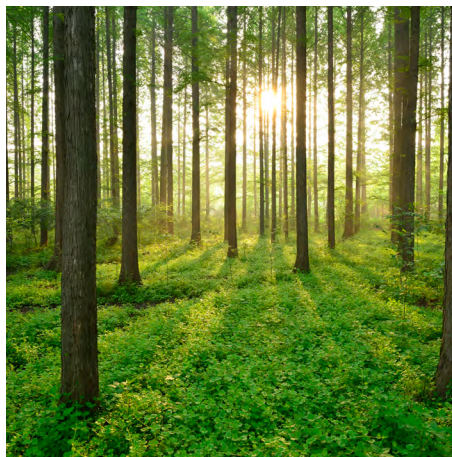


SYNTESRAPPORT 2007-2024: BETONGTEKNISKT PROGRAM KÄRNKRAFT

RAPPORT 2026:1206



BETONGTEKNISKT
PROGRAM KÄRNKRAFT



Syntesrapport 2007-2024: Betongtekniskt program kärnkraft

Syntes av programperioderna 2007 - 2024

PETER LUNDQVIST, VATTENFALL

ISBN 978-91-89917-49-1 | © ENERGIFORSK juli 2026

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

Förord

Energiforsk driver sedan 2007 ett forskningsprogram kring betongkonstruktioner inom kärnkraftverken. Föreliggande rapport utgör en kortfattad sammanfattning av den forskning som utförts inom de första programetapperna under åren 2007 – 2024.

Energiforsks Betongtekniska program inom kärnkraft har som syfte att öka kunskapen om de aspekter som påverkar säkerhet, underhåll och utveckling av betongstrukturer i de nordiska kärnkraftverken. Det övergripande målet med det betongtekniska programmet är att säkerställa avsedd livslängd och hög tillgänglighet för svenska kärnkraftverk med bibehållen säkerhet.

Eftersom det 80-tal projekt som bedrivits inom betongprogrammet spänner över ett stort område har projekten delats in i sju kategorier vilka behandlas i separata kapitel. I referenslistan i slutet av rapporten ges en fullständig lista över samtliga rapporten som publicerats inom betongprogrammet.

Syntesrapporten har tagits fram av Peter Lundqvist, Vattenfall Research & Development, som är teknisk expert i betongprogrammet. Rapportförfattaren ansvarar för innehållet.

Sammanfattning

Energiforsk driver sedan 2007 ett forskningsprogram kring betongkonstruktioner inom kärnkraftverken. Programmet initierades då det finns ett behov av att bygga både kompetens och att utveckla teknikbasen för teknisk förvaltning av byggnader och konstruktioner inom kärnkraftindustrin. Det övergripande målet med det betongtekniska programmet är att säkerställa avsedd livslängd och hög tillgänglighet för svenska kärnkraftverk med bibehållen säkerhet. Programmet finansieras av Vattenfall, Uniper (tidigare E.ON), Fortum, Teollisuuden Voima Oy (TVO), Skellefteå Kraft, Karlstads Energi, Strålsäkerhetsmyndigheten och Svensk kärnbränslehantering (SKB).

Föreliggande rapport utgör en kortfattad sammanfattning av den forskning som utförts inom de första programtapperna under åren 2007 – 2024. Forskningsprojekten som utförts inom programmet har i denna rapport delats in i följande kategorier.

- Spännkablar i reaktorinneslutningar, där utförda projekt har fokuserat på olika sätt att bedöma och prognostisera kvarvarande spännkrafter i spännkablarna.
- Fukt- och temperaturlstånd i reaktorinneslutningar, där fokus har varit att bestämma nuvarande fuktförhållanden i betongen i reaktorinneslutningar samt prediktera framtida fuktstånd.
- Oförstörande provningsmetoder, vilket har omfattat en litteraturgenomgång över metoder som är lämpliga att applicera på kärntekniska betonganläggningar samt vidareutveckling av vissa av de identifierade metoderna samt flertalet nya metoder.
- Korrosion av armering i betongkonstruktioner, där främsta fokus har varit att undersöka olika orsaker till korrosion på armeringen främst i kylvattenvägarna på svenska kärnkraftverk samt den ingjutna tätplåten i reaktorinneslutningar.
- Förvaltning av betongkonstruktioner inom kärnkraften vilket även innefattar att ta fram acceptanskriterier för kärnkraftverkens betongkonstruktioner. Detta område innefattar även inspektionsmetoder, instrumentering samt övervakning för kärntekniska betongkonstruktioner.
- Studier av materialegenskaper. De projekt som utförts inom denna kategori har bland annat undersökt betongs motståndskraft mot olika kemikalier och höga temperaturer, kartlagt och undersökt användningen av polymera material i betongkonstruktioner samt undersökt bärförmågan hos infästningar.
- Avancerade beräkningsmetoder är ett område som främst omfattat olika projekt för analys av betongkonstruktioners mekaniska beteende med hjälp av numeriska beräkningsmetoder med finita element-metoden.

I betongprogrammets regi har dessutom ett antal seminarier anordnats vilka har behandlat ämnen inom betongområdet där forskning har utförts. Teman för dessa seminarier har varit: spännkablar i reaktorinneslutningar, dimensionering av reaktorinneslutningar, infästningar i betongkonstruktioner. Betongprogrammet anordnar tillsammans med Energiforsk betongtekniska program inom vattenkraften

dessutom det årliga seminariet "Kraftindustrins betongdag" där olika projekt presenteras under ett gemensamt tema.

Summary

Since 2007 Energiforsk has been organizing a research program regarding all aspects of concrete structures within the nuclear industry. It is jointly financed by Vattenfall, Uniper (formerly known as E.ON), Fortum, Skellefteå Kraft, Karlstads Energi, Swedish Radiation Safety Authority and Teollisuuden Voima Oy (TVO) in Finland. The program was initialized due to an identified need for building competence and developing technical solutions within this area. The primary objective of the program is to contribute to safe and economical long-term operation of the Swedish and Finnish nuclear power plants.

In this report a short summary of the research conducted within the program during the periods between 2007 and 2024 are presented. For overviewing purposes, the research projects have in this report been divided into the following categories:

- Tendons in nuclear reactor containments; the research within this category has mainly been focused on different methods for predicting prestress losses in the tendons.
- Moisture and temperature conditions in nuclear reactor containments; the focus has been to determine and predict the moisture conditions in the concrete and ambient climate in Swedish nuclear reactor containments.
- Non-destructive testing methods, in which a literature review regarding methods suitable for the conditions in nuclear reactor containments have been conducted. Some of the identified methods have been further studied and developed.
- Corrosion of reinforcement and steel components in concrete structures. The main focus in this area has been to investigate mechanisms causing corrosion of the reinforcement in the cooling water ways. In addition, corrosion of the cast-in steel liner has also been investigated.
- Ageing management of concrete structures in the nuclear power industry. This has also included the development of acceptance criteria for concrete structures. Inspection methods for nuclear concrete structures instrumentation and monitoring of concrete structures are also included within this field.
- Studies of material properties. The projects conducted within this category have e.g. investigated the resistance of concrete to various chemicals and elevated temperatures, investigated the use of polymers in concrete and investigated the capacity of anchorages in concrete structures.
- Advanced analysis methods, which has focused on the analysis of the mechanical behavior of concrete structures in the nuclear power industry using the finite element method.

The concrete research program also organizes one to two seminars each year covering different topics within the concrete area. Examples of topics for earlier seminars are tendons in reactor containments, design of concrete containments and anchor bolts for nuclear power plants applications. In association with the Energiforsk concrete research program within hydro power the annual seminar "Kraftindustrins betongdag" is organized covering different mutual topics.

Innehåll

1	Inledning	9
1.1	Betongtekniskt program kärnkraft	9
1.2	Syfte	9
1.3	Rapportens upplägg	10
2	Betongkonstruktioner i kärnkraftverk	11
2.1	Reaktorinneslutningen	11
2.2	Kylvattenvägar	12
3	Spännkablar i reaktorinneslutningar	13
3.1	Inledning	13
3.2	Projekt utförda inom betongprogrammet	13
3.3	Sammanfattning av genomförda projekt	14
4	Fukt- och temperaturtillstånd i reaktorinneslutningar	18
4.1	Inledning	18
4.2	Projekt utförda inom betongprogrammet	18
4.3	Sammanfattning av genomförda projekt	18
5	Oförstörande provningsmetoder	21
5.1	Inledning	21
5.2	Projekt utförda inom betongprogrammet	21
5.3	Sammanfattning av genomförda projekt	22
6	Korrosion av ingjutna ståldetaljer i betongkonstruktioner	27
6.1	Inledning	27
6.2	Projekt utförda inom programmet	27
6.3	Sammanfattning av genomförda Projekt	28
7	Förvaltning av betongkonstruktioner	35
7.1	Inledning	35
7.2	Projekt utförda inom programmet	35
7.3	Sammanfattning av genomförda projekt	35
8	Studier av materialegenskaper	39
8.1	Inledning	39
8.2	Projekt utförda inom programmet	39
8.3	Sammanfattning av genomförda projekt	39
9	Avancerade beräkningsmetoder	43
9.1	Introduktion	43
9.2	Projekt utförda inom programmet	43
9.3	Sammanfattning av genomförda Projekt	43
10	Seminarier anordnade inom programmet	48
10.1	Tekniska seminarier som anordnats av betongprogrammet	48
10.1.1	Workshop: spännkablar i kärnkraftstillämpningar	48

10.1.2	Design of concrete containments - focus on integrity and tightness	48
10.1.3	Anchor Bolts for Nuclear Power Plant Applications – Design and Assessment	48
10.1.4	Instrumentation and modelling of concrete structures	48
10.1.5	Acceptanskriterier	49
10.1.6	Jordbävningsseminarium	49
10.1.7	Jordbävningsanalyser, direkt spektra-till-spektra metoder	49
10.1.8	Oförstörande provning i kärnkraftens betongkonstruktioner	49
10.2	Kraftindustrins betongdag	49
11	Referenser	50

1 Inledning

1.1 BETONGTEKNISKT PROGRAM KÄRNKRAFT

Energiforsk driver sedan 2007 ett forskningsprogram kring betongkonstruktioner inom kärnkraftverken. Det finns ett behov av att bygga både kompetens och att utveckla teknikbasen för teknisk förvaltning av byggnader och konstruktioner inom kärnkraftindustrin. Det övergripande målet med det betongtekniska programmet är att säkerställa avsedd livslängd och hög tillgänglighet för svenska kärnkraftverk med bibehållen säkerhet. Programmet finansieras av Vattenfall, Uniper (tidigare E.ON), Fortum, Teollisuuden Voima Oy (TVO), Skellefteå Kraft, Karlstads Energi, Strålsäkerhetsmyndigheten och Svensk kärnbränslehantering (SKB).

Flertalet projekt har utförts i samverkan med andra forskningsprogram/organisationer. Dessa är:

- Energiforsk betongtekniska program vattenkraft, vilket finansierar forskning inom det betongtekniska området med fokus på tillämpningar inom vattenkraften,
- NUGENIA (Nuclear Generation II and III Association), vilket är en internationell organisation vars syfte är att bidra med en vetenskaplig och teknisk bas som stöd till internationella forsknings- och utvecklingsprojekt inom kärnkraftsindustrin,
- BEFO (Bergteknisk forskning), vilket är en projektledningsorganisation som driver och finansierar forskningsuppdrag inom bergteknik och bergmekanik,
- SBUF (Svenska byggbranschens utvecklingsfond), vilket är en ekonomisk förening med fem medlemsföretag som finansierar forsknings- och utvecklingsprojekt inom byggbranschen,
- FORMAS (Forskningsrådet för miljö, areella näringar och samhällsbyggande), vilket är ett statligt forskningsråd som främst finansierar forskning inom miljö, areella näringar och samhällsbyggande,
- REBET (Nätverk för betongreparationer), vilket är en ideell förening med syfte att främja praktisk betongreparationsteknik,
- CBI Betonginstitutet (Cement och betonginstitutet), vilket är ett industriforskningsinstitut som bland annat bedriver forskning, utveckling och olika konsulttjänster inom betong- och bergmaterialområdet,
- Trafikverket, vilket är den statliga myndigheten med ansvar för trafikslagen: vägtrafik, tågtrafik, trafik till sjöss samt flyg,
- RISE, vilket är ett statligt institut för forskning och utveckling.

1.2 SYFTE

Syftet med föreliggande rapport är att utgöra en kortfattad sammanfattning av publicerade rapporter inom Energiforsks betongtekniska program för programperioderna mellan åren 2007 och 2024.

1.3 RAPPORTENS UPPLÄGG

Då de projekt som bedrivits inom betongprogrammet spänner över ett stort område har projekten delats in i nedanstående kategorier vilka behandlas i separata kapitel i föreliggande rapport. I referenslistan i slutet av rapporten ges en fullständig lista över samtliga rapporten som publicerats inom betongprogrammet.

- Spännkablar i reaktorinneslutningar.
- Fukt- och temperaturlstånd i reaktorinneslutningar.
- Oförstörande provningsmetoder.
- Korrosion av armering i betongkonstruktioner.
- Förvaltning av betongkonstruktioner.
- Studier av materialegenskaper.
- Avancerade beräkningsmetoder.
- Seminarier anordnade inom programmet.

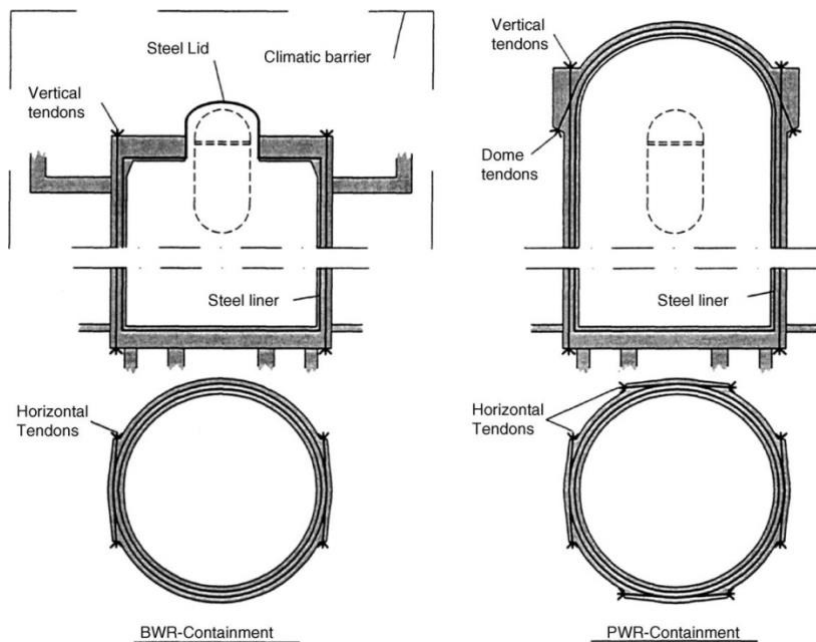
2 Betongkonstruktioner i kärnkraftverk

Majoriteten av byggnadskonstruktionerna i ett kärnkraftverk är av armerad betong. De konstruktioner som fokuserats på i Energiforsks betongtekniska program är de konstruktioner som är viktiga av säkerhets eller driftsmässiga skäl. Dessa är reaktorinneslutningen och kylvattenvägarna. I nedanstående avsnitt ges en kort beskrivning av båda dessa konstruktioner.

2.1 REAKTORINNESLUTNINGEN

Reaktorinneslutningen är en cylindrisk spännarmerad betongkonstruktion vilken innesluter reaktorn. Inneslutningens funktion är främst att förhindra spridning av radioaktiva ämnen i händelse av en reaktorolycka, men även att skydda reaktorn mot yttre påverkan. I Sverige och Finland finns två olika utformningar av reaktorinneslutningen beroende på reaktortyp, det vill säga om reaktorn är en kokvattenreaktor (BWR) eller en tryckvattenreaktor (PWR). I Figur 1 visas den principiella utformningen av inneslutningarna till de båda reaktortyperna.

Den stora skillnaden mellan de båda inneslutningstyperna är att PWR-inneslutningen är större än inneslutningen på en BWR. BWR-inneslutningen är dessutom i sin tur innesluten av en sekundär byggnad, reaktorbygganden, och därmed avskild från det yttre klimatet. På grund av sin storlek är PWR-inneslutningen inte innesluten av en reaktorbyggnad utan är i direkt kontakt med uteklimatet. Ytterligare en skillnad är utformningen av takkonstruktionen till inneslutningarna. Taket på en PWR-inneslutning utgörs av en spännarmerad betongkupol. Takkonstruktionen för en BWR-inneslutning varierar lite mellan olika inneslutningar, gemensamt för samtliga är dock att cylinderväggen ansluter till en tjock betongplatta vilken antingen utgör taket alternativt att betongplattan övergår i en cylindrisk konstruktion.



Figur 1. Utformningen av de två reaktorinneslutningar som finns i Sverige och Finland. Till vänster en BWR-reaktor och till höger en PWR-reaktor (från Anderson, Structural integrity of prestressed nuclear reactor containments, Lunds Tekniska Högskola, 2007).

Cylinderväggarna är försedda med spännkablar i både horisontell och vertikal led. Syftet med spännablarna är att förhindra sprickbildning i betongen och därmed utsläpp av radioaktiva substanser i samband med en olycka i reaktorn. På insidan är cylinderväggen försedd med en tätplåt som ytterligare ska säkra tätheten mot läckage. Tätplåten är i sin tur skyddad av en inre slakarmerad betongvägg. Tjockleken på väggarna varierar mellan 1 – 1,5 m, där den inre spännarmerade delen är mellan 0,76 m och 1,2 m tjock. Inneslutningarnas höjd är runt 60 m för en PWR-inneslutning och cirka 27 m för en BWR. Den inre diametern varierar mellan cirka 18 – 25 m för en BWR-inneslutning och är cirka 35 m för en PWR-inneslutning.

2.2 KYLVATTENVÄGAR

Kylvattenvägarna är en del av de säkerhetsklassade konstruktionerna på ett kärnkraftverk. Kylvattenvägarna omfattar både intaget där kylvatten tas in till kondensorn för att kyla reaktorn och utloppet där kylvattnet lämnar anläggningen. In- och utloppen på kylvattenvägarna består huvudsakligen av bergtunnlar täckta med slakarmerad betong. I många fall är kylvattenvägarna sammanbyggda med och utgör del av den bärande strukturen för andra betongkonstruktioner i kärnkraftverket. Även övriga delar består av slakarmerad betong.

3 Spännkablar i reaktorinneslutningar

3.1 INLEDNING

Spännkablar i reaktorinneslutningarna syftar till att bibehålla en tryckspänning i betongen i händelse av ett inre övertryck i inneslutningen vilket kan orsakas av en intern reaktorolycka. Genom att förhindra dragspänningar och därmed risken för sprickbildning förhindras utsläpp av radioaktiva substanser till omgivningen. Ett av de stora problemen med spännkabelsystem är att kraften i spännkablar kommer minska med tiden på grund av långtidseffekter i materialen. Dessa är krypning och krympning i betongen samt relaxation av spännstålet. Detta innebär att vid en viss ålder kommer spännkrafterna i inneslutningen inte vara tillräckliga för att förhindra sprickbildning i betongen och därmed har inneslutningen uppnått sin tekniska livslängd.

Korrosionsskyddet av spännkablar kan utformas på två principiellt olika sätt:

- Genom cementinjektering av foderrören, vilket medför att spännkablar i princip gjuts ihop med inneslutningen
- Genom injektering av foderrören med rostskyddsfett eller genom ventilation med torrluft av foderrören.

Den stora skillnaden mellan de två systemen är att vid cementinjektering är spännkablar inte tillgängliga för direkt inspektion eller att de vid behov inte går att byta ut. Detta är möjligt för kablar som är fettinjekterade eller ventilerade. I dessa inneslutningar utförs kontinuerligt mätningar av kvarvarande spännkrafter och på så vis övervakas spännkraftsförlusterna över tid och vid behov kan krafterna höjas. Detta är inte möjligt för cementinjekterade spännkablar där det således inte finns något sätt att övervaka spännkraftsförlusterna.

3.2 PROJEKT UTFÖRDA INOM BETONGPROGRAMMET

De projekt som fokuserat på spännkablar i reaktorinneslutningar är följande:

- Status på reaktorinneslutningar med cementinjekterade spännkablar [1].
- Long-term stability of tendons in containments of reactors [3].
- Aging management of nuclear prestressed concrete containments [4].
- Instrumentering av spännkablar i Forsmark 2 [5].
- ACCEPPT, Ageing of concrete and civil structures within nuclear power plants [6].
- Utredning av problem med lastceller på spännkablar i Olkiluoto 3.
- Instrumentering av spännkablar av typ BBRV [7].
- Sammanställning av spännkablar i reaktorinneslutningar [8].
- Provnings i Barsebäcks FILTRA - Bestämning av spännlinors spänning – Metodutveckling [9].

- Determination of stresses in grouted strands of a reactor containment by a destructive test method [56].
- Analysis of prestressing tendons long-term durability in Swedish nuclear reactor containments [57].

3.3 SAMMANFATTNING AV GENOMFÖRDA PROJEKT

Doktorandprojektet "Status på reaktorinneslutningar med cementinjekterade spännkablar" [1] behandlade olika sätt att uppskatta spännkraftsförluster i spännarmerade betongkonstruktioner med fokus på reaktorinneslutningar. Projektet bestod av tre delar, den första delen behandlade modellering av spännkraftsförluster med olika prediktionsmodeller för krypning, krympning och relaxation. Dessa modeller applicerades på både gamla spännarmerade betongbalkar från kärnkraftverket Olkiluoto samt på de svenska inneslutningarna i Ringhals och Forsmark där mätningar av kvarvarande spännkraft utförs. För modelleringen av inneslutningarna användes även resultaten från klimatutredningen i ett annat Energiforskprojekt [2].

Resultatet visade att modifiering av modellerna efter verkliga klimatförhållanden förbättrade modellernas noggrannhet och ett antal av modellerna uppvisade god överensstämmelse med uppmätta spännkraftsförluster. I den andra delen av projektet utfördes försök med en oförstörande provningsmetod där resonansfrekvensen mättes för ett antal spännarmerade betongbalkar. En teoretisk modell presenterades som för första gången kunde beskriva sambandet mellan betongbalkarnas resonansfrekvenser och spännkraften, nämligen att resonansfrekvenserna ökar med spännkraften. I den tredje delen undersöktes temperaturens inverkan på spännkraftsförluster i ett antal spännarmerade betongbalkar. Resultaten visade att spännkraftsförlusterna ökar med omgivande temperatur samt att den metod som används för att bestämma kvarvarande spännkraft i betongbalkar har vissa brister.

I projektet "Long-term stability of tendons in containments of reactors" [3] genomfördes en sammanställning och analys av samtliga uppmätta spännkrafter i inneslutningarna i Forsmark och Ringhals samt en litteraturstudie av långtidsegenskaper hos spänntrådar vid rumstemperatur. I litteraturstudien inkluderades även de försök som utförts sedan början av 1980-talet på trådar tagna från spännkablar i de svenska inneslutningarna. Resultaten av utvärderingen av uppmätta spännkraftsförluster visade att majoriteten av spännkraftsförlusterna utvecklas under de första 5-10 åren efter uppspänningen, därefter är utvecklingen av förluster långsam. Vidare visade utvärderingen att höja spännkrafter i gamla spännkablar bör utföras med försiktighet då effekten av höjningarna är kortvariga. I litteraturstudien redogjordes för spännståls beteende över lång tid under höga belastningar, bland annat beskrevs sambandet mellan stålets struktur och dess deformation. Vidare indikerade analysen av utförda provningar att spännstålets gränstörning minskar med tiden.

I rapporten "Aging management of nuclear prestressed concrete containments" [4], presenterades den amerikanska praxisen för hanterandet av åldrande samt inspektion och övervakning av reaktorinneslutningar med icke-injekterade spännkablar. Rapporten beskriver de föreskrifter, vägledning och normer som används i USA för bland annat konstruktion, inspektion och övervakning av spännarmerade reaktorinneslutningar. Rapporten ger även detaljerad information kring hur spännarmerade reaktorinneslutningar ska övervakas och utvärderas, inklusive

tolkning och bedömning av värden från periodisk övervakning vad gäller uppmätta krafter och förskjutningar. Vidare inkluderas även nuvarande amerikanska praxis för täthetsprovning av inneslutningar samt drifterfarenheter. Rapporten beskriver också metoder för analys av befintliga betonginneslutningar med datoriserade analysverktyg och realistiska materialegenskaper i syfte att reducera den konservatism som inkluderas i samband med konstruktionsfasen av inneslutningar.

Projektet "Instrumentering av spännkablar i Forsmark 2" [5] var en delfinansiering till ett Vattenfallprojekt där tre nya spännkablar som installerades i inneslutningen till Forsmark 2 instrumenterades med lastceller och töjningsgivare. Mätningar av spännkrafterna utfördes både under uppspänningen och sedan kontinuerligt under drift. Resultaten från uppspänningen gav information om korttidsförluster, det vill säga lås- och friktionsförluster samt indikerade att mätning av kvarvarande spännkraft med domkraft tenderar att överskatta spännkraften. Resultaten från långtidsmätningarna visade att majoriteten av spännkraftsförlusterna utvecklades under de första 20-30 dagarna efter uppspänningen samt att temperaturen är en viktig parameter att övervaka vid mätningar med lastceller.

Ytterligare ett projekt har genomförts inom betongprogrammet som delvis behandlar spännkraftsförluster, det europeiska samarbetsprojektet ACCEPPT [6], denna del av projektet presenteras i kapitel 9.

I projektet "Utredning av problem med lastceller i Olkiluoto 3" utfördes en utredning av orsaken till de problem som observerats med kraftgivarna som placerats på ett antal spännkablar i inneslutningen till reaktorn till Olkiluoto 3. På grund av sekretesskäl kan inte resultaten från utredningen presenteras i föreliggande rapport.

I projektet "Möjligheter till instrumentering av spännkablar av system BBRV" [7] utreddes möjligheterna att instrumentera spännkablar av typ BBRV med syfte att kontinuerligt mäta spännkraften i kablarna. Detta system är monterat i Ringhals 3 och 4 samt Forsmark 3. Spännkablarna i systemet BBRV består av ett stort antal (vanligast är 139) enskilda ståltrådar som förankras i ankarstycket via kallformade huvuden i ändarna på trådarna. I samband med uppspänningen placeras mellanlägg mellan ankarstycket och ankarplattan för att säkerställa kraften i spännkabeln. Denna lösning medför att kablarna går att instrumentera i efterhand genom att ersätta ett eller flera mellanlägg med givare för mätning av kraft. Nackdelen är att det sannolikt är kostsamt att använda kommersiellt tillgängliga ringformade lastceller. I projektet togs fyra möjliga alternativ till instrumentering fram med syfte att mäta spännkrafterna i kablarna. Alternativ 1 innebar att kapa samtliga trådar för att sedan installera en konventionell ringformade lastcell och slutligen återstuka trådarna. I alternativ 2 används en avvaxling för att leda ner spännkraften från ankarstycket till två separata lastceller som mäter kraften. I alternativ 3 mäts kraften i spännkabeln indirekt via taktill tryckgivare i kombination med ett material med betydligt högre styvhet än stålet i förankringen. En förändring i kraft i spännkabeln ger för detta material en betydligt större kraft vilken då kan mätas med den taktilla tryckgivaren. Alternativ 4 innefattade att montera töjningsgivare på ankarstycket och mäta töjningsförändringen som orsakas av en spännkraftsförlust. Töjningen kan sedan räknas om till en kraftförlust.

I projektet "Förspänningssystemen i de svenska reaktorinneslutningarna" [8] sammanställdes information kring spännkabelsystemen i samtliga svenska reaktorinneslutningar. Detta innefattade information om bl.a. typ av spännkabelsystem, uppspänningskrafter och efterföljande spännkraftsmätningar och mekaniska egenskaper hos spännstålet. I ett parallellt projekt inom Energiforsk

betongtekniska program inom vattenkraften utfördes en liknande sammanställning över installerade spännkablar inom vattenkraften [10]. Syftet var att ta fram liknande sammanställningar för både kärn- och vattenkraft för att kunna identifiera gemensamma frågeställningar inom området. Dessa sammanställningar ska sedan ligga till grund för framtida gemensamma projekt.

Projektet "Provningar i Barsebäcks FILTRA Bestämning av spännlinors spänning – Metodutveckling" [9] var en förstudie inför att eventuellt utföra tester i en av reaktorinneslutningarna i Barsebäcks kärnkraftverk. Spännkablarna i Barsebäcks inneslutningar är cementinjekterade. Det finns därför ingen direkt oförstörande mätmetod för att bestämma kvarvarande spännkraft såsom mätning med domkraft. Den metod som är planerad att användas i Barsebäck är att frilägga en spännkabel genom vattenbilning och sömborring av betongen. En eller flera av linorna i den frilagda spännkabeln kommer sedan instrumenteras med töjningsgivare innan den kapades. Genom att mäta töjningsförändringen som uppstår i samband med kapningen kan spännkraften i kabeln uppskattas. I detta projekt provades metoden i FILTRA-anläggningen i Barsebäck som har en liknande konstruktion som reaktorinneslutningen. En horisontell spännkabel frilades på tre ställen i längsled genom en kombination av sömborring och vattenbilning av betongen. Vid varje håltagning förseddes tre trådar på en och samma lina med trådtöjningsgivare. En lina förseddes med en lägesgivare och även en temperaturgivare installerades. Linan kapades med en vinkelslip vid de tre mätningställena. Efter kapningen plockades linan ut för ytterligare provning i laboratorium. Resultaten visade att metoden fungerar för att uppskatta spännkraften i linan, dock krävdes lite mer försök för att fastställa noggrannheten i mätmetoden. Generellt visar resultaten att liknande mätningar kan höja kunskaperna om de injekterade spännkablarnas tillstånd och beteende vid brott samt ge input för verifiering av beräkningsmodeller.

Projektet "Determination of stresses in grouted strands of a reactor containment by a destructive test method" [56] var en direkt fortsättning på [9] där den utvecklade metodiken användes på ett antal spännkablar i reaktorinneslutningen till Barsebäck 2. Förutom bestämning av spännkrafter utfördes även temperatur- och fuktmätningar i betongen samt laboratorieprovning av betongprover tagna i samband med friläggandet av spännkablarna. Även en kortfattad litteraturstudie utfördes över liknande försök där krafterna i injekterade spännkablar bestämts med olika metoder. Totalt utfördes nio håltagningar, s.k. mätfönster, i vilka två olika spännkablar frilades. Tre av mätfönstren täckte olika positioner längs en horisontell spännkabel och på motsvarande vis täckte de övriga sex mätfönstren olika positioner längs en vertikal spännkabel. I varje mätfönster instrumenterades flera olika trådar i spännkablarna med trådtöjningsgivare (TTG). I nära anslutning till de spännkablar som kapades monterades även TTG direkt på betongen, syftet var att mäta reaktorinneslutningens respons av kapningen. Okulära inspektioner av spännkablarna i samband med håltagningen visade att spännkablar, injekteringsbruk samt foderrör var i mycket gott skick. I tre av mätfönstren, två för vertikala spännkabeln och ett för den horisontella, kapades samtliga linor i spännkablarna samtidigt som töjningarna mättes. I de övriga mätfönstren utfördes endast mätningar för att undersöka responsen i spännkabeln p.g.a. kapningen. Resultaten visade att denna metod kunde användas för att uppskatta krafter i injekterade spännkablar samt att spännkraftsförlusterna i de undersökta spännkablarna var relativt låga, runt 3 %. Vidare så kunde effekterna av kapningarna detekteras på spännkablarna i övriga mätfönster även vid avstånd upp till 10 m. Detta tyder på en god vidhäftning mellan spännstål och injekteringsbruk och därmed även en god kraftöverförande förmåga. Resultaten från TTG på betongen visade att

kapningen även påverkade spänningen i betongen lokalt, där spänningarna i betongen gick från tryck till drag. Fukt- och temperaturmätningarna visade, i god överensstämmelse med tidigare mätningar (avsnitt 4 nedan), på höga fuktnivåer i betongen.

I samband med spännkraftsmätningarna som utförs vid de svenska reaktorinneslutningar med icke-injekterade spännkablar demonteras en eller flera trådar på vilka materialprovning utförs i laboratorium. Provningsen omfattar spännstålets mekaniska egenskaper samt en metallografisk undersökning. I projektet "Analysis of prestressing tendons long-term durability in Swedish nuclear reactor containments" [57] sammanställdes och analyserades resultaten från samtliga av dessa laboratorieprovningar som utförts sedan 1970-talet. Syftet var att identifiera eventuella förändringar i materialegenskaper. Förutom en statistisk analys av materialdata så utfördes även nya experimentella undersökningar av både använda och oanvända spänntrådar, vilket inkluderade mekaniska provningar, kemisk analys samt undersökningar av stålets mikrostruktur. Resultaten visade att de flesta mekaniska egenskaper, såsom elasticitetsmodul och draghållfasthet, uppvisar stor spridning men några tydliga eller statistiskt säkerställda trender över tid kunde inte påvisas. Däremot indikerade resultaten på en viss minskning i den uppmätta brottöjningen. Undersökningarna av spännstålets mikrostruktur visade inte på några avvikelser i vare sig struktur eller kemisk sammansättning.

4 Fukt- och temperaturtillstånd i reaktorinneslutningar

4.1 INLEDNING

Fukt- och temperaturförhållandena i betong påverkar flera olika egenskaper hos betongen. För betong i reaktorinneslutningar är det främst uttorkningen av betongen som är av intresse, denna påverkas till exempel kraftigt av omgivande temperatur. Uttorkningen påverkar direkt krympningen av betongen men även till viss del krypningen. Båda dessa långtidsmekanismer ger i första hand upphov till spännkraftsförluster i spännkabellarna men kan även ge upphov till spänningskoncentrationer och sprickbildning i betongen. Fukttillstånden i betongen är också direkt avgörande för initiering och propagering av korrosion av ingjutna metallkomponenter vilket främst avser armeringen och tätplåten i betongen.

4.2 PROJEKT UTFÖRDA INOM BETONGPROGRAMMET

De projekt som fokuserat på fukt- och temperaturtillstånd i reaktorinneslutningar är följande:

- Förändringsprocesser i reaktorinneslutningar [2],
- Climatic conditions inside nuclear reactor containments [11],
- Utvärdering och uppföljning av projektet CONMOD, Del II - Utvärdering av utvecklingsstatus för fuktanalysmetoder [12],
- ACCEPPT, Ageing of concrete and civil structures within nuclear power plants [6].
- Genomgång av konstruktion av kokvattenreaktorinneslutningar i Norden [13],
- Simulerad uttorkning av betong [14].
- Temperature influence on the concrete in the spent fuel pools [58].

4.3 SAMMANFATTNING AV GENOMFÖRDA PROJEKT

I projektet "Förändringsprocesser i reaktorinneslutningar" [2], undersöktes klimatet inne i två BWR-inneslutningar (Barsebäck 2, och Ringhals 1) och en PWR-inneslutning (Ringhals 3). Syftet var att bedöma och kvantifiera tidigare och framtida förändringsprocesser i inneslutningarna med avseende på fukt- och temperaturtillstånd. Inomhusklimatet, det vill säga temperatur och relativ fuktighet (RF) i luften, mättes vid flera olika nivåer i inneslutningarna. Dessutom mättes temperatur och RF i betongen. På BWR-inneslutningarna bestämdes både RF och temperatur i olika djup i väggarna och på så vis erhöles en fukt och temperaturprofil över tvärsnittet. För inneslutningen på Ringhals 3 mättes detta endast på ett djup av 75 mm från utsidan. Resultaten från undersökningarna visade att klimatförhållandena inuti inneslutningarna främst karakteriseras av en låg RF och att temperaturen under drift ökar med höjden till maximalt mellan 40°C till 50°C. Vidare visade mätningarna att uttorkningen av inneslutningarna går extremt långsamt och inne vid tätplåten har betongen i princip inte torkat överhuvudtaget efter mer än 30 år. En uttorkningsmodell

för att bestämma nuvarande samt prediktera framtida fuktillstånd i inneslutningsväggarna presenterades och verifierades både mot laboratorieförsök samt mot mätningar på plats.

”Climatic Conditions inside Nuclear Reactor Containments” [11] var ett doktorandprojekt på Lunds Tekniska Högskola och Vattenfall som avslutades våren 2016. Projektet innefattade bland annat en materialstudie avseende fukttransportegenskaper av betong som tagits ur från den inre cylinderväggen på inneslutningen på Ringhals 4. Resultaten visade att det inte var någon signifikant skillnad mellan fukttransportegenskaperna på prover uttagna vid olika nivåer i inneslutningen. Mätningar av RF och temperatur i både betongen och luften inuti inneslutningarna i Ringhals 1 och 4 samt Forsmark 2 och 3 utfördes under ett driftår på flera olika positioner och nivåer i inneslutningarna samt vid olika djup över tvärsnitten. Resultaten från mätningarna visade liknande resultat som i [2], det vill säga att uttorkningen av betongen går extremt långsamt. Via mätningarna kunde fuktprofilerna över tvärsnittet bestämmas för respektive mätpunkt. Mätningarna visade även att det inte är någon större skillnad i RF i betongen mellan BWR och PWR-inneslutningar samt att fukten som torkar ur betongen har en stor påverkan på klimatet inne i inneslutningarna. För en PWR-inneslutning uppskattades till exempel att cirka 750 kg fukt tillförs till luften från betongen varje år. Utifrån mätningarna av fukttransportegenskaperna utvecklades en modell för beräkning av uttorkningen i BWR-inneslutningarna. Beräkningarna utfördes över en period av 60 år och verifierades mot resultaten från de utförda mätningarna i inneslutningarna. Resultaten visade att fram till nu har cirka 30-45 % av det fritt bundna vattnet i betongen torkat ut. Enligt beräkningarna kommer mellan 40-50 % att ha torkat ut efter 60 år. Detta visar att den största delen av uttorkningen redan har skett vilket betyder att fukttillskottet från betongen och därmed dess påverkan på klimatet inuti inneslutningen minskar med tiden.

I projektet ”Utvärdering och uppföljning av projektet CONMOD, Del II - Utvärdering av utvecklingsstatus för fuktanalysmetoder” [12] sammanställdes resultaten från projektet CONMOD avseende de undersökningarna av fuktillstånd i reaktorinneslutningen på Barsebäck. Även den utveckling som skett inom området sedan projektets avslut presenterades. Sammanställningen visade att endast två av rapporterna inom CONMOD behandlade fuktrelaterade frågeställningar i någon större utsträckning. Den ena av dessa var [2], vilken beskrivs ovan. I den andra rapporten rapporterades om fuktmätningar, bland annat RF, kapillär mätnadsgrad och bestämning av sorptionskurvor, som utförts på borrhärdar tagna ur reaktorväggen. Vidare gavs en sammanställning över samtliga punkter i Barsebäck där fuktmätningar utfördes. Enligt rapporten är den stora utvecklingspotentialen i att beskriva uttorkningen av inneslutningar med temperaturgradienter över inneslutningsväggen. Vidare rekommenderades det att alla de tillfällen då mätningar liknade de som utfördes i [11] måste tas tillvara för att ytterligare öka kunskapen inom området.

Ett projekt som delvis behandlar fukt- och temperaturtillstånd i reaktorinneslutningar, är det europeiska samarbetsprojektet ACCEPPT [6], denna del av projektet presenteras i kapitel 9.

I projektet ”Genomgång av konstruktion av kokvattenreaktorinneslutningar i Norden” [13] utfördes en genomgång av ett tidigare projekt som utförts inom Nordic Owner Group (NOG). NOG-projektet hade som syfte att systematisera och sprida kunskap rörande kokvattenreaktorer. Det projekt som utfördes inom betongprogrammet syftade

till att utföra en inledande studie genom att identifiera de argumentationslinjer och slutsatser som presenterades i NOG-rapporterna avseende konstruktioner och konstruktionsdelar. Därefter sammanställdes och utvärderades dessa med avseende på dagens kunskapsläge. På grund av sekretess är spridningen av rapporten begränsad till medlemsföretagen i Energiforsk och finns därför ej tillgänglig för allmänheten.

Projektet "Simulerad uttorkning av betong" [14] var en fortsättning på de tidigare projekten som utförts inom programmet inom fuktområdet. Projektet bestod av två delar, den första delen var en utredning av ett kommersiellt tillgängligt program, WUFI, för fuktberäkningar och jämförelse med den modell som utvecklades och verifierades i [11]. Simuleringar av fuktförhållandena i betongen i reaktorinneslutningarna till Ringhals 1 och 4 utfördes med WUFI och den tidigare utvecklade modellen. Simuleringsresultaten jämfördes sedan med mätningar som utförts inom [11]. Överensstämmelsen mellan de båda beräkningsmodellerna och resultaten från utförda fuktmätningar var god och slutsatsen var att WUFI kan användas i framtida beräkningar för att simulera de processer som sker i betongen. I del två av projektet analyserades betongens inverkan på inneklimatet i en reaktorinneslutning. Simuleringarna med beräkningsmodellerna samt mätdata över avfuktningen av inneslutningen till Ringhals 4 visade att betongen bidrar med cirka en tredjedel av det vatten som avfuktas under ett år. Både dessa och tidigare resultat har visat att RF i betongen efter mer än 30 års drift är fortsatt hög, ofta över 80 %. Detta motsvarar en nivå som för många korrosionsprocesser är en brytpunkt för där risk för korrosionsangrepp föreligger. En sammanställning av olika möjliga korrosionsrisker visade att det finns flera möjliga riskzoner där korrosion av tätplåten skulle kunna uppkomma. Det rekommenderades att en kartläggning över riskzoner i konstruktionen genomförs samt att potentiella processer och dess styrande parametrar identifieras.

Projektet "Temperature influence on the concrete in the spent fuel pools" [58] undersökte hur temperaturvariationer och temperaturgradienter påverkar betongkonstruktionerna i bassängerna där använt kärnbränsle förvaras. Syftet med projektet var att undersöka effekterna av exceptionella lastfall eller olycksscenarior då vattnet i bassängerna i värsta fall kan börja koka. Dessa snabba temperaturförändringar kan skapa relativt stora temperaturskillnader mellan bassängernas in- och utsida med t.ex. sprickbildning och därmed förlorad integritet som följd. Projektet byggde på intervjuer och enkätundersökningar med personal vid kärnkraftverken och kärnavfallsanläggningarna i Sverige och Finland. Detta kompletterades även med en omfattande litteraturstudie inom området. Resultaten visade att utformningen av bränslebassängerna är liknande i alla anläggningar, bestående av armerad betong täckt med en tätplåt av rostfritt stål på insidan. Sprickbildning orsakat av höga temperaturer i bassängerna har beaktats i både dimensionering och i efterföljande säkerhetsutvärderingar. Litteraturstudien visade att förhöjda temperaturer under 100 °C generellt medför minskad styvhethos betongkonstruktioner och något reducerad draghållfasthet. Påverkan på tryckhållfastheten är betydligt mindre och i vissa fall kan öka vid högre temperaturer. Andra faktorer som påverkar betongens beteende under höga temperaturer är typ av ballast och betongens fuktillstånd. Generellt så visade resultaten att bassängernas strukturella integritet med avseende på främst vattentätethet bibehålls även vid höga temperaturer.

5 Oförstörande provningsmetoder

5.1 INLEDNING

Oförstörande provning (OFP) innefattar samtliga mättnings- och undersökningsmetoder som inte påverkar den undersökta konstruktionen och baseras på att mäta olika fysikaliska fenomen i konstruktionen. Oftast avses metoder som baseras på utbredning av mekaniska vågor i konstruktionen. Konstruktionens respons kan sedan relateras till andra fysikaliska egenskaper hos konstruktionen såsom styvhet, sprickighet eller geometri. En annan metod som används inom OFP är utbredningen av elektromagnetiska vågor, till exempel radar, i konstruktionen.

5.2 PROJEKT UTFÖRDA INOM BETONGPROGRAMMET

De projekt som fokuserat på oförstörande provningsmetoder av betongkonstruktioner är följande:

- Utvärdering av oförstörande provningsmetoder med möjliga tillämpningar inom kärnkraftstekniska betongkonstruktioner [15],
- Litteraturstudier och test av oförstörande provningsmetoder (OFP) med möjliga tillämpningar på kärnkraftens betongkonstruktioner [16],
- Impulsresponsmätningar beroende av sprickdjup, delaminering [17],
- Instrumenterad bomknackning [18],
- Projektorstyrd avsökning och dokumentation [19],
- Utvärdering och uppföljning av projektet CONMOD, Del 1, Oförstörande provningsmetoder [20],
- ACCEPPT, Ageing of concrete and civil structures within nuclear power plants [6].
- Ultraljudsметод för att detektera korrosion i tätplåt i reaktorinneslutningar (etapp 1) [21],
- Detektion av korrosion i ingjuten tätplåt i reaktorinneslutning, olinjäritet / harmonic imaging etapp 2 [22].
- Acoustic emission detection and source location [59].
- Infrared thermography for detecting defects in concrete structures [60].
- Nonlinear ultrasonic evaluation for corrosion assessment of steel plates embedded in concrete [61].
- Methods for locating pool liner leakage at nuclear power plants [62].
- Methods for detection of rebar in nuclear concrete structures [63].
- Testing of acoustic cameras to detect leakage through a concrete structure, [64].

5.3 SAMMANFATTNING AV GENOMFÖRDA PROJEKT

I projektet "Utvärdering av oförstörande provningsmetoder med möjliga tillämpningar inom kärnkraftstekniska betongkonstruktioner" [15] sammanställdes olika OFP-metoder för möjlig applicering på betongkonstruktioner i kärnkraftverk. Utifrån denna sammanställning värderades vilka av de olika metoderna med avseende på utveckling och användning som rekommenderas att gå vidare med för applicering på betongkonstruktioner inom kärnkraftverk. Arbetet avsåg både metoder för tillståndskontroll och för kontinuerlig övervakning av betongkonstruktioner. Exempel på metoder som kan ha en praktisk användning är radar, ytvågsseismik och frekvensrespons. Av rapporten framgick att det endast är de metoder som baseras på vågutbredningsfenomen som kan kopplas till hållfasthetsparametrar hos betongen. Därför rekommenderades att bland annat följande metoder bör utvecklas vidare: impendansmätning, skjuvvågsreflektion och kontaktlösa ytvågsmätningar. För kontinuerlig övervakning föreslogs att följande metoder undersöks vidare: akustisk emission, modanalys samt seismiska nätverk.

Projektet "Litteraturstudier och test av oförstörande provningsmetoder (OFP) med möjliga tillämpningar på kärnkraftens betongkonstruktioner" [16] syftade till att undersöka olika metoder som kan vara lämpliga för att identifiera delaminering i betongkonstruktioner, fokus var på betongkonstruktioner i kylvattenvägarna. Metoder som bedömdes vara lämpliga för detta ändamål var impendansmätning, vibrationsmätning samt ultraljudsmätningar i en tömd kylvattenkanal och mätning med parametrisk sonar i vattenfylld kylvattenkanal. I projektet testades även ett ultraljudsinstrument för detektering av delaminering dels i laboratorieförsök och dels i kylvattenvägarna i Ringhals 2. Försöken visade att instrumentet kunde detektera delamineringar i både provkroppar och verkliga konstruktioner. Laboratorieförsök med vattenstråle visade att även denna metod kan vara en lämplig metod för att detektera delaminering i betongkonstruktioner.

Projektet "Impulsresponsmätningar, beroende av sprickdjup" [17] syftade till att undersöka hur impulsresponsmetoden lämpar sig att identifiera delaminering i betongkonstruktioner. Impulsresponsmätningar går ut på att mäta en konstruktions respons på en impuls, i detta fall ett slag, och anses vara lämplig att införa då den påminner om den etablerade metoden bomknackning. Bomknackning går ut på att slå på konstruktionen med till exempel en hammare, områden med delaminering kommer då låta annorlunda än intakta områden. Tre olika metoder för impulsresponsmätningar undersöktes. Delamineringar ner till ett djup på 180 mm, vilket var det största djup som undersöktes, kunde detekteras.

Som en direkt fortsättning på föregående projekt [17] där de metoder som undersöktes i laboratoriemiljö testades nu metoderna i anslutning till kylvattenvägarna i Ringhals 2 i projektet "Instrumenterad bomknackning" [18]. Metoderna innefattade tre olika hammare för excitering av konstruktionen kombinerade med två olika metoder för att registrera betongens respons. Resultaten från mätningarna visade att samtliga metoder kunde detektera delaminering i en verklig betongkonstruktion. För fortsatt teknikutveckling rekommenderades en metod där både kraften från slaget samt ljudhastigheten i betongen kan mätas då denna metod var den som genererade störst skillnad mellan intakt och delaminerad betong.

Projektet "Projektorstyrd avsökning och dokumentation" [19] syftade till att utveckla en metod för att kunna detektera och kvantifiera delaminering i betongkonstruktioner och även kunna dokumentera resultaten av undersökningen. Den föreslagna

metodiken innefattade att ett rutnät med aktuella mätpunkter projiceras på ytan som ska undersökas. Själva undersökningen går sedan ut på att slå på ytan med en instrumenterad hammare som mäter kraft i slaget och två givare som registrerar betongens respons från slaget. Information, till exempel respons, lagras sedan för varje mätpunkts läge på undersökta ytan, vilket ger en dokumentationsmöjlighet samt objektiv kvantifiering av mätresultaten.

I projektet "Utvärdering och uppföljning av projektet CONMOD, Del 1, Oförstörande provningsmetoder" [20] sammanställdes samtliga de undersökningar med OFP-metoder som användes i CONMOD-projektet i Barsebäck. Sammanställningen visade att endast tre av de OFP-metoder som undersökts i projektet kunde rekommenderas för applicering på reaktorinneslutningar. Dessa var ytvågsseismik, georadar samt högenergiröntgen. Utvecklingen som skett sedan CONMOD avslutats beskrivs kortfattat.

I det europeiska samarbetsprojektet ACCEPPT [6] behandlade en del oförstörande provningsmetoder med syfte att detektera skador i främst tätplåten på inneslutningar utan en inre betongvägg, det vill säga inte den konstruktionslösning som svenska inneslutningar har med ingjuten tätplåt. En genomgång av olika OFP-metoder genomfördes där syftet var att identifiera lämpliga globala och lokala undersökningsmetoder. De globala metoderna ska användas i ett första steg för att identifiera områden med skador. En pilotundersökning genomfördes i en fransk reaktorinneslutning där inspelningsutrustning installerades under ett trycktest. Resultatet indikerade att ljud genereras från strukturerna under ett trycktest och att detta skulle kunna vara en bas för framtida globala inspektionsmetoder. För att sedan lokalisera skadorna inom dessa områden ska lokala metoder användas. Resultaten från genomgången av olika OFP-metoder visade att för global detektering av skador är sensorer av Microflown typ alternativt så kallade akustiska kameror mest lämpliga. För lokal detektering visade sig handhållna ultraljudsinstrument av typen Rotoarray vara effektiva för att detektera bland annat delamineringar och simulerade korrosionsskador mellan tätplåt och betong.

Projektet "Ultraljudsmetod för att detektera korrosion i tätplåt i reaktorinneslutningar" [21] var etapp 1 i en serie av två projekt som syftade till att ta fram en metod för undersökning av tätplåten med avseende på korrosion i svenska och finska reaktorinneslutningar. Till skillnad från t.ex. franska och amerikanska inneslutningar är tätplåten ingjuten även på insidan och därmed inte tillgänglig för de metoder som undersöktes i bl.a. ACCEPPT [6]. Hypotesen som projektet bygger på är att korrosionsprodukter kommer uppvisa ett olinjärt beteende, d.v.s. att responsen är olika i tryck respektive drag. Detta kommer i så fall ge upphov till övertoner till grundfrekvensen (lägsta resonansfrekvensen), vilket bl.a. utnyttjas i medicinskt ultraljud, s.k. harmonic imaging. Om man sedan filtrerar bort grundfrekvensen kan man ta fram de reflexer som enbart kommer från korrosionsprodukterna och därmed detektera korrosionen. I denna etapp utfördes mätningar med ett system för ultraljudsmätningar som tidigare användes i [16], vilket nu även uppgraderades. Mätningarna utfördes på en tidigare använd provkropp [6] bestående av betong med en plåt på ena sidan. Resultaten visade att systemet fungerade bra för att detektera övertoner. Slutsatsen var att det krävdes mer förfinad dataanalys samt en provkropp som var designad specifikt för dessa mätningar.

I etapp 2 av ovannämnda projekt "Detektion av korrosion i ingjuten tätplåt i reaktorinneslutning olinjäritet / harmonic imaging etapp 2" [22] utfördes ett stort antal

mätserier med olika sensorer och frekvenser i främst 50 – 100 kHz (ultraljud). Mätningarna utfördes på en nytillverkad betongprovkropp med en ingjuten korroderad stålplåt. Resultaten visade att de använda frekvenserna kan tränga igenom 1200 mm oarmerad betong och att kontinuerligt ultraljud skapar övertoner. Dock gav inte den korroderade stålplåten några tydliga reflexer för kortvariga signaler. Försök utfördes även med ultraljud i luft mot en korroderad stålplåt med ett korrosionsskikt på två till tre mm. Resultaten visade på tydliga reflexer för en signal på 50 kHz. Anledningen till att det inte genererades några reflexer i betongen antogs vara p.g.a. den betydligt högre våghastigheten i betong jämfört med luft. Då våghastigheten är cirka tio gånger högre i betong blir följaktligen även våglängden 10 gånger större och är därmed för stor för att korrosionen ska påverkas och kunna detekteras. Slutsatsen var att mer forskning krävs på området och olika metoder för att utföra framtida mätningar diskuterades kortfattat.

Projektet "Acoustic emission detection and source location" [59] var en fortsättning på det globala försök som utfördes inom projektet ACCEPPT [6]. I projektet togs ett första steg i utvecklingen av en icke-förstörande metod för att globalt detektera och lokalisera skador eller andra avvikelser i nordiska reaktorinneslutningar. Grundidén var att mekaniska förändringar i konstruktionen, t.ex. deformationer i svetsar, skapandet av sprickor i betongen eller spänningar mellan liner och betong, ger upphov till kortvariga ljudhändelser som kan detekteras med mikrofoner. En mätutrustning där fyra mikrofoner arrangerats i ett tetrahedralt system vilket möjliggör bestämning av ljudkällans riktning i tre dimensioner genom analys av tidsskillnader i ljudets ankomst till mikrofonerna utvecklades och verifierades i laboratorium. I samband med ett täthetsprov av reaktorinneslutningen till Ringhals 2 installerades utrustningen inuti reaktorinneslutningen i nära anslutning mot kupolen. Resultaten från försöken visade att mätutrustningen kunde detektera ljudhändelser som inträffade under ett trycktest. Totalt identifierades cirka 200 ljudhändelser varav 59 kunde lokaliseras med hög tillförlitlighet. Slutsatsen var att den använda metoden fungerar som en global detekteringsmetod för att lokalisera områden där möjliga strukturella förändringar har inträffat under förutsättning att fri sikt råder mellan ljudkälla och mätutrustning.

I projektet "Infrared thermography for detecting defects in concrete structures" [60] utfördes en teoretisk utvärdering av möjligheterna att använda oförstörande provningsmetoder baserade på infraröd (IR) termografi för att detektera skador i betongkonstruktioner. Fokus var på förhållandena i kylvattenvägarna i de nordiska kärnkraftverken. IR-termografi bygger på att mäta temperaturvariationer på ytor oftast med hjälp av en värmekamera. Skador i en betongkonstruktion, t.ex. sprickbildning, kan ha en påverkan på betongens värmeledningsförmåga, vilket i teorin ger upphov till lokala temperaturskillnader. Genom att använda en värmekamera skulle då eventuella skador kunna detekteras. Det scenario som undersöktes var om denna metod skulle kunna användas direkt efter tömning av kylvattenvägarna då det fortfarande råder en temperaturskillnad mellan betongen och omgivande luft och på så vis upptäcka eventuella skador. Undersökningen utfördes genom både en litteraturstudie över tidigare utförda försök och kommersiella produkter samt numeriska simuleringar av temperaturförhållandena i kylvattenvägarna. Resultaten visade att IR-termografi i praktiken har en begränsad potential för att identifiera sprickor i kylvattenvägar under realistiska driftförhållanden. Metoden bedömdes vara mer lämpad som ett komplement till andra oförstörande provningsmetoder vid en tillståndsbedömning.

Non-linear ultrasonic evaluation for corrosion assessment of steel plates embedded in concrete [61] var ett doktorandprojekt som utfördes vid avdelningen för Teknisk

geologi vid Lunds tekniska högskola. Syftet med projektet var att undersöka möjligheterna att använda OFP-metoder baserade på icke-linjärt ultraljud för att detektera främst korrosion på ingjuten tätplåt. Konventionell ultraljudsprovning har begränsningar i betong eftersom dessa högfrekventa vågor dämpas kraftigt. Icke-linjära ultraljudsmetoder baseras på att defekter såsom sprickor och korrosionsangrepp orsakar vågformsförvrängningar. Detta leder till bildandet av nya frekvenskomponenter, t.ex. övertoner, vilka kan användas som indikatorer på skador. Undersökningarna utfördes på mindre provkroppar med främst förkorroderade plåtar i laboratoriemiljö. Resultaten visade att icke-linjära metoder kan både upptäcka och bedöma korrosion i stålplåtar som är ingjutna i betong, och att mer omfattande angrepp ger tydligare utslag i mätningarna. Metoden har även visat potential att identifiera inbäddade främmande material, såsom trä, samt att upptäcka separationer mellan plåt och betong. Vidare så visade resultaten att icke-linjär utvärdering av ultraljudsmätningar i kombination med konventionella metoder har stor potential för att ge en rättvisande bild över en betongkonstruktions status avseende skador. Ytterligare undersökningar på provkroppar med mer realistiska dimensioner krävs för att vidare kunna bedöma metodernas detektionsförmåga. Sådana studier bör också ta hänsyn till faktorer som förekommande mikrosprickor i betongen, grov ballast, tät placerad armering samt de dimensioner som är typiska för kärnkrafttekniska betongkonstruktioner.

Projektet "Methods for locating pool liner leakage at nuclear power plants" [62] undersökte olika metoder för att lokalisera läckage i de rostfria plåtar som täcker insidan på bränslebassängerna i de nordiska kärnkraftverken. Nuvarande undersökningsmetoder består av att tömma bassängerna och sedan inspektera plåten manuellt, vilket är tidskrävande och behäftat med höga kostnader. Syftet med projektet har varit att utvärdera oförstörande provningsmetoder som möjliggör fjärrstyrd, undervattensbaserad lokalisering av läckage. Arbetet utfördes i två delar, en litteraturstudie över potentiella OFP-metoder och en experimentell del där potentialen hos en skjuvvågsbaserad metod undersöktes på en rostfri stålplåt med inbyggda artificiella defekter. Resultaten från litteraturstudien visade att det finns få metoder som skulle kunna användas för denna applikation. Den mest lovande metoden var en elektromagnetisk metod som kan detektera sprickor genom att identifiera störningar i ett genererat strömflöde i stålet. Resultaten från den experimentella delen visade att mekaniska skjuvhorisontella vågor kunde detektera defekter i storlek ner mot cirka 10 mm. Detekteringsförmågan beror starkt på defektens orientering och hur mätningen utförs. Slutsatsen från projektet var att en enskild metod inte är tillräcklig för att identifiera skador i en bassängplåt. Istället krävs en kombination av olika tekniker, där även robotiserade system för utförandet av själva undersökningen samt automatiserad dataanalys bör inkluderas.

I projektet "Methods for detection of rebar in nuclear concrete structures" [63] kartlades och utvärderades olika oförstörande provningsmetoder för detektering av armering i kärntekniska betongkonstruktioner. Syftet med projektet var att ge ett praktiskt beslutsunderlag för metodval, kompetensbehov och tillämpning i fält. Arbetet i projektet bestod av en mindre genomgång av litteratur och leverantörsdata, praktiska erfarenheter samt jämförande tester av olika utrustningar. Det huvudsakliga fokuset var på kommersiellt tillgängliga och accepterade metoder, främst täcksiktmetare, georadar samt ultraljudsbaserade metoder. Andra mer specialiserade metoder såsom Impact echo, magnetometri samt röntgen behandlades endast i begränsad omfattning. Resultaten av sammanställningen visade att täcksiktmetare är lämpliga som ett första steg eller om syftet med undersökningen endast är att detektera ytnära armering.

Georadar ger en tydlig och ofta lättolkad bild av det översta armeringslagret och lämpar sig för applicering för scanning av stora ytor. Det finns dock en del begränsningar som minskar möjligheten att tydligt detektera underliggande armeringslager. Ultraljudsbaserade metoder kan ge mer information om flera lager av armering, dock är resultaten mer svårtolkade och kräver mer erfarenhet att tolka korrekt. Den övergripande slutsatsen är att det inte finns någon enskild metod som kan ge fullständig information kring armeringen i en betongkonstruktion, i synnerhet inte i de fall då armeringen förekommer i flera lager. Den mest effektiva strategin är således att kombinera två eller samtliga av de presenterade metoderna beroende på syftet med undersökningen.

I projektet "Testing of acoustic cameras to detect leakage through a concrete structure" [64], undersöktes potentialen hos akustiska kameror för att detektera läckage genom inneslutningsväggar. Undersökningen genomfördes vid VERCORS-anläggningen i Frankrike, en nerskalad modell av en reaktorinneslutning. Tester utfördes vid två olika trycknivåer i samband med trycktester av inneslutningen. Akustiska kameror är försedda med ett flertal mikrofoner som visualiserar ljudkällor i form av en värmekarta i kamerans skärm. Tekniken är särskilt känslig för högfrekventa ljud, vilket gör den lämplig för att detektera gasläckage. Resultaten från undersökningen visade att de akustiska kamerorna kunde detektera läckage genom inneslutningen. De är dock mest lämpade för koncentrerade läckage genom t.ex. sprickor i betongen. Läckage utspridda över en större yta är betydligt svårare att upptäcka. Rekommendationen var att akustiska kameror bör kombineras med andra detekteringsmetoder för att detekteringsmöjligheterna. Läckespray är ett bra komplement som medför att mindre läckage kan detekteras. Läckespray ska dock användas med försiktighet då sprickande bubblor genererar ljud som kan tolkas som läckage av de akustiska kamerorna.

6 Korrosion av ingjutna ståldetaljer i betongkonstruktioner

6.1 INLEDNING

I princip alla betongkonstruktioner är försedda med någon form av slakarmering, vars funktion mer eller mindre är avgörande för konstruktionens bärförmåga och funktion över lång tid. Den vanligaste typen av armering är kolstål vilken är känslig för korrosion. Andra ingjutna ståldetaljer är tätplåten i reaktorinneslutningen och även plåtar till olika typer av bassänger. Den alkaliska miljön i betongen skyddar stålet från korrosion genom att ett så kallat passivskikt bildas på stålets yta. Detta passivskikt kan brytas ner genom två olika processer. Den ena är karbonatisering av betongen vilket är resultatet av cementets reaktion med koldioxid. Karbonatisering leder till att pH-värdet i betongen sjunker och när pH-värdet är tillräckligt lågt bryts passivskiktet vilket i närvaro av fukt kan medföra att stålet korroderar. Den andra processen som kan bryta passiveringen är att kloridjoner tränger in i betongen och når stålet. Vid en viss kloridjonskoncentration bryts passivskiktet och armeringen kan då korrodera. Ytterligare ett fenomen som teoretiskt kan orsaka främst armeringskorrosion är så kallad läckströmskorrosion, där ström från en närliggande likströmskälla "läcker" och leds genom armeringen i betongen tillbaka till strömkällan.

Armeringskorrosion är ett stort problem för betongkonstruktioner då det påverkar konstruktionens bärförmåga och därmed dess säkerhet negativt. I kärnkraftverk är det särskilt armeringen i betongkonstruktionerna i kylvattenvägarna som är utsatt för korrosionsskador. Detta är ett stort problem då kylvattenvägarna möjliggör kylning av reaktorn vilket är avgörande både för reaktorsäkerheten och en stabil och säker drift. Avställning av reaktorn på grund av reparationer av kylvattenvägarna medför således stora kostnader för anläggningarna. För reaktorinneslutningen är korrosionsskador på tätplåten ett allvarligt problem som direkt påverkar reaktorsäkerheten. Korrosionsskador på tätplåten är svåra att lokalisera och medför omfattande reparationsåtgärder.

6.2 PROJEKT UTFÖRDA INOM PROGRAMMET

De projekt som fokuserat på korrosion av armering och ståldetaljer i betongkonstruktioner är följande:

- Studie av vattenlinjekorrosion på tätplåt ingjuten i betong vid kondensationsbassäng [23],
- Korrosion på stål i betong i kylvattenvägar, Delprojekt 1 – Litteraturgranskning [24],
- Korrosion på stål i betong i kylvattenvägar, Delprojekt 2 – Relativa fuktighetens inverkan på kloridinitierad armeringskorrosion [25],
- Korrosion på stål i betong i kylvattenvägar, Delprojekt 3 – Korrosion på stål i vattenmättad betong [26],
- Galvanisk korrosion på armering i nära anslutning till huvudkylvattenpumpar [27],

- Korrosionsskydd av stål i betongkonstruktioner – Handbok [28],
- Katodiskt skydd av betongkonstruktioner med termiskt sprutade offeranoder av zink - Erfarenhetsinsamling och fältundersökning med fokus på långtidsegenskaper – Etapp I [30],
- Katodiskt skydd av betongkonstruktioner, termiskt sprutade offeranoder av zink - Etapp 2 [31],
- Rostfria ståls korrosionshårdighet och galvaniska inverkan på kolstål i betong med hög fukt- och kloridhalt [32],
- Korrosionsprovning av olika typer av bergbultar [33] och [28],
- Corrosion of steel in concrete at various moisture and chloride levels [34],
- Reparationsmetoder för kärnkraftsindustrin - kartläggning [35],
- ACCEPPT, Ageing of concrete and civil structures within nuclear power plants [6],
- Armeringskorrosion i kylvattenvägarna på kärnkraftverk (etapp I) [36],
- Armeringskorrosion i kylvattenvägar (etapp II) [37],
- Systematisk genomgång av potentiella korrosionsrisker för ingjuten metallisk tätplåt i reaktorinneslutningar [38].
- Utredning av risk för korrosion i wet-well mellan rostfritt stål och kolstål [65].
- Ytbehandling av kärntekniska betongkonstruktioner [66].
- Träinducerad korrosion på ingjuten tätplåt [67].
- Bestämning av korrosionsskyddsförmågan för olika reparationsbruk vid partiella reparationer [68].

6.3 SAMMANFATTNING AV GENOMFÖRDA PROJEKT

I projektet "Studie av vattenlinjekorrosion på tätplåt ingjuten i betong vid kondensationsbassäng" [21] undersöktes risken för vattenlinjekorrosion på tätplåten i en BWR-inneslutning eventuellt orsakad av läckage av vatten från kondensationsbassängen. Undersökningen bestod av dels en litteraturstudie och dels undersökningar av korrosionstillståndet hos tätplåten i Barsebäck 1. Resultatet från studien visade att den inspekterade tätplåten inte utsatts för vattenlinjekorrosion och att enbart obetydliga ytliga korrosionsangrepp kunde konstateras. Vidare visade betongprover som tagits i samband med undersökningen att betongen var i gott skick.

"Korrosion på stål i betong i kylvattenvägar, Delprojekt 1 – Litteraturgranskning" [24] syftade till att sammanställa rapporterade kloridhalter från tidigare undersökningar av betongkonstruktioner i bräckt vatten samt undersöka om något kloridtröskelvärde för initiering av korrosion på armering ingjuten i betong finns rapporterat. I rapporten presenterades undersökningar av kloridhalter i betong i både bräckt vatten och i havsvatten. Resultaten av litteraturstudien visade bland annat att det är svårt att fastställa ett generellt och entydigt kloridtröskelvärde. Variationerna i rapporterade

kloridtröskelvärden var stor, största skillnaden mellan två tröskelvärden översteg en tiopotens.

Syftet med projektet "Korrosion på stål i betong i kylvattenvägar, Delprojekt 2 – Relativa fuktighetens inverkan på kloridinitierad armeringskorrosion" [25], var att undersöka vid vilken relativ fuktighet (RF) i betongen som korrosionshastigheten är som störst. Detta undersöktes genom ett antal försöksserier där provkroppar lagrades i en saltlösning och exponerades för olika RF. Resultaten från försöken indikerade att mätbar korrosion endast uppkommer i intervallet 90-97 % RF. Vidare visade resultaten att det för varje betongkvalitet med stor sannolikhet finns ett kloridtröskelvärde över vilket armeringens passivering bryts och korrosion initieras. Hur allvarlig denna korrosion blir avgörs i sin tur av omgivande RF. Slutligen rekommenderades att framtida undersökningar bör utföras vid 95 % RF och enligt den i rapporten föreslagna proceduren.

Sista projektet i serien "Korrosion på stål i betong i kylvattenvägar" var Delprojekt 3 – "Korrosion på stål i vattenmättad betong" [26] i vilket olika tänkbara mekanismer som orsakar armeringskorrosion i vattenmättad betong undersöktes. Anledningen till undersökningen var att pågående armeringskorrosion har konstaterats under vattenlinjen i kylvattenvägar vilken, rent teoretiskt, bör ske med låg hastighet på grund av den låga syrehalten. I undersökningen ingick bland annat litteraturstudier, modellering av korrosionsmekanismer, försök med galvanisk korrosion samt fältmätningar av potentialer i marken runt Forsmark. Resultaten från projektet visade att risken för korrosion av armering i vattenmättad betong är låg. Exempel på fall där korrosion ändå förekommer är bland annat utvändigt luftade väggar, armering i närheten av rostfria konstruktioner samt konstruktioner där enskilda armeringsjärn påverkas av läckström från närliggande katodiskt skyddade konstruktioner. Resultaten visade även att risken för armeringskorrosion i vattenmättad betong inte kan uteslutas i kylvattenvägar på grund av de fall som konstaterats på Ölandsbron och i Göteborgs hamn där omfattande skador upptäckts och som inte har kunnat hittas en förklaring till.

För att undersöka om korrosionen av armeringen i kylvattenvägarna påverkas av de rostfria huvudkylvattenpumparna vilka är i elektrisk kontakt med armeringen utfördes mätningar i kylvattenvägarna till Ringhals 4 samt laboratorieförsök i projektet "Galvanisk korrosion på armering i nära anslutning till huvudkylvattenpumpar" [27]. Vidare undersöktes även effekten av de offeranoder som monterats i kylvattenvägarna. Resultaten visade att den elektriska kontakten mellan armering och de rostfria pumparna sannolikt inte skadat armeringen. De monterade offeranoderna förbättrade skyddet mot korrosion dock ger de inte ett fullständigt katodiskt skydd. Den höga förbrukning av offeranoder som observerats var sannolikt orsakad av den elektriska kontakten mellan armering och de rostfria pumparna.

Resultatet av den forskning som utförts av Swerea/Kimab inom området korrosion av stål i betongkonstruktioner sammanfattades i en handbok, "Korrosionsskydd av stål i betongkonstruktioner" [28]. Syftet var ta fram en praktisk och lättförståelig handbok vilken riktade sig till personer som jobbar inom betongområdet men som saknar djupare kunskaper inom korrosion. Handboken behandlar en teoretisk genomgång av korrosionsprocessen på stål i betong, olika metoder för tillståndsbedömning av stål ingjutet i betong med avseende på korrosion, en genomgång av olika armeringsstål med förhöjd korrosionsbeständighet samt en genomgång av olika elektrokemiska

skyddsmetoder mot korrosionsangrepp. Projektet finansierades även av FORMAS och REBET.

Projektet "Katodiskt skydd av betongkonstruktioner med termiskt sprutade offeranoder av zink - Erfarenhetsinsamling och fältundersökning med fokus på långtidsegenskaper – Etapp I" [30], var ett samarbetsprojekt med CBI Betonginstitutet, Swerea Kimab och Trafikverket. Syftet med etapp 1 av projektet var att undersöka långtidsegenskaper hos termiskt sprutade zinksikt på befintliga betongkonstruktioner. Termiskt sprutade zinksikt innebär att ett zinksikt appliceras på betongkonstruktionens yta vilket skyddar den ingjutna armeringen från korrosionsangrepp. Undersökningen utfördes både genom litteraturstudier samt genom undersökning av termiskt sprutad zink på både kantbalkar på Ölandsbron samt på intagsbyggnaden till Forsmark 3. Resultaten visade bland annat att skyddsförmågan hos zinksiktet kan bedömas som god och att skyddets funktion till stor del beror på betongens fukthalt, ju torrare betong desto sämre skyddsförmåga. Slutsatsen från studien var att det finns goda möjligheter att använda termiskt sprutade offeranoder som korrosionsskydd.

I etapp 2 av projektet [31] utfördes både laboratorieundersökningar av provkroppar med ingjutna armeringsjärn besprutade med offeranoder av zink och fältundersökningar av tre betongkonstruktioner med sprutade offeranoder av zink. I laboratorieundersökningarna exponerades ett antal provkroppar både med och utan sprutade offeranoder för olika nivåer av RF. Resultaten visade att skyddsförmågan hos zinksiktet var god i samtliga miljöer. De tre betongkonstruktionerna som undersöktes i fält var kantbalk till en stödmur på Essingeleden, betongväggar i intagsbyggnaden i Forsmark samt kantbalkar på en vägbro i Göteborg. Fältmätningarna visade att den termiskt sprutade zinken gav ett fullgott skydd enligt den europeiska standarden. Vidare rekommenderas det inte att använda termiskt sprutad zink på betongytan under vattenytan på grund av den höga zinkförbrukningen under vatten. Den huvudsakliga slutsatsen som kunde dras från de utförda projekten var att termiskt sprutad zink ger ett fullgott korrosionsskydd så länge zinksiktet finns kvar på betongytan.

Projektet "Rostfria ståls korrosionshärdighet och galvanisk inverkan på kolstål i betong med hög fukt- och kloridhalt", [32] var ett större forskningsprojekt där betongprogrammet stod för en del av finansieringen. Övriga finansiärer var Göteborgs Hamn AB, Outokumpu Stainless AB, SBUF, Swerea KIMAB och Trafikverket. Syftet med projektet var att undersöka hur hög klorid- och fukthalt i betong påverkar risken för galvanisk korrosion på armeringen i elektrisk kontakt med rostfri armering samt rostfri armerings korrosionshärdighet i dessa förhållanden. Vidare avsågs att ta fram rostfria stålqualiteter som är lämpliga i dessa förhållanden samt komplettera tidigare riktlinjer för val av rostfri armering i betong. Undersökningarna omfattade litteraturstudier samt försök både i laboriemiljö och genom exponering i olika utomhusmiljöer. Resultaten visade bland annat att rostfri armering har betydligt bättre motståndsförmåga mot korrosion jämfört med vanlig kolstålsarmering. Vidare kunde inga synliga korrosionsangrepp konstateras på ingjutna rostfria armeringsjärn i kloridhaltig betong delvis nedsänkt i havsvatten. Rostfri armering som är elektriskt ihopkopplad med kolstålsarmering ger inte upphov till galvanisk korrosion om båda armeringstyperna är ingjutna i betong, befinner sig den rostfria armeringen utanför betongen ökar däremot risken för galvanisk korrosion. Betongens bindemedel har en försumbar inverkan på risken för korrosion av rostfri armering i betong med hög kloridhalt.

”Korrosionsprovning av olika typer av bergbultar”, [33] var ett projekt som delfinansierades av Energiforsks betongtekniska program. Övriga finansiärer var Nordic Galvanizers AB, Outokumpu Stainless AB, Galvano A/S, Vik Ørsta A/S SBUF, BEFO och Trafikverket. Projektet syftade till att undersöka korrosionshårdigheten hos olika typer av bergbultar under exponering av kloridhaltigt grundvatten. Fokus var på bergbultar i tunnlar och bergtrum. Försök utfördes under två år i två vägtunnlar där bergbultar av olika typer göts in i anläggningscement. De typer av bergbultar som undersöktes var, obelagt kolstål, rostfria bultar, samt varmförzinkade bergbultar med och utan epoxibeläggning. Resultaten visade att bergbultar av kolstål samt varmförzinkade bergbultar är olämpliga då höga kloridhalter i grundvattnet inte kan uteslutas. Både rostfria bergbultar samt varmförzinkade bergbultar med epoxibeläggning visade god korrosionshårdighet och inga synliga angrepp kunde konstateras efter två års exponering.

”Korrosionsprovning av olika typer av bergbultar i tunnlar – Långtidsexponering” [28] var en direkt fortsättning av ”Korrosionsprovning av olika typer av bergbultar”, där ett antal av bergbultarna från föregående projekt hade lämnats kvar för långtidsexponering. Efter totalt åtta års exponering på de båda testplatserna togs samtliga kvarvarande bergbultar ut och analyserades. Resultaten vare desamma som för föregående projekt, d.v.s. samtliga typer av korrosionsskydd klarade av exponeringsmiljön i de båda tunnlarerna. Ingen synlig korrosion kunde påvisas på de delar av provkropparna som antingen varit ingjutna i cement eller som varit fritt exponerade inne i berget. De delarna av bergbultarna av kolstål som exponerats fritt i de kloridhaltiga tunnelmiljöerna var angripna av korrosion. Övriga provkroppar var i god kondition även i de fritt exponerade delarna. Zinksiktet på de varmförzinkade provkropparna hade degraderats relativt snabbt både i kontakt med cementet och i de fritt exponerade delarna i tunnelmiljö.

”Corrosion of steel in concrete at various moisture and chloride levels” [34], var en licentiatavhandling i ett pågående doktorandprojekt på Lunds Tekniska Högskola och Swerea Kimab. I projektet ingick en omfattande försöksserie där stål ingjutet i bruk innehållande klorider exponerades för klimat med 75% till 100% RF. Även ett dynamiskt klimat där RF varierades mellan 75% och 100% undersöktes. För de statiska klimatförhållandena visade resultaten att för kloridhalter i bruket understigande 1% av cementvikten förekom ingen korrosion. Vid högre kloridhalter var korrosionshastigheten störst i intervallet 93% – 97%. I dessa fall hade exponeringstiden varit 3 månader. Vid en exponeringstid på 15 månader visade resultaten att maximal korrosionshastighet uppkom vid 97% RF för bruk med kloridhalter mellan 0,2% och 1,0% av cementvikten. Resultaten visade alltså att även RF i det omgivande klimatet bör inkluderas vid bestämning av kloridtröskelvärden. Resultaten från de prover som exponerats för dynamiska förhållanden visade att korrosion initieras vid lägre kloridhalter än för statiska förhållanden. I projektet utfördes även fältmätningar av korrosionspotentialer i kylvattenvägarna Ringhals. Detta var samma mätningar som redovisas i [27].

”Reparationsmetoder för kärnkraftsindustrin” [35] utfördes som en pilotstudie där en kartläggning genomfördes av både utförda och kommande reparationsobjekt i kylvattenvägarna på svenska kärnkraftverk. En litteraturstudie innefattades olika skadetyper i betongkonstruktioner, reparationsmetoder och andra motverkande åtgärder såsom katodiskt skydd och olika tillsatsmedel till den färskbetongen. Vidare presenterades underhållsinstruktionerna i Ringhals tillsammans med beskrivningar av genomförda tillståndsbedömningar och reparationer i kylvattenvägarna i Ringhals.

Exempel på genomförda tillståndsbedömningar med tillhörande åtgärder i kylvattenvägarna presenterades även för kärnkraftverken i Oskarshamn och Forsmark. Den enda reparationsmetod som kunde identifieras från genomgången var avverkning av skadad betong och sedan att ersätta skadad betong och armering. Slutligen presenterades hur reparationsprocessen av betongkonstruktioner beskrivs i Rehabcon samt en genomgång av reparationsstandarderna i den europeiska normen Eurocode.

En del av det europeiska samarbetsprojektet ACCEPPT [6] behandlade skador och reparationsmetoder på tätplåten i reaktorinneslutningar. Genomgången av observerade skador visade att de främsta skadeorsakerna på tätplåten är korrosionsskador samt sprickor i svetsar. Sammanställningen av reparationsmetoder visade att få reparationsmetoder för åtgärd av skadad tätplåt har publicerats. De reparationsmetoder som hittades i litteraturstudien presenterades i rapporten.

Projektet "Armeringskorrosion i kylvattenvägar inom kärnkraften – etapp I" [36] syftade till att utreda orsaken till de omfattande korrosionsskador som observerats vid tillståndsbedömningar av kylvattenvägarna i Oskarshamns och Ringhals kärnkraftverk. Rostutfällningar har observerats vid flera ställen i kylvattenvägarna och vid friläggning av armeringen visade det sig att i vissa fall så var armeringen helt oskadd och i vissa fall helt bortkorroderad. Den lokala korrosionshastigheten har således i vissa fall varit väldigt hög, vilket inte enbart kan förklaras med kloridinitierad armeringskorrosion. Två processer identifierades som möjliga orsaker till skadorna: läckströmskorrosion och galvanisk korrosion. Mätningar i kylkanalerna kunde inte fastställa om armeringen är påverkad av läckströmmar från intilliggande likströmskällor. Mätningar av armeringens elektrokemiska potential visade att armeringen hade ovanligt ädel potential. Orsaken till detta är att armeringen är elektriskt sammankopplad med komponenter av betydligt mer ädla metaller, såsom rostfria pumpar eller luckor och titanrör i kondensorn. Labbförsök visade att korrosionshastigheterna ökade kraftigt då kolstål i betong sammankopplades med antingen titan eller rostfritt stål. Katodiskt skydd genom matning av skyddsström installerades i kylvattenvägarna till Oskarshamn 3 i ett försök att minska korrosionsangreppen. Preliminära resultat visade att den galvaniska påverkan på armeringen från komponenter av ädlare metaller kunde minskas kraftigt.

Etapp II av projektet "Armeringskorrosion i kylvattenvägar" [37] syftade till att undersöka hur stor inverkan eventuella läckströmmar och luftningsceller, d.v.s. skillnad i syrekonzentration, har på de korrosionsangrepp som studerats i etapp I. Vidare utvärderades de försök med katodiskt skydd som startas i etapp I. Genom mätningar av korrosionspotentialer i kylkanalerna kunde någon påverkan av läckströmmar inte påvisas. Laboratorieförsök visade att luftningsceller inte påverkar korrosionshastigheten på ingjutet stål i betong. Laboratorieförsök utfördes även där väl ingjutna armeringsjärn var i kontakt med armeringsjärn med bristfällig ingjutning och utsatta för kloridhaltigt vatten. Resultaten visade visserligen att korrosionshastigheten ökade, dock var ökningen betydligt lägre än för armeringsjärn som är elektriskt sammankopplade med t.ex. rostfritt stål. En fullskalig installation av ett katodiskt skyddssystem med påtryckt ström i kylkanalerna till Oskarshamn 3 visade att korrosionspotentialen kunde sänkas till skyddspotential vilket kraftigt minskar den galvaniska påverkan av ädlare metaller på den ingjutna armeringen. Detta minskar kraftigt korrosionsangreppen på armeringen.

I projektet "Systematisk genomgång av potentiella korrosionsrisker för ingjuten metallisk tätplåt i reaktorinneslutningar" [38] utfördes en omfattande genomgång av

potentiella korrosionsprocesser som kan uppkomma på tätplåten i reaktorinneslutningar. Särskilt fokus var på de fuktförhållanden som identifierats i tidigare projekt [11], [12] och [14], d.v.s. att fuktnivåerna i betongen vid tätplåten är betydligt högre än vad man tidigare trott. Detta har tolkats som en ökad risk för korrosionsangrepp i t.ex. oavsiktliga hålrum vid tätplåten. Resultaten av analysen visade att risken för korrosion på tätplåt ingjuten i defektfri betong är obefintlig. För att korrosion ska kunna initieras på tätplåten krävs någon form av kavitet i betongen närmast tätplåten. En förutsättning för att korrosion ska kunna initieras i en helt sluten kavitet är en hög relativ fuktighet i betongen. Risken för kritiska korrosionsangrepp ökar betydligt för en kavitet med en relativt stor volym som är delvis vattenfylld. Dessutom krävs det att kaviteten innehåller någon heterogenitet eller främmande material som bidrar till att skapa en för korrosion gynnsam miljö. Störst risk sker i en kavitet som dessutom kommunicerar med omgivande miljö, via t.ex. en spricka, och där t.ex. processvatten flödar genom sprickan. En litteraturgenomgång av rapporterade skador på tätplåtar både i Sverige och internationellt visade att det är vid dessa förutsättningar som korrosionsskador uppkommit. Den genomförda analysen resulterade i att riskzoner för korrosion kunde identifieras, t.ex. utsidan av tätplåten vid genomföringar och gjutskarvar eller vid övergång mellan ingjuten och fritt exponerad tätplåt.

I projektet "Utredning av risk för korrosion i wet-well mellan rostfritt stål och kolstål" [65] undersöktes riskerna för uppkomsten av galvanisk korrosion av tätplåten i reaktorinneslutningarna till BWR-reaktorer. I dessa inneslutningar ansluter tätplåten via en s.k. blandskarv till bassängplåtarna av rostfritt stål i wet-well. Resultaten visade att risken för galvanisk korrosion i blandskarven är mycket liten under normala driftförhållanden. Detta beror främst på att tätplåten är ingjuten i betong vilket är en starkt alkalisk miljö som passiverar kolstålets yta. Dessutom är tillgången på syre mycket begränsad, eftersom diffusionen genom betongen är låg och atmosfären i inneslutningen till stor del består av kvävgas. Så länge som passiveringen av tätplåten bibehålls så uppstår ingen signifikant potentialskillnad gentemot det rostfria stålet. Därmed är själva drivkraften för galvanisk korrosion eliminerad. Risk för korrosion på tätplåten kan dock uppkomma om passivering av någon anledning bryts. Detta kan exempelvis ske genom vatteninträning i håligheter eller sprickor nära plåten, tillförsel av syre eller i närvaro av föroreningar såsom klorider.

Projektet "Ytbehandling av kärntekniska betongkonstruktioner" [66] behandlade hur kärntekniska betongkonstruktioner påverkas av olika miljöer och hur detta är kopplat till funktionen hos befintliga ytskydd. Den absolut vanligaste förekommande ytbehandlingen av kärntekniska betongkonstruktioner är beläggning med epoxibaserade system. Syftet med projektet var att kartlägga förekommande skador och skadeorsaker på ytskydd och betongkonstruktioner, utvärdera nuvarande ytskyddssystem som används inom kärnkraften samt identifiera förbättringsbehov och nya potentiella ytskyddsteknologier. Arbetet utfördes genom en litteraturstudie och insamlade driftserfarenheter från de nordiska kärnkraftverken. Eftersom fukt- eller vattenrelaterade skador är vanligast förekommande på ytbehandlade betongkonstruktioner är ytskydd som motverkar vatteninträning avgörande. Resultaten visade att valet av ytskydd och kvaliteten på utförandet är avgörande för livslängden på ytskyddet. Baserat på resultaten så rekommenderades att alternativa ytskyddsteknologier testas och utvärderas och att de betongytor som i dagsläget är oskyddade utreds för applicering av lämpliga ytskyddssystem.

Projektet "Träinducerad korrosion på ingjuten tätplåt" [67] baserades på resultaten från "Systematisk genomgång av potentiella korrosionsrisker för ingjuten metallisk tätplåt i reaktorinneslutningar" [38] där det konstaterats att korrosionsskador på tätplåten ofta orsakats av oavsiktligt ingjutna objekt. I detta fall undersöktes hur korrosion initieras och utvecklas på grund av ingjutna träbitar i kontakt med tätplåten. Undersökningen utfördes uteslutande genom laboratorieförsök där korrosionen på ingjutna plåtbitar i kontakt med träbitar undersöktes. Olika fuktinnehåll, storlekar samt trätyper undersöktes. Resultaten visade att träbitar ingjutna i betong kan skapa lokala, galvaniska korrosionssystem som under rätt förhållanden leder till korrosion av ingjutna plåtar. Viktiga parametrar för initieringen var hög fukthalt i träet, volymen på träbiten samt anliggning mellan trä och stål. Ett viktigt resultat var att korrosionshastigheten var väldigt hög i ett tidigt skede med korrosionshastigheter på upp till flera mm per år initialt. Detta innebär att mindre oavsiktligt ingjutna träbitar kan få allvarliga konsekvenser, vilket tidigare erfarenheter bekräftar.

Erfarenheter från både infrastrukturkonstruktioner och kärntekniska anläggningar visar att lokala reparationer av skador i betongkonstruktioner ofta misslyckas och leder till att nya skador utvecklas efter relativt kort tid. Detta beror i många fall på att faktorer som påverkar korrosion inte hanteras korrekt i gränzonen mellan gammal och ny betong. Projektet "Bestämning av korrosionsskyddsförmågan för olika reparationsbruk vid partiella reparationer" [68] utfördes i samarbete med flera andra aktörer och behandlade hur olika reparationsbruk påverkar korrosion på armering vid partiella betongreparationer. Arbetet utfördes genom laboratorieförsök, fältförsök samt en genomgång av verkliga fall för att identifiera vilka material- och utförandefaktorer som styr korrosionsskyddet. I både laboratorie- och fältförsöken undersöktes olika reparationsmaterials skyddsförmåga genom att gjuta in armering i mindre provkroppar. Provkropparna utsattes för klorider, antingen genom ingjutna klorider eller genom insugning av kloridhaltigt vatten. Resultaten visade att reparationsbrukens korrosionsskyddande egenskaper varierade kraftigt, särskilt avseende resistivitet, kloridbindande förmåga samt porstrukturen i bruket. De reparationsbruk som uppvisade bäst korrosionsskyddande egenskaper innehöll tillsatsmedel i form av korrosionsinhibitor. Ett annat viktigt resultat var att vid partiella reparationer uppkommer en särskild risk, den så kallade makrocellskorrosionen. Den uppstår när ny, passiverad armering i reparationsbruk kopplas ihop med äldre, korrosionsaktiv armering i kloridhaltig betong. Detta kan medföra accelererad korrosion i den gamla betongen, trots att lagningen i sig är korrekt utförd. Den övergripande slutsatsen från undersökningarna var att följande faktorer är avgörande för en hållbar reparation, rätt val av reparationsbruk, tillräckligt täcksikt för armeringen, god utförandekvalitet samt vid behov komplettering med katodiskt skydd.

7 Förvaltning av betongkonstruktioner

7.1 INLEDNING

Åldringshantering och förvaltning av kärnkraftverkens betongkonstruktioner blir alltmer viktig då verken åldras samtliga har gått in i långtidsdrift, LTO (long time operation), vilket innebär en drifttid som överstiger 40 år. En effektiv åldringshantering avseende ekonomisk och säker drift är att utveckla en förvaltningsstrategi för betongkonstruktionerna. I detta inkluderas även att ställa upp acceptanskriterier för olika konstruktioners funktion samt hur inspektioner och statusbedömningar ska utföras.

7.2 PROJEKT UTFÖRDA INOM PROGRAMMET

De projekt som fokuserat på förvaltning av betongkonstruktioner är följande:

- Acceptance criteria for the maintenance of concrete structures in the nuclear industry [39].
- Förvaltning av kärnkraftverkens betongkonstruktioner [40].
- Effektivisering av underhåll och förvaltning av betongkonstruktioner (ej publicerad offentligt).
- Konstruktionsförutsättningar för byggnader [69].
- Making inspections of concrete structures in nuclear powerplants more efficient [70].
- Remote inspections of concrete structures [71].
- Instrumentation of nuclear concrete containment buildings [72].
- Methods for collection and evaluation of concrete data within the nuclear industry [73].

7.3 SAMMANFATTNING AV GENOMFÖRDA PROJEKT

Projektet "Acceptance criteria for the maintenance of concrete structures in the nuclear industry" [39] syftade till att identifiera och sammanställa information kring befintliga acceptanskriterier som utlöser underhållsåtgärder av armerade betongkonstruktioner på kärntekniska anläggningar. Studien omfattade en litteraturgenomgång av bl.a. gällande standarder och riktlinjer som används inom det betongtekniska området, erfarenheter från internationella studier samt utförarnas egna erfarenheter. Sammanställningen visade att en betydande del av en tillståndsbedömning av en betongkonstruktion är begränsad till användning av okulära besiktningar. En okulär inspektion är subjektiv vilket medför att bedömningen oftast är kvalitativ. De flesta acceptanskriterier är därför framtagna för kvalitativ bedömning av armerade betongkonstruktioner. En betongkonstruktions beständighet är en funktion av dess beståndsdelar, dess kvalitet, konstruktionens placering och de miljömässiga belastningsförhållandena. Detta medför att beständigheten måste utvärderas separat för varje konstruktion och även för olika strukturella delar av samma konstruktion. Av denna anledning är det oftast dagens kunskapsnivå som ligger till grund för

bedömningen av en betongkonstruktions beständighet. Det går därför inte att fastställa allmänna acceptanskriterier för betongkonstruktioner som täcker in alla nivåer av en tillståndsbedömning. Studien innehöll även en lista över forsknings- och utvecklingsbehov inom området.

I "Förvaltning av kärnkraftverkens betongkonstruktioner" [40] togs ett förslag på utformning av ett förvaltningssystem för betongkonstruktionerna i kärnkraftverkens kylvattenvägar och turbinbyggnader fram. Förvaltningssystemet som togs fram var i stor utsträckning baserat på Trafikverkets förvaltningssystem för broar och tunnlar, BaTMan (Bridge and tunnel management). Trafikverkets förvaltningssystem för underhåll av byggnadsverk innefattar olika typer av inspektioner för att bedöma en konstruktions nuvarande tillstånd. Utifrån inspektionens resultat klassas sedan konstruktionen eller dess olika delkomponenter in i olika tillståndsklasser vilka styr om och i så fall vilka åtgärder som ska vidtas för att upprätthålla konstruktionens status. Trafikverket har även sammanställt ett stort antal mätmetoder för att kvantifiera olika typer av skador och degraderingar och som ska användas i samband med en inspektion. Exempel på mätmetoder som anges är mätning av tvärsnittsminskning av armering p.g.a. korrosion, bestämning av kloridhalter i betong och mätning av minskningen av ett element p.g.a. spjälkning eller vittring. För varje mätmetod finns även gränsvärden framtagna för den undersökta skadan, t.ex. så är gränsvärdet för reduktion av armeringsarea p.g.a. korrosion en minskning på 20 % och gränsvärdet för vattenlösliga klorider i är 0,30 % av cementvikten i nivå med armeringen. Som en grund för kärnkraftverkens förvaltningssystem togs en översiktlig beskrivning av ingående komponenter i kylvattenvägarna och turbinbyggnaden fram. För de mätmetoder som är relevanta för kärnkraftverkens betongkonstruktioner gavs en kort metodbeskrivning. Vissa av mätmetoderna anpassades för att passa konstruktioner som är unika för kärnkraftverk. De parametrar som mätmetoderna mäter samt deras gränsvärden rekommenderades att även användas som acceptanskriterier och ska därmed utgöra grunden för tillståndsklassningen i förvaltningssystemet. Slutligen gavs förslag på utformning av inspektionsprotokoll som är lämpliga att använda inom kärnkraftsindustrin.

I projektet "Konstruktionsförutsättningar för byggnader" [69] utvecklades en gemensam struktur för KFB-dokument inom kärntekniska anläggningar. KFB-dokumentet fungerar som ett centralt underlag vid projektering, verifiering och förvaltning av kärntekniska byggnader. Bakgrunden var att det saknades en branschgemensam standard, vilket medförde att tillståndshavarna utvecklade sina egna dokument. Följden blev att de olika tillståndshavarna utvecklade egna dokument med varierande innehåll och omfattning, vilket bl.a. försvårade jämförelse och uppföljning. Syftet med projektet var att ta fram en enhetlig mall med instruktioner för hur KFB-dokument ska utformas, baserat på befintliga underlag från svenska kärnkraftverk samt erfarenhet från liknande projekt. Den framtagna mallen omfattade bland annat teknisk beskrivning av byggnaderna, tillämpliga normer, klassningar utifrån t.ex. säkerhets- och seismiskklass, ingående material samt geotekniska förutsättningar. Den inkluderar även krav för dimensionering i bruks- och brottgränstillstånd samt hantering av laster, inklusive olyckslaster och extrema händelser såsom jordbävning. En viktig aspekt var kopplingen till säkerhetsanalyserna för byggnaderna, där byggnader ska kunna upprätthålla sin funktion även vid störningar och olyckor.

Projektet "Making inspections of concrete structures in nuclear powerplants more efficient" [70] behandlade effektivisering av de okulära inspektioner av

betongkonstruktioner som utförs rutinmässigt på kärntekniska anläggningar. Huvudfokuset var på effektivisering av dokumentationsprocessen. Bakgrunden till projektet var att inspektionerna till stor del utförs helt manuellt, vilket innebär att dokumentationen av resultaten blir väldigt tidskrävande. Syftet med projektet var att identifiera och utvärdera metoder och digitala verktyg som kan förenkla arbetet och frigöra tid för mer kvalificerade bedömningar. Arbetet baserades på litteraturstudier samt intervjuer och analyser av befintliga arbetsmetoder inom branschen. Resultaten visade att dokumentation och efterarbete kan uppgå till cirka 60 % av den totala arbetstiden för en inspektion. Vidare visade resultaten att de största förbättringspotentialerna fanns i att digitalisera dokumentationsprocessen. Detta kan exempelvis utföras genom användandet av surfplattor där resultatet från inspektionen kan föras in direkt i inspektionsprotokollet, vilket även kan kompletteras med funktioner som taligenkänning och direkt infogning av bilder. Även förbättrade rapportmallar och tydligare standardisering av hela processen kan bidra till att minska variationer både mellan inspektörer och inspektionstillfällen. Även mer avancerade tillämpningar diskuterades kortfattat såsom drönarteknologi för att inspektera svåråtkomliga områden och följa skador över tid. Dessa kan ge högre kvalitet av inspektionerna men kräver betydligt större investeringar och förändringar i arbetssätt.

I projektet "Remote inspections of concrete structures" [71] undersöktes olika möjligheter för att utföras inspektioner av kärntekniska betongkonstruktioner på distans. Traditionellt utförs absoluta majoriteten av inspektionerna genom manuella okulära metoder på handnära avstånd, vilket innebär flertalet risker i framför allt svåråtkomliga eller farliga miljöer. Dessutom är de manuella metoderna både tidskrävande och kostsamma. Distansbaserade inspektionsmetoder erbjuder flertalet fördelar gentemot de manuella okulära inspektionerna genom att minska eller helt eliminera behovet av fysisk tillgång till konstruktionerna. Dessutom möjliggörs mer kontinuerlig övervakning av konstruktionerna. Sammanställningen av tillgänglig teknik visade flertalet olika tekniker inom distansinspektion som vanligtvis kombineras med drönar- eller robotteknik. Vanliga tekniker är olika bildbaserade metoder som fotogrammetri och 3D-scanning, vilka möjliggör detaljerad geometrisk dokumentation av betongkonstruktionerna. Dessa metoder kan uppnå mycket hög geometrisk noggrannhet och kan användas för att identifiera sprickor och andra ytdefekter. Termografi är ytterligare en distansmetod som kan upptäcka temperaturvariationer och därmed potentiellt indirekt identifiera defekter såsom delaminering. Även olika akustiska metoder och radarbaserade tekniker kan användas för att undersöka konstruktioner utan behov av direkt fysisk kontakt. Oavsett val av teknik bör dessa kombineras med någon form av artificiell intelligens för exempelvis bildanalys och automatiserad skadedetektering. Det rekommenderades fortsatt utveckling av detta område där flertalet olika tekniker kombineras för vidare applicering och integrering av teknikerna inom kärnkraftsbranschen.

Projektet "Instrumentation of nuclear concrete containment buildings" [72] behandlade instrumentering av kärntekniska betongkonstruktioner i syfte att övervaka konstruktionernas status över tid. Inriktningen på projektet var uteslutande instrumentering av befintliga kärnkraftverk och inte i samband med nybyggnation. Arbetet utfördes genom en sammanställning över instrumenteringssystem i befintliga kärnkraftverk både i Sverige och internationellt. Vidare presenterades olika typer av givare som kan användas för instrumentering av betongkonstruktioner. Givarna delades in efter användningsområde i två olika kategorier, detektorer och stödinstrumentering. Detektorer är givare som används för att upptäcka och identifiera en s.k. felmod i konstruktionen. En felmod innebär en händelse där konstruktionen

förlorar sin funktion. Detektorer är givare som mäter parametrar kopplade till olika felmoder. Det kan exempelvis vara givare som övervakar konstruktionens globala beteende eller givare som mäter en specifik skada eller defekt i konstruktionen. Stödinstrumentering är givare som syftar till att samla in information kring konstruktionen, exempelvis temperatur- och fuktgivare. Uppbyggnaden av själva mätsystemet, bl.a. loggning av data, strömförsörjning, felsökning och underhåll av systemet diskuterades också. Slutligen presenterades ett förslag till instrumentering av befintliga reaktorinneslutningar. Förslaget innehöll rekommendationer på typer av givare som detektorer samt stödinstrumentering.

Projektet "Methods for collection and evaluation of concrete data within the nuclear industry" [73] behandlade hur insamling, hantering och analys av den data som samlas in i samband med inspektioner av betongkonstruktioner vid kärnkraftsanläggningar kan förbättras. Arbetet utfördes genom sammanställning av arbetssätten vid de nordiska kärnkraftverken samt litteraturstudier av lämpliga tekniker. Som tidigare konstaterats i [70] sker datainsamlingen fortfarande till stor del manuellt där dokumentationen från inspektioner förs över till digitala rapporter i efterhand. Denna information lagras sedan i olika system och majoriteten av datan finns i ostrukturerad form i separata rapporter. Detta medför svårigheter att söka, jämföra och analysera data över tid. Resultaten från sammanställningen visade att arbetssätten mellan de olika tillståndshavarna skiljer sig åt och att en standardiserad metod för insamling och hantering av data saknas. Baserat på resultaten så rekommenderades flera åtgärder. Primärt är att digitalisera själva datainsamlingen i samband med inspektioner, exempelvis genom att använda surfplattor. Den insamlade datan bör samlas i en central strukturerad databas, vilket gör datan mer sökbar, spårbar och användbar för analys. För analys och visualisering föreslås användning av s.k. Business Intelligence-verktyg, som möjliggör trendanalys och prognoser. Vidare rekommenderades även fram potentialen i artificiell intelligens för att extrahera information ur textbaserade rapporter och därigenom göra historiska data mer tillgängliga. Slutligen presenterades olika statistiska analysmetoder för att identifiera trender och prognosticera framtida beteenden eller tillstånd.

8 Studier av materialegenskaper

8.1 INLEDNING

Studier av olika materials egenskaper har inom betongprogrammet främst inriktat sig på betongens egenskaper oftast i samverkan med andra material eller i de särskilda miljöer som råder i kärntekniska anläggningar såsom förhöjda temperaturer.

8.2 PROJEKT UTFÖRDA INOM PROGRAMMET

De projekt som fokuserat på studier av materialegenskaper är följande:

- Gasinträning i reaktorinneslutningar av betong - Mätningar och modellering [38],
- Inverkan på betong av borsyrahaltigt vatten och ingjutna borföreningar [42],
- Inverkan av salter på betong - Kemisk och fysikalisk påverkan [43],
- Behovsstudie av polymera material i betongkonstruktioner [44],
- Utvärdering av egenskaperna hos fogband i mjukjord PVC för betongkonstruktioner – Korrelation mellan accelererad åldring, långtidsexponering och fogband i drift, [45],
- Provning och analys av nya och åldrade fogband [46],
- Betongens hållfasthet vid moderata temperaturbelastningar [47],
- ACCEPPT, Ageing of concrete and civil structures within nuclear power plants [6],
- Infästningar i betongkonstruktioner [48],
- Vattenavvisande impregnering av betong i kärnkraftsmiljö [49].
- Compilation of concrete test data from the nuclear industry [74].
- Betongprovningar i nedlagda reaktorinneslutningar [75].
- Shear force capacity of existing concrete slabs [76].

8.3 SAMMANFATTNING AV GENOMFÖRDA PROJEKT

”Gasinträning i reaktorinneslutningar av betong - Mätningar och modellering” [38], syftade till att ta fram en modell för kvantifiering av tryckförloppet i betongen i en reaktorinneslutning under ett trycktest. Mätningar av trycket i betongen på olika nivåer i inneslutningsväggen utfördes under två trycktester i Ringhals. Mätningarna visade att det sker en tryckökning i betongen, vilket kan förklara en del av den tryckminskning som sker i själva inneslutningen under trycktestet. En teoretisk modell utvecklades som beskrev tryckökningen i betongens porsystem. Denna modell verifierades även mot de utförda tryckmätningarna i betongen. En trycksänkning i inneslutningen behöver således inte tyda på en otät inneslutning utan kan bero på en långsam tryckökning i betongens porsystem vilket minskar gasvolymen och därmed trycket i inneslutningen.

I rapporten "Inverkan på betong av borsyrahaltigt vatten och ingjutna borföreningar" [42] undersöktes hur bor påverkar betongen i kärnkraftverk. Det är vanligt att borsyra tillsätts både vattnet i bränslebassänger samt att borföreningar gjuts in i betongen på grund av dess förmåga att bromsa neutroner från det radioaktiva bränslet. En litteraturstudie inom området visade att borsyra i vattnet på bränslebassänger har en försumbar inverkan på betongen. En litteraturstudie över inverkan av ingjutna borföreningar visade att få studier utförts inom området. Främst påverkar lösliga borföreningar betongens hårdnande. Svårslösliga borföreningar har endast en marginell/försumbar inverkan på betongs egenskaper.

Rapporten "Inverkan av salter på betong - Kemisk och fysikalisk påverkan" [43] innehåller en beskrivning av både betong och ballast samt en genomgång av cementpastans egenskaper. Huvuddelen av rapporten innehåller en omfattande genomgång av hur olika typer av salter, både kemiskt och fysikaliskt, påverkar betong. Sammanfattningen visade att sulfatangrepp är det absolut allvarigaste kemiska saltangreppet för en betongkonstruktion som i vissa fall kan leda till total förstörelse av betongen. Det vanligaste fysikaliska saltangreppet är frostangrepp i närvaro av salter. Frostangrepp förvärras nämligen påtagligt när betongen utsätts för saltlösningar med relativt låga saltkoncentrationer, vilket kan leda till kraftig avskalning av betongytan.

I "Behovsstudie av polymera material i betongkonstruktioner", [44] utfördes en inventering inom både vattenkraft och kärnkraftsindustrin avseende behovet att bygga upp en kunskap kring polymera material i betongkonstruktioner med avseende på åldring av materialen. Projektet finansierades av Energiforsk två betongtekniska program inom kärnkraft och vattenkraft. Gemensamt för kärnkraftverken var att man önskade en ökad kunskap om framför allt genomföringar av polymera material, till exempel skydds bälgar, och fogmassor. En ökad förståelse för åldringen av dessa komponenter önskades för att kunna bedöma när de kan anses förbrukade och således behöver bytas ut.

"Utvärdering av egenskaperna hos fogband i mjukgjord PVC för betongkonstruktioner – Korrelation mellan accelererad åldring, långtidsexponering och fogband i drift", [45] utfördes som ett resultat av ovan beskrivna behovsstudie [44]. [44] visade att det fanns ett stort intresse både inom vattenkraften och inom kärnkraften för fogband i mjukgjord PVC (polyvinylklorid) i betongkonstruktioner. Gamla fogband som suttit i både kärnkraftverk och kraftverksdammar i cirka 30 år undersöktes tillsammans med ett antal fogband som i laboratorieförsök utsatts för en alkalisk miljö i 20 år. Resultaten visade att förlust av mjukgöraren i fogbanden med stor sannolikhet var den största bidragande orsaken till att fogband åldras. En möjlig orsak till att mjukgöraren bryts ner är den alkaliska miljön som råder i betongkonstruktioner.

I "Provning och analys av nya och åldrade fogband" [46] utfördes mer omfattande provningar av olika typer av fogband, bland annat vidare försök på de som undersöktes i [45] och på nya fogband. Fogbanden exponerades för olika temperaturer och fuktigheter samt både UV-ljus och alkalisk miljö. Resultaten visade att PVC innehållande ftalatmjukgörare inte är lämpliga i betongkonstruktioner då deras egenskaper snabbt försämras med tiden i dessa miljöer. Vid bedömning om ett fogband av PVC är lämpligt är det alltså avgörande vilken mjukgörare som använts. För fogband av andra gummimaterial är det brist på erfarenheter över lång tid och mer forskning krävs för att identifiera material som är lämpliga för användning i betongkonstruktioner. I dagsläget är det inte möjligt att genomföra tillförlitliga

statusbedömningar av fogband i drift då det först tydligt måste klargöras vilka egenskaper som begränsar ett fogbands funktion.

”Betongens hållfasthet vid moderata temperaturbelastningar” [47] var ett examensarbete som utfördes vid Lunds Tekniska Högskola. Syftet med projektet var att undersöka hur de förhöjda temperaturerna, 66-120°C, som kan uppkomma i en reaktorinneslutning under drift påverkar betongens mekaniska egenskaper. Detta utfördes dels genom en litteraturstudie och dels genom laboratorieförsök där provkroppar av betong utsattes för olika temperaturer. Resultaten visade att betong med liknande sammansättning som i svenska reaktorinneslutningar har god motståndskraft mot moderata temperaturbelastningar och att detta inte påverkar betongen i någon större utsträckning.

I det europeiska samarbetsprojektet ACCEPPT [6] utfördes en sammanställning över skador på betongkonstruktioner inom kärnkraftindustrin som rapporterats i litteraturen. Dessutom beskrevs olika nedbrytningsmekanismer för betongkonstruktioner och en bedömning av deras relevans för kärntekniska betongkonstruktioner. Sammanställningen visade att väldigt få skador rapporterats på betongkonstruktionerna i reaktorinneslutningar. De skador som rapporterats beror till största delen på misstag under byggtiden och inte på degradering av materialen över tid.

Doktorandprojektet ”Infästningar i betongkonstruktioner” [48] utfördes vid avdelningen för konstruktionsteknik vid LTU. Projektets syfte var att modellera krafter och deformationer i befintliga och nya infästningar och att studera hur eventuella sprickor i betongen inverkar på bärförmåga och styvhet. I en del av projektet undersöktes hur bärförmågan för infästningar belastade i drag påverkas av konstruktionens tjocklek, storleken på infästningens huvud samt av armeringen i konstruktionen. Resultaten visade att bärförmågan ökade med konstruktionens styvhet, det vill säga en ökad mängd armering och/eller ökad tjocklek på konstruktionen. Vidare ökar förankringskapaciteten med en ökning av storleken på infästningens huvud. För att ta hänsyn till inverkan av storleken på infästningens huvud och konstruktionens tjocklek föreslogs modifieringar av europeiska konstruktionsnormen.

”Vattenavvisande impregnering av betong i kärnkraftsmiljö” [49] syftade till att undersöka om och i så fall var det skulle finnas fördelar med att använda vattenavvisande impregnering av betongkonstruktioner i förebyggande syfte inom kärnkraftindustrin. Detta inkluderade även att identifiera de miljöer där det i så fall rent praktiskt skulle vara möjligt att använda metoden. Vattenavvisande impregnering används i dagsläget på betongkonstruktioner för att främst göra ytskiktet vattenavstötande och därmed förhindra inträngning av klorider i betongen. Detta kan även minska effekterna av vissa skademekanismer genom att påverka konstruktionens fuktnivå. Fyra olika miljözoner identifierades där en bedömning gjordes av vad som krävs för att uppnå avsedd skyddseffekt med impregnering samt vilka förutsättningar som ställs på betongens fuktnivå och täthet. Resultaten visade att impregnering sannolikt är en metod som går att använda på betongen i kärnkraftverkens kylvattenvägar. Impregnering är således en bra metod för att begränsa kloridtransport in i betongen. Fuktnivån i betongen i kylvattenvägarna kommer dock sannolikt inte minska av en impregnering. Impregnering har även ingen effekt mot pågående armeringskorrosion eller då betongen utsätts för höga kloridkoncentrationer.

I projektet "Compilation of concrete test data from the nuclear industry" [74] sammanställdes data från olika typer av provningar på extraherade betongprovkroppar som utförts på de nordiska kärnkraftverken. Syftet med sammanställningen var att samla in och strukturera befintliga testresultat i en gemensam databas. Databasen kan sedan användas för att t.ex. förbättra tillförlitligheten i analyser genom att basera dessa på verklig materialdata i stället för nominella värden. Fokuset var främst på säkerhetsklassade byggnader där information om provningstyp, resultat och hur provtagningen genomförts har inkluderats. Totalt sammanställdes resultat från 215 provningar där de äldsta utfördes i samband med byggnationen av anläggningarna. De vanligaste provningarna avsåg bestämning av betongens tryckhållfasthet och kloridinnehåll, vilka tillsammans utgör ungefär hälften av datamängden. Andra provningar omfattade karbonatiseringsdjup, vatteninträngning, spräckhållfasthet samt tunnslipsanalyser. Majoriteten av provningarna har utförts på borrhärdor som tagits från olika delar av konstruktionerna. Det konstaterades att den sammanställda datan var behäftad med vissa brister, främst så saknas ofta information kring de enskilda provningsresultaten, bl.a. om syftet med provningen. Det rekommenderades därför vidare arbete för att komplettera databasen med ytterligare data samt att även analysera och utvärdera den redan insamlade datan. I dagsläget består datan endast av rådata från provningarna och för att kunna användas fullt ut i analyser krävs en viss bearbetning.

Projektet "Betongprovningar i nedlagda reaktorinneslutningar" [75] behandlade hur provningar av betong från inneslutningarna till den svenska reaktorer som tagits ur drift kan genomföras. De nedlagda reaktorerna utgör en unik möjlighet till att samla in materialdata och därmed kunna karakterisera betongen i de befintliga kärnkraftverken i Norden. Denna information är viktig för att kunna öka tillförlitligheten i analyser och utredningar av befintliga kärntekniska betongkonstruktioner genom att basera dessa på materialdata från verkliga konstruktioner. Det huvudsakliga syftet med projektet var att ta fram en generell provningsplan att använda som underlag för uttag och analys av betongprover från de nedlagda reaktorinneslutningarna. Resultatet blev en omfattande provningsstrategi som omfattar både rena materialprovningar samt mer avancerade provningar på själva konstruktionerna. Materialprovningarna som rekommenderades var både standardtester såsom bestämning av tryck- och draghållfasthet och mer avancerade såsom fuktprofil, karbonatisering och brottenergi. De avancerade provningar som ska utföras på hela konstruktionen innefattade exempelvis trycktester för att studera täthet, läckage och deformationer. Slutligen presenterades även en genomgång av möjliga provningar som kan genomföras i de anläggningar som i nuläget är nedlagda baserat på deras nuvarande tillstånd och det planerade rivningsarbetet.

I projektet "Shear force capacity of existing concrete slabs" [76] undersöktes hur den beräknade tvärkraftskapaciteten hos armerade betongplattor utan tvärkraftsarmering varierar mellan olika konstruktionsnormer. Det har observerats att befintliga betongplattor ofta har för låg tvärkraftskapacitet och även för låg bärförmåga avseende genomstansning enligt dagens norm, Eurokod 2. Syftet med projektet var att försöka förklara skillnaden i resultat mellan de olika normerna. Arbetet utfördes genom en litteraturstudie samt jämförande beräkningar för flera olika typfall. Resultaten visade att de äldre normerna ofta överskattar tvärkraftskapaciteten, i vissa fall så mycket som 25 %, jämfört med Eurokod 2. Skillnaderna mellan de olika normerna var som störst för plattor med måttlig tjocklek och vid lägre dragarmeringsinnehåll. Även för genomstansning överskattar vissa av de äldre normerna kapaciteten, särskilt för tunna plattor.

9 Avancerade beräkningsmetoder

9.1 INTRODUKTION

Avancerade beräkningsmetoder avser oftast numeriska beräkningar med finita element metoden (FEM). FEM är en numerisk metod för att lösa differentialekvationer och används inom konstruktionstekniken för att beräkna både linjära och icke-linjära strukturmekaniska problem. Exempel på problem kan vara spännings- och töjningsberäkningar i betongkonstruktioner eller undersökning av hur sprickbildning påverkar en betongkonstruktions beteende.

9.2 PROJEKT UTFÖRDA INOM PROGRAMMET

De projekt som fokuserat på studier av materialegenskaper är följande:

- Seismic analyses of nuclear facilities with interaction between structure and water - Comparison between methods to account for Fluid-Structure-Interaction (FSI) [50],
- ACCEPPT, Ageing of concrete and civil structures within nuclear power plants [6].
- Verifiering av struktur och fuktmekaniska beräkningsverktyg– Vercors etapp I [51],
- Instrumentation and modelling of a reactor containment building [52].
- Reaktorinneslutningars mekaniska långtidsbeteende - Vercors Fas II [77].
- Long-term mechanical analysis of nuclear reactor containments - Vercors Fas III [78].
- Syretransport genom reaktorinneslutningar och korrosion av ingjutna tätplåtar [79].
- Effect of room temperature differences on safety-related reinforced concrete floors and walls in the reactor building of OL 2 NPP [80].
- Direct spectra-to-spectra methods - alternative methods for development of floor response spectra at nuclear facilities in Sweden and Finland [81].

9.3 SAMMANFATTNING AV GENOMFÖRDA PROJEKT

”Seismic analyses of nuclear facilities with interaction between structure and water - Comparison between methods to account for Fluid-Structure-Interaction (FSI) ” [50] utgör en state-of-the-art rapport om olika sätt att hantera interaktionen mellan fluider och strukturer i numeriska beräkningar. En viktig tillämpning av fluid-struktur-interaktion (FSI) är vid seismiska analyser av kärntekniska betongkonstruktioner då de vattenfyllda bassängerna i inneslutningen inkluderas i analysen. Vattnet i bassängerna kommer ha en stor inverkan på konstruktionernas beteende. I rapporten sammanställs och beskrivs de metoder inom området som är av störst intresse för analyser av betongkonstruktioner. Två olika beräkningsexempel presenterades där flera av de metoder som ingick i sammanställningen applicerades. I det första exemplet

studerades vattnets rörelser i en vätskefylld tank. I det andra exemplet jämfördes olika metoder för att beskriva beteendet hos en BWR-inneslutning utsatt för två olika typer av jordbävningar, en typiskt svensk jordbävning och en typisk för den amerikanska västkusten. Resultaten från analyserna visade att vattnet har en stor inverkan på resultaten i analyserna och för att få tillförlitliga resultat från seismiska analyser av till exempel reaktorinneslutningar måste vattnet inkluderas i beräkningsmodellen.

I projektet ACCEPPT [6] genomfördes flertalet avancerade analyser, både numeriska och analytiska. I en del av projektet undersöktes samverkan mellan tätplåt och betong genom både försök på en laboriemodell samt med modellering av modellens beteende. Modellen bestod av en betongplatta med förankrad tätplåt, under försöket utsattes modellen för liknande belastningar som under en LOCA (loss of coolant accident). Resultaten visade att uppmätta töjningar var långt under töjningsgränsen för materialet och att ingen separation mellan tätplåt och betong kunde observeras. Modellering av samverkan mellan tätplåt och betong visade på god överensstämmelse med uppmätt beteende. Resultatet blev en modell som inkluderar effekterna av krypning och krympning i betongen för att beskriva tätplåtens beteende under LOCA belastning. Rekommendationen var att använda denna modell vid analyser av tätplåtens funktion över lång tid.

I en annan del av ACCEPPT modellerades beteendet hos en inneslutning till en tryckvattenreaktor under hela inneslutningens livslängd och resultatet jämfördes med töjnings- och deformationsmätningar som utförts på inneslutningen. Resultaten visade att både axisymmetriska och modellering i 3D kan beskriva töjnings- och spänningsförändringar i inneslutningen över lång tid. Detta inkluderar effekterna av krypning och krympning hos betongen, relaxation av spännstålet samt inverkan av fukt- och temperaturförändringar. Resultaten visade även att analyser av fukt- och temperaturtillstånden måste inkluderas i analyser av spännings- och töjningstillstånden i en reaktorinneslutning. En förutsättning för att utföra tillförlitliga analyser av en inneslutnings beteende är att ha tillgång till relevanta mätdata för att kunna verifiera både själva modellen och indatan till modellen. Detta innebär att det måste vara möjligt att utföra mätningar på själva konstruktionen men även finnas tillgång till tillförlitliga materialdata, till exempel från tester på små provkroppar.

Projektet " Verifiering av struktur och fuktmekaniska beräkningsverktyg" [51] var en del av en benchmarkövning för avancerade beräkningar. EDF (Électricité de France) har byggt en 1/3 skalmodell av en reaktorinneslutning i syfte att studera åldringsprocesser och deras påverkan på spännarmerade reaktorinneslutningar. Försök och mätningar kommer pågå under sju år, vilket ska motsvara 60 års drift för en inneslutning i full skala. Inneslutningen är försedd med ett omfattande instrumenteringssystem för övervakning och mätning av inneslutningens beteende över tid. Föreliggande projekt omfattade modellering av följande två delar av Vercors projektet: "konstruktionens beteende i tidigt skede och under själva åldrandet" samt "konstruktionens täthet till följd av åldrandet". Den tredje och sista delen "konstruktionens beteende under svåra haveriförhållanden" studeras i ett pågående projekt (maj 2019). Indata till beräkningarna såsom klimatdata, mekaniska egenskaper hos betongen samt geometrisk indata tillhandhålls av projektorganisationen kring Vercors. I föreliggande projekt utfördes simuleringar över temperaturutvecklingen i konstruktionen samt hur den relativa fuktigheten i betongen utvecklades över tid med start direkt efter gjutningen av betongen. Simuleringar utfördes även av inneslutningens deformation under tidig ålder fram till uppspanningen av spännkablarna samt den resulterande deformation orsakad av spännkablarna. De

ingående processerna i betongen som modellerades specifikt för att kunna simulera ovanstående var betongens hydratering, temperaturutveckling, fukttinhåll, hållfasthetstillväxt, krympning, krypning samt inverkan av krafterna i spännkablarna inkluderat relaxation av spännstålet. Resultaten från simuleringarna jämfördes sedan med mätdata som erhållits från Vercors avseende temperaturutveckling samt töjningar i konstruktionen. Vidare utfördes även en jämförelse mellan resultaten från övriga deltagare i benchmark-projektet. Resultaten visade att modellering med FEM kan användas för att beskriva det tidiga skedet i en betongkonstruktion avseende utveckling av både temperatur och deformationer med rimlig tillförlitlighet.

I projektet "Instrumentation and modelling of a reactor containment building" [52] togs ett förslag fram på ett instrumenteringsprogram för inneslutningen till Olkiluoto 2. Syftet med instrumenteringen var att mäta inneslutningens mekaniska beteende under drift samt i samband med trycktester. I kombination med en avancerad FE-beräkning och erhållna mätdata kan sedan t.ex. spännkrafterna i spännkablarna uppskattas. Instrumenteringsprogrammet utformades inte specifikt för Olkiluoto 2 utan mer generellt för att passa samtliga svenska och finska BWR inneslutningar med cementinjicerade spännkablarna. Det föreslagna instrumenteringsprogrammet baserades på en modellering av inneslutningens mekaniska beteende under ett trycktest där lämpliga positioner för instrumentering kunde identifieras utifrån modelleringens resultat. Töjningsgivare med tillhörande temperaturgivare samt pendlar föreslogs som lämpliga givare för att mäta deformationen i inneslutningen. Vidare gavs förslag på andra parametrar som är viktiga att mäta för att kunna utföra en mer avancerad FE-simulering av inneslutningen, t.ex. temperatur och RF i både inomhusluften i inneslutningen samt på vissa ställen i betongen.

Projektet "Reaktorinneslutningars mekaniska långtidsbeteende - Vercors Fas II" [77] var en fortsättning på arbetet i [51] som en del av det internationella benchmarkprojektet VERCORS som handlar om numerisk modellering av den franska skalmodellen av en reaktorinneslutning. Projektets huvudsakliga syfte är att förbättra förståelsen för hur beräkningsmodeller kan beskriva konstruktionens beteende över lång tid samt att jämföra modellerade resultat med uppmätt data. Projektet var indelat i tre huvuddelar: krypning och krympning i ung betong, långtidsdeformationer i reaktorinneslutningen vid upprepade trycktester, samt läckage genom betongkonstruktionen. Den numeriska modelleringen byggde på en multifysikalisk modell utvecklad i COMSOL Multiphysics. Modellen omfattade flera samverkande fenomen såsom temperaturvariationer, fukttransport, krympning och krypning i betong samt relaxation i spännkablarna. Resultaten visade att de beräknade långtidsdeformationerna generellt underskattar de uppmätta töjningarna. Detta gällde samtliga större konstruktionsdelar särskilt där tvärsnittsgeometrin förändras såsom anslutningen mellan cylindervägg, sockel, och grundkonstruktion. Skillnaderna mellan modellerna och mätningarna var särskilt tydlig avseende krypning i betongen. Den numeriska läckagemodellen baserades på en tryckberoende densitet hos luften vilket ökade noggrannheten i modellen avsevärt. Resultaten visade att modellen på global nivå stämde väl överens med de läckage som mättes upp under trycktesterna.

I projektet "Long-term mechanical analysis of nuclear reactor containments" [78] genomfördes den sista delen i VERCORS-projektet. I denna del utfördes mer detaljerade modelleringar jämfört med de två tidigare projekten. Även denna del bestod av tre delar, modellering av långtidsdeformationer i inneslutningen, modellering av läckage genom inneslutningen vid trycktester samt undersöka effekterna av den nedskalade geometrin på betongens uttorkning. I samtliga tre

delarna utfördes modelleringen med avancerade numeriska multifysik modeller i COMSOL Multiphysics. Resultaten från modelleringarna jämfördes mot mätningar av deformationer och läckage som erhöles från organisationen kring VERCORS. Data från övriga mätningar som utförts, t.ex. temperatur och fuktmätningar, erhöles även de från VERCORS och användes som indata till modellerna. Slutligen jämfördes resultaten från modelleringen med de övriga deltagarna i benchmarken. I modelleringen av långtidsdeformationerna togs precis som tidigare hänsyn till flera samverkande faktorer, inklusive mekaniska laster, temperaturvariationer, relativ fuktighet samt långtidseffekter såsom krympning och krypning samt relaxation. Simuleringarna utfördes med två olika geometrier, en kilformad utklippt del av den totala geometrin samt på den kompletta tredimensionella geometrin. Resultaten visade att modellerna kunde återge uppmätta töjningar relativt väl, men med avvikelser på cirka 25–30 %. Bäst överensstämmelse erhöles i mitten på cylinderväggen, medan avvikelserna var större vid geometrier med komplexa detaljer, såsom kupol och genomföringar. Modelleringen av läckaget genom inneslutningen utfördes med en något mer detaljerad modell än tidigare med både tryckberoende luftdensitet och fuktberoende permeabilitet på betongen. Resultaten visade att modellen relativt väl kunde förutsäga luftläckaget genom inneslutningen i samband med utförda trycktester jämfört med mätningar. Modellen som användes för att undersöka skaleffekterna på betongens uttorkning bestod av en utskuren del av cylinderväggen. Resultaten visade att traditionella modeller baserade enbart på diffusion inte är tillräckliga för att beskriva uttorkningens effekter. Faktorer som självuttorkning och åldersberoende materialegenskaper måste inkluderas för att korrekt kunna prediktera spänningar och deformationer.

I projektet "Syretransport genom reaktorinneslutningar och korrosion av ingjutna tätplåtar" [79] undersöktes hur syre transporteras genom betongen i inneslutningen fram till tätplåten i samband med täthetsprovningar. En förutsättning för korrosion på tätplåten är nämligen tillgång till syre, vilket rent teoretiskt inte ska kunna tränga in till tätplåten i en homogen betong. Förutsättningarna för syretransport genom betongen undersöktes genom en numerisk modell där värme-, fukt- och gastransport kopplades samman på ett liknande vis som i de tidigare projekten om VERCORS [77], [78]. Fyra idealiserade elementarfall studerades: helt homogen och sprickfri betong samt tre olika sprickscenarier med uppsprucket täckskikt som kombinerades utan och med genomgående sprickor. Detta utfördes som en simulering av olika typer av skador i betongen. Äldringen av betongen modellerades genom beaktande av uttorkningsprocessen i betongen. Resultaten visade att i ny, osprucken betong är gastransporten mycket låg eftersom porerna till stor del är vattenfyllda. I och med att betongen torkar ökar transporten och skillnaden mellan intakt och sprucken betong minskar därför med tiden. Oavsett skadetyper så kommer skador att innebära att trycket och syrenivån vid tätplåten kommer att stiga under en kort tidsperiod vid trycktestet. Syrekonzentrationen utjämnas dock efter endast några dagar. Vidare visade resultaten att om övriga förutsättningar för korrosionsangrepp föreligger vid tätplåten så krävs en liten mängd syre för att initiera och driva korrosionsprocessen. Det föreligger således en risk att korrosion kan initieras på grund av syretransporten i samband med täthetsprovningar av inneslutningar.

Projektet "Effect of room temperature differences on safety-related reinforced concrete floors and walls in the reactor building of OL 2 NPP" [80] var ett examensarbete som utfördes vid Altos universitet i Finland. I arbetet analyserades hur temperaturskillnader mellan olika rum påverkar väggar och bjälklag av armerad betong i reaktorbyggnaden vid Olkiluoto 2. Analyserna utfördes med numerisk

modellering med finita elementmetoden. Inledningsvis utfördes en kortfattad litteraturstudie kring temperaturpåverkan på betongs mekaniska egenskaper i temperaturområdet 20°C – 65°C, vilket användes som underlag till FE-modellerna. Analysen utfördes därefter i två steg, där det första var av en global modell av hela reaktorbyggnaden. Den globala modellen användes för att identifiera kritiska områden där termiska spänningar är som störst samt för att jämföra storleken på termiska spänningar med motsvarande mekaniska spänningar. Det andra steget var sedan en lokal FE-modell över dessa kritiska områden. Resultaten visade att redan vid temperaturskillnader på 20°C uppstod spänningar som var större än belastningen i bruksgränstillståndet och som dessutom överstiger betongens draghållfasthet. Sprickbredderna var dock endast ytliga och inte genomgående. Vidare visade resultaten att långtidseffekter i betongen, främst krypning, medför en reduktion av de termiska spänningarna vilket bidrar till att reducera uppsprickningen av betongkonstruktionerna.

Projektet "Direct spectra-to-spectra methods - alternative methods for development of floor response spectra at nuclear facilities in Sweden and Finland" [81] behandlade beräkningsmetoder för verifiering av kärntekniska betongkonstruktioner med avseende på jordbävningsslaster. Denna typ av analyser utförs genom att lasterna tas fram med hjälp av s.k. tidshistorieanalyser, vilka har nackdelen att de är väldigt beräkningstunga och tar lång tid att genomföra. I detta projekt undersöktes alternativa metoder för att ta fram lasterna, s.k. direkt spektra-till-spektra metoder. Dessa metoder är betydligt mer tidseffektiva. Genom en litteraturstudie identifierades två metoder som undersöktes vidare. Utifrån analysen av metoderna byggdes två representativa numeriska modeller: en förenklad av en reaktorinneslutning samt en generisk modell av en servicebyggnad. I dessa modeller utvärderades sedan de två metoderna samt den traditionella tidshistorieanalysen. Resultaten visade att de två studerade metoderna stämde väl överens med resultat från traditionell tidshistorieanalys. Samtidigt framkom att tidshistorieanalys ger stor spridning mellan olika körningar, och att resultaten från de två studerade metoderna i de flesta fall ligger inom denna spridning. Vidare visade resultaten att metoderna kan reducera beräkningstiden mycket kraftigt (upp till cirka 200 gånger snabbare), vilket gör dem särskilt användbara i tidiga skeden eller vid analys av olika designalternativ. Tillsammans med rapporten publicerades även ett bibliotek med MATLAB-script som kan användas vid implementering av direkt spektra-till-spektra metoder.

10 Seminarier anordnade inom programmet

Energiforsks betongtekniska program har årligen vanligtvis anordnat ett till två tekniska seminarier inom olika områden som rör betongkonstruktioner inom kärnkraftsindustrin. Dessutom anordnas i samarbete med Energiforsk betongtekniska program vattenkraft det årliga seminariet Kraftindustrins betongdag i Älvkarleby.

10.1 TEKNISKA SEMINARIER SOM ANORDNATS AV BETONGPROGRAMMET

Årligen anordnas mellan ett och två tekniska seminarier eller workshops av det betongtekniska programmet. Seminarierna har behandlat olika ämnen inom det betongtekniska området med fokus på kärntekniska tillämpningar.

10.1.1 Workshop: spännkablar i kärnkraftstillämpningar

Workshopen "Spännkablar i kärnkraftstillämpningar Spännkraft, tillståndsbedömning, livslängd och materialfrågor" genomfördes den 12 november 2013 och behandlade olika aspekter kring spännkablarna i reaktorinneslutningarna samt en sammanfattning av de projekt som genomförts med stöd av Energiforsks betongtekniska program. Workshopen avslutades med en paneldiskussion och summering av det som presenterats under workshopen. Några av de frågor som diskuterades var bestämning av kvarvarande spännkrafter i både injekterade och icke-injekterade spännkablar samt fördelar och nackdelar med de två olika korrosionsskyddsystemen. En summering av seminariet finns i [53].

10.1.2 Design of concrete containments - focus on integrity and tightness

Seminariet genomfördes den 28 januari 2015. Syftet med seminariet var att öka kunskapen om de krav som ställs på reaktorinneslutningar av betong och belysa de olika tekniska lösningar som använts för att uppfylla de ställda kraven. Seminariets fokus var på förhållanden som primärt gäller för svenska och finska reaktorinneslutningar. De områden som behandlades var myndighetskrav, konstruktionsnormer i olika länder och tillämpningar på reaktorinneslutningar. En summering av seminariet finns i [54].

10.1.3 Anchor Bolts for Nuclear Power Plant Applications – Design and Assessment

Seminariet anordnades den 3 november 2015 och behandlade infästningar i betongkonstruktioner med fokus på de förhållanden som gäller för kärntekniska betongkonstruktioner. Ämnen som avhandlades under seminariet var säkerhetskoncepterna som finns i både europeiska och amerikanska konstruktionsnormer, aktuell forskning inom området samt exempel på projekt som genomförts i Sverige och Finland.

10.1.4 Instrumentation and modelling of concrete structures

Seminariet anordnades den 15 mars 2016 [55]. Syftet med seminariet var att öka kunskapen inom området övervakning av främst kärntekniska betongkonstruktioner samt att utgöra en grund för diskussioner om framtida forsknings- och utvecklingsbehov inom området. Fokuset för seminariet var på tre olika områden reaktorinneslutningar med cementinjekterade spännkablar, reaktorinneslutningar med

icke-injekterade spännkablar samt mätning och övervakning av betongens fysikaliska egenskaper.

10.1.5 Acceptanskriterier

Seminariet anordnades den 28 april 2017. Syftet med seminariet var att ta fram underlag för framtida projekt för att utveckla acceptanskriterier för kärnkraftens betongkonstruktioner. De områden som berördes under dagen var skador som kan uppträda i främst betongkonstruktionerna i kylvattenvägarna på kärnkraftverk och mätning av spännkrafter. Hur dessa frågor hanteras inom andra områden avhandlades också, bl.a. Trafikverkets system för förvaltning av infrastrukturkonstruktioner samt hantering av spännarmering inom vattenkraftsindustrin.

10.1.6 Jordbävningsseminarium

Seminariet anordnades den 16 maj 2022. Seminariet behandlade jordbävningar samt seismisk design och analys av kärntekniska anläggningar i Sverige och Finland. De områden som berördes var bland annat regelverk i Sverige och Finland, nuläget kring seismisk fara och riskbedömningar samt behovet av bättre data och uppdaterade modeller. Vidare så diskuterades vanliga metoder för jordbävningsanalys samt mer avancerade numeriska modeller. Även praktiska erfarenheter från provning, kvalificering av utrustning och förenklade bedömningsmetoder togs upp. En sammanfattning av seminariet finns i [82].

10.1.7 Jordbävningsanalyser, direkt spektra-till-spektra metoder

Seminariet anordnades den 9 december 2024. På seminariet presenterades resultaten från projektet "Direct spectra-to-spectra methods - alternative methods for development of floor response spectra at nuclear facilities in Sweden and Finland" [81], se även avsnitt 9.3 ovan. På seminariet presenterades de två direkt spektra-till-spektra metoderna som behandlades i rapporten. Vidare gavs även en presentation kring de beräkningsscript som utvecklats inom projektet och som ska utgöra stöd vid genomförandet av denna typ av analyser.

10.1.8 Oförstörande provning i kärnkraftens betongkonstruktioner

Seminariet anordnades den 20-21 november 2023 i Lund. På seminariet presenterades de projekt om oförstörande provningsmetoder av betongkonstruktioner som utförts inom betongprogrammet inklusive pågående projekt. I samband med seminariet hölls även ett studiebesök på Lunds Tekniska Högskola där den utrustning och instrument som används inom forskningen demonstrerades.

10.2 KRAFTINDUSTRINS BETONGDAG

Kraftindustrins betongdag är ett årligt seminarium som anordnas i samarbete med Energiforsks betongtekniska program vattenkraft i Vattenfalls kontor i Älvkarleby. Under seminariet presenteras pågående och avslutade projekt inom Energiforsks betongprogram inom vattenkraft och kärnkraft och andra aktuella frågor inom det betongtekniska området. Exempel på teman på anordnade seminarier är betongreparationer och tillståndskontroll och övervakning.

11 Referenser

Nedanstående referenslista är en sammanställning av samtliga rapporter som publicerats inom Energiforsks betongtekniska program kärnkraft.

- [1] Lundqvist P., Assessment of Long-Term Losses in Prestressed Concrete Structures – Application for Nuclear Reactor Containments, 2012, Elforsk rapport 12:74.
- [2] Nilsson L-O, Johansson P., Förändringsprocesser i reaktorinneslutningar – Betongväggarnas klimatförhållanden och uttorkning, 2009, Elforsk rapport 09:100.
- [3] Westberg S-B., Long-term stability of tendons in containments of reactors, Energiforsk rapport 2016:244.
- [4] Sheikh A.H., Aging management of nuclear prestressed concrete containments, 2015, Elforsk rapport 2015:146.
- [5] Lundqvist P., Instrumentering av spännkablar i Forsmark 2, 2015, Energiforsk rapport 2016:243.
- [6] Lundqvist P., ACEPPT – Ageing of civil and concrete structures in nuclear power plants - Project summary, 2016, Energiforsk rapport 2016:265.
- [7] Ansell A., Möjligheter till instrumentering av spännkablar av system BBRV, Energiforskrapport 2018:542.
- [8] Barslivo G., Förspänningssystemen i de svenska reaktorinneslutningarna, Energiforskrapport 2018:543.
- [9] Hassanzadeh M., Provningsmetoder i Barsebäcks FILTRA - Bestämning av spännlinors spänning – Metodutveckling, Energiforskrapport 2019: (inte publicerad vid färdigställandet av föreliggande rapport).
- [10] Lundqvist P., Bernstone C., Sammanställning över spännstag inom vattenkraften, Energiforskrapport 2017:398.
- [11] Oxfall M, Climatic conditions within nuclear reactor containments, 2016.
- [12] Nilsson L-O., Åhs M., Utvärdering av utvecklingsstatus för fuktanalysmetoder - Utvärdering och uppföljning av projektet CONMOD, Del II, 2016, Energiforsk rapport 2016:242
- [13] Hassanzadeh, M., Oxfall M., Genomgång av konstruktion av kokvattenreaktorinneslutningar i Norden, Energiforskrapport 2017:363 (Begränsad spridning).
- [14] Oxfall M., Simulerad uttorkning av betong, Energiforskrapport 2017:464.
- [15] Ulriksen P., Utvärdering av oförstörande provningsmetoder med möjliga tillämpningar inom kärnkrafttekniska betongkonstruktioner, 2008, Elforsk rapport 08:24.

- [16] Ulriksen P., Litteraturstudier och test av oförstörande provningsmetoder (OFF) med möjliga tillämpningar på kärnkraftens betongkonstruktioner, 2010, Elforsk rapport 10:85.
- [17] Ulriksen P., Impulsresponsmätningars beroende av sprickdjup - delaminering, 2011, Elforsk rapport 11:11.
- [18] Ulriksen P., Instrumenterad bomknackning, 2012, Elforsk rapport 12:09.
- [19] Ulriksen P., Jonsson P., Projektorstyrd avsökning och dokumentation, 2015, Energiforsk rapport 2015:162.
- [20] Kristensen A.L., Utvärdering och uppföljning av projektet CONMOD, Del I – Oförstörande provningsmetoder, 2016, Energiforsk rapport 2016:
- [21] Ulriksen P., Ultraljudsmetod för att detektera korrosion i tätplåt i reaktorinneslutningar, 2016 Energiforskrapport 2016:246.
- [22] Ulriksen P., Detektion av korrosion i ingjuten tätplåt i reaktorinneslutning olinjäritet / harmonic imaging etapp 2, 2019, (inte publicerad vid färdigställandet av föreliggande rapport).
- [23] Sederholm B., Kalinowski M., Eistrat K., Studie av vattenlinjekorrosion på tätplåt ingjuten i betong vid kondensationsbassäng, 2008, Elforsk rapport 09:20.
- [24] Lindmark S. Sederholm B., Korrosion på stål i betong i kylvattenvägar Delrapport 1 – Litteraturgranskning, 2010, Elforsk rapport 10:82.
- [25] Sandberg B., Ahlström J., Sederholm S., Nilsson L-O., Lindmark S., Korrosion på stål i betong i kylvattenvägar, Delrapport 2 – Relativa fuktighetens inverkan på kloridinitierad armeringskorrosion, 2010, Elforsk rapport 10:83.
- [26] Sandberg B., Ahlström J., Tidblad J., Sederholm B., Korrosion på stål i betong i kylvattenvägar, Delprojekt 3 – Korrosion på stål i vattenmättad betong, 2009, Elforsk rapport 10:84.
- [27] Ahlström J., Sandberg B., Galvanisk korrosion på armering i nära anslutning till huvudkylvattenpumpar, 2012, Elforsk rapport 12:27.
- [28] Sederholm B., Pahverk H., Korrosionsprovning av olika typer av bergbultar i tunnlar – Långtidsexponering, Energiforskrapport 2019: (inte publicerad vid färdigställandet av föreliggande rapport).
- [29] Camitz G., Korrosionsskydd av stål i betongkonstruktioner – Handbok, 2010, Elforsk rapport 10:110.
- [30] Sederholm B., Selander A., Katodiskt skydd av betongkonstruktioner med termiskt sprutade offeranoder av zink - Erfarenhetsinsamling och fältundersökning med fokus på långtidsegenskaper – Etapp I, 2011, Elforsk rapport 11:55.
- [31] Sederholm B., Selander A., Katodiskt skydd av betongkonstruktioner med termiskt sprutade offeranoder av zink - Etapp 2, 2015, Energiforsk rapport 2015:134.

- [32] Sederholm B., Ahlström J., Rostfria ståls korrosionshärdighet och galvaniska inverkan på kolstål i betong med hög fukt- och kloridhalt, 2013, Elforsk rapport 13:81.
- [33] Sederholm B., Reuterswärd P., Korrosionsprovning av olika typer av bergbultar, 2013, Elforsk rapport 13:91.
- [34] Ahlström J., Corrosion of steel in concrete at various moisture and chloride levels, 2014, Energiforsk rapport 2015:133.
- [35] Niia T., Silfwerbrand J., Reparationsmetoder för kärnkraftsindustrin - kartläggning, 2015, Energiforsk rapport 2015:161.
- [36] Sederholm B., Ahlström J., Armeringskorrosion i kylvattenvägarna i kärnkraftverken, Energiforskrapport 2017:343.
- [37] Sederholm B., Ahlström J., Nyberg J., Armeringskorrosion i kylvattenvägar, Energiforskrapport 2018:510.
- [38] Sandberg B., Sederholm B., Taxen J., Trägårdh J., Tidblad J., Systematisk genomgång av potentiella korrosionsrisker för ingjuten metallisk tätplåt i reaktorinneslutningar, Energiforsk rapport 2019: (inte publicerad vid färdigställandet av föreliggande rapport).
- [39] Ferreira M., Bohner E., Calonius C., Acceptance criteria for maintenance of nuclear concrete structures, Energiforsk rapport 2017:358.
- [40] Hassanzadeh M., Förvaltning av kärnkraftverkens betongkonstruktioner, Energiforsk rapport 2019: (inte publicerad vid färdigställandet av föreliggande rapport).
- [41] Fredlund P., Nilsson L-O., Gasinträngning i reaktorinneslutningar av betong - Mätningar och modellering, 2009, Elforsk rapport 09:101.
- [42] Fagerlund G., Inverkan på betong av borsyrahaltigt vatten och ingjutna borföreningar, 2010, Elforsk rapport 10:62.
- [43] Fagerlund G., Inverkan av salter på betong - Kemisk och fysikalisk påverkan, 2011, Elforsk rapport 12:29.
- [44] Blomfeldt T., Bergsjö P., Behovsstudie av polymera material i betongkonstruktioner, 2013, Elforsk rapport 13:38.
- [45] Blomfeldt T., Bergsjö P., Utvärdering av egenskaperna hos fogband i mjukgjord PVC för betongkonstruktioner – Korrelation mellan accelererad åldring, långtidsexponering och fogband i drift, 2013, Elforsk rapport 13:39.
- [46] Jacobsson K., Nordängar S., Lukes D., Provning och analys av nya och åldrade fogband, 2015, Energiforsk rapport 2015:119.
- [47] Jönsson H., Tornberg R., Betongens hållfasthet vid moderata temperaturbelastningar, 2013, Elforsk rapport 13:84.
- [48] Nilforoush R., Anchorage in Concrete Structures: Numerical and Experimental Evaluations of Load-Carrying Capacity of Cast-in-Place Headed Anchors and Post-Installed Adhesive Anchors, doktorsavhandling, Konstruktionsteknik, Luleå Tekniska Universitet, 20174.

- [49] Selander A., Vattenavvisande impregnering av betong i kärnkraftsmiljö, Energiforskrappport 2016:283.
- [50] Gasch T., Facciolo L., Eriksson D., Rydell C., Malm R., Seismic analyses of nuclear facilities with interaction between structure and water - Comparison between methods to account for Fluid-Structure-Interaction (FSI), 2013, Elforsk rapport 13:79.
- [51] Bernstone C., Gasch T., Åhs M., Malm R., Verifiering av struktur och fuktmekaniska beräkningsverktyg, Energiforskrappport 2017:432.
- [52] Gasch T., Ahmed L., Malm R., Instrumentation and modelling of a reactor containment building, Energiforskrappport 2018:526.
- [53] Adsten M., Hassanzadeh M., Workshop spännkablarna i kärnkraftstillämpningar - Spännkraft, tillståndsbedömning, livslängd och materialfrågor, 2014, Elforsk rapport 14:60.
- [54] Forsström S., Design of concrete containments - focus on integrity and tightness, 2015, Energiforsk rapport 2015:145.
- [55] Lundqvist P., Instrumentation and Monitoring of Concrete Structures in nuclear Power Plants, Energiforsk rapport 2016:306.
- [56] Hassanzadeh, M., Lundqvist P., Determination of stresses in grouted strands of a reactor containment by a destructive test method, Energiforskrappport 2026:1179, 2026.
- [57] Suchorzewski, J., Tarka K., Boubitsas D., Analysis of prestressing tendons long-term durability in Swedish nuclear reactor containments, ännu inte publicerad, 2021.
- [58] Tort C., Ylinen K., Temperature influence on the concrete in the spent fuel pools, Energiforskrappport 2023:944, 2023.
- [59] Ulriksen P., Acoustic emission detection and source location, Energiforskrappport 2020:697.
- [60] Boubitsas D., Olsson L., Ståhl F., Infrared thermography for detecting defects in concrete structures, Energiforskrappport 2021:762.
- [61] Nilsson M., Nonlinear ultrasonic evaluation for corrosion assessment of steel plates embedded in concrete, doktorsavhandling, Teknisk geologi, Lunds tekniska högskola, Energiforskrappport 2024:1022, 2024.
- [62] Nilsson M., Methods for locating pool liner leakage at nuclear power plants, Energiforskrappport 2026:1156, 2026.
- [63] Nilsson M., Methods for detection of rebar in nuclear concrete structures, Energiforskrappport 2026:1182, 2026.
- [64] Spåls, J., Tropp F., Wölfinger G., Testing of acoustic cameras to detect leakage through a concrete structure, Energiforskrappport 2026:1189, 2026.
- [65] Högberg J., Utredning av risk för korrosion i wet-well mellan rostfritt stål och kolstål, Energiforskrappport 2020:668, 2020.

- [66] Edwards, Y., Thörn T., Ytbehandling av kärntekniska betongkonstruktioner, Energiforskrapport 2023:958, 2023.
- [67] Engblom J., Sandberg B., Ahlström J., Träinducerad korrosion på ingjuten tätplåt, Energiforskrapport 2025:1123, 2025.
- [68] Sederholm B., Ahlström J., Trägårdh J., Bestämning av korrosionsskyddsförmågan för olika reparationsbruk vid partiella reparationer, Energiforskrapport 2026:1186, 2026.
- [69] Jिंगstål P., Martinsson J., Konstruktionsförutsättningar för byggnader, Energiforskrapport 2021:760, 2021.
- [70] Cvitanovic P., Täpp M., Midböe F., Making inspections of concrete structures in nuclear powerplants more efficient, Energiforskrapport 2024:990, 2024.
- [71] Popescu C., Wernersson A., Mirzazade A., Täljsten B., Remote inspections of concrete structures, Energiforskrapport 2024:1014, 2024.
- [72] Malm R., Sandström L., Instrumentation of nuclear concrete containment buildings, Energiforskrapport 2024:1021, 2024.
- [73] Kährström F., Hambaes J., Janz M., Johannesson P., Methods for collection and evaluation of concrete data within the nuclear industry, Energiforskrapport 2024:1032, 2024.
- [74] Zarai N., Lundqvist P., Compilation of concrete test data from the nuclear industry, Energiforskrapport 2021:761, 2021.
- [75] Hassanzadeh, M., Rydle D., Sandström L., Betongprovningar i nedlagda reaktorinneslutningar, Energiforskrapport 2023:945, 2023.
- [76] Ahmed L., Shear force capacity of existing concrete slabs, Energiforskrapport 2025:1102, 2025.
- [77] Åhs M., Malm R., Bernstone C., Könönen M., Reaktorinneslutningars mekaniska långtidsbeteende - Vercors Fas II, Energiforskrapport 2019:632, 2019.
- [78] Åhs M., Malm R., Bernstone C., Rydle D., Hassanzadeh M., Calonius K., Long-term mechanical analysis of nuclear reactor containments, Energiforskrapport 2024:1031, 2024.
- [79] Åhs M., Malm R., Hassanzadeh M., Syretransport genom reaktorinneslutningar och korrosion av ingjutna tätplåtar, Energiforskrapport 2021:786, 2021.
- [80] Riekkinen V., Effect of room temperature differences on safety-related reinforced concrete floors and walls in the reactor building of OL 2 NPP, Energiforskrapport 2021:728, 2021.
- [81] Rydle D., Olofsson M., Bäckstrand A., Godio M., Barslivo G., Direct spectra-to-spectra methods - alternative methods for development of floor response spectra at nuclear facilities in Sweden and Finland, Energiforskrapport 2024:1030, 2024.

[82] Rydle D., Sammanfattning av jordbävningsseminarium för kärntekniska byggnader, Energiforskrapport 2023:922, 2023.

SYNTESRAPPORT 2007-2024: BETONGTEKNISKT PROGRAM KÄRNKRAFT

Energiforsk driver sedan 2007 ett forskningsprogram kring betongkonstruktioner inom kärnkraftverken. Det finns ett behov av att bygga både kompetens och att utveckla teknikbasen för teknisk förvaltning av byggnader och konstruktioner inom kärnkraftindustrin.

Det övergripande målet med det betongtekniska programmet är att säkerställa avsedd livslängd och hög tillgänglighet för svenska kärnkraftverk med bibehållen säkerhet.

Programmet finansieras av Vattenfall, Uniper (tidigare E.ON), Fortum, Teollisuuden Voima Oy (TVO), Skellefteå Kraft, Karlstads Energi, Strålsäkerhetsmyndigheten och Svensk kärnbränslehantering (SKB).

Föreliggande rapport utgör en kortfattad sammanfattning över de projekt som utförts inom programetapperna 2007 – 2024.

Ett nytt steg i energiforskningen

Forskningsföretaget Energiforsk initierar, samordnar och bedriver forskning och analys inom energiområdet samt sprider kunskap för att bidra till ett robust och hållbart energisystem. Energiforsk är ett politiskt neutralt och icke vinstutdelande aktiebolag som ägs av branschorganisationerna Energiföretagen Sverige och Energigas Sverige, det statliga affärsverket Svenska kraftnät, samt gas- och energiföretaget Nordion Energi. Läs mer på energiforsk.se.

