellens elementindelning.

¹¹ T.ex. i anslutning till lastkoncentrationer, större ändringar i tvärsnitt och/eller materialegenskaper.



3.4 BETONGENS HYDRATATION

Det finns ett antal olika framtagna modeller för att beskriva hur snabbt kemiska reaktioner sker då betong hydratiserar. I vår modellering så har vi använt olika modeller för att beskriva hydratationen vid olika tidpunkter. För den unga betongen så beskrivs detta av:

$$\alpha(t) = e^{A\log(\frac{t}{3600})^B} \tag{1}$$

Här bestäms hydratationsgradens (α) tidsberoende utifrån betongens temperaturutveckling vid adiabatiska förhållanden, betongens temperatur vid leverans till arbetsplatsen och den använda cementtypens maximala värmeavgivning från hydratation. Dessa data ger genom kurvanpassning ekvationens parametrar A (-7) och B (-2,7). Metoden är framtagen av Byfors [3].

För bestämning av hydratationsgraden för ung betong så har vi använt modellen:

$$\frac{\partial \alpha(t)}{\partial t} = \beta_{WC} \beta_T \beta_{\varphi} \left(\frac{\partial \alpha(t_e)}{\partial t} \right)_{ref}$$
(2)

Hydratationsgraden beror här av dels reaktionshastighetsfaktorer för vattencementtalet (β wc), temperatur (β T), och relativ fuktigheten (β_{φ}), och dels hydratationsutvecklingen vid ett referensklimat¹² $\left(\frac{\partial \alpha(t_e)}{\partial t}\right)_{ref}$. Modellen är

framtagen av Norling Mjörnell [17].

Faktorn β_{WC} beräknas utifrån den maximalt möjliga hydratationsgraden (α_{max}) och en parameter (A_{betaWC}) framtagen från kurvanpassning av betongens faktiska hydratationsutveckling jämfört med en betong tillverkad med ett referensvattencementtal. Kurvanpassningen har gjorts gentemot Vercors adiabatiska mätningar på betongen.

$$\beta_{WC} = \left(\frac{\alpha_{max} - \alpha}{\alpha_{max}}\right)^{A_{betaWC}} \tag{3}$$

Den maximalt möjliga hydratationsgraden är i det här fallet 0,98 och A_{betaWC} är 1,9 [23].

Faktorn β_T baseras på termisk aktiveringsenergi i Arrhenius ekvation, och beskrivs av en mognadsgradsfunktion

$$\beta_T = e^{\left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\theta} \tag{4}$$

som utgår från en referenstemperatur¹³ (T_{ref}), faktisk temperatur vid arbetsplatsen (T), och en parameter som tar hänsyn till den termiska aktiveringsenergins temperaturberoende (θ):

$$\theta = \theta_{ref} \left(\frac{30}{T + 10 - 273.15} \right)^{\kappa_3} \tag{5}$$



^{12 20 °}C och fullständigt mättat förhållande

¹³ Referenstemperaturen är 25 °C (298.15 K)

Det två parametrarna θ_{ref} (4700) och κ_3 (0.54) är empiriska konstanter framtagna från experimentella anpassningar. Ansatta värden är i det här fallet som inom parantes, baserat på betongreceptet.

Faktorn β_{ϕ} bestäms av betongens andel vattenfyllda kapillära porer, eftersom det huvudsakligen är detta vatten som bidrar till bildandet av hydratationsprodukter. I ekvationen

$$\beta_{\theta} = \frac{\frac{w_{e}(\theta)}{c} - P_{cap_{p}} \cdot \alpha(t)}{\frac{W_{e}(\theta)}{c} - .19\alpha(t) - P_{cap_{p}} \cdot \alpha(t)}$$
(6)

ingår vattencementtalet $(\frac{W_0}{c})$ och den kapillära porvolymen (P_{cap_p}) , som i sin tur bestäms av:

$$P_{cap}{}_{p} = \frac{\frac{W_{0}{}_{0}{}_{.32+}W_{0}}{0{}_{.32+}\frac{W_{0}}{c}}}{0{}_{.32+}\frac{W_{0}}{c}}$$
(7)

3.5 BETONGENS TEMPERATURUTVECKLING

Temperaturen i reaktorinneslutningens betongkonstruktion beräknas med diffusionsekvationen

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (k \nabla T) + Q \tag{8}$$

utifrån betongens densitet (ρ), specifika värmekapacitet (C_p), temperatur (T), värmeledningsförmåga (k), och värmeavgivning (Q) från hydratationen. Värmeavgivningen

$$Q = \frac{d\alpha(t)}{dt} \cdot q_u \cdot C \tag{9}$$

bestäms utifrån maximal värmeavgivning (q_u) och mängden cement (C).

Värmeledningsförmågan är beroende av betongens fukthalt (sänkt fukthalt sänker värmeledningsförmågan). Detta beroende har inte inkluderats i modellen.

Dimensionsförändringar som uppkommer genom temperaturändringar har beräknats med ekvationen:

$$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T \tag{10}$$

Parametern α är betongens termiska längdutvidgningskoefficient (1.1 · 10⁻⁵)

3.6 BETONGENS FUKTINNEHÅLL

Fukthaltutvecklingen i betong har stor betydelse för möjligheten att bedöma betongens hydratisering vid tidig ålder, liksom modellering av hållfasthetstillväxt, krypning och krympning. Den modell som valts för att beräkna fukttransporten har utvecklats inom ramen för Nugenia-projektet Accept [26].

Fukttransporten modelleras med relativ fuktighet som drivande potential, där den relativa fuktigheten i betongens porer (ϕ) utgörs av förhållandet mellan faktisk



ånghalt och mättnadsånghalten för luft vid en viss temperatur. Fukttransporten baseras på Ficks andra lag

$$\frac{\partial W_e}{\partial t} = \frac{\partial W_e}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla \left(\delta_{\varphi} \nabla \varphi \right) + Q_2 \tag{11}$$

utifrån fuktkapacitet¹⁴ ($\frac{\partial W_e}{\partial \varphi}$), och fukttransportkoefficient¹⁵ (δ_{φ}), relativ fuktighet (φ) och betongens självuttorkning (Q_2). Självuttorkningen bestäms av:

$$Q_2 = \frac{\partial \alpha(t)}{\partial t} \cdot C \cdot 0.25 \tag{12}$$

utifrån hydratationshastighet $\left(\frac{\partial \alpha(t)}{\partial t}\right)$, mängd cement (*C*), och den till cementet maximala mängden kemiskt bundet vatten (uppskattad till 0,25)

Ytövergångsmotståndet (k_{RH} ,), med relativ fuktighet som drivande potential, har modellerats med Lewis relation [12]

$$k_{RH} = \frac{h \cdot v_s}{\rho_{air} \cdot C_{p(air)}} \tag{13}$$

utifrån den konvektiva värmeövergångskoefficienten (h), mättnadsånghalt (v_s), luftens densitet (ρ_{air}), och luftens värmekapacitet ($C_{p(air)}$). Det resultat som modellen ger innebär en uppskattning av ytövergångsmotståndet.

3.7 BETONGENS HÅLLFASTHETSUTVECKLING

Hållfasthetstillväxten i ung betong är beroende av temperaturförloppet i det tidiga gjutskedet (det så kallade mognadsgradskonceptet). För en specifik betong så kan vid ett känt temperaturförlopp - hållfasthetstillväxten relateras till ekvivalent ålder genom Arrhenius-funktionen. Den ekvivalenta åldern är den tid som fordras vid en fix temperaturnivå (t. ex. 20° C) för att få samma hållfasthet under ett verkligt förlopp där temperaturen varierar. På så sätt så kan hållfasthetstillväxen bestämmas som funktion av verklig tid [10]. Den ekvivalenta åldern ges av ekvationen [25] som:

$$t_e = \beta_\Delta \int_t \beta_T \times dt + t_{e,0} \tag{14}$$

Inverkan av tillsatsmedel (β_{Δ}) är här satt till 1, och starttiden ($t_{e,0}$) är satt till 0. Mognadsgradsfunktionen (β_T) är en temperaturkänslighetsfaktor.

Betongens medeltryckhållfasthet bestäms utifrån [22]

$$f_{cm}(t_e) = e^{s\left(1 - \sqrt{\frac{672}{t_e}}\right)} \times f_{cm,28}$$
(15)



¹⁴ Härledd från sorptionsisotermen

¹⁵ Fukttransportkoefficienten är beroende av den relativa fuktigheten.

baserat på tryckhållfasthet efter 28 dygn (f_{cm,28}). Använt cement (CEM 52.5 N) ger s (0,2).

E-modulens variation med ekvivalenta åldern ges av [22]:

$$E_{cm}(t) = \left(\frac{f_{cm}(te)}{f_{cm}}\right)^{0.3} \times E_{cm}$$
(16)

utifrån tryckhållfasthet vid tiden t (fcm(te)), tryckhållfasthet (fcm,28) och elasticitetsmodulen (Ecm,28) efter 28 dygn.

3.8 BETONGENS KRYMPNING

Betongs krympning beror främst på fukttransportprocesser. När cementpastans porer får ett minskat fuktinnehåll så leder detta till att de drar ihop sig och därmed krymper betongkonstruktionen som helhet. En konstruktions krympningsprocess påverkas av betongens sammansättning, dess geometri, omgivande luftfuktighet och temperaturförhållanden. Dessutom är olika typer av krympningsmekanismer framträdande vid olika relativ fuktighet, vilket i sin tur beror på betongens materialsammansättning och vattencementtal. Dessa krympningsmekanismer resulterar sammantaget i betongens slutkrympning.

I det tidiga skedet så sker den största delen av betongens autogena krympning inom några dagar efter gjutningen. Betongen kan då betraktas som att vara plastisk, vilket betyder att den inte bidrar till att bygga upp spänningar i konstruktionen.

Krympningen (ε_w) har beräknats utifrån hur fukthalten (W_{akt}) förändras jämfört med den referensfukthalt som råder efter lång tid ($W_{80\% RF}$).

$$\varepsilon_w = \varepsilon_{\infty,w} \frac{W_{98\% RF} - W_{akt}}{W_{98\% RF} - W_{80\% RF}}$$
(17)

Som startvillkor har ansatts 98% fukthalt (det förutsätts att det inte sker någon krympning då fukthalten går från 100% till 98%). Den totalt möjliga krympningen ($\varepsilon_{\infty,w}$) har ansatts till 0,05% [23].

Fukthalten (W_e) vid en given hydratationsgrad (α_c) och relativ fuktighet (φ) bestäms av summan av den vattenhalt som finns i gelporerna (W_{gel}) och den vattenhalt som finns i kapillärporerna (W_{cap}). Metoden är framtagen av Norling Mjörnell [17]:

$$W_e(\varphi, \alpha_c) = W_{gel}(\varphi, \alpha_c) + W_{cap}(\varphi, \alpha_c)$$
(18)

Vattenhalten i gelporerna bestäms av:

$$W_{gel}(\varphi, \alpha_c) = W_{gel} \cdot \left(1 - \frac{1}{e^{(\beta - \alpha_c \cdot 10) \cdot \varphi}}\right)$$
(19)

$$W_{gel} = P_{cap} \cdot \alpha_C \cdot C \tag{20}$$

där *P_{cap}* motsvaras av den kapillära porositeten



$$P_{cap} = \left(\frac{\frac{W}{C} - 0.39\alpha_C}{0.32 + \frac{W}{C}}\right) \tag{21}$$

Vattenhalten i kapillärporerna bestäms av:

$$W_{cap}(\varphi, \alpha_c) = W_{cap} \cdot \left(e^{(\beta - \alpha_c \cdot 10) \cdot \varphi} - 1 \right)$$
(22)

$$W_{cap} = \frac{W_{tot} - W_{gel} \cdot \left(1 - \frac{1}{e^{(\beta - \alpha_C \cdot 10) \cdot \varphi}}\right)}{e^{(\beta - \alpha_C \cdot 10) \cdot \varphi - 1}}$$
(23)

I ekvationerna motsvaras C av betongens cementinnehåll (320 kg/m³) och W av mängden blandningsvatten (196 kg/m³). För att få fram parametern β så krävs att den beräknade sorptionsisotermen kurvanpassas till motsvarande uppmätt sorptionsisoterm. I det här fallet så gav kurvanpassningen att β är 10.

3.9 SPÄNNKABLARNAS FÖRSPÄNNING

De spännkrafter som lagts in i modellen har hämtats från Vercors dokumentation. Krafterna har fördelats ut jämnt i respektive riktning. Till exempel så ger kablarnas placering i horisontalled cirka fem spännkablar per meter vägg, vilket tillsammans med väggtjockleken ger en spänning per ytenhet.

Spännkrafterna har beräkningsmässigt hanterats i Comsol på samma sätt som för motsvarande problemställning i Nugenia-projektet Accept [7]. En med ekvivalent tid varierande temperatur har lagts på i de modellnoder som representerar kablarna. Förspänningen beräknas via termisk expansion av stålmaterialet, dvs. utifrån stålets värmeexpansionskoefficient och elasticitetsmodul.

3.10 BETONGENS KRYPNING

Krypningen antags starta då konstruktionen belastas, dvs. vid uppspänning av spännkablarna. Modelleringen av krypning baseras på ekvationerna i Eurokod 2, Bilaga B [22].

I dessa simuleringar har endast baskrypningen beaktats, dvs krypning orsakad av förändringar i fuktinnehåll (Picket-effekten) beaktas ej. Den dominerade delen av krypningen vid en reaktorinneslutning beror på inverkan från förspänningen. Utav denna anledning har ett tidsberoende kryptal beräknats i enlighet med Eurokod 2 för olika konstruktionsdelar. Därefter beräknas motsvarande tillskott i töjningar som orsakas av krypningen på grund av genomsnittliga spänningsnivåer i de olika konstruktionsdelarna. För cylinderväggen delas även kryptöjningarna upp i två komponenter på grund av den stora skillnaden i förspänning från spännkablar i vertikal- respektive ringsled. Motsvarande teknik har används vanligtvis för förspända inneslutningar, och tillämpades även i Nugenia-projektet Accept [26].



4 Resultat egna beräkningar

4.1 TEMPERATURUTVECKLING

Den värmeutveckling som sker efter gjutning medför en kraftig temperaturhöjning som i regel når sin topp inom ett par dygn, följt av avsvalning till omgivningens temperaturnivå. Användandet av värmare under den första gjutetappen av cylinderväggen delgavs inte förrän i slutet av Vercors, och därför gjordes modelleringen först under felaktiga randvillkor för omgivande temperaturer.

Resultatet från temperaturberäkningarna, för referenspunkterna G1 och G2, presenteras i Figur 15 (för båda temperaturrandvillkoren), tillsammans med mätdata från temperaturgivarna. G1 ligger 5 cm in i väggen, och G2 ytterligare 30 cm längre in, dvs. 5 cm in från väggens yttersida. Som förväntat så ökar temperaturen kraftigt under de första 24 timmarna till följd av dels den energi som frigörs då cementet hydratiserar, dels den högre lufttemperaturen som åstadkommits av värmarna. Två luftvärmare startades efter 5 timmar, och ytterligare två efter 19 timmar. De första två värmarna ökade lufttemperaturen med 20 °C, och tillsammans med de två tillkommande med totalt 30 °C.

Värmarna stängdes av efter 37 timmar, samtidigt som formrivning påbörjades. Som framgår av i Figur 15 så faller då betongtemperaturen i G1 då snabbt för att sedan långsamt anpassa sig till en temperatur där betongen endast påverkas av omgivande lufttemperaturväxlingar (ca. 70 timmar). Den uppmätta temperaturen för referenspunkten G2 är i princip samma som G1 och redovisas därför inte i figuren. Nästkommande gjutetapp (lyft 2) startade 300 timmar efter formrivning. Den underliggande betongens ytskikt har då ingen temperaturhöjning kvar till följd av cementets hydratisering.



Figur 15. Beräknad temperaturutveckling i mätpunkterna G1 och G2 för gjutetapp 1 av reaktorinneslutningsväggen, uppmätt temperaturutveckling i G1, samt omgivande lufttemperatur.



Som framgår av diagrammet så visar våra beräkningsresultat med korrekta randvillkor (G1 beräknad rev.) att värmeutvecklingen underskattas under de inledande 40 timmarna. Detta kan bero på att betongens densitet och accelerationen för den tidiga reaktionen har underskattats (betongens densitet skall enligt Vercors mätningar ansättas till ett något högre värde). Därefter följer den beräknade temperaturen den uppmätta temperaturen väl, från 40 timmar och framåt. Efter att hydratationens inverkan avtagit så varierar betongens temperatur med omgivande temperatur. De reviderade beräkningsresultaten fångar här inte upp max- och minitemperatur. Resultaten med randvillkoret utan värmare fångade däremot väl upp denna del av temperaturutvecklingen.

Värmeutvecklingen för konstruktionen som helhet, vid tidpunkten för den åttonde gjutetappen av cylinderväggen visas i Figur 16.



Figur 16. Betongens temperatur vid tidpunkten för den åttonde gjutetappen av cylinderväggen. Resultat från den axial-symmetriska modellen, med en temperaturgradient från 10 °C (blå färg) till °30 C (röd färg)



Figur 17. Beräknade betongens temperatur 91 dygn (4 november 2014) efter start av betonggjutningsarbetet (3D-modellen).



4.2 RELATIV FUKTIGHET

Någon mätning av relativ fuktighet i betongen görs inte, men denna har ändå beräknats eftersom uttorkningsgradienten har en direkt inverkan på modelleringen av töjningar. Väggen, som är 40 cm tjock, antas initialt ha en relativ fuktighet om 98%. Fuktigheten sjunker snabbt under de första 24 timmarna till följd av den självuttorkning som sker på grund av hydratationen, se Figur 18. I takt med att hydratationen avstannar, dvs. 24 timmar och därefter, så kommer fuktigheten nära betongens yta att bero av de yttre fukthaltförhållandena. I Figur 18 visas den relativa fuktighetens variation vid olika tidpunkter genom ett tvärsnitt av betongväggen, där fuktigheten i de inre delarna är högre än i väggens yttre delar. Även om resultatet inte kan valideras genom mätningar i det här projektet, så har motsvarande beräkningsresultat verifierats i en tidigare studie [16]. Figur 19 visar relativ fuktighet i konstruktionen efter 91 dygn.



Figur 18. Den relativ fuktighetsutvecklingen i referenspunkterna G1 och G2 (vänster), och distributionen av den relativa fuktigheten utmed betongens tvärsnitt, med 6 timmars intervall, från gjutstart till 72 timmar (höger).



Figur 19. Betongens relativa fuktighet 91 dygn (4 november 2014) efter start av betonggjutningsarbetet.



4.3 SPÄNNINGAR OCH TÖJNINGAR

Vertikala och horisontella kryptöjningar variation i reaktorinneslutningens cylindervägg beror på spänningsnivåerna i betongen. I benchmarken så har spänningar och töjningars utveckling över tid beräknats för några lägen där det finns töjningsgivare installerade. I Figur 20 redovisas beräknade totaldeformationer i anslutning till enskilda spännkablar vid en tidpunkt i direkt anslutning till att förspänningsarbetet färdigställts. Resultaten efter uppspänningen av, horisontell kabel # 2 och gammakabel, har därefter ritats upp i 3D i Figur 21.



Figur 20. Konstruktionens totaldeformation i anslutning till fyra spännkablar vid tidpunkt när förspänningen genomförts för samtliga spännkablar. Där blått motsvarar 0 i deformation och röd motsvarar "maximal" deformation.



Figur 21. 3D-visualiseering av totaldeformationen för deformationen efter att den vertikala kabeln och den horisontella kabeln #2 i Figur 20, vid tidpunkterna 51 dygn (vänster) och 80 dygn (höger) från start av förspänningsarbetet (avslut sker efter 98 dygn). Maximal deformation är här cirka 9 mm (rödfärgade områden). Blå färg motsvaras av ingen deformation.



Redovisningen av uppnådda resultat görs för samma givarläge som temperaturresultaten i avsnitt 4.1, dvs. töjningsgivaren i position G1. Här har Vercors styrt modelleringen till att ha som startpunkt beräknad töjning innan förspänningsarbetet påbörjas (150506), och slutpunkt tidpunkten då förspänningsarbetet avslutats (150812). De töjningar som givaren i G1 har registrerat i vertikal och tangentiell riktning (efter temperaturkompensation), presenteras i Figur 22. I diagrammet så visas mätningarnas respektive referenspunkter.

Våra modellerade töjningsresultat vid tidpunkten efter avklarad förspänning redovisas i Tabell 6, tillsammans med motsvarande mätvärden. Mätvärdena här hämtats från diagram i benchmarkprojektets slutrapport [5]. I rapporten redovisas tyvärr inte på vilket sätt som mätresultaten har bearbetats för att komma fram till dessa värden.

Resultatet visar på god överensstämmelse med töjningsgivarens data i vertikal riktning, men något sämre i horisontell riktning. Resultatet i den horisontella riktningen inom spridningsintervallet i jämförelse med övriga gruppers beräkningsresultat [5]. Orsaken till sämre överensstämmelse i tangentiell led beror på att kontreforer ej beaktas i den axi-symmetriska modellen. Detta innebär att tvärsnittet i en axi-symmetrisk modell är cirkulärt, men i verkligheten så bidrar kontreforerna till ökad styvhet och därigenom en ovalisering av tvärsnittet. Därmed är det full rimligt att beräkningsmodellen överskattar radiella töjningar. I vertikalled har kontreforerna marginell inverkan då deras area är marginell jämfört mot hela cylinderväggen.



Figur 22. Mätdata för töjningsgivaren G1 under förspänningsarbetet (98 dygn).



		Töjning [μm/m]		
Givare	Riktning	Beräknad	Uppmätt	
G1	V	-400	-410	
G1	Т	-380	-175	

Tabell 6. Beräknade och uppmätta töjningar i vertikal (V) och tangentiell (T) riktning för referenspunkt G1



5 Kollektiva resultat från Vercors-projektet

5.1 BAKGRUND

I detta kapitel presenteras en sammanställning av de bidrag och resultat som inkluderades i tema 1, dvs. prediktering ab temperaturutvecklingen i anslutningen mellan bottenplatta och cylindervägg av inneslutningen från start av gjutning tills samtliga etapper gjutits. Där det är möjligt dras slutsatser om olika modellers inverkan på resultatet. Det är dock komplicerat att dra slutsatser om olika modellers noggrannhet eller tillämplighet eftersom i) modellerna inte alltid har redovisats i tillräcklig omfattning, och ii) de resultat som presenteras kan vara baserade på olika förutsättningar (dvs. indata skiljer). Vissa delar av utvärderingen i detta avsnitt bygger därför på kvalificerade bedömningar och gissningar. I efterföljande avsnitt är det dock förtydligat om en slutsats baseras på en kvalificerad bedömning.

Underlaget till analysen är:

- Projektets sammanfattningsrapport [5]
- Extended abstracts och presentationer från workshop 7-9 mars 2016

Deltagandet i tema 1 delas in i två kategorier; preliminära resultat och slutgiltiga resultat. I Tabell 7 sammanfattas de projektgrupper som bidrog till att skicka in resultat till den preliminära fasen och i Tabell 8 de grupper som bidrog till att skicka in resultat till den slutgiltiga fasen. Totalt så deltog 11 projektgrupper i den inledande fasen av projektet och levererade preliminära resultat. I den avslutande fasen av projektet deltog åtta projektgrupper varav fem av dessa även deltog i den inledande fasen.

Projektledare	Företag/Organisation	Land
Mehdi Asali	OXAND France	FR
Christian Bernstone	Vattenfall AB	SE
Laurie Buffo-Lacarriere	LMDC, Université de Toulouse, INSA-UPS Génie Civil	FR
Frédéric Dofour	3SR Lab	FR
Oscar Elison	Scanscot Technology AB	SE
Randy James	ANATECH	US
Resat Oyguc	Istanbul Technical University	TR
Yaming Pan	University of California, Davis	US
Rong Pan	Nuclear & Radiation Safety Centre, Ministry of Environmental	CN
	Protection	
Giuseppe Sciumè	Dept. of Innovation Engineering – University of Salento	IT
Romain Venier	Tractabel Enegineering France / Coyne et Bellier	FR

Tabell 7. Deltagare i den inledande fasen av Tema 1	Tabell 7.	Deltagare	i den	inledande	fasen av	/ Tema	1.
---	-----------	-----------	-------	-----------	----------	--------	----



Projektledare	Företag/Organisation	Land
El Mahdi Bouhijiti	Ecole des Mines de St-Etienne (EMSE) – EDF-SEPTEN	FR
Laurie Buffo-Lacarriere	LMDC, Université de Toulouse, INSA-UPS Génie Civil	FR
Frédéric Dofour	3SR lab	FR
Oscar Elison	Scanscot Technology	SE
Yaming Pan	University of California, Davis	US
Vit Smilauer	Chech Technical University	CR
Marios Soutsos	Queen's University Belfast	GB
Romain Venier	Tractabel Enegineering France / Coyne et Bellier	FR

Tabell 8. Deltagare i den slutliga fasen av Tema 1.

I projektets sammanfattningsrapport finns dels resultat från den inledande och den slutgiltiga fasen av benchmark workshopen sammanställda. Som tidigare beskrivits tå baserades analyserna i den inledande fasen av projektet ett antagande om randvillkoren som ej överenstämde med verkligt utförande (användandet värmare efter gjutning). Däremot så genomfördes dessa analyser i blindo dvs deltagarna hade ej tillgång till uppmätta temperaturer i betongkonstruktionen. I senare skede av projektet har deltagarna haft tillgång till mätresultaten och därmed haft möjlighet att justera sina beräkningar för att bättre stämma överens med uppmätt beteende.

I Tabell 9 finns en förteckning av projektgrupperna och vilka analysmetoder och förutsättningar som de använde.

Projektgrupp Programvara		Modeller för beskrivning av ung	Kommentar
		betong	
21	HACON	Specifik modell för hydratation,	2D axisymmetrisk
		värmeutveckling och spänningstillväxt	modell
25	CasT3M	kombinerad modell för termo-hydro-	3D-beräkning på en
		chemo-mechanical med simulering av	tårtbit (4.5°) av
		uttorkningsförloppet, fleraxlig krypning,	inneslutningen
		anisotrop skademodell och probabilistiska	
		effekter	
33	Egen kod	Endast beräkning av temperatur, baserat	Modellen uppbyggd av
		på värmeutveckling från hydratation enligt	Voronoi celler som i sin
		[20] och tvåkomponents-modell för	tur baseras på slumpvis
		beräkning av värmekapacitet.	fördelade noder.
37	Ansys	Endast beräkning av temperatur, ingen	2D axisymmetrisk
		information finns gällande vilka	modell
		förutsättningar som denna beräkning	
		baseras på.	
40	CasT3M	Specifik chemo-thermal modell baserad på	3D-beräkning på en
		[2] inklusive kopplad viskoelastisk krypning	tårtbit (15°) av
		och skademodell	inneslutningen
44	Lusas	Inbyggd materialmodell baserad på	3D-beräkning av
		Schindler et al (2005) för värmeutveckling	inneslutningen (360
		av hydratation och hållfasthetstillväxt	ringmodell)
		enligt Model Code 90.	
50	Code Aster	Kombinerad modell för termo-hydro-	3D-beräkning på en
		mechanical med simulering av	tårtbit (15°) av
		uttorkningsförloppet, skademodell	inneslutningen

Tabell 9 Förteckning av deltagarnas analysverktyg och analysförutsättningar.



5.2 PRELIMINÄRA RESULTAT

På grund av de för deltagarna okända värmarna så underskattade samtliga grupper temperaturutvecklingen under de första 50 timmarna. Inte heller den platå som uppmätts i temperaturer (mellan 10 h och 35 h) uppträder i modellerna eftersom samtliga modeller baseras på en underskattning av omgivande temperaturer.

För att analysera de olika modellerna kan man därför istället bortse från eventuella skillnader mellan simulerade temperaturer och verkligt uppmätta temperaturer och istället beakta skillnaderna mellan de olika modellerna.

5.2.1 Temperatur

I Figur 23 illustreras skillnaden i resultat för mätpunkten G1. Resultaten visar att det skiljer ca 15 °C mellan maximal temperatur i betongen baserat på de två analyser som predikterar den lägsta maxtemperaturen (ca 33 °C) kontra den modell som predikterar den högsta maxtemperaturen (ca 47 °C). Om man bortser från dessa tre analyser så varierar predikterad temperatur mellan ca 36 och 45 °C bland övriga bidrag.

Tidpunkten för när den maximala temperaturen uppnås varierar också kraftigt mellan de olika bidragen, från ca 9 h efter gjutning till ca 23 h efter påbörjad gjutning.



Figur 23 Uppmätt och beräknad temperatur vid givarposition G1 – från preliminära fasen.

Motsvarande resultat för punkten F1 som ligger nära övergången mellan cylindervägg och bottenplatta visas i Figur 24. Skillnaden i resultat avviker dock inte lika mycket mellan dessa modeller som för ovanstående mätpunkt. Här varierar temperaturen mellan ca 28 °C och 36 °C. Dock varierar tidpunkten för när maximal temperatur uppnås än mer än tidigare, mellan ca 10 h och 29 h. Det är intressant att notera att det inte är samma deltagare som nödvändigtvis ger högst respektive lägst uppskattade temperaturer jämfört mot i föregående figur.





Figur 24 Uppmätt och beräknad temperatur vid givarposition F1 – från preliminära fasen.

Eftersom det inte finns någon förteckning av de modeller som endast deltog i den inledande delen är det svårt att bedöma vad dessa skillnader består i. Utav denna orsak presenteras resultaten från G1 igen men endast med de deltagare som även var med i slutgiltiga fasen, se Figur 25.



Figur 25 Uppmätt och beräknad (endast grupper som även deltog i slutgilitga fasen) temperatur vid givarposition G1 – från den preliminära fasen.

Baserat på dessa resultat är det lättare att urskilja skillnader respektive likheter mellan de olika bidragen.

T.ex. så påvisar grupp 21 och grupp 50 snarlika resultat där dock grupp 21 får en högre temperatur som även tar betydligt längre tid att klinga av jämfört mot alla andra analyser. I båda dessa analyser baseras den värmeutveckling som sker på Arrhenius ekvation som beskriver den kemiska reaktionshastigheten. Den ena



modellen (grupp 21) baseras på en axi-symmetrisk modell medan grupp 50 baseras på en solidmodell som beskriver en tårtbit av inneslutningen. Skillnaden mellan att betrakta inneslutningen som axi-symmetrisk eller en tårtbit borde rimligtvis inte ha någon nämnvärd inverkan på resultatet. Den marginella skillnad som finns mellan dessa resultat beror troligtvis på olikheter i indata mellan modellerna. En annan skillnad mellan dessa modeller är att grupp 50 även inkluderar fukttransport och via detta beaktar uttorkningen av betongen. Detta bedöms ha marginell inverkan på temperaturutvecklingen i betongen men har naturligtvis större inverkan på töjningarna i betongen. Töjningar i betongen redovisades dock inte i denna fas.

Analyserna från grupp 25, 37 och 40 påvisar snarlika resultat avseende temperaturer. Beskrivningen av de analysförutsättningar den beräkningsmodell som användes av grupp 37 saknas dock i sammanställningen och därför finns inte så mycket mer information att gå på förutom vad som beskrivs i Tabell 9. Det är dock mycket troligt att denna modell baseras på liknande analysförutsättningar som grupp 21 och 50 som nämndes ovan. Detta skulle i så fall visa att det främst är variationer i indata som orsakar spridning mellan modellerna och relativt liten skillnad i temperatur tros bero på bakomliggande modeller.

När det gäller grupp 25 och 40 så baseras båda modellerna på samma programvara Cast3M. Båda modellerna baseras dessutom på relativt avancerade materialmodeller, ([2][21]), som baseras på kopplade beteenden mellan fukttransport och kemiska processer, temperatur samt mekaniskt beteende (thermo-hydro-chemo-mechanical) för att beskriva ung betong genom hydratation, uttorkning, krypning, krympning samt uppsprickning. Det är rimligtvis inte komplexiteten i dessa modeller eller det faktum att t.ex. fukttransport (uttorkning) beskrivs som gör att dessa modeller var framgångsrika. Som jämförelse kan nämnas att det även finns flera andra bidrag som baserades på liknande materialmodeller men vars prediktioner var mindre väl överensstämmande. Orsaken är rimligen dels tack vare stor erfarenhet av liknande simuleringar och materialmodeller sedan tidigare och genom detta väl kalibrerade indataparametrar för denna typ av simuleringar. Om syftet är att simulerade temperaturer ska ge väl överensstämmelse ned uppmätta resultat bör därmed betydligt enklare modeller kunna användas. Däremot så är simulering av t.ex. fukttransport och kopplade beteenden mellan de olika processerna viktigare för simulering av deformationer, töjningar etc., vilket framgår i efterföljande avsnitt.

5.3 RESULTAT EFTER RELEASE AV MÄTDATA

Inför den slutgiltiga fasen hade samtliga deltagare fått ta del av både nya randvillkor på grund av värmarna och uppmätta temperaturer i betongkonstruktionen. Deltagarna gavs möjlighet att kalibrera sina modeller mot tillgänglig mätdata under den fas då värmarna var igång i syfte att få indata som resulterar i bättre prediktion. Detta påverkar tyvärr möjligheten att utvärdera de olika modellerna eftersom det blir svårbedömt att avgöra om resultatens noggrannhet beror på underliggande materialmodeller eller om det beror på kalibreringen.



5.3.1 Temperatur

Totalt skickade sju projektgrupper in resultat som avsåg temperaturutveckling i betongkonstruktionen. I den andra fasen så är spridning mellan de olika deltagarnas resultat är betydligt mindre.

Vid givare F1 visade försöket på en maximal temperatur på ca 40 °C, deltagarnas resultat varierade mellan ca 35 °C och 47 °C, men där alla utom ett bidrag låg inom en felmarginal på ±3 °C, se Figur 26. Samtliga deltagare uppskattar även tidpunkten då maximal temperatur uppträder med mycket god marginal.



Figur 26 Uppmätt och beräknad temperatur vid givarposition F1 – från den slutgiltiga fasen.

Vid positionen för givare G1 visade försöket på en maxtemperatur på ca 49 °C och den lägsta maxtemperaturen uppskattades till ca 42 °C och den högsta till 51 °C bland deltagarna, se Figur 27. Alla deltagare utom en ligger inom en felmarginal på ±3 °C. Samtliga deltagare uppskattar även tidpunkten då maximala temperaturen uppträder med mycket god marginal.



Figur 27 Uppmätt och beräknad temperatur vid givarposition G1 – från den slutgiltiga fasen.



Intressant att notera är att för givare F1 så överskattar fler deltagare temperaturen än underskattar medan för givare G1 är fallet det motsatta. Det är därmed inte samma deltagare som står för största avvikelsen vid givare G1 som vid givare F1.

Vid den övre nivån, dvs. vid tunnare tvärsnitt, får som tidigare påpekat de flesta bidragen mycket god överensstämmelse med mätresultat. För samtliga bidrag fås bäst överensstämmelse med de givare som är placerade närmast ränderna, dvs. G1 och G2. Samtliga bidrag får något sämre överensstämmelse mot mätpunkten i mitten. Detta indikerar att randvillkorens temperaturer har uppskattats med högre noggrannhet än temperaturökningen orsakad av hydratationen, vilket visserligen inte är så förvånande.

Vid den lägre nivån (givare F1, F102 och F2), dvs. vid tjockare tvärsnitt, fås generellt något sämre överensstämmelse än för övre nivån. Störst avvikelse mellan modellerna fås även här i centrumsnittet där samtliga bidrag utom ett underskattar temperaturen.

Samtliga bidrag visar att temperaturen vid den övre nivån är högre än vid den lägre nivån vilket stämmer väl överens med observationen från mätningarna.

Alla bidrag har relativt stora skillnader mellan analysförutsättningar och beräkningsmodeller men samtliga ger dock bra överensstämmelse mot försöken. Detta beror sannolikt på att deltagarna har haft möjlighet att justera t.ex. sina indataparametrar i syfte att få så god överensstämmelse som möjligt. Dessutom är det relativt sätt lättare att uppskatta temperaturen än t.ex. töjningen i betongen.

5.3.2 Töjning

I den slutgiltiga fasen redovisas - till skillnad från den preliminära fasen - även töjningar i betongen. Det finns resultat från fyra bidrag, och från mätningar. De töjningar som avses är i tangentiell riktning, dvs i ringsled.

Några av deltagarna presenterar jämförelser mellan uppmätta töjningar och sina beräknade och därmed har inte dessa prediktioner skett i blindo, dvs deltagarna hade tillgång till töjningsresultaten då de presenterade sina beräknade resultat.

Det finns en signifikant skillnad i beräknade töjningar mellan de olika bidragen, men även en stor avvikelse mot mätdata för alla utom ett bidrag. Prediktionerna avviker i många fall flerfaldigt vilket illustreras i Figur 28. Som exempel kan nämnas skillnaden i töjning 4 dygn efter gjutning, där beräknad töjning motsvarar 49, 85, 170 respektive 333 μ m/m enligt deltagare 50, 25, 40 och 44. Motsvarande uppmätta värde var ca 47 μ m/m. Projektgrupp 50 lyckades därmed uppskatta mätningen med hög noggrannhet för denna mätpunkt. Deras prediktioner stämde även väl överens även för övriga mätpunkter. Övriga bidrag ger dock en kraftig överskattning av töjningarna i betongen.

Som tidigare påpekats så är prediktionen av temperatur snarlik bland deltagarna och särskilt mellan de deltagare som även redovisade töjningar. Det är därför extra intressant att se att skillnaden i töjningar är så pass stor trots detta.

De tre prediktioner som ger bäst överensstämmelse baseras samtliga på relativt avancerade materialmodeller där olika processer är kopplade, se Tabell 9. Det står



inte uttryckligen att det bidrag som fick störst avvikelse (team 44) försummar krypning, men det är sannolikt så då krypning saknas i den programvara som använts. Projektgrupp 25 och 40 beaktar båda krypning och grupp 50 skriver uttryckligen att de inte beaktar krypning vid tidig ålder (dvs. <1 dygn). Det är dock otydligt om/hur krypning (grundkrypning och uttorkningskrypning) beaktas av grupp 50. I en senare artikel som sammanfattar tema 2 och 3 beaktas dock detta av grupp 50, varför det är rimligt att antas att krypningen även beaktas i tema 1.

Krypning är mycket viktig parameter för att uppskatta töjningstillståndet i ung betong och det är därmed rimligt att den stora skillnad som uppkommer mellan team 44 och övriga bidrag huvudsakligen beror på att krypning försummats.

Dessutom, grupp 25 och 50 beräknar till skillnad från övriga bidrag även uttorkningen i betongen, dvs. transport av fukt vilken i sin tur kopplas till krympning och krypning. Skillnaden mellan grupp 44 och övriga skulle eventuellt kunna förklaras på grund av avsaknad av simulering av fukttransport. Detta är dock knappast orsaken eftersom grupp 40 inte heller beaktar fukttransport och deras modell ger prediktioner som ungefär är likvärdiga med t.ex. grupp 25, se Figur 28.



Figur 28 Beräknade och uppmätta tangentiella töjningar 4 dygn efter gjutning.

I Figur 29 illustreras beräknade temperaturkurvor för samtliga bidrag som redovisade töjningsresultat. Som framgår av Figur 28 och Figur 29 så visar resultaten att även om en bra överensstämmelse mot uppmätta temperaturer erhålls så kan detta resultera i stor avvikelse i inducerade töjningar.





Figur 29 Beräknad och uppmätt temperatur vid givare G1.

En ytterligare viktig aspekt är hur pass snabbt hållfasthetstillväxten antas ske. Skillnader i detta antagande skulle kunna leda till att konstruktionen spricker eller inte, men även när i tiden en spricka förväntas att ske. För att illustrera skillnaden mellan detta visas beräkningen av inducerade spänningar från grupp 44 i Figur 30 och motsvarande fall från grupp 40 i Figur 31. Tyvärr visar dessa figurer resultaten i olika tidsskalor (dygn respektive timmar) och för olika långa tidsperioder. Här visar modellerna att dels den största tryckspänning som uppträder under hydratationen avviker och är ca 4 MPa (grupp 44) respektive ca 2 MPa (grupp 40).



Figur 30 Beräknad spänning i betongen enligt projektgrupp 44.





Figur 31 Beräknad spänning i betongen enligt grupp 40.

För att förtydliga skillnaden i deras prediktioner, presenteras en graf som illustrerar jämför resultaten från dessa två grupper i Figur 32.



Figur 32 Jämförelse mellan beräknad spänning från grupp 40 respektive 44.

5.4 SLUTSATSER

Några av de viktigaste slutsatserna från utvärderingen av VeRCoRs projektet, men även från många andra benchmark-workshops, är att det är mycket svårt att genomföra utvärderingar och jämförelser mellan olika modelleringstekniker, materialmodeller etc. om det finns stora friheter i val av indata. För att detta ska vara möjligt så bör förutsättningarna vara entydigt bestämda på förhand. Detta



innebär att försöken bör genomföras under än mer kontrollerade former. Ett exempel är användandet av värmare tillsammans med att den temperaturgivare som fanns för registrering av omgivande lufttemperatur inte fungerade tillfredställande, vilket resulterade i att temperaturrandvillkoret blev högst osäkert.

Syftet med ett mock-up test är inte att genomföra en så pass bra gjutning som möjligt. Självklart bör förfarandet efterlikna verkliga förhållanden men detta får inte vara på bekostnad av att det inför stora osäkerheter. Som exempel, om gjutningen istället hade skett i konstant och kontrollerad miljö (både temperatur och relativ luftfuktighet) så hade utvärderingen varit avsevärt enklare.

Dessutom så bör all nödvändig indata bör definieras. Här är dock ett problem att olika materialmodeller kräver olika typer av indata och det är inte praktiskt möjligt att testa samtliga indata som deltagare kan behöva. En viktig parameter för att kunna verifiera fukthalten i betongen vore mätning av dess relativa fuktighet.

Slutligen, tillgång till mätdata bör inte ges till deltagarna då detta leder till att deltagarna kan kalibrera indataparametrar för att ge exakt det uppmätta beteendet. De redovisade beräknade temperaturerna uppvisar en tydlig skillnad i spridning mellan deltagarna i den första (preliminära) och den senare omgången. Om alla väsentliga materialparametrar är definierade på förhand och deltagarna måste använda dessa så minskar möjligheten att kalibrera modellerna.

Resultaten visar även att även om temperaturen i betongen predikteras med stor noggrannhet så kan det skilja kraftigt i uppskattningen av vilka påkänningar som induceras i betongen. Detta beror bland annat på osäkerheter i bestämning av krypning och krympning i betongen och särskilt i det tidiga skedet för betong. Naturligtvis avser detta både om och hur krympning och krypning beaktas. Som resultatet i Figur 28 visar så fås en väldigt konservativ prediktion av töjningen om t.ex. krypningen försummas.



6 Slutsatser och diskussion

Sammanfattningsvis så har den del av Vercors benchmark som redovisas i denna rapport visat exempel på både fördelar och brister med att verifiera designparametrar och prognostisering av reaktorinneslutningars funktion genom konstruktionsberäkningar. Resultaten visar att FE-modellering kan beskriva det tidiga skedet efter färdigställd konstruktion både vad gäller temperatur- och deformationsförändringar med rimlig tillförlitlighet, med hänsyn tagen till effekterna av temperatur, betongen krympning och krypning, och spännkablars relaxation.

Det finns dock potential till förbättringar. Resultaten visar också att även om temperaturen i betongen predikteras noggrant så kan det skilja kraftigt i uppskattningen av inducerade påkänningar. Detta beror bland annat på osäkerheter i bestämning av krypning och krympning i betongen och särskilt i det tidiga skedet för betong.

Energiforsk-projektet har delvis tagit fram de resultat som har ingått i det övergripande benchmarkprojektet. En viktig bidragande orsak till begränsningen har varit att projektet kom att starta flera månader senare än Vercors. Detta har medfört dels en tidplan som inte har varit möjlig att hämta in, och dels att arbetet har varit känsligt för störningar. Vidare så har personalsituationen blivit sådan att LTH har behövt gå in och ta helhetsansvar för modelleringsarbetet på ett annat sätt än vad som ursprungligen planerats för.

En central del i allt modelleringsarbete är en bra digital beskrivning av den studerade konstruktionens geometrier. För Vercors så har detta varit lika för alla deltagande projektgrupper, med tillgång till CAD-filer som beskriver reaktorinneslutningens utformning. Denna CAD-dokumentation har uppenbart varit framtagen för själva konstruktionsprojektet, dvs. inte för användning i FEprogramvaror. De felaktigheter som funnits i CAD, och som har saknat betydelse utanför Vercors, har här medfört stora svårigheter med att importera geometrierna till COMSOL. Detta problem har varit lika för alla deltagande organisationer, med felhanteringen har inte gått att sköta koordinerat. Felen har handlat om att linjer som beskriver geometrier inte sammanfaller vilket gör att programvarukoden inte kan hitta dess noder, eller att geometrier inte systematiskt har varit definierade som antingen solider eller skalelement vilket påverkar programmets sätt att elementindela konstruktionen. Det är generellt så att FE-modellering ställer högre krav på en noggrannare definition av geometrin än vad som är normalt är fallet då geometrier ritas upp i CAD. Benchmarken har sämre förutsättningar att uppnå sitt syfte om onödiga osäkerheter introduceras, vilket tyvärr har varit fallet vad gäller beskrivningen av reaktorinneslutningens geometri.

Avsaknad av kompletta randvillkor, och begränsad tillgång på data från anläggningens instrumentering är också faktorer som har introducerat osäkerheter som har försvårat modelleringsarbetet, och utvärderingen av dess resultat.

Vad gäller randvillkoren så är det dels avsaknad av information om att värmare har använts under en av gjutetapperna (eventuellt flera av etapperna), och att



omgivande lufts relativa fuktighet inte har ingått i mätprogrammet (och inte heller relativ fuktighet i betongen). Att värmare använts stod inte klart för projektgruppen förrän vid Vercors avslutande workshop. Avsaknaden av mätdata har medfört att resultaten - trots goda ambitioner från Vercors - inte har kunnat valideras utom för enstaka mätpunkter. Utvärdering har därför i stor utsträckning endast kunnat göras gentemot översiktliga dokumentation i Vercors slutrapport.

I Sverige finns sedan lång tid tillbaka tillgång till viktiga forskningsresultat omsatta i ekvationer som beskriver betongs mekanismer. Ett flertal av dessa har använts i projektets multifysik-modellering. För några mekanismer så har ekvationer hämtats från Eurokoder. Även om det inte går att fullt ut avläsa från Vercors projektdokumentation så använde övriga deltagande organisationers i regel andra referenser för sitt modelleringsarbete. I vår jämförelse av resultat så har det inte gått att visa att enskilda ekvationsbeskrivningar står ut som bäst, utan att det snarare är hanteringen av randvillkor och indata som avgör hur pass bra resultatet blir. Olika materialmodeller kräver olika typer av indata. Det är inte möjligt att testa samtliga indata som kan behövas.



7 Referenser

- Beck, Y-L, Martinot, F., Desforges, S., Buchoud, E., och Henault, J.M. (2016). Distributed measurements with optical sensors in the EDF group: experience feedback and perspectives. In International Conference on Smart Infrastructure and Construction (ICSIC), Cambridge: 27 - 29 June 2016, 6 s.
- [2] Briffaut M., Benboudjema F., Torrenti J.M., Nahas G. (20119 Numerical analysis of the thermal active restrained shrinkage ring test to study the early age behaviour of massive concrete. Engineering Structures, vol. 33 (4), pp. 1390-1401.
- [3] Byfors, J. (1980), Plain concrete at early ages, Doktorsavhandling, Kungliga Tekniska Högskolan, ISBN 0346-6906, 345 s.
- [4] COMSOL Multiphysics (2015). Stockholm. Version 5.2.0.166.
- [5] Corbin, M. och Garcia, M. (2016). Overview, synthesis and lessons learnt from the International Benchmark VeRCoRs 2015, Report EDF SEPTEN, 116 p.
- [6] EDF (2015) International Benchmark VeRCoRs 2015 Benchmark workshop Modeling the behaviour of the VeRCoRs mock-up – Program and Abstracts.
- [7] Eriksson, D., Malm, R. och Hansson, H. (2015). Nugenia Accept Analysis of stress concentrations and crack risk. Rapport KTH med begränsad access. 2015-05-19, 95 s.
- [8] Eurocode 2 (2007). Design of concrete structures Part 2: Concrete Bridges, EN 1992-2.
- [9] Gasch, T. (2016). Concrete as a multi-physical material with applications to hydro power facilities, Licentiatavhandling, Kungliga Tekniska Högskolan, ISSN 1103-4270 ; 139 , 131 s.
- [10] Hargman, A. (1991). Temperaturspännin I betong vid tidig ålder, Examensarbete TVBK-5050. Lunds Tekniska Högskola, 51 s.
- [11] Hassanzadeh, M. (2016). Tests and analysis to determine residual stress in posttensioned bonded tendons – a research program within the R&D Arena Barsebäck. Ej pubicerad Energiforsrapport. 52 s.
- [12] Lewis, W. (1962). The evaporation of a liquid into a gas. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 5(1-2), s. 109-112.
- [13] Lundqvist (2016). ACCEPPT Ageing of civil and concrete structures in nuclear power plants. Energiforskrapport 2016-265, ISBN 978-91-7673-265-6, 30 s.
- [14] Malm, R. (2016). Guideline for FE analyses of concrete dams, Energiforskrapport 2016:270, ISBN 978-91-7673-270-0, 160 s.
- [15] Mazars, J., Labbe, P. och Masson, B. (2016). Behaviour and assessment of massive structures: An overview of the French research programs CEO.fr and



VeRCoRs, i 9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FraMCoS-9), 12 s.

- [16] Nilsson L-O. och Johansson P. (2009). Förändringsprocesser i reaktorinneslutningar – betongväggarnas klimatförhållanden och uttorkning, Elforskrapport 09:100.
- [17] Norling Mjörnell, K. (1997). Moisture conditions in high performance concrete, Mathematical modelling and measurements. Doktorsavhandling. Chalmers Tekniska Högskola. ISBN: 91-7197-580-2, 126 s.
- [18] Oukhemanou, E., Desforges, S., Buchoud, E., Michel-Ponnelle, S. och Courtois, A. (2016). VeRCoRs Mock-up: Comprehensive monitoring system for reduced scale containment model. I 3rd Conference on technological innovations in nuclear civil engineering (TINCE 2016), Paris 5-9 september, 12 s.
- [19] Oxfall, M., Johansson, P., och Hassanzadeh, M. (2014). Moisture profiles in concrete walls of a nuclear reactor containment after 30 years of operation", i XXII Nordic Concrete Research Symposium, 13 augusti 2014, Norsk Betongförening.
- [20] Riding K.A., Poole J.L., Folliard K.J., Juenger M.C.G & Schindler A.K. (2012) Modeling hydration of cementitious systems. ACI Materials Journal, vol 109 (2), pp 225 – 234.
- [21] Sellier A., Multon S., Buffo-Lecarrièr, Vidal T., Bourbon X., & Camps G. (2016) Concrete creep modelling for structural applications; non-linearity, multiaxiality, hydratation.
- [22] SS-ENV 1992-1-1 (2005). Betongkonstruktioner Dimensionering, Eurocode 2 -Del 1-1: Allmänna regler och regler för byggnader, 258 s.
- [23] Svensk Byggtjänst (1997). Betonghandbok Material, utgåva 2. ISBN 9789173327992, 1127 s.
- [24] Vercors (2015). Preliminary analysis reportV0.pdf, distribuerad av EDF, xxx
- [25] Vogt, C., Lagerblad, B., Wallin, K., Baldy, F. och Jonassson, J-E.(2009). Low pH self compacting concrete for deposition tunnel plugs, SKB-rapport R-09-07. ISSN 1402-3091, 78 s.
- [26] Åhs, M., Poyet, S., Nilsson, L-O. och L'Hostis, V. (2014). A model to predict moisture conditions in concrete reactor containments, i Fontevraud 8 – SFEN International Symposium, 15-18 september 2014. Avignon.



VERIFIERING AV STRUKTUR- OCH FUKTMEKANISKA BERÄKNINGS-VERKTYG

Beräkningar är ett viktigt verktyg för att förutsäga olika strukturer och komponenters hållbarhet, åldringsmekanismer och egenskaper i samband med att kärnkraftverk åldras.

Électricité de France har utanför Paris byggt en skalmodell av en reaktorinneslutning motsvarande en fransk fullskalereaktor. Anläggningen gör det möjligt att studera hur åldringsprocesser påverkar förspända reaktorinneslutningar.

Syftet är att efter de sju år som det övergripande forskningsprojektet vid på anläggningen pågår, genom accelererad åldring uppnå påverkan motsvarande den åldring som en fullskalereaktor har utsatts för efter 60 års drift.

Här redovisas resultat från den första delen av tre benchmarkanalyser av olika beräkningsverktygs möjlighet att kunna förutse konstruktionens beteende i tidigt skede och under själva åldrandet. Rapporten beskriver också konstruktionens täthet till följd av åldrandet och hur den beter sig under svåra haveriförhållanden.

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

