



Arbetsgrupp: Richard Sundberg

Författare: Richard Sundberg

Samråd: Kostas Xanthopoulos, Sofia Lillhök

Fastställt: Lars Skånberg

Utredningsrapport avseende oförstörande provningsmetoders förutsättningar och möjligheter för kontroll av betongkonstruktioner i kärnkraftverk

Sammanfattning

Strålsäkerhetsmyndigheten har genomfört denna utredning med avseende att undersöka provbarheten av kärnkraftsverkets betongkonstruktioner med oförstörande provningsmetoder (OFP).

Denna utredning har bedömt att det finns förutsättningar att identifiera kritiska områden för att kunna prioritera och begränsa provningsomfattningen för en reaktorinneslutning. De eventuella skador som kan förekomma på betongkonstruktioner i kärnkraftanläggningarna som OFP metoderna kan komma att behöva detektera har redovisats i utredningen. Denna utredning har bedömt att det finns möjligheter att prova betongkonstruktioner såsom reaktorinneslutningen med dess ingående delar. Dock finns det även begränsningar för OFP metodernas förmåga. När betongkonstruktioner har en ökande tjocklek så minskar detekterings och karakteriseringsförmågan, speciellt vid begränsad åtkomst till betongkonstruktionens båda sidor. Inom området tjocka betongkonstruktioner med dess ingående delar finns det behov av vidare forskning och utveckling.

För de ingjutna spännkablarna i reaktorinneslutningen behöver provningsmetoder utvecklas för att kunna göra en tillståndskontroll av dessa. Det går inte med dagens kunskapsnivå att göra några tillförlitliga bedömningar av de ingjutna spännkablarna.

SSM bör framöver stödja och finna kunskap i sådan forskning som undersöker och utreder olika oförstörande provningssystemers kapacitet att detektera



och storleksbestämma defekter i betongkonstruktioner med dess ingående delar. Det behöver undersökas vidare vilka detekteringskrav och eventuella storleksbestämningens krav som kommer att ställas på de oförstörande provningsmetoderna vid en tillståndsbedömning, innan en mer detaljerad bedömning av kontrollmetodernas applicerbarhet på betongkonstruktioner på kärnkraftverk kan göras.



Innehåll

1	Bakgrund.....	4
2	Syfte och uppdrag	4
2.1	Avgränsningar.....	4
2.2	Utredningens omfattning och inriktning.....	4
2.3	Underlag.....	5
2.4	SSM:s föreskrifter.....	5
3	Inneslutningens konstruktion	5
3.1	Kontroll av inneslutningen.....	6
4	Nedbrytningsmekanismer	7
4.1	Funktionsbetingad nedbrytning	7
4.2	Miljöbetingad nedbrytning.....	7
4.2.1	Fysikalisk nedbrytning.....	8
4.2.2	Kemisk nedbrytning.....	8
4.2.3	Korrosion	8
4.2.4	Strålningsnedbrytning	9
4.3	Övriga påverkande faktorer på nedbrytningen.....	9
5	Kritiska punkter att inspektera på en reaktorinneslutning	9
5.1	Övriga påverkande parametrar för identifiering av kritiska områden att inspektera	11
6	OFP-metoder.....	12
6.1	Elektromagnetiska metoder	12
6.1.1	High Energy Computed Radiography, HECR	12
6.1.2	Ground Penetrating Radar, GPR.....	13
6.1.3	Elektrokemisk mätmetod, Halvcellpotential mätning.....	13
6.2	Akustiska metoder	14
6.2.1	Impact-echo, IE.....	14
6.2.2	Spectral Analysis of Surfaces Waves - SASW	14
6.2.3	Multi-channel Analysis of Surface Waves - MASW	14
6.2.4	Impulse response metoden, IR.....	15
6.2.5	Akustisk emission AE.....	15
6.2.6	Ultraljud Pulseko, UPE.....	15
6.3	Visuella metoder	16
6.4	Värdering av användbarheten av OFP på betongstrukturer i kärnkraft anläggningar	17
7	Omvärldsbevakning och forskning	18
8	Slutsatser och rekommendationer	19
9	Referenser	20



1 Bakgrund

Djupförsvaret i en kärnkraftsanläggning delas in i flera överlappande nivåer av tekniska, administrativa och organisatoriska åtgärder för att skydda en anläggnings barriärer. En barriär är ett fysiskt hinder mot spridning av radioaktiva ämnen. Barriärerna är själva bränslet med dess kapsling, reaktortanken och reaktorinneslutningen samt själva reaktorbyggnaden för kokvattenreaktorer (BWR). Alla barriärer är viktiga för anläggningens säkerhet men olika viktiga vid olika drifttillstånd, störningar och haverier. Funktionen hos inneslutningen ska upprätthållas vid alla händelser och behöver därmed kunna klara höga tryck och belastningar. Inneslutningen är en passiv funktion som bara används vid extrema situationer. Reaktorinneslutningens uppgift är vid extrema situationer att inte släppa ut radioaktiva ämnen, genom att vara tät vid höga tryck och stora belastningar. I tryckvattenreaktorer (PWR) har inneslutningen dessutom till uppgift att skydda primärsystemet från yttre påverkan. Detta ställer extra höga krav på inneslutningens konstruktion och funktion. Det är därför av stor vikt att kunna bedöma tillståndet hos reaktorinneslutningen med avseende på dess funktioner vid extrema situationer.

2 Syfte och uppdrag

Syftet med denna utredning är att undersöka provbarheten av kärnkraftverks betongkonstruktioner med oförstörande provningsmetoder. Med betongkonstruktioner avses betong, armering samt eventuella friliggande eller ingjutna tätskikt av metall. Med armering avses både slakarmering och förspänd armering, den förspända armeringen kan vara ingjuten eller frigående. SSM/SKI har genomfört flera utredningar och forskningsprojekt under det senaste decenniet som berör ämnet. Denna utredning har sammanfattat samt värderat dessa utredningar och forskningsprojekt med avseende på oförstörande provningsmetoder av betongkonstruktioner. Målet har varit att genomföra en kartläggning och värdering av de kontrollmöjligheter som kan användas för att identifiera de degraderingar i betongkonstruktioner som kan uppstå. Utredningen har fokuserat på reaktorinneslutningen. Utredning har även identifierat områden där kunskap och utvecklingsinsatser kan behövas göras i framtiden. En del av utredning syftar även till kompetensöverföring.

2.1 Avgränsningar

Inom utredning har ingen ny forskning och utveckling bedrivits. Utredningen har fokuserat på att sammanställa och värdera befintlig kunskap inhämtad av SSM.

2.2 Utredningens omfattning och inriktning

- Sammanställa de degraderingsmekanismer som är identifierade i tidigare genomförda SSM utredningar och undersökningar.



- Sammanställa översiktligt vilken provning som idag görs av reaktorinneslutningar
- Inventera var forskning och utveckling avseende provning av betongkonstruktioner står idag.
- Värdera provbarheten av reaktorinneslutningen och andra betongkonstruktioner med avseende på detektering av möjliga degraderingsmekanismer med dagens kunskapsnivå inom OFP.
- Utarbeta ett förslag på handlingsplan och strategi för SSM:s insatser inom området.
- Inom utredning har utredaren i viss mån studera vilka större internationella projekt avseende provning av reaktorinneslutningen som pågår. Utredning kommer även studera vilka internationella forum där erfarenhetsåterföring inom området pågår.

2.3 Underlag

Utredningen har i huvudsak baserats på följande underlag:

- Genomförda utredningar och forskningsprojekt i SSM:s och SKI:s regi
- Genomförda litteraturstudier inom området
- Artiklar och forskningsresultat som har publicerats eller har presenterats på internationella konferenser

2.4 SSM:s föreskrifter

Allmänna krav på kontroll och provning gäller enligt 5 kap. 3 § SSMFS 2008:1 och 17§ SSMFS 2008:17. För betongkonstruktioner finns dock inga preciserade föreskriftskrav eller annan vägledning.

3 Inneslutningens konstruktion

I SKI utredning [3] har det utförts en inventering av konstruktionen av de svenska reaktorinneslutningarna. Dessa återges kortfattat nedan:

De svenska kärnkraftreaktorerna har en cylindrisk inneslutning med en invändig diameter mellan 19-25m. Samtliga reaktorinneslutningar har en förspänd betongkonstruktion med en ingjuten tätplåt. Dessa har förspänd armering, i både horisontellt och vertikalt led, i den cylindriska delen av inneslutningen. PWR reaktorerna är även förspända i kupolen av inneslutningen. De förspända kablarna är i många fall frigående och ligger i foderrör. För Ringhals 2-4 och Forsmark 1-3 är foderrören injekterade med korrosionsskyddande medel såsom fett eller så är de torrluftventilerade. Stålkablarna i dessa är åtkomliga för inspektioner och byten. När det gäller Oskarshamn 1-3 och Ringhals 1 (tidigare även Barsebäck 1-2) så är foderrören med stålkablar injekterade med cement. Dessa förspänningskablar är därför inte åtkomliga för inspektion eller utbyte på samma sätt som de frigående. Utöver den förspända armeringen ingår vanlig slakarmering



Reaktorinneslutningens cylindriska vägg är gjuten i två koncentriska delar med en totaltjocklek om 1.0-1.5m, den inre betongdelens tjocklek är ca 0.2-0.3m. Mellan de två koncentriska delarna sitter det en ingjuten tätplåt som är 4-8mm tjock. Tätplåten är i vissa fall tillverkad i rostfritt material. Tätplåten i BWR reaktorernas bottenplatta ligger fritt exponerad i kondensationsbassängens botten. På Ringhals 1 och Oskarshamn 2 är tätplåten i de övre delarna av inneslutningen fritt exponerad. I det sfäriska taket på PWR reaktorerna är tätplåten fritt exponerad.

3.1 Kontroll av inneslutningen

En typ av provning som används för att kontrollera inneslutningens täthet och tätplåtens integritet är täthetsprovning. De krav som ställs enligt anläggningarnas säkerhetsredovisningar är bl.a:

- inneslutningen inklusive nödvändiga komponenter, byggnadsdelar och slussar, etc. skall vara utformade så att tillåtet läckage inte överskrids. Den skall med tillräckliga marginaler motstå de tryck och temperaturer som kan uppkomma efter ett rörbrott.

Täthetsprovning av svenska reaktorinneslutningar genomförs enligt kraven i US 10 CFR Appendix J [1] och omfattar tre provtyper, nämligen:

- Typ A-prov som utförs för att mäta det totala integrerade läckaget från inneslutningen
- Typ B-prov som utförs för att mäta lokala läckage i genomföringar, dörrar, slussar
- Typ C-prov som utförs för att mäta läckage genom skalventiler

Täthetsprovning kan utföras enligt två optioner, Option A och Option B. Enligt option A skall inneslutningen täthetsprovas 3 gånger jämt fördelade på 10 år. Provtrycket skall vid tillämpningen av option A vara minst halva det tryck som kan uppstå vid ett konstruktionsstyrande rörbrott, det s.k. DBA-trycket. Option B, som tillåter tillståndsbaserade provintervall, innebär att om två på varandra följande integralprov visat godkänt resultat kan provintervallet förlängas till 10 år. Provtrycket vid tillämpning av option B skall motsvara fulla designtrycket. SSM har hittills inte godkänt tillämpning Typ-A provningar enligt option B. Däremot har SSM godkänt tillämpning av option B för Typ B- och Typ C-prov i flera av anläggningarna. Det ska noteras att provningsintervallet för Typ B prov enligt option B och C har minskats.

Inneslutningstätheten kontrolleras i samband med idrifttagningen av anläggningen och därefter vid regelbundna täthetsprover. Dessa prover genomförs, som framgått ovan, inledningsvis vid ett statiskt gastryck som motsvarar ett beräknat maximal tryck vid ett dimensionerande haveri. Påföljande provningar enligt option A sker normalt vid 50% av detta tryck. Både gas- och vattenläckage genom skalventiler och genomföringar mäts.



Enligt SKI Rapport 02:58 [2] utförs det visuella kontrollen av reaktorinneslutningens byggnad enligt kraven i US 10 CFR Appendix J [1] utöver täthetsprovningarna. Dock anger inte bestämmelserna i [1] hur dessa visuella inspektioner ska genomföras utan det anges att en allmän visuell kontroll av åtkomliga inre och yttre ytor av inneslutningens byggnader och komponenter ska utföras före varje typ-A provning.

De kontroller som görs av förspänningskabelsystem är begränsat till de system där spännkabeln är frigående. Sådana kontroller omfattar normalt följande (variationer kan förekomma); uppmätning av förspänningskraft, visuell kontroll av förankringsdetaljer och av stålkablarna samt undersökning av det injekterade fettets kring stålkablar där sådant används.

4 Nedbrytningsmekanismer

Vid nedbrytning av en armerad betongkonstruktion samverkar vanligtvis flera mekanismer. En nedbrytningsmekanism ger möjligheter för en annan nedbrytningsmekanism att verka. De nedbrytningsmekanismer som kommer att beskrivas nedan är inte helt oberoende av varandra. Information om dessa mekanismers påverkan har framför allt inhämtats från tidigare utredningar genomförda av SKI [2] och [3] samt SSM [4].

Betongkonstruktioner bryts ner med tiden under inverkan av dels användning, funktionsbetingad nedbrytning, dels av olika miljöfaktorer, miljöbetingad nedbrytning. Funktionsbetingad nedbrytning kan orsakas av olika typer av statiska och dynamiska laster, temperaturförändringar, krympning och krypning. Miljöbetingad nedbrytning kan vara utifrån kommande nedbrytande substanser eller av materialet självt.

4.1 Funktionsbetingad nedbrytning

De laster som betongkonstruktionen är konstruerad för att bära påverkar också själva konstruktionens egenskaper. När det gäller reaktorinneslutningar så påverkas dessa mindre av vardagslaster, då dessa är dimensionerade för att klara betydligt större laster. Antagligen är den största påverkande normala lasten den som uppkommer på grund av rörelser i betongkonstruktionen i samband med temperaturförändringar och temperaturgradienter. Betongen är ett levande material vilken kryper och krymper, dessa rörelser kan ge upphov till tvångskrafter om inte rörelserna kan ske fritt. Med krypning avses att betongkonstruktion som står under ständigbelastning deformeras sakta och med krympning avses att betongen krymper i samband med härdning.

4.2 Miljöbetingad nedbrytning

Nedbrytning av armerade betongkonstruktioner beroende av miljöfaktorer kan delas in i fyra huvudkategorier:

- Fysikalisk nedbrytning
- Kemisk nedbrytning



- Korrosion (tätplåt, armeringsjärn och spännarmering)
- Strålningsnedbrytning

Betong helt utan armering och ingjutna korrosionskänsliga ståldetaljer är mycket resistent mot miljöbetingad nedbrytning. De vanliga problemställningarna vid miljöbetingad nedbrytning är brist på samverkan mellan betong, armering och annat ingjutningsgods.

4.2.1 Fysikalisk nedbrytning

Denna kategori omfattar degradering av betong på grund av externa förhållanden som kan leda till sprickbildning på grund av överskridande av betongens hållfasthet, eller förlust av ytmaterial. Dessa sprickor kan i sin tur leda till att andra nedbrytningsmekanismer aktiveras och ökar åldringen av betongkonstruktionen. Exempel på fysikalisk ned brytning är frostangrepp och kristallisering av klorider eller salter vilket kan leda till sprickbildning på betongen. Abrasion, erosion och kavitation är andra exempel på där yt-skiktet påverkas av vilken miljö betongen vistas i.

4.2.2 Kemisk nedbrytning

Den kemiska påverkan av betong kan vara av olika slag beroende på cementtyp, ballastens kemiska sammansättning och betongens innehåll. Med kemiska angrepp menas förändring av betongen genom kemiska reaktioner med antingen cementen, ballasten eller armeringsjärnet. Dessa reaktioner kan vara sulfatangrepp och alkaliballastreaktioner vilken kan leda till uppsprickning av betong genom svällning av olika substanser. Karbonatisering är en process som sker genom att koldioxid diffunderar in i betongen och reagerar med substanser som kalciumhydroxid. Detta leder till en volym-sänkning samt att betongens pH minskar. Denna minskning av pH kan leda till armeringskorrosion.

4.2.3 Korrosion

Vid karbonatisering av betongen ökar risken för korrosion vid $\text{pH} < 12$, detta gäller för slakarmering, tätplåt och spännarmering. Vid höga kloridhalter i betongen tenderar denna att behålla mer vatten. Den höga vattenhalten förvärrar korrosionsförhållanden för de ingjutna delarna.

Korrosion av spännarmering kan vara lokal eller allmän. De flesta korrosionsfall som har observerats i andra betongkonstruktioner har berott på lokal korrosion, t. ex. gropfrätning, spänningsskorrosion, väteförsprödning eller en kombination av dessa. Spännarmeringens spänningstillstånd gör den mera känslig för korrosion.

De olika fysikaliska och kemiska fenomen som beskrivits ovan har vanligtvis sin största betydelse när det sker i kombination med att armering och ingjutningsgods påverkas av korrosion.



4.2.4 Strålningsnedbrytning

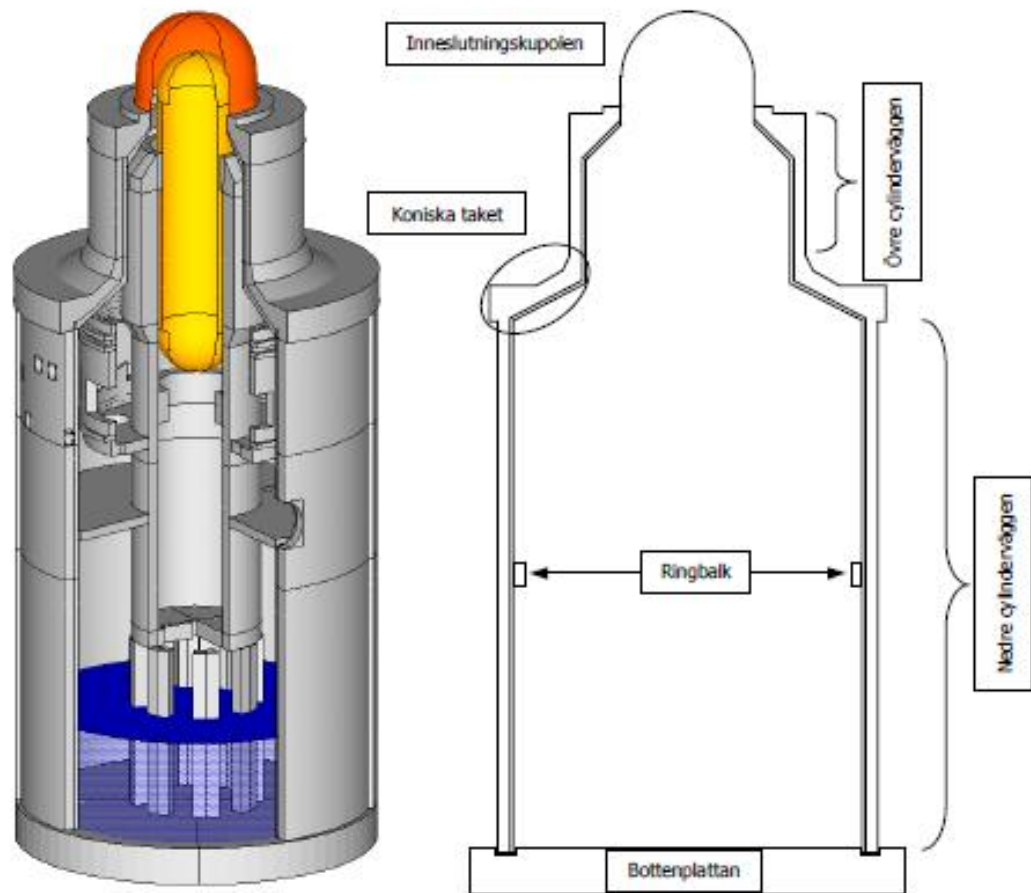
Strålning från reaktorhärden kan delas upp i alfa-, beta-, gamma- och neutronstrålning. Av dessa är det neutron och gammastrålningen som kan påverka betongens egenskaper. Neutronbestrålning kan leda till volymökning hos betongen och gammastrålning kan leda till radiolys av vattnet i betongen med gasbildning samt försämrade kryp- och krympeegenskaper.

4.3 Övriga påverkande faktorer på nedbrytningen

Betongkonstruktioner som inte är utförda enligt ritningsunderlag och/eller har avsteg från normer och krav, har varit den mest bidragande orsaken till de flesta skadefall som har drabbat inneslutningarna i Sverige och andra länder enligt [2]. Även i projekt CONMOD [5] konstateras att avvikelser från befintlig dokumentation vid konstruktionsutförande är en av de mest kritiska faktorerna för uppkomst av skador i betongkonstruktioner.

5 Kritiska punkter att inspektera på en reaktorinneslutning

Detta avsnitt syftar till att ge en överblick av var på en reaktorinneslutning det kan komma att behöva genomföras oförstörande provning för att säkerställa att konstruktion kommer att fungera som avsett. Detta ger även en vägledning om vilka utmaningar som OFP tekniker kan komma att ställas inför. I projekt CONMOD [7] genomfördes det strukturanalys för att identifiera områden som är kritiska med avseende på inneslutningens täthet och bärförmåga, vid en tryck- och temperaturhöjning [7]. Undersökningen i [7] är specifik för den aktuella typen av reaktor och en bedömning behöver göras för varje anläggning. I [7] redovisas dock ett antal områden som ger en vägledning var någonstans i en inneslutning de kritiska punkterna kan vara belägna med avseende på täthet och bärförmåga. Figur 1 visar den studerande inneslutningens övergripande strukturdelar.



Figur 1 Övergripande strukturdelar i en reaktorinneslutning

Nedan sammanfattas resultaten från analyserna i [7] tillsammans med en generell bedömning av möjliga kritiska områden.

Nedre cylinderväggens anslutning mot koniska taket

I detta område identifierades det mest kritiska området vid de genomförda analyserna i [7]. I detta område uppstår stora spänningar i tätplåten och i de vertikala spännkablarna

Koniska taket

Det koniska taket innehåller inte några ringspännkablar förutom de övre och nedre delarna som ansluter mot cylindervägg. Takets mittdel är därmed endast armerad i generatrisled, vilket leder till stora spänningar i tätplåt och generatriskablarna.

Nedre cylindervägg, områden med spännkabelluckor

De mest kritiska områdena för horisontella spännkablar är de spännkabel-luckor (områden där horisontella kablar saknas) som finns på nivåer för genomföringar.



Anslutning av nedre cylinderväggen till bottenplatta

För vissa konstruktionslösningar av anslutningen för den nedre cylinderväggen till bottenplattan, kan denna del vara ett kritiskt område (dock ej den studerande).

Genomföringar

Genomföringar påverkar inneslutningens beteende på grund av

- Håltagningen i sig
- Påverkan av inläggning/placering av spännkablar
- Tätplåtens anslutning till foderrör.

Håltagningen utgör en försvagning av reaktorinneslutningen, det största förekommande håltagningen är personalslussen. Som omnämns tidigare uppstår även spännkabelluckor på grund av genomföringar. Tätplåten sammansvetsas med genomföringen (foderröret), på grund av detta uppstår en fastlåsning av tätplåten vilket ger upphov till ökade spänningar.

Infästning och avtätning av kupol och luckor

Detaljutförningen av anslutningen mellan kupol/luckor till inneslutningskonstruktionen är viktiga för inneslutningens tätande förmåga.

Spännkabelpilastrarna

De vertikala spännkabelpilastrarna utgör förankringsområde för de horisontala spännkablar, dessa har viss positiv inverkan men initierar även lokalt förhöjda spänningar. Även områden för förankring av vertikala spännkablar har lokalt höga spänningskoncentrationer.

5.1 Övriga påverkande parametrar för identifiering av kritiska områden att inspektera

I den undersökning som gjordes i [7] för att identifiera kritiska punkter i en reaktorinneslutning att inspektera, poängterar man även vikten av att följande underlag bör beaktas vid val av områdena.

- Inventering av allt relevant underlag för konstruktionen såsom ritningar, konstruktionsförutsättningar och konstruktionsberäkningar. Speciellt viktigt är att samla och utvärdera information om byggmetoder och vid uppförandet samt vid anläggningsändringar.
- Visuell inspektion av betongkonstruktionen för kartering av större sprickor. Även visuell inspektion där konstruktionsavvikelse har noterats.
- En sammanställning av driftserfarenheter som berör inneslutningen och dess funktioner utförs. Dessa erfarenheter kan omfatta driftstemperaturer i inneslutningen speciellt vid genomföringarna. Eventuella identifierade läckage och otätheter i samband med provningar och inspektioner.



6 OFP-metoder

Vid OFP provning av betongkonstruktioner finns det ett flertal metoder som kan appliceras. Detta avsnitt avser att ge en introduktion samt en överblick av vilka metoder som kan appliceras samt metodernas möjligheter och begränsningar på en översiktlig nivå. Detta är inte en fullständig redovisning av samtliga OFP metoder utan ett begränsat urval av de mest förekommande alternativt de metoder som kan vara intressanta för provning av reaktorinneslutningar. Metoderna som redovisas är de metoder där det möjligtvis finns förutsättningar att möta en eller flera identifierade behov såsom att:

- Verifiera betongenskonstruktionens överensstämmelse med ritning genom att mäta konstruktionen tjocklek, utformning, armeringsplacering samt antaljärn, lokalisering av tätplåt etc.
- Detektera och storleksbestämma sprickor i betongens yta
- Detektera och storleksbestämma sprickor och håligheter i betongens volym
- Detektera och storleksbestämma områden där vidhäftning mellan armering och betong alternativt tätplåt och betong har släppt.
- Bedöma om slakarmering, spännkablar och tätplåt har korrosionsskador samt bedöma omfattningen av korrosionen
- Bedöma skador eller brott på spännkablarna

Det finns även andra behov såsom t ex att bestämma spännkraften i ingjutna spännkablar, mäta eventuella fundamentals rörelse och stabilitet. Metoder för detta behandlas inte i denna utredning då dessa frågeställningar inte kopplas till klassiska OFP metoder. Det är då andra typer av mätningar som behöver göras.

De OFP metoder som kommer belysas kan grovt indelas i följande metoder:

- Elektromagnetiska metoder
- Akustiska metoder
- Visuella/optiska metoder

I nedanstående avsnitt redovisas för respektive metodområde ett antal OFP tekniker och dess användningsområde.

6.1 Elektromagnetiska metoder

6.1.1 High Energy Computed Radiography, HECR

HECR är en effektiv röntgenmetod. Det är en metod som under de rätta förutsättningarna har goda möjligheter att undersöka en betongkonstruktion. Metoden kräver dock åtkomst från två sidor av betongkonstruktionen. Detta är inte alltid fallet för reaktorinneslutningar.

Om åtkomst från två håll medges så är röntgen en relativt känslig metod för att hitta håligheter i betongen och i ofullständigt cementinjekterade kabelka-

naler, $\text{\O}20\text{mm}$ hål med djup 15 mm går att detektera vid en betongtjocklek om 1200mm enligt CONMOD undersökningar [5]. Denna applikation kan även detektera brott på spännkablär.

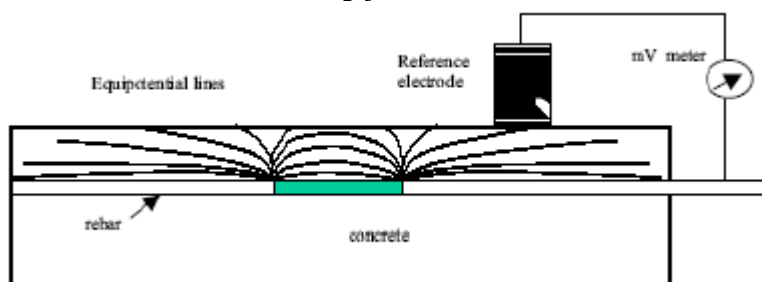
HECR har även möjlighet att detektera områden som har korroderat bort på tätplåten. Storleken på korroderade områden som metoden kan detektera beror på ett antal faktorer såsom betongkonstruktionens tjocklek, mängden armering, tätplåtens tjocklek etc. I de genomförda undersökningarna ingick simulerade defekter i storleksordningen $\text{\O}5\text{-}50\text{mm}$ vilka kunde detekteras. Det ska dock påpekas att $\text{\O}5\text{mm}$ hål detekterades under relativt gynnsamma förhållanden.

6.1.2 Ground Penetrating Radar, GPR

Denna radarmetod fungerar som konventionell radar där kortvågiga radiovågor, elektromagnetisk energi puls, sänds ut i objektet. Det elektromagnetiska fältet reflekteras mot material där den elektriska ledningsförmågan förändras. Metall anses ge en totalreflektion. Det innebär att metallobjekt i en betongkonstruktion kan identifieras. Men även att det inte går att se vad som är bakom metallen, såsom tätplåten. Metoden lämpar sig dock väl för att hitta armeringsstänger och spännkabelrör. Tekniken går även att använda vid detektering av delaminering och sprickor. GPR är en etablerad teknik som används normalt vid betongkonstruktioner upp till 0.5-0.6m. Tekniken går även att användas på större djup upp till en 1m.

6.1.3 Elektrokemisk mätmetod, Halvcellpotential mätning.

Utöver ovanstående elektromagnetiska tekniker finns andra metoder såsom halvcellpotentialmätning vilken är en elektrokemisk mätmetod. Halv-potentialmätning kallas även för elektrodpotentialmätning vilken ger information om korrosion på armeringsjärn. Metoden är lämplig för att avsöka större ytor men har vissa begränsningar då det finns ett flertal faktorer som kan påverka mätningarna och ge ett missvisande resultat. Mätning av armeringens halvpotential sker med hjälp av en referenselektrod med en känd konstant elektrodpotential, vilken är ihopkopplad med armeringen via en voltmeter, se figur 2. Metoden används på bland annat på broar för att undersöka korrosionen hos armeringsjärnet.



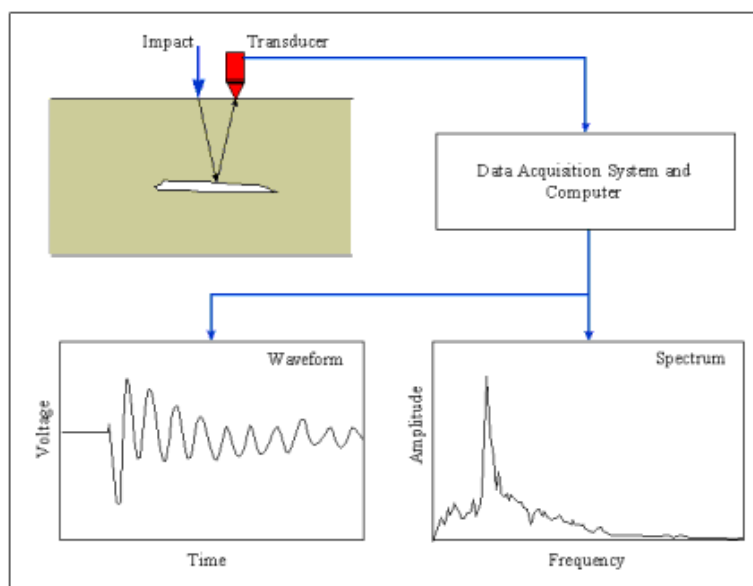
Figur 2 Principen för elektrodpotentialmätning

Metoden är lämplig för att avsöka större ytor, dock kan det vara nödvändigt att verifiera resultatet med andra provningsmetoder.

6.2 Akustiska metoder

6.2.1 Impact-echo, IE

Denna provningsmetod är väletablerad inom oförstörande provning av betongkonstruktioner. Metoden bygger på att man alstrar en ljudvåg till exempel med en stål kula eller en hammare sedan har man en mottagare (geofon eller accelerometer) som processar ljudvågen som propagerat genom betongen och reflekteras av inre brister såsom sprickor, delamineringar håligheter etc och yttre begränsningar såsom betongkonstruktionen baksida. Mottagen signal analyseras i tids- eller frekvensplanet. Provningsmetoden kan avgöra vilket djup den eventuella defekten är placerad i betongkonstruktionen samt att metoden kan användas för att mäta betongkonstruktionens tjocklek. I figur 3 nedan redovisas metodens princip.



Figur 3 Impact-echo, figure över metodens princip

6.2.2 Spectral Analysis of Surface Waves - SASW

Denna metod baserar sig på utbredning av ytgående mekaniska vågor. Genom en mekanisk stöt genereras en stötvåg i betongkonstruktionens yta. Två mottagande sökare (geofoner eller accelerometer) placeras på olika avstånd från den punkt där stötvågen alstrades. Denna metod används för att få information om betongens egenskaper på djupet och globalt. Vågformerna som registreras i mottagarna används för att utvärdera om olika lager i betongkonstruktionen har varierande egenskaper, t ex styvheten.

6.2.3 Multi-channel Analysis of Surface Waves - MASW

Denna metod har samma grundläggande principer som SASW, d.v.s. att den baserar sig på utbredningen av ytgående mekaniska vågor. Skillnaden mot



SASW är att det finns fler mottagande sökare. Detta gör att mer information om de olika skikten i en betongkonstruktion erhålls. Detta gör att datainsamlingsutrustningen behöver vara mer kraftfull samt tillhörande analysprogram. Denna metod kan utvärdera betongegenskaper för flera skikt samt med en konstruktion med en varierad geometri. Metoden kan användas för att mäta betongtjocklek samt ingående lagers tjocklek, i viss mån mäta betongens mekaniska egenskaper och kvalitet samt bindningen mellan tätplåt och betong.

6.2.4 Impulse response metoden, IR

Impulse responsmetoden bygger på samma grundprincip som Impact-echo metoden. D.v.s att man alstrar en ljudvåg vilken består av akustiska vågor med frekvenser i första hand under ultraljudsområdet. Det som utmärker metoden är utöver hastighetsresponsen från konstruktionen mäts även kraft-tidssambandet för stöten. Ett impuls-respons spektrum bildas som överföringsfunktion mellan in- och utsignal, ur detta spektrum utvärderas den dynamiska styvheten eller avståndet till en reflektor. Reflektorn kan bestå av hållighet, spricka eller betongkonstruktionens baksida.

6.2.5 Akustisk emission AE

Akustisk emission är en passiv metod som lyssnar efter ljud som alstras av materialet. Metoden kan både registrera korrosion och sprickbildning. Ljudet som alstras när materialet genomgår förändringar registreras av piezoelektriska mottagare som är monterade på objektet. Det mottagna ljudet processas för att filtrera bort bakgrundsljud. Analysverktyget lokaliserar vart på objektet de mottagna sprickorna härrör. Metoden kan användas genom att mäta konstant på objektet för att registrera förändringar eller användas i samband med provtryckningar där konstruktionen belastas. Enligt [6] kan metoden på ett tillförlitligt sätt detektera merparten av de möjliga skadorna hos betongkonstruktionen med dess armering. Metoden kan användas för kontinuerlig mätning under belastning, exempel på sådan tillämpning är på broar av betong.

6.2.6 Ultraljud Pulseko, UPE

Metoden baserar sig på att ljudvågor alstras ner i betongen, energi/ljudvåg reflekteras mot t ex sprickor, hålligheter och samt betongens motstående sida. Mottagningen av reflekterade ljudvågen kan göras antingen med den sändande enheten eller en separat mottagare. Metoden används för att detektera defekter i volymen. Ultraljudsmetoden kan användas för mätning från en sida, med både sändare och mottagare, på bekostnad av att det blir begränsad tjocklek på komponenten. Alternativt genomlysningssmetoden då en sökare placeras på vardera sidan av objektet, med denna applicering kan tjockare komponenter avsökas. Metodens applicering på inneslutningar kan vara komplicerad på grund av konstruktionens tjocklek, tät armering samt de ingående spännkabelkanalerna. Metoden kan detektera sprickor och hålligheter samt lokalisera övriga ingående delar i en betongkonstruktion såsom



armeringsjärn och spännkabelkanaler. Med ultraljud kan även vissa egenskaper, såsom elastiska egenskaper och hållfasthetsbestämning, hos betongen uppskattas under gynnsamma förhållanden, detta görs genom att mäta upp ljudhastigheten hos komponenten och vidare analysera detta resultat.

Den ljudvåg som alstras i betongen har normalt en frekvens inom spannet 20 kHz till 500kHz och kan vara av vågtypen longitudinell eller transversell. Vid minskad frekvens ökar inträngningsdjupet i komponenten, men med minskad frekvens minskar även upplösningsförmågan. Betongkonstruktioner upp till 1m kan avsökas med ett relativt gott resultat, även tjockare komponenter kan avsökas. Detta är dock beroende av vilken storlek på defekter som avses detekteras.

6.3 Visuella metoder

Visuella metoder används idag som en del i bedömningen av betongkonstruktioners tillstånd. Visuella inspektioner utförs direkt utan hjälpmedel eller med hjälpmedel såsom fiberoptik, kamera, spegel etc,

Inom Nuclear Energy Agency (NEA) / Committee on the Safety of Nuclear Installations (CSNI) har en arbetsgrupp utvärderat behov och möjligheter för olika provningsmetoder för betongkonstruktioner[8]. I denna rapport har det redovisats att visuell provning är något som man kan användas för att få en överblick av hela betongkonstruktionens yta. NEA/CSNI redovisar att visuella metoder kan vara en del i att detektera åldringsrelaterade skador som t.ex. sprickor, fukt, ytsplittring saltutslag etc.på betongstrukturens yta. De redovisar vidare ett behov av förbättrad teknik för kartering av sprickor på stora ytor av betongen.

I projekt Conmod [7] redovisas att en viktig del vid genomförande av strukturanalyser är att denna föregås av en visuell inspektion där eventuella konstruktionsavvikelser noteras samt att en kartering av större sprickor utförs. Då dessa faktorer kan påverka resultatet av strukturanalyser vid identifiering av kritiska punkter hos en reaktorinneslutning.

Bodycote rapport [10] redovisar ett par möjliga optiska metoder för att göra en kartering av sprickor på större ytor. Dessa är ESPI vilket står för Electronic Speckle Pattern Interferometry och shearografi. Båda metoderna bygger på att man belyser ytorna med laser och har en mottagande del i form av en kamera. Den mottagande delen kan registrera små förändringar i ytan vid belastning. För shearografi är vanliga belastningsmetoder av ytan, värme, vacuum och vibrationer. För ESPI anges provtryckning av inneslutningen som en möjlig belastningsmetod.



6.4 Värdering av användbarheten av OFP på betongstrukturer i kärnkraftanläggningar

Denna utredning har konstaterat att det finns möjligheter att prova betongkonstruktioner såsom reaktorinneslutningen med dess ingående delar. Dock finns även begränsningar för OFP metodernas förmåga. Följande kan konstateras i denna utredning.

- Det finns idag OFP metoder för att verifiera betongkonstruktionens överensstämmelse med ritningar för att verifiera as-built överensstämmelse mot konstruktionsritning. Dock kan det finnas lokala begränsningar p.g.a. åtkomst problem.
- Det finns OFP metoder för att detektera och i viss mån storleksbestämma sprickor i betongens yta. Dock kräver detta normalt åtkomst till den yta där sprickor finns belägna.
- Detektera och storleksbestämma defekter och håligheter i betongens volym är möjlig. OFP metodernas förmåga att detektera defekter och håligheter behöver vidare utredas. Förmågan att detektera och storleksbestämma är starkt beroende av i vilken grad full åtkomst till konstruktionen är möjlig.
- Det finns teknik för att verifiera att det finns vidhäftning mellan armering och betong samt mellan tätplåt och betong. Åtkomst till närliggande yta ger ett bättre resultat.
- Korrosion av slakarmering går att konstatera och mäta. Det finns flera metoder att mäta detta med. Åtkomst från närliggande yta ger ett bättre resultat. Tjocka betongkonstruktioner med begränsad åtkomst påverkar provningsresultatet negativt. Även flera lager av armering kan påverka mätningarna.
- Då det gäller ingjutna spännkablar finns det begränsade möjligheter att använda OFP. Det går under gynnsamma förhållanden att konstatera ett brott på spännkabeln med OFP. Det finns ringa eller mycket små möjligheter att konstatera korrosion eller andra skador på den ingjutna spännkabeln.
- När det gäller tätplåten finns det provningsmetoder för att detektera större korrosionsangrepp, detta förutsätter dock åtkomst till den närliggande ytan av konstruktionen för bästa möjliga resultat. Där tätplåten är fri från betong samt medger åtkomst, finns det OFP metoder som kan användas för att konstatera samt mäta storleken på korroderade områden.

NEA/CNSI har i [9] pekat ut att återkommande kontroll av tjocka armerade betongkonstruktioner vilka man inte har full åtkomst för provning, är högt prioriterade ämnesområde för vidare behandling. I [9] anges att det allmänt



för OFP metoderna saknas det oberoende verifierad information om provningskapacitet för säkerhetskritiska betongstrukturer i tillräcklig omfattning. Denna utredning delar den slutsatsen.

Denna utredning har på en övergripande nivå bedömt möjligheterna att genomföra provning på identifierade områden och ingående delar i betongkonstruktionen. Det bör vidare undersökas vilka krav som ställs på provningssystemens förmåga att detektera korrosion och defekter såsom håligheter och sprickor. Samt eventuella behov av med vilken noggrannhet dessa degraderingar ska storleksbestämmas. Dessa behov bör kopplas till respektive identifierat kritiskt område i avsnitt 5.

SSM bör framöver fortsätta att stödja sådan forskning som undersöker och utreder provningssystem kapacitet att detektera och storleksbestämma defekter i betongkonstruktioner samt dess ingående delar. En viss prioritering bör göras för OFP undersökningar av tjocka betongkonstruktioner där det är begränsningar i åtkomst, där befaras de största begränsningarna finnas för OFP metoder. I avsnitt 5 så identifierades t.ex. det koniska taket som ett av de kritiska områdena som kan behöva provas. Denna del har även en komplex och svår provad geometri. Det är dock viktigt att även verifiera vad provningstekniker kan klara av under gynnsamma provningsförutsättningar vid mindre komplexa och mer normala geometrier.

7 Omvärldsbevakning och forskning

SSM följer idag omvärldsbevakningen och forskning i olika forum. Ur ett OFP perspektiv har provning av betongkonstruktioner på kärnkraftverk under det senaste decenniet börjat synas mer och mer vid internationella konferenser och antalet arbetsgrupper inom området har ökat. Utvecklingsinsatserna inom området har ökat och det är av vikt att följa utvecklingen nationellt och internationellt.

SSM deltar i följande två arbetsgrupper, en på internationell nivå och en på nationell (delvis nordisk) nivå där frågor samt projekt som berör OFP av reaktorinneslutning behandlas:

- NEA/CSNI- Kommittén för säkerhet vid kärntekniska anläggningar (CSNI) Arbetsgruppen för Integritet och åldrande Komponenter och strukturer (IAGE) har som ett allmänt mandat att föra fram aktuell kunskap rörande aspekter som är relevanta för att säkerställa integriteten hos konstruktioner, system och komponenter. Den arbetsgrupp som är relevant för detta ämnes område är – integritet och åldrande hos betongstrukturer
- ELFORSK- Betongprogram: Kärnkraftverken innehåller omfattande betongkonstruktioner för vilka nya metoder och verktyg



måste tas fram för att säkerställa status och i förekommande fall kunna genomföra kvalitetssäkrade reparationer. Mot denna bakgrund startade Elforsk 2007 ett betongtekniskt program finansierat av kärnkraftsverken i Sverige och TVO i Finland samt av Strålsäkerhetsmyndigheten, SSM.

I nuläget bedöms deltagandet i de två ovanstående arbetsgrupperna vara tillräckliga, dock kan deltagandet och finansieringen behöva ökas ytterligare, för att följa och genomföra nödvändiga projekt.

SSM finansierar även andra forskningsprojekt utanför ovanstående arbetsgrupper. Ett exempel på ett sådant projekt är CONSAFESYS, där det t.ex. ingår att utvärdera och validera provningskapacitet för olika OFP-metoder under realistiska förhållanden på både avställda kärnkraftverk (Barsebäck) och andra kärnkraftverk (Oskarshamn 3).

Utöver ovanstående så deltar SSM i konferenser på nationell och internationell nivå för att följa utvecklingen inom OFP för betongkonstruktioner.

8 Slutsatser och rekommendationer

Utredningen har identifierat och sammanställt de degraderingsmekanismer som eventuellt kan vara aktuella för betonginneslutningar på kärnkraftverk. De oförstörande provningssystemen kommer inte alltid kunna detektera dessa skademekanismer, men kan eventuellt identifiera sekundära effekter såsom korrosion och sprickbildning. Även vissa andra materialparametrar kan mätas med OFP och användas vid en tillståndsbedömning av betongkonstruktioner. Utöver ovanstående degraderingsmekanismer så har det i utredningen konstaterats att det är av vikt att verifiera konstruktionen mot det ursprungliga ritningsunderlaget då det vid ett flertal tillfällen har konstaterats avvikelser. Detta kan leda till degraderingar eller påverka betongkonstruktionens bärförmåga och täthet, vid ökat tryck. Detta är en av de mest kritiska faktorerna för uppkomst av skador i betongkonstruktioner.

I utredningen har kritiska områden för en specifik reaktorinneslutning redovisats för att få en bild av vilka provningstekniska förutsättningar som kan komma att uppstå. Dessa för provning intressanta områden har genom tidigare utförda strukturanalyser identifierats som områden som är kritiska med avseende på inneslutningens täthet och bärförmåga vid en ökad temperatur och tryck. Detta visar att det går att identifiera kritiska områden för att kunna prioritera och begränsa provningsområdena. Detta arbete behöver utföras för respektive reaktors betongkonstruktioner mer detaljerat för att få en fullständig bild av vilka de kritiska delarna är och dokumentera provningsförutsättningarna för dessa. Det behöver undersökas vidare vilka detekterings- och eventuella storleksbestämnings krav som kommer att ställas på de oförstö-



rande provningsmetoderna vid en tillståndsbedömning, innan en slutlig bedömning av kontrollmetodernas effektivitet och ändamålsenlighet kan göras.

Utredningen har konstaterat på en övergripande nivå att det kan vara möjligt att genomföra kontroll och provning med oförstörande provning för att upptäcka degraderingar på merparten av de ingående delarna i en betongkonstruktion. Även när det gäller att verifiera befintlig konstruktion mot ritningsunderlag finns det idag möjligheter att göra detta med OFP metoder. Vad det gäller metoder för att undersöka betongens yta så finns det metoder som går att applicera, dock kan en kravbild av vad som behöver detekteras behövas definieras. När det gäller volymetrisk provning av betongen med dess ingående delar så finns det både möjligheter och begränsningar. Det kan konstateras i denna utredning att när betongkonstruktioner har en ökande tjocklek så minskar detekterings och karakteriseringsförmågan avsevärt om man endast har åtkomst från en sida, vilket innebär att för tjocka betongkomponenter finns det behov av vidare forskning och utveckling.

För de ingjutna spännkablarna behöver nya provningsmetoder utvecklas för att kunna göra en tillståndskontroll av dessa. Litteraturen anger att det går att bedöma om dessa ingjutna kablar är av med OFP, men inte kunna göra några tillförlitliga bedömningar av eventuell degradering såsom korrosion och andra skador. För att tillstånds bedöma den ingjutna tätplåten finns det vissa möjligheter med dagens provningstekniker. Dock behöver metoder vidareutvecklas, speciellt i de fall där åtkomst från närliggande sida är begränsad. Vid dessa fall finns det inte några tillförlitliga metoder med dagens teknik.

Utredningen anser att SSM bör fortsätta samt eventuellt fördjupa deltagande i den internationella arbetsgruppen inom NEA/CSNI vilken handhar frågor rörande betongstrukturers integritet och åldring. SSM bör fortsätta sitt deltagande i den motsvarande nationella arbetet inom ELFORSK. Även specifika forskningsprojekt som stöder ovan identifierade behov bör SSM stödja.

9 Referenser

- [1] 10 CFR 50 Appendix J – 10/26/95- Primary Reactor Containment Leakage Testing for Water-Cooled Power Reactors
- [2] SKI Rapport- Utredning kring reaktorinneslutningar – konstruktion, skador samt kontroller och provningar- Rapport 02:58, januari 2003
- [3] SKI Rapport – Betonginneslutningar i svenska kärnkraftverk, SKI Rapport 02:59, December 2002
- [4] SSM utredningsrapport – Tillsyn och förutsättningar för långa drifttider av åldrande kärnkraftanläggningar, SSM2010/659, 2010-11-29
- [5] Force Technology Report - Concrete containment management



- using Finite Element technique combined with in-situ Non-destructive Testing of conformity with respect to design and construction quality (CONMOD) – Main report, 2005
- [6] Licentiate thesis, Revealing of age-related deterioration of pre-stressed reinforced concrete containments in nuclear power plants- Requirements and NDT methods, Elena Österberg, 2004
 - [7] Technical Report, CONMOD – Utvärdering av inneslutningen vid Barsebäck 1 Steg 1: Förberedande strukturanalyser, SCTE/02401/TR-01 utgåva 1, 2002-11-18
 - [8] Development Priorities for Non-Destructive Examination of Concrete Structures in Nuclear Plant, NEA/CSNI/R(98)6, 1998
 - [9] A decade of CSNI Activities in the Area of Ageing of Nuclear Power Plant Concrete Structures, NEA/CSNI/R(2008)14, December 2008.
 - [10] Bodycote Technical report TEK06-0428 ed. 1, Recent progress within Non-Destructive Testing of concrete structures, 2006-11-13