



Strål
säkerhets
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

Författare: Pär Ljustell
Erik Hansson
Inspecta / Stockholm

Forskning

2018:10

Tillståndsbedömningar av betong-
strukturer inom kärnkraft - BEKON

SSM perspektiv

Bakgrund

Bedömning av tillståndet hos betongkonstruktioner i kärntekniska anläggningar är en central del i en säker förvaltning av kärntekniska anläggningar. De svenska anläggningarna blir äldre och många har gått eller är på väg att gå in i långtidsdrift vilket gör att tillståndet hos betongkonstruktionerna får allt större betydelse vid säkerhetsbedömningar av anläggningarna. Därför är det viktigt med aktuell kunskap om förekommande degraderingsmekanismer samt kunskap om tillämpliga kontroll- och provningsmetoder för sådana konstruktioner.

Syfte

Syftet med forskningsprojektet är att utifrån en litteraturstudie sammanställa kunskap om lämpliga metoder för bedömning av tillståndet hos betongstrukturer i kärntekniska anläggningar. Denna kunskap är väsentlig för att uppnå hög kvalitet i säkerhetsbedömningar av befintliga anläggningar.

Resultat

Rapporten visar att en god bedömning av en betongkonstruktion kan uppnås genom att ett antal aspekter beaktas av personer med erforderlig kunskap och erfarenhet.

- Vilka betongytor som ska avsynas alternativt besiktigas besvaras genom en grundläggande förståelse för konstruktionens funktion och hur lasten tas upp i konstruktionen.
- Vilka degraderingsmekanismer som riskerar att förekomma kan besvaras med hjälp av lokala miljöförhållanden.
- Vilken metod/inspektionsteknik som kan tillämpas på en specifik betongkonstruktion för identifiering av eventuell skada kan bestämmas utifrån kännedom om möjliga degraderingsmekanismer.
- Vilka toleransvillkor som kan tillåtas med avseende på eventuell degradering bör fastställas innan inspektion av betongkonstruktionen genomförs. Detta med syfte att öka objektiviteten i bedömningen.

Rapporten har behandlat reaktorinneslutningar och kylvattenvägar. Dess kvalitativa slutsats är att degraderingsmekanismer med risk för konsekvenser på säkerheten är främst korrosion i reaktorinneslutningar och erosion, kloridinträngning, korrosion, vittring och urlakning i kylvattenvägarna. Projektet bedömer att dessa degraderingsmekanismer bör kunna identifieras med konventionella provningsmetoder så som t.ex. visuell kontroll, bomknackning, karbonatiserings- och kloridmätning, ultraljudprovning samt petrografi.

Resultatet av detta projekt ska kunna bidra vid SSM:s säkerhetsbedömningar av betongkonstruktioner i kärntekniska anläggningar.

Behov av ytterligare forskning

Oförstörande provning för betongkonstruktioner är i allmänhet ett område där behov finns av ytterligare forskning.

Projekt information

Kontaktperson SSM: Sofia Lillhök

Referens: SSM 2015-1011



Strål
säkerhets
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

Författare: Pär Ljustell
Erik Hansson
Inspecta / Stockholm

2018:10

Tillståndsbedömningar av betong- strukturer inom kärnkraft - BEKON

Datum: April 2018

Rapportnummer: 2018:10 ISSN: 2000-0456

Tillgänglig på www.stralsakerhetsmyndigheten.se

Denna rapport har tagits fram på uppdrag av Strålsäkerhetsmyndigheten, SSM. De slutsatser och synpunkter som presenteras i rapporten är författarens/författarnas och överensstämmer inte nödvändigtvis med SSM:s.

Innehållsförteckning

1. Sammanfattning	3
2. Beteckningar	4
3. Inledning	5
Bakgrund	5
Problem.....	5
Syfte och mål.....	6
Metod	6
Avgränsning	6
4. Översiktlig konstruktionsbeskrivning av betongkonstruktioner inom kärnkraftsindustrin i Sverige	7
Reaktorinneslutningar.....	7
Kylvattenvägar	9
5. Degraderingsmekanismer i betong	10
Miljöbetingad nedbrytning.....	10
6. Miljöbeskrivning och potentiella skademekanismer för betongkonstruktioner inom kärnkraft	14
Reaktorinneslutningar.....	14
Bedömning av skademekanismer förekommande in reaktorinneslutningen	15
Kylvattenvägar	16
Bedömning av skademekanismer förekommande in kylvattenvägar.....	16
7. Diagnosticering och informationskrav.....	18
8. Återkommande kontroll och besiktning av betongstrukturer inom kärnkraft.....	19
Reaktorinneslutningar i Svenska anläggningar.....	19
Kontroller och besiktningar av reaktorinneslutningar och kylvattenvägar i USA.....	20
Kylvattenvägar i Svenska anläggningar	20
9. Bro och tunnelförvaltning (BaTMan) - Trafikverket	21
Övergripande kvalitetssäkring och arbetsflöde i BaTMan.....	23
Mätning och bedömning av broars tillstånd.....	24
Beslutsregler och särskild inspektion	26
Krav på genomförande av skadeutredning	27
Nästa inspektion	27
Metoder för mätning av fysiskt tillstånd i betong	28
Tryck- och spräckhållfasthet – uttag av provkroppar	28
Karbonatisering.....	29
Täckskicktsmätning.....	29
Kloridmätning	30
Sprickmätning	30
Bomknackning	30
Elektropotentialmätning (t.ex. halvcellspotential)	30
Provtagning i vatten	31
Frostbeständighet	31
Mikroskopisk analys.....	31
Ultraljudsmätning	31
Termografimätning.....	31
Betongytor under isolering	31
Okulär inspektion genom ”fönster”	32
Undersökning av spännkablar	32
10. Statusbestämning av betongkonstruktioner	33

Provningsmetoder för betong	33
Anslagsmetoder	34
Ultraljudsprovning	34
Karbonatiseringsmätning	35
Kloridjonmätning	35
Elektromagnetiska metoder (Virvelström, radar etc.)	35
Petrografi.....	36
Visuell inspektion	37
Mekanisk provning	37
Radiografiska metoder.....	38
Provmetoder för armering	38
Halvcellspotential (Potentialmätning)	38
Resistivetsmätning	39
Ytpotentialmätning	39
11. Resultat – Urval av provningsmetod baserat på typ av konstruktion och degraderande process	40
12. Diskussion och slutsatser	43
13. Rekommendationer	46
14. Förslag till fortsatta insatser	47
15. Erkännanden	48
16. Referenser	49

1. Sammanfattning

Tillståndsbedömningar av betongkonstruktioner är en vital del i ett större perspektiv gällande förvaltning av betongkonstruktioner. Detta p.g.a. att många av de åtgärder som beslutas vilar på någon form av bedömning av betongkonstruktionen. Begreppet tillståndsbedömning täcker in flera områden och för en god tillståndsbedömning behöver ett antal frågor besvaras av personal med erforderlig kunskap och erfarenhet:

- Plats: var/vilka betongytor ska avsynas alternativt besiktigas? Grundläggande är förståelsen för konstruktionens funktion och hur lasten tas upp i konstruktionen, d.v.s. en genomgång av ritningar, beräkningsrapporter, inspektionsrapporter etc. ska göras innan inspektionen i fält påbörjas. Detta ger svaret var/vilka ytor som ska avsynas alternativt besiktigas.
- Degraderingsmekanismer: vilka degraderingsmekanismer eftersöks? En analys av degraderingsmekanismer föreliggande med rimlig nivå av risk för förekomst m.h.t. lokala miljöförhållanden är grundläggande.
- Mätmetod/inspektionsteknik: vilken teknik ska tillämpas på specifikt konstruktionselement? Med kännedom om möjliga degraderingsmekanismer kan de mest lämpade teknikerna/metoderna väljas ut för identifiering av eventuell skada.
- Toleransvillkor: vid identifikation av skada, hur fortskriden degradering kan tillåtas? Toleransvillkor krävs för respektive konstruktionsdel och degraderingsmekanism. Nivåerna bör vara definierade innan inspektion i fält genomförs. Detta för att öka objektiviteten i bedömningen.

I föreliggande rapport behandlas reaktorinneslutning och kylvattenvägar. Degraderingsmekanismer som kan föreligga för respektive konstruktion baserat på konstruktionsutformning och lokal miljö redovisas. Den kvalitativa slutsatsen är att degraderingsmekanismer med risk för säkerhetsmässig konsekvens utgörs främst av korrosion i reaktorinneslutningen. För kylvattenvägarna gäller främst erosion, kloridinträngning, korrosion, vittring och urlakning. Dessa bedöms kunna identifieras med konventionella provningsmetoder.

Trafikverket har en utvecklad metodik för tillståndsbedömning av betongkonstruktioner vilket förvaltas inom ett system vid namn Bro- och tunnelförvaltning (BaT-Man). Metodiken för tillståndsbedömningar går igenom i föreliggande rapport och den bedöms utgöra en bra grund för vidareutveckling till ett system anpassat till kraven inom kärnkraftsindustrin.

2. Beteckningar

ACI	American concrete institute
AKR	Alkalikiselreaktion
ASME	American society of mechanical engineers
BaTMan	Bridge- and tunnel management
BWR	Boiling water reactor
CBI	Cement och betonginstitutet
LH-betong	Långsamt härdande betong
LOCA	Loss of coolant accident
NRC	Nuclear regulatory commission
PWR	Pressure water reactor
RCT	Rapid chloride test
SAR	Safety analysis report
SEM	Svepelektronmikroskop
SSM	Strålsäkerhetsmyndigheten
STF	Säkerhetstekniska föreskrifter
TK	Tillståndsklass
Vct	Vatten-cement-tal

Begrepp och definitioner [1]:

Ord	Definition
Avsyning	Endast undersökning okulärt/visuellt
Inspektion	Underökning med känsel och hörsel, ex. bomknackning. Avsyning ingår i inspektion.
Kontroll	Mätningar och provuttag. Ex. mätning av täckande betongskikt, uttag för klorid- och karbonatiseringsanalys.
Besiktning	Avser helheten, d.v.s. alla ingående moment: avsyning, inspektion och kontroll.
Tillståndsbedömning	En tillståndsbedömning ska ge svar på nuvarande och framtida status hos konstruktionen. Resultat av besiktning, resultat av analyserade prover, historik och anläggningsdata ger tillsammans underlag för en tillståndsbedömning.

3. Inledning

Bakgrund

Med i dag känd information kommer Sverige efter år 2020 ha 6 kärnkraftsreaktorer i drift. Dessa uppfördes under 1970 och 1980-talet. Avsedd drifttid vid uppförandet var 40 år vilket senare har reviderats och förlängts genom uppgraderingar av ett antal anläggningar till 60 års drift. Vid en uppgradering kontrolleras samtliga konstruktionsdelar vilka kan påverkas av eventuella nya driftsparametrar under fortsatt drift. Således byts t.ex. vissa detaljer ut för att säkerställa att gällande krav uppfylls. Emellertid är vissa delar i en kärnkraftsanläggning inte praktiskt möjliga eller ekonomiskt försvarbara att byta ut. Däri ingår t.ex. vissa delar av säkerhetsmässig betydelse så som reaktorinneslutningen och biologiska skärmen, men även delar av kylvattensystemen. Här krävs istället kontroller genom oförstörande provning och till viss mån uttag av provkroppar för förstörande provning samt kunskap om hur betong påverkas av lokala faktorer under långa tider.

Vid tiden för uppförandet av kärnkraftsanläggningarna var kunskapen om hur man uppför grova betongkonstruktioner god [2]. Dock var kunskapen kring betongs beständighet begränsad vilket kan uttolkas av att det inte fanns något regelverk för t.ex. blandningsförhållanden för betong med olika tillämpningar [3]. Idag finns dessa regelverk. Således finns en större tillförlitlighet hos moderna betongkonstruktioner avseende betongens förmåga att lokalt motstå belastning med avseende på funktion och miljö.

Problem

Med åldrande anläggningar blir tillståndsbedömningen av betongkonstruktioner en allt viktigare aspekt för att säkerställa funktion och minimera driftstörningar samt upprätthålla säkerheten i industrianläggningar generellt och så även inom kärnkraftsindustrin. Historiskt har frågan kring åldrande armerade betongkonstruktioner inte varit något problem av signifikant art då de tidiga konstruktionerna i samhället uppfördes på bredare front först under mitten av 1900-talet och betong är mycket beständigt. Vidare, upptäcktes skador så reparerades dessa eller så revs konstruktionen och en ny uppfördes. Detta angreppssätt är inte alltid möjligt inom kärnkraftsindustrin och således blir tillståndsbedömningen en viktig del i bedömningen av säkerheten kring anläggningen.

I en kärnkraftsanläggning finns två system, relaterat till armerade betongkonstruktioner, intressanta ur ett åldringssperspektiv och med säkerhetsmässig betydelse. Dessa är reaktorinneslutningen och kylvattensystemet. Tillståndsbedömning av betongen i reaktorinneslutningen och i biologiska skärmen, vilken är den del av betongstrukturen i reaktorinneslutningen närmast härden, är viktig för värdering av dess kondition relativt uppställda krav. Biologiska skärmen utsätts för de högsta exponeringsnivåerna av neutron- och γ -strålning vid en jämförelse med samtliga övriga betongstrukturer i en inneslutning. Att strålning degraderar egenskaperna hos betong och armering är känt. Emellertid råder för närvarande en brist på kunskap huruvida detta är eller kan bli ett problem för betongen i biologiska skärmen under

anläggningarnas driftstid [4, 5]. Således är det motiverat att genomföra tillståndsbedömningar av betongen närmast reaktorn.

Betongkonstruktioner inom kylvattensystemen exponeras för en aggressiv miljö i form av tempererat bräckt- eller saltvatten med turbulent strömning i vissa positioner. Vidare finns biologisk tillväxt som också kan påverka betongen. Denna miljö är väsentligt annorlunda jämfört med miljön i en reaktorinneslutning. Således kan olika typer av degraderingsmekanismer förväntas i betongen i de olika byggnadsdelarna. Därmed blir det betydelsefullt att de mest lämpade metoderna används för rätt statusmarkörer i respektive byggnadsdel för att säkerställa ett tillförlitligt resultat av konditionsbedömningen.

Syfte och mål

Syftet med föreliggande litteraturstudie är att skapa ett underlag för bedömning av vilka provningsmetoder som är lämpliga för tillståndsbedömning av betongkonstruktioner med säkerhetsmässig betydelse inom kärnkraft. Föreliggande rapport riktar sig till en intresserad allmänhet med intresse för tillståndsbedömningar av betongkonstruktioner. Således begränsas de tekniska beskrivningarna till en allmän nivå. Målet med studien är att specificera konventionella provningsmetoder som fångar potentiella degraderingsmekanismer, vilka kan vara aktuella för betongkonstruktioner med säkerhetsmässig betydelse, i olika delar av en kärnkraftsanläggning.

Metod

Informationen i föreliggande rapport är inhämtad från böcker, utredningar och forskningsrapporter samt webbplatser.

Avgränsning

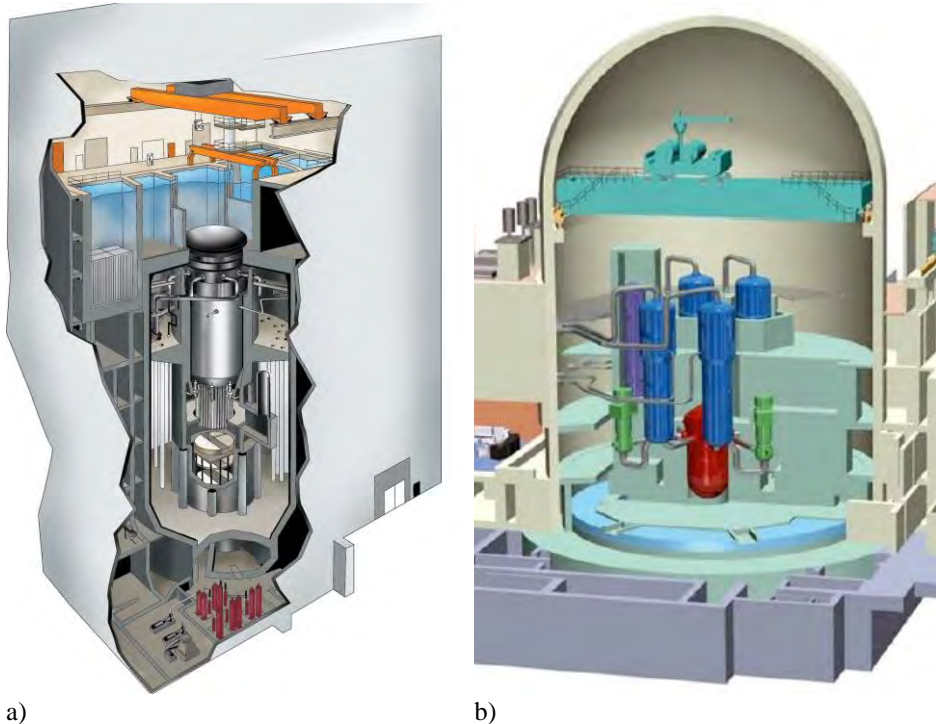
Föreliggande rapport är en litteraturstudie av möjligheter och begränsningar med olika provningsmetoder för tillståndsbedömning av betong. Rapporten fokuserar på betongkonstruktioner med säkerhetsmässig betydelse och utsatta för åldring, d.v.s. reaktorinneslutningen samt kylvattensystemen. Övriga byggnader behandlas endast översiktligt. En översiktlig beskrivning av de olika konstruktionerna samt dess miljö- och driftsförutsättningar redovisas. Vidare redovisas en begränsad del av Trafikverkets ledningssystem för hantering av bro och tunnlar konstruerade i armerad betong kopplat till tillståndsbedömningar av dito.

4. Översiktlig konstruktionsbeskrivning av betongkonstruktioner inom kärnkraftsindustrin i Sverige

Det utmärkande för betongstrukturer inom kärnkraftsindustrin är att konstruktionerna är platsbyggda, armerade och i vissa delar med särskilda krav. Ur drift- och säkerhetssynpunkt är två olika betongkonstruktioner speciellt intressanta i en kärnkraftsanläggning; reaktorinneslutningen med specifika krav på tryckupptagande förmåga, täthet och moderering av strålning samt kylvattenvägarna vilka är utsatta för en extremt aggressiv miljö. Reaktorinneslutningens tryckupptagande förmåga erhålls genom spännarmering och dess täthet genom en ingjuten tätplåt. Moderering av strålning uppnås genom ökad vägg tjocklek vilket föranleder kraftiga vägg tjocklekar. För att minimera risken för sprickbildning användes vid uppförandet s.k. långsamt hårdnande betong (LH-betong) i de tjocka konstruktionerna [6].

Reaktorinneslutningar

I principiella drag består de svenska inneslutningarna av en bottenplatta på vilken det står en koncentrisk mantel. På mantelns övre del ligger någon form av lock. Utseende och form av de övre delarna av inneslutningen är framförallt beroende av typ av reaktor (BWR eller PWR), men kan även skilja sig inom respektive typ. Inne i en inneslutning för en BWR finns en centrumpelare på vilken reaktortanken står. Centrumpelaren fortsätter upp och omgärdar reaktorns mantel upp till inneslutningens tak, se figur 1a. Om reaktorn är av externpumpstyp finns ett mellanbjälklag placerat nedanför reaktortanken i höjd med styrdonsutrymmet och för en internpumpsreaktor återfinns mellanbjälklaget i höjd med moderatortanken och dess stativ. Mellanbjälklaget separerar primär- och sekundärutrymmet och skapar dess trycknedtagningsfunktion tillsammans med kondensationspoolen. I en inneslutning för en PWR återfinns inget mellanbjälklag och ingen kondensationspool, se figur 1b. Dess tryckupptagande förmåga ges av den inneslutna volymen i reaktorinneslutningen som är väsentligt större för en PWR jämfört med en BWR. Reaktortanken i fallet PWR omgärdas även den av en strålskärm av slakarmerad betong.



a) b)
 Figur 1. Översiktsbild av reaktorbyggnad samt reaktorinneslutning. a) BWR internpumpsreaktor. b) PWR. Källa KSU.

De svenska reaktorinneslutningarnas väggar är uppbyggda enligt principen om att ett tunnare slakarmerat betongskikt (0.2-0.3 m) finns på insidan av inneslutningens koncentriska mantel. Detta betongskikt har som primär funktion att skydda tätplåten (4-8 mm tjock), som är belägen direkt utanför det inre betongskiktet, från korrosiva ämnen samt även verka som missilskydd vid händelse av s.k. LOCA (stort rörbrott). Tätplåtens funktion är att verka förslutande och därmed hindra utsläpp av radioaktiva ämnen vid haveri. Direkt utanför tätplåten anligger ett tjockare betongskikt (0.7-1.2 m) vars primära funktion är att verka lastbärande, i kombination med spännarmeringen, för det inre övertryck som kan uppstå vid ett stort rörbrott. D.v.s. spännarmeringens funktion är att verka för att endast tryckspänningar ska råda i betongen vid stort rörbrott. En viss mängd slakarmering finns även i den yttre mantelns ytskikt [6]. Betongen har även till uppgift att moderera strålningen så den inte kan tränga utanför inneslutningen.

Reaktortanken av typ BWR står/vilar med en kjol mot en centrumpelare som i sin tur står på bottenplattan. Beroende på om reaktorn är av typen intern- eller externpumpsreaktor ansluter kjolen högt upp eller lägre ner på centrumpelaren som omsluter reaktortankbotten samt dess mantel. Centrumpelaren har ingen tryckbärande säkerhetsfunktion, dock bär den upp reaktortanken samt utgör den första och primära skärmen för moderering av strålningen utanför reaktortanken. Centrumpelaren är konstruerad av slakarmerad betong.

Reaktorinneslutningarna är spännarmerade både i horisontal- och vertikalplanet. Vertikalarmeringen finns i manteln, och löper över kupolen i fallet PWR. Spännarmeringens kanaler är torrluftsventilerade (F1-F3) eller injekterade med korrosionshämmande fettprodukter (R2-R4), medan i andra inneslutningar (O1-O3, R1) är kablar direkt ingjutna i betongen. R1 har 18 stycken extra vertikala spännkablar som är cementinjekterade i ändarna och i övrigt försedda med permanent korrosions-

skydd [2]. Som konsekvens blir förutsättningarna för besiktning, kontroll och därmed tillståndsbedömning olika i anläggningarna.

Således har de olika delarna i reaktorinneslutningens inre delar samt vägg olika funktion och därmed blir betydelsen av påverkan från en eventuell degraderingsmekanism olika beroende på var i inneslutningen degraderingen pågår.

Kylvattenvägar

Kylvattenvägarna består av ett antal olika delar. Generellt förekommer först någon form av kylvatteninlopp in till en intagsbyggnad. Kylvatteninloppen kan utgöras av en bergtunnel eller bergtunnel med armerad sprutbetong eller en öppen kanal med vägg och botten av platsgjuten slakarmerad betong. Här finns också ett filter för grovrensning. Inne i intagsbyggnaden sker finrensning och eventuell dosering för minskning av påväxt i systemet [3]. Kylvattnet leds vidare från intagsbyggnaden till kondensorn via tunnlar och pumpstationer. Dessa delar består i huvudsak av platsgjutna slakarmerade betongkonstruktioner alternativt bergtunnlar. Från kondensorn leds vattnet ner till en kylvattenavloppstunnel via fallschakt. Från kylvattenavloppstunneln tas eventuellt uppvärmt vatten via hjälpkylvattenvägar till intagssidan för säkerställande av isfri miljö under vinterhalvåret. Dessa tunnlar utgörs av bergstunnlar med eller utan klädda golv, väggar och tak i armerad betong.

5. Degraderingsmekanismer i betong

Betong, liksom andra material, bryts ner i ett längre tidsperspektiv. Nedbrytnings-hastigheten är starkt beroende av lokala miljön kring betongen men också vilka belastningar den utsätts för. Således är det viktigt att betongkvalitén är anpassad till den miljö och belastning den ska verka i för att erhålla en beständig konstruktion.

Breysse [7] för en diskussion kring vad som kan kallas ”skada”. Författaren konstaterar att betong är ett sprött material och således motsvarar skada alltid bildandet av en/ flera mikrosprickor i materialet. Dessa mikrosprickor kan i ett senare skede sammanlänkas och bilda en makrospricka. I något skede kommer dessa mikrosprickor eller någon makrospricka närma sig ett slutligt tillstånd (t.ex. då konstruktionens funktion riskeras).

En annan betydelse av ordet ”skada”, enligt Breysse, är i bemärkelsen ”skademekan-ism” där skadan kan beskrivas av en intern tillståndsvariabel vars utveckling är kopplad till utvecklingen av materialegenskaperna. T.ex. kan styvheten i en konstruktion påverkas av frekvensen av sprickor i materialet (eller E-modulen för fallet drag/tryckprov).

Vid tillståndsbedömning av betongkonstruktioner kommer båda betydelserna av ”skada” enligt Breysse behöva beaktas då de är sammankopplade, d.v.s. en tillståndsbedömning innefattar i vissa fall en mätning av förekommande sprickfrekvens (eller minskningen av styvhet) medans för andra fall innebär det en bedömning av en enskild makrospricka.

Flertalet av de degraderingsmekanismer som förekommer i betong samverkar med varandra. Ofta utgör t.ex. en spricka en transportkanal för nedbrytande ämnen vilka kan påverka betongen och armeringen. Normalt delas degraderingsmekanismerna upp i *funktionsbetingad* degradering och *miljöbetingad* degradering. Funktionsbetingad degradering har sitt ursprung i de laster konstruktionen är konstruerad för att bära. För en reaktorinneslutning, vilken är konstruerad för att klara ett givet övertryck, innebär detta att den vardagliga lasten, d.v.s. egenvikt, naturliga temperaturcykler och driftstemperaturcykler, med största sannolikhet inte bidrar med någon funktionsbetingad nedbrytning. Miljöbetingad nedbrytning innebär påverkan av lokala yttre och inre faktorer vilka medför degradering av betongen.

För en mer fullständig beskrivning av degraderingsmekanismer och dess fysikaliska och kemiska processer hänvisas läsare till [8, 9]. Här redovisas mekanismer som kan vara aktuella för betong i en kärnkraftsanläggning.

Miljöbetingad nedbrytning

Miljöbetingad nedbrytning kan delas upp i tre huvudkategorier, fysikalisk, kemisk och övriga. Betongen i sig är mycket resistent mot miljöbetingad nedbrytning, d.v.s. ofta handlar degraderingen om en brist på samverkan mellan betong, armering och ingjutningsgods. Enligt [2] avses oftast korrosion av armering och andra korrosionskänsliga detaljer när man talar om degradering av betong. Nedan följer en kort beskrivning av de tre huvudkategorierna och mekanismer.

- *Fysikalisk nedbrytning* vilken i sin tur delas in i följande faktorer:
 - *Frostsprängning* vilket innebär att vatten tränger in i kaviteter, till exempel sprickor och andra hålrum, och sen expanderar när vattnet fryser till is. Förutsättningar för att denna mekanism ska vara aktuell är befintliga sprickor/hålrum samt att temperaturen i betongen sjunker under noll grader Celsius.
 - *Frysning och upptining* påverkar betongen genom att betongen alltid innehåller en delmängd porvatten. Vattnet kan innehålla salter och andra ämnen. Vid cyklisk temperaturskiftning kring noll grader Celsius vandrar vattnet mellan flytande fas och fast fas. Under denna process sker olika fysikaliska och kemiska reaktioner i betongen vilken under de första ca 10 cyklerna ökar hållfastheten men därefter minskar hållfastheten.

Motverkande åtgärder mot frostsador är att se till att betongen blir tät och att det bildas luftporer i betongen.

 - *Saltkristallisation* kan uppkomma i konstruktioner stående i vatten, särskilt i områden med stora tidvattenskillnader och i skvalpzoner. När vattennivån sjunker lämnas salt kvar i ytskiktet av konstruktionen. Saltet bildar sedan kristaller vid avdunstning av vattnet vilka växer och kan leda till spricktillväxt/spjälkning.
 - *Höga temperaturer* ger flera olika effekter i betongen. Vid temperaturer över 100°C förångas och avdunstar por- och gel-vattnet i betongen. Denna effekt kallas *dehydrering* vilken i sig ökar betongens hållfasthet men även kan leda till inre spänningar och degradering. Vid högre temperaturer träder fastransformationer av ballast och cement in vilket förändrar den kemiska stabiliteten hos betongen, d.v.s. en risk för ökad reaktivitet hos ingående komponenter. Vidare uppkommer spänningar på både lokal mikronivå och kontinuumnivå. På kontinuumnivå då betongkonstruktionen är begränsad i sin rörelsefrihet i vissa riktningar. På mikronivå då ballasten och cementpastan har olika längdutvidgningskoefficienter. Detta leder till lokala spänningar och tillväxten av lokala mikrosprickor. Vid höga temperaturgradienter i betongen kan spjälkning uppkomma. Det visar sig som att flak av betongytan separerar från betongen. En måttlig temperaturökning, upp till ca 100°C, påverkar inte tryckhållfastheten nämnvärt jämfört med elasticitetsmodulen som sjunker [10].
 - *Erosion* (hydromekanisk) är en fysikalisk mekanism som kan förekomma då någon vätska strömmar utmed betongytan. Vätskan slipar/nöter på betongytan varmed partiklar lossnar.
 - *Kemisk nedbrytning* innefattar samverkan mellan betongen och yttre miljö eller mellan ingående komponenter i betongen. Därmed är det av betydelse för betongens beständighet att komponenterna väljs med avseende på den miljö betongen ska verka i. Kemisk nedbrytning delas in i följande faktorer:

- *Alkalikisreaktionen* (AKR) är kemiska reaktioner mellan kalciumhydroxiden (kalk) som finns i cement och kiselföreningar som finns i bal-lasten. Dessa reaktioner leder till en gel som i närvaro av vatten sväller. Forskning [5] visar på att olika typer av AKR ger olika hård gel. Om gelen har låg styvhet kan den diffundera in i omgivande porer och låga lokala spänningar kan förväntas. Däremot, om gelen har en hög styvhet erhålls lokalt höga spänningar vilka relaxeras genom spricktillväxt och därmed degradering av betongen. Karakteristiskt uppstår ett krackele-ringsmönster på betongens yta då processen har fortgått en tid. Skador på grund av AKR finns rapporterade från svenska kärnkraftverk, dock ej från inneslutningskonstruktioner [2].

- *Karbonatisering* innebär att den omgivande koldioxiden i luften reagerar med kalciumhydroxiden i betongen och bildar kalciumkarbonat. Processen är en naturlig del av åldringen hos betong och innebär ingen försämring av hållfastheten. Dock påverkas betongens pH-värde med en sänkning till $\text{pH} < 9$ varmed det alkaliska porvattnet inte längre ger armeringsjärnet ett stabiliserande och skyddande oxidskikt. Således bryts oxidskiktet ner och korrosionsprocessen initieras. Vid korrosion bildas bland annat brun-röd rost vilken har 6-7 gånger större volym än metalliskt järn. Följden blir sprickbildning och spjälkskador och därmed en hållfasthetsförlust.

Hastigheten med vilken karbonatiseringsfronten tar sig fram är mycket låg i betong med ett vatten-cement-tal (vct) lägre än 0.4 och normalt ut-sätts inte armeringen för korrosion. Vid vct-tal > 0.7 går processen for-tare och sprickbildning/spjälkning kan uppstå redan efter 5 år vid tunna täcksikt.

- *Kloridangrepp* sker när kloridjoner tränger in och förändrar den ke-miska miljön i betongen. Kloridjoner finns naturligt i vatten, vägsalter och i luftburna salter. Kloridjoner utgör en katalysator i korrosionspro-cessen. Störst risk för kloridangrepp står att finna i skvalpzoner där sal-ter, vatten och luft är optimal [11].

- *Marksalter (sulfater etc)*. Sulfat är den allvarligaste formen av saltan-grepp. Vissa jordmåner innehåller höga halter av sulfat. Sulfat tillsam-mans med vatten och kalciumhydroxid reagerar och bildar gips. Detta kombinerat med hydratiserad kalciumaluminat bildar ettringit. Ettringit har stor volym och leder således till sprickbildning i betongen. Ett van-ligt förekommande exempel där sulfatangrepp förekommer är avlopps-rör i betong. I Sverige används normalt endast så kallad sulfatresistent cement.

- *Urlakning* innebär att kalciumföreningar i cementpastan reagerar med olika ämnen som finns i direkt kontakt med betongen. Utfällningar bil-das vilka tydligast kan ses i anslutning till sprickor. Störst risk för urlakning kan förväntas vid vattenfyllda rör och behållare, till exempel kyltornsbehållare.

- *Korrosion* är en vanlig typ av degraderingsprocess som drabbar arme-rade betongkonstruktioner där skyddet från betongen förlorats. Det finns många varianter av korrosion, se t.ex. [12].

- *Övriga degraderingsmekanismer* vilka kan förekomma i kärnkraftverkens inneslutningar är:
 - *Strålning* har förmågan att skapa kemiska förändringar i atomstrukturen i både ballast och cementpastan under relativt höga doser av γ -strålning och fluenser av neutronstrålning. Var gränsen går för när en påverkan kan ses på betongens hållfasthet är idag inte helt klarlagd. Förmodligen är gränsen inte någon definitiv gräns utan ett område. Orsaken kan vara att betongen påverkas olika beroende på valet av sammansättning och vilka typer av ballast som används.

Förändringarna i atomstrukturen kan delas upp i två olika typer. Den första typen är geometriska förändringar i atomgittret då strålningen skapar dislokationer. Den andra typen är fastransformation från kristallint gitter till amorf gitter. Dislokationer påverkar materialets mekaniska egenskaper så som hållfasthet och duktilitet. Vidare kan dislokationer bidra till volymökning och därmed spänningar på lokal nivå.

Ballasten, vilken till stor del består av kristallina strukturer, kan under höga fluenser av neutronstrålning omvandlas till amorf fas. Amorf kvarts har visat sig ha en högre reaktivitet med alkalisk lösning än kristallin kvarts, d.v.s. risken för AKR ökar signifikant [13, 14]. Vidare har strålningens effekten av minskad densitet hos ballasten [15-17] vilket kan korreleras med en fasomvandling hos ballasten [18]. Därför kan man anta att AKR inte förekommer i betongen så länge som höga halter av kristallin kvarts förekommer i ballasten. Gray [17] rapporterar även en volymminskning hos cementpastan, diametralt mot det för ballasten. Neutron och γ -strålningen anses inte ha någon direkt påverkan på cementpastans gitterstruktur och stabilitet då en stor mängd imperfektioner och oregelbundenheter redan förekommer från början i denna fas.

- *Dehydrering* innebär en sänkning av betongens vatteninnehåll. Orsaken kan vara t.ex. förhöjd temperatur. En accelererad dehydrering leder till ökad hållfasthet men också till en ökad risk för inre spänningar på grund av olika längdutvidgningskoefficienter hos ballast och cementpasta.
- *Vittring* är ett samlingsnamn för olika degraderingsmekanismer som kan uppkomma i betong och olika bergarter, d.v.s. degraderingsprocessen kan antingen vara av fysikalisk eller kemisk art, eller av båda arter samtidigt.

6. Miljöbeskrivning och potentiella skademekanismer för betongkonstruktioner inom kärnkraft

En enkel princip för kategorisering av betongkonstruktioner inom kärnkraften är att utgå från härden och utåt i radiell riktning. En generellt högre temperatur råder inom reaktorinneslutningen (jmf utomhustemperaturen) med högst värden kring rörgenomföringar. Luftfuktigheten är normal alternativt torr t.ex. kring torrluftsventilerade kanaler för spännarmeringen. Utanför reaktorinneslutningen råder inomhustemperatur (BWR) alternativt utomhustemperatur (PWR) med normalvarierande luftfuktighet. Högsta nivåerna av fukt råder vid och i kylvattenkanalerna.

Reaktorinneslutningar

Utsidan av en reaktorinneslutning hos en BWR ligger inomhus, bortsett från bottenplattan. Således är dessa betongkonstruktioner inte utsatta för skademekanismer som huvudsakligen orsakas av yttre förhållanden såsom frostangrepp, erosion, abrasion eller utvändigt karbonatisering [6]. PWR inneslutningar står, tvärtom BWR inneslutningar, utomhus. Dess utsida är målad. Skyddslagren (målarfärgen) skyddar mot väder och vind, dock kommer koldioxid diffundera igenom dessa skyddslager. Prover av inträngningsdjupet hos karbonatiseringen visar på en försumbar inträngning och ingen påverkan på armering kan förväntas enligt [6]. Beroende på utformningen av dränage kring och under bottenplattan kommer den exponeras olika mycket för vatten, marksalter och klorider. Kärnkraftsanläggningarna är ofta lokaliserade i närheten till havet. Därmed kommer grundvattnet inom vissa regioner och nivåer bestå av en blandning av söt- och bräckt vatten eller havsvatten. Betongen kommer då exponeras för t.ex. klorider.

Invändigt under drift är reaktorinneslutningen fylld med kvävgas. I inneslutningen föreskrivs en maximal temperatur på 65°C, med undantag för närhet till rörgenomföringar där 93°C tillåts, enligt amerikanska ACI 349 vilken tillämpas i Sverige. Enligt [6] ligger de globala temperaturerna i de svenska inneslutningarna i intervallet 20-60°C beroende på anläggning. Den temperaturen bedöms inte kunna påverka betongens mekaniska och kemiska egenskaper i någon större grad under drifttiden. Dock förekommer temperaturer som överstiger 100°C och ända upp till 174°C enligt industrins redovisningar [6]. Gällande BWR är miljön i inneslutningarnas övre del, primärutrymmet, torr till skillnad mot den undre delen, sekundärutrymmet, där en pool finns. Insidan i primärutrymmet utsätts betongen också för en viss mängd strålning under drift. Dock väsentligen mindre jämfört med betongstrukturerna (centrumpelare och biologiska skärmen) närmast härden. Centrumpelaren och främst dess strålskärmar är den del av inneslutningens betongstruktur som utsätts för högst nivåer av strålning.

Enligt nyligen presenterade data [19] från in-situ långtidsmätningar av temperatur och relativ fuktighet, i fyra olika reaktorinneslutningar, i både luft och betong påvisades att temperaturen uppfyller de krav som ställs. Mätningarna visade också på

stabila värden för relativ luftfuktighet vilket visar att anläggningarna avfuktning fungerar som avsett. I [19] redovisas även predikterande data för pågående uttorkning och omfördelning av fukt i inneslutningarnas betongkonstruktioner. Resultaten visar på att uttorkning fortfarande pågår men att den avtar med tiden. Efter nuvarande driftstid om ca 30-40 år är den sammanlagda uttorkningen ca 35-45 % av betongens förångningsbara vatten. Vid 60 års drift predikteras nivåer kring 45-55 %, d.v.s. merparten av uttorkningen har redan skett.

Bedömning av skademekanismer förekommande i reaktorinneslutningen

Vilka degraderingsmekanismer som är aktuella för en betongkonstruktion beror mycket på typen av cement som använts och vilken kvalitet betongen har samt tillverkningsprocessen vid gjutning. Vidare beror risken för skada även på vilken miljö betongen exponeras för. Generellt finns få rapporterade fall av skador i betong eller armering härrörande från avsedd driftmiljö. Skadorna har istället kunna relaterats till tillverkningsfel och avsteg från gällande krav och ritningar [6].

Baserat på informationen i [2, 6] bedöms risken som liten utvändigt en BWR inneslutning för följande degraderingsmekanismer: karbonatisering, frostangrepp, urlakning, sulfatangrepp, sura angrepp, alkali-ballastreaktioner, abrasion eller erosion. För inneslutningar i PWR finns en potentiell risk för karbonatisering utvändigt. Dock visar enstaka prover som Ringhals genomfört försumbar inträngning i betongen och således bedöms risken som försumbar att armeringskorrosion kan uppträda.

Invändigt, hos PWR och BWR inneslutningar, bedöms karbonatisering som potentiellt möjlig men inte till den grad att det skulle påverka tätplåten [6]. Vidare föreligger en risk för alkali-ballastreaktioner framkallad av neutronstrålningen. Emellertid, de svenska inneslutningarnas ballast är av typen som inte naturligt reagerar med alkalier i cementen. Kunskapsläget är dock förnärvarande bristfälligt huruvida detta kan bli ett problem nödvändigt att beakta under anläggningarnas drifttid [4]. Invändigt i wet-well föreligger risk för biologisk påväxt. Dock bedöms risken för påverkan på konstruktionens säkerhet och funktion m.a.p. biologisk påväxt som liten.

Den något förhöjda temperaturen i inneslutningen och runt genomföringar förväntas inte ge några degraderande effekter i betongen i det långa loppet [6, 10]. Detta stöds även av resultaten i [20].

Potentiella degraderingsmekanismer gällande inneslutningens armering är korrosion och bestrålning. Då armeringen ligger inbäddad i betong bedöms det som en liten risk att bestrålningen skulle orsaka någon degraderande effekt. Enligt [2] finns en potentiell risk för kloridinträngning och därmed armeringskorrosion utvändigt inneslutningar för PWR anläggningar. Källorna är luftburna föroreningar, havssalt samt ingjuten klorid. Emellertid bedöms omfattningen av eventuell kloridinträngning vara så liten att den korrosion som kan uppstå aldrig skulle äventyra säkerheten.

Tätplåtens integritet beror till stor del på risken för att fukt/vatten kan komma åt den. I ett sådant fall kan korrosion initieras. I annat fall är sannolikheten för degradering av dito bedömd som mycket låg.

Spännarmeringen, vilken är placerad nära inneslutningens utsida, är som tidigare nämnts direkt ingjuten i betongen eller ligger i torrluftsventilerade rör alternativt rör

fyllda med korrosionshämmande produkter. Korrosion är den mekanism som potentiellt kan förekomma, dock finns inget naturligt i närliggande miljö som kan initiera korrosionsprocessen och således är sannolikheten för korrosion mycket låg.

Trots en bedömd mycket låg risk för korrosion i tätplåt eller spännarmering utgör dessa konstruktionselement grunden för inneslutningens säkerhetsfunktion. Således finns det goda skäl att regelbundet genomföra besiktningar av dessa konstruktions-element.

Kylvattenvägar

Betongstrukturer utgörande kylvattenvägar kan i huvudsak kategoriseras utgående från om kontakt med vatten eller inte föreligger, d.v.s. betong ständigt under vattenytan, betong utsatt för både luft och vatten i den s.k. skvalpzonen, och betong ständigt i fria atmosfären. Betong under vattenytan följer vattnets temperaturskiftningar och exponeras för turbulens, salter samt biologi. På utloppssidan råder även en något förhöjd temperatur, ca 10°C varmare jämfört med temperaturen på intagssidan. Således finns en förhöjd risk för degraderande mekanismer jämfört med betong som ständigt befinner sig i fria atmosfären.

Bedömning av skademekanismer förekommande i kylvattenvägar

Potentiellt degraderande mekanismer för kylvattenvägarna är vittring (frostsprängning, saltkristallisation), kloridangrepp, karbonatisering, urlakning, erosion och korrosion. Samtliga av dessa mekanismer kan undvikas, alternativt minimeras, genom att betongen är tät, med lågt vct och har erforderlig luftinblandning samt konstruerad med ett tillräckligt tjockt tätskikt. Vidare kan biologisk påväxt ske i skvalpzonen och under vattenytan.

I skvalpzonen kan kloridinträngning ske och därmed också armeringskorrosion och då i form av den vanliga rödrosten då tillgången på syre är god. Kloridjoner är inte skadliga för betongen i sig. I skvalpzonen sker en ständig uttorkning av vatten/fukt vilket medför att salt ackumuleras. Salt består kemiskt sett av natriumklorid, och i löst tillstånd förekommer alltid en mängd fria kloridjoner. I betongen förekommer kloridjoner i fri form i porvattnet och i bunden form till cementgelen [3]. De fria kloridjonerna kan reagera med armeringen och skapa armeringskorrosion. Den armerade betongen klarar av att ackumulera en viss mängd kloridjoner under vilken armeringen inte korroderar, det s.k. kloridtröskelvärdet. Över kloridtröskelvärdet tränger kloridjonerna undan hydroxidjonerna, vilka är de joner som skapar det basiska tillståndet och därmed passiviserar armeringen, och korrosionen startar. Kunskapen kring kloridtröskelvärdet är mycket begränsad och osäker. Tröskelvärdet har visat sig vara beroende av flera parametrar bl.a. betongens pH-värde, vct, och cementtyp. Sannolikt beror tröskelvärdet även på om cykliska förhållanden föreligger.

Även under vattenlinjen kan korrosion ske och då under brist på syre vilket resulterar i s.k. svartrost (magnetit) [21]. Svartrost har hälften så stor volymökning som rödrost och således leder svartrost till bildandet av sprickor i betongen [3] i ett mycket senare skede om alls någon uppsprickning sker. Således är svartrost svårare/omöjlig att upptäcka med en avsyning av betongytan, d.v.s. andra metoder krävs. Exempel på sådana metoder är olika typer av OFP t.ex. georadar eller resisti-

vitetsmätning. Svartrost rapporteras mycket sällan. Skälen kan vara flera, normalt refereras endast till begreppet korrosion, d.v.s. vilken typ av korrosion som förekommer berörs sällan i konventionella betongkonstruktioner.

I motsats till kloridinträngning som ökar i hastighet med ökad relativ fuktighet minskar karbonatiseringshastigheten med ökad fukthalt i betongen. I vattenmättad betong är diffusionshastigheten tämligen konstant och mycket låg för både koldioxid och kloridjoner [22]. Karbonatiseringen (inträngning av koldioxid i betongen) sänker pH-värdet och leder till att det passiviserande oxidskiktet på armeringen neutraliseras. Därmed kan korrosion starta. Karbonatiseringshastigheten sänks av ett lågt vct i betongen varför betong med lågt vct är fördelaktigt. Lågt vct är även fördelaktigt mot urlakning då diffusionshastigheten sänks allmänt i betongen.

Erosion är en degraderingsprocess som kan förekomma på alla ytor som är i kontakt med strömmande vatten. Processen kan upptäckas visuellt och har generellt ingen påverkan på en konstruktions hållfasthet om den inte får fortgå under mycket lång tid.

Betong ständigt under vattenlinjen eller betongytor i kontakt med vatten, t.ex. sprickytor, kan drabbas av urlakning. Det innebär att främst kalciumhydroxiden löses upp av vattnet och transporteras bort [22]. Kalciumhydroxid bidrar till betongens höga pH-värde och urlakas kalciumhydroxiden sker en sänkning av pH-värdet. Vidare kan urlakning leda till sänkt hållfasthet genom ökad porositet [6]. Ökad porositet medför högre diffusionshastighet och därmed ökar risken för en sänkning av kloridtröskelvärdet samt en allmän högre risk för tidig armeringskorrosion.

Kondensorn som kylvattnet strömmar igenom består av ädlare metaller (rostfritt/titan) än armeringen (kolstål/järn) i kylvattenavloppet. Detta utgör en potentiell risk för uppkomst av s.k. galvanisk korrosion. Härvid sker ett flöde av elektroner från armeringen (oädel) till kondensorn (ädel). Denna degraderingsprocess kan upptäckas genom färgförändringar på betongytan.

7. Diagnostisering och informationskrav

Betongs beständighet för en viss miljö och strukturell last är starkt korrelerad till om betongen är anpassad och med god kvalitet för den verkliga tillämpningen. Oavsett vilken typ av degraderingsprocess (funktions- eller miljöbetingad) som är aktiv så är betongens porositet/kompakthet av intresse, även om denna information ensamt inte kan beskriva statusen hos betongen. Intresset för porositet/kompakthet beror på att både den strukturella hållfastheten och motståndet mot miljöbetingad nedbrytning ökar med en kompaktare betong/minskad porositet.

Enligt [7] kan information om betongstatusen klassificeras in i tre olika grupper:

- Information/data gällande nuvarande materialtillstånd, t.ex. porositet, tjocklek på täcksikt, frekvens av inre skador, som kan mätas direkt eller indirekt genom en egenskap som är beroende av dess variation.
- Information/data gällande hastigheten på skadeutvecklingen, t.ex. nivå på potentialskillnader som kan driva korrosionsprocesser, diffusionskoefficienter eller neutronflödet genom betongen.
- Information/data gällande lokal miljö, t.ex. temperatur eller fuktighet.

Dessa grupper är ofta sammankopplade, d.v.s. korrelation råder mellan t.ex. frekvensen av mikrosprickor (materialtillstånd) och diffusionshastigheten (skadeutvecklingshastighet).

8. Återkommande kontroll och besiktning av betongstrukturer inom kärnkraft

De tre kärnkraftsanläggningarna i Sverige; Forsmark, Oskarshamn och Ringhals har samtliga rutiner för underhåll och återkommande kontroll av betongkonstruktioner för att säkerställa funktion och säkerhet. Bortsett från täthetsprovningen och den visuella kontroll som erfordras av inneslutningen i samband med detta ligger övriga betongkonstruktioner inom svensk kärnkraft helt under egenkontroll. Som konsekvens blir processerna för underhåll och återkommande inspektion av betongkonstruktionerna olika i fråga om frekvens, skadetoleranser, åtgärder etc. Detta kan t.ex. ses i [3, 6].

Reaktorinneslutningar i svenska anläggningar

I de säkerhetstekniska föreskrifterna (STF) samt i SAR för respektive reaktorinneslutning föreskrivs vilka kontroller och provningar som ska genomföras. Dessa är de återkommande täthetsprovningarna av inneslutningen, globalt och lokalt, visuella byggnadsinspektioner samt kontroller och provningar av icke-ingjutna förspänningskabelsystem. Vidare genomförs i varierande grad icke-föreskrivna kontroller, enstaka eller återkommande, av betongstrukturer i de svenska kärnkraftsanläggningarna [6]. I [6] konstateras att anläggningsägarna i Sverige förefaller sakna ett aktivt program för att med en viss regelbundenhet återkommande besiktiga och kontrollera betongstrukturer, både åtkomliga och icke-åtkomliga ytor. Omfattande arbete har dock genomförts sedan 2001 hos anläggningsägarna för att kartlägga hur väl befintliga underhållsprogram täcker de aktiva skademekanismer som verkar på olika byggnadsdelar. Detta för att uppfylla de krav som ställs i SSMFS 2008:1. Anläggningarna har av naturliga skäl olika strategier för att uppfylla kravet på kontinuerligt underhållsarbete.

De föreskrivna aktiviteterna i respektive anläggnings STF baseras på de gamla bestämmelserna i appendix J i det amerikanska regelverket 10 CFR 50 [23]. Relaterat till tillståndsbedömning av betongstrukturer föreskriver regelverket endast en allmän visuell kontroll av åtkomliga inre och yttre ytor av inneslutningens byggnader och komponenter för att upptäcka eventuellt strukturell degradering av inneslutningen. Detta ska genomföras inför varje typ-A-provning (täthetsprov av inneslutningen enligt option A, se [23] vilket föreskrivs för de svenska inneslutningarna). Eventuell degradering av betongen ska åtgärdas innan täthetsprovet. Noterbart är att omfattningen och med vilka metoder de okulära besiktningarna skall genomföras inte föreskrivs i bestämmelserna.

Kontroller och besiktningar av reaktorinneslutningar och kylvattenvägar i USA

Mot bakgrund av en ökande skadefrekvens samt typen av rapporterade skador i de amerikanska inneslutningarnas konstruktioner gjorde NRC 1996 ett tillägg i appendix J av 10 CFR 50 med hänvisning till § 50.55a i vilken det föreskrivs att de visuella kontrollerna och andra byggnadsbesiktningar av inneslutningarna skall genomföras enligt ASME XI, subsection IWE och IWL. I dessa ges detaljerade anvisningar för kontroll och besiktning till skillnad från appendix J. Subsection IWE reglerar kontroll av inneslutningar i metall och tätplåten i inneslutningar av betong. Subsection IWL behandlar armerad betong och spännarmerade reaktorinneslutningar. I IWL finns två kategorier av betongytor. Kategori L-A adresserar åtkomliga betongytor vilka ska visuellt kontrolleras vid 1, 3 och 5 år efter täthetsprovning och därefter vart 5:e år. Besiktningen kan t.ex. utföras så som beskrivs av ACI enligt ACI 201.1R och ACI 349.3R. Dessa är vägledningsdokument för fastställande av tillståndet hos betongstrukturer. Den huvudsakliga besiktningsmetoden är visuell besiktning, antingen s.k. allmän eller detaljerad. Detaljerad besiktning utförs för de fall degradering upptäckts i syfte att bestämma dess omfattning. Kategori L-B adresserar icke injekterad förspända kablar vilka besiktigas med samma intervall som betongen enligt kategori L-A. Ett urval av trådarna i spännkablarna skall testas med avseende på sträckgräns, brottgräns samt brottförlängning. Eventuellt korrosionsskydd skall kontrolleras med avseende på alkalinitet, vatteninnehåll och koncentration av joner.

För icke åtkomliga betongytor specificerar 10 CFR 50.55a(b)(2)(viii) ytterligare krav på dokumentationen av föreliggande betongstatus. Godtagbarheten hos de icke åtkomliga betongytorna måste bedömas baserat på statusen hos åtkomliga betongytor som kan indikera degradering hos de icke åtkomliga ytorna.

För vidare information om föreskrifter och guider från NRC och ASME, se [24].

Riktlinjer för utvärderandet av betongstrukturer med undantag för reaktorinneslutningen finns även dessa tillgängliga från ACI. T.ex. finns vägledningsdokument för bedömning av betongstrukturer för vattenledning (kylvattenvägar) inom kärnkraft.

Kylvattenvägar i svenska anläggningar

Pilotstudien [3] presenterar en genomgång av processerna för underhållsplaner och återkommande inspektioner för kylvattenvägarna hos de tre anläggningarna i Sverige. Genomgången visar att samtliga verk arbetar med egna instruktioner och metoder som ska användas vid kommande inspektioner och reparationer. I Oskarshamn pågår en större genomgång av statusen hos kylvattenvägarna. Se [3] för ytterligare information.

9. Bro och tunnelförvaltning (BaTMan) - Trafikverket

Erfarenhet från tillståndsbedömningar av armerade betongkonstruktioner liknande de som finns inom kärnkraftsindustrin kan hittas hos Trafikverket i Sverige. Broar uppförda i armerad betong liknar i vissa avseenden de konstruktioner som återfinns inom kärnkraften. Likheterna är flera, t.ex. är konstruktionerna ofta platsbyggda, armerade med spännarmering och slakarmering, dimensionerna är stora d.v.s. tjocka konstruktioner och miljön är för vissa delar av vissa broar aggressiv. Därmed kan det finnas goda erfarenheter att dra nytta av inom processerna för tillståndsbedömning och underhåll av betongbroar.

Bro- och tunnelförvaltning inom Trafikverket dokumenteras och hanteras inom ett system kallat BaTMan – Bridge and Tunnel Management. Förvaltningssystemet ägs av Trafikverket och stöder förvaltningen av konstruktioner under hela dess livstid, d.v.s. systemet hanterar: nybyggnation, inspektion, planering, upphandling, åtgärder och utrivning. Systemet förvaltas och utvecklas i samverkan mellan Trafikverket, Sveriges Kommuner och Landsting, Stockholms stad, SL Stockholms lokaltrafik, Trafikverkets Enskilda vägar samt Göteborgs hamn. Förvaltningssystemet hanterar inte bara broar och tunnlar utan stödjer också färjelägen, kajer, bryggor, stödmurar m.m.

Informationen i föreliggande rapport baseras på rapporter publicerade i BaTMans bibliotek kopplat till inspektion och tillståndsbedömning av broar och tunnlar. Grundläggande dokument är Vägverkets Handbok för Broinspektion [25] tillsammans med Trafikverkets Handbok för Inspektion av Byggnadsverk [26] och därtill kopplad underrapport Mätning och bedömning av broars tillstånd [27].

Vägverkets Handbok för Broinspektion [25] och i den refererade dokument avses utgöra ett komplett hjälpmedel för inspektion och utbildning för inspektion av broar. Handboken beskriver:

- Syfte, omfattning och krav:
 - Beskriver kraven som finns för inspektion, d.v.s. omfattning, tidsintervaller och kompetenskrav på broinspektör samt syfte.
- Broinspektion – utförande:
 - Ger råd hur inspektionerna ska genomföras (planering, utrustning och vilka hjälpmedel som behövs).
 - Behandlar arbetssätt i fält med provtagningar och mätningar från planering till utförande.
 - Informerar om brotyper, konstruktionsdelar och element samt brotekniska begrepp.
 - Beskriver illustrativt skadetyper med bilder samt anger skadeorsaker.
 - Beskriver inspektionsdokumentationen.
- Mätmetoder och bedömning av broars tillstånd:
 - Underliggande dokument [28].
 - Beskriver grundläggande begrepp så som fysiskt- och funktionellt tillstånd.
 - Funktionella egenskaper hos konstruktionsdelarna.

- Anger val av mätmetod baserat på skadetyper, material och konstruktionsselement.
 - Beskriver mätmetoder, samt eventuell kompletterande mätmetod, och anger gränsvärde för fysiskt tillstånd.
 - Guide för genomförande av mätning med vald mätmetod(er).
- Kodförteckning:
 - Underliggande dokument.
 - Kodförteckning för registrering av inspektionsresultat i BaTMan.

I syfte att förvalta konstruktionerna sker insamling av data, vilket i huvudsak görs vid olika typer av inspektioner:

- Översiktlig inspektion

Syfte: Verifiera uppfyllnad av krav ställda i underhållsentreprenaden.

Omfattning: Inspektion avseende konstruktionsdelar och element med krav på egenskaper och åtgärder.

Tidsintervall: Minst en gång per år. Tidsintervallen styrs av entreprenadkontraktet.

Kompetens: God kunskap om förekommande mätmetoder samt kännedom om brokonstruktion och verkningssätt.
- Allmän inspektion

Syfte: Följa upp närmast från föregående huvudinspektion gjorda bedömningar av skador som inte åtgärdats. Vidare syftar inspektionen till att upptäcka och bedöma skador som om de inte skulle ha upptäckts innan nästa huvudinspektion skulle resultera i icke tillfredsställande trafiksäkerhet eller bärighet alternativt väsentligt ökade förvaltningskostnader.

Omfattning: Inspektion avser samtliga konstruktionsselement utom element i vatten. Anslutande delar ska även dessa inspekteras.

Tidsintervall: Utförs då så erfordras för att följa upp de vid huvudinspektionen upptäckta bristerna.

Kompetens: Samma krav som för utförande av huvudinspektion.
- Huvudinspektion

Syfte: Upptäcka och bedöma brister vilka med någon sannolikhet kan påverka trafiksäkerheten, konstruktionens funktion alternativt enbart leda till förhöjda förvaltningskostnader inom en 10-årsperiod.

Omfattning: Inspektion avser samtliga konstruktionsselement. Anslutande delar ska även dessa inspekteras. Kravet gäller alla åtkomliga ytor; för icke åtkomliga ytor görs en bedömning baserad på närliggande delar.

Tidsintervall: Maximalt 6-årsintervall. Tidskrav för åtgärdande av brister föreligger och är beroende av tilldelad tillståndsklass. En huvudinspektion får delas upp i delar vilka utförs vid olika tillfällen men måste som helhet vara genomförd inom ett och samma kalenderår. Undantag gäller för byggnadsverk med fastställd drift- och underhållsplan. För dessa byggnadsverk gäller att grundkraven i huvudinspektionen blir uppfyllda. Aktiviteterna i huvudinspektionen tillåts att planeras ut under hela maximala 6-årsperioden. För maskinell utrustning gäller ett maximalt inspektionsintervall på 3 år.

Kompetens:

 - Ingenjörsutbildning.

- Trafikverkets inspektionsutbildning alternativt flerårig praktisk tillämpning av Trafikverkets inspektionsmetodik.
- Erfarenhet av mätning och bedömning av det fysiska och funktionella tillståndet m.h.a. mätmetoder framtagna för det specifika byggnadsverket och dess konstruktionselement.
- Kunskap om nedbrytningsprocesser och konstruktioners beständighet gällande föreliggande konstruktioner.
- Kunskap och erfarenhet att prognostisera skadeutveckling.
- Kunskap och erfarenhet om att finna lämpliga teknisk-ekonomiska lösningar för åtgärdande av skadorna.

Specifika krav på kompetens tillkommer (förutom grundkraven) för inspektion av speciella byggnadsverk, konstruktionstyper eller konstruktionsdelar, för:

- Betong- och stålkonstruktioner krävs kännedom om Trafikverkets aktuella Betong- och Stålbestämmelser.
 - Bergkonstruktioner (bergtunnlar) krävs bergsingenjör eller likvärdigt, > 5 års erfarenhet av underjordsarbete avseende stabilitetsbedömning, tätning, förstärkning m.m., kännedom om anläggningsägarnas styrande dokument.
 - Maskinell och elektrisk utrustning krävs elbehörighet enligt Elinstallationsförordningen, kännedom om Elektriska Starkströmsföreskrifter, kunskap att provköra maskin/elutrustning samt kunskap och erfarenhet av hydrauliska utrustningar.
 - Konstruktionselement i vatten krävs erforderligt certifikat för arbete i vatten.
- Särskild inspektion
 - Syfte: För att vidare undersöka de vid regelbundna inspektionerna påkomna eller förmodade brister.
 - Omfattning: Inspektion avser enskilda konstruktionselement.
 - Tidsintervall: Då så erfordras vilket beslutas vid regelbundna inspektioner.
 - Kompetens: Samma som huvudinspektion. Instrumenterade mätningar kräver specialistkompetens.

Övergripande kvalitetssäkring och arbetsflöde i BaTMan

En kvalitetssäkrad, ekonomisk och effektiv förvaltning av betongkonstruktioner uppnås genom att ett antal aspekter uppfylls:

- Med kunskapen om att alla konstruktionsdelar/element är olika väsentliga för konstruktionens säkerhet och funktion differentieras toleransvillkoren för när skadornas omfattning kan få säkerhetsmässig påverkan. Konstruktionsdelar/element med bärande eller skyddande (trafiksäkerhetsfunktion) funktion har snävare toleransvillkor jämfört med övriga konstruktionsdelar.
- En övergripande strävan om att mätmetoderna ska ge så objektiva mätdata/svar som möjligt. Kvarvarande bedömningar kvalitetssäkras genom erforderliga och differentierade kompetenskrav på personal utgående från typ av inspektion. Det är alltid den s.k. huvudinspektören som har det övergri-

pande ansvaret.

- Processer, guider och instruktioner för genomförande av inspektioner och mätningar beskrivs.
- Degraderingsmekanismer och skador för identifikation finns beskrivna för respektive konstruktionsdel/element.
- Krav på dokumentation av information från inspektionerna.

Sammantaget ger ovanstående 5 punkter att rätt konstruktionsdelar kontrolleras, värderas, repareras och dokumenteras på ett kvalitetssäkrat sätt.

Arbetsflödet statuerat inom BaTMan kan brytas ner till följande övergripande punkter. Arbetsflödet anges i huvudsak kronologisk ordning:

1. Studie av tidigare dokumentation, d.v.s. inspektionsrapporter, avvikelserapporter, slutbesiktningsdokument och konstruktionsritningar etc. Även studie av konstruktionens funktion och verkningssätt är kravställd.
2. Planering av inspektion i fält. Verktyg, mätutrustning, hjälpmedel för åtkomlighet, kontakt med andra organisationer/myndigheter tas, informationsgivning till allmänhet etc.
3. Genomförande av inspektion i fält.
4. Bedömning och värdering av erhållna observationer och mätdata baserat på toleransvillkor och erfarenhet/kunskap. Planering av uppföljande inspektioner samt åtgärder.
5. Dokumentation i BaTMan.

Mätning och bedömning av broars tillstånd

Rapporterad information under denna rubrik kommer huvudsakligen ifrån [27].

Tillståndsuppgifter ligger som grund för styrning, planering, upphandling och åtgärder samt uppföljning. Detta för att säkerställa att samhällets krav på säkerhet, framkomlighet och ekonomi uppfylls i förvaltning och drift. Således är av väsentlig betydelse att tillståndsuppgifterna är av hög kvalitet, objektiva och tillgängliga. Därmed är entydighet ett krav på tillämpade metoder för mätning och utvärdering av tillståndsuppgifterna. Tillståndsuppgifterna samlas in vid framförallt huvud- och särskild inspektion.

Vid bedömning av broars tillstånd förekommer begreppen fysiskt och funktionellt tillstånd. Det fysiska tillståndet bestäms m.h.a. mätmetoder. Mätmetod bestäms av skadetyper, konstruktionselement, material, övrigt. I [27] beskrivs de flesta förekommande kombinationer av konstruktionselement och skadetyper. För varje mätmetod anges ett gränsvärde som anger ett tillstånd vid vilket funktionen hos föreliggande konstruktionselement kan vara bristfälligt. Exempel: ponera att vittring upptäcks i en

spännarmerad betongbalk i huvudbärverket. Tabell 1 från [27] ger ledningen att areaförlusten ska bestämmas med mätmetod 1p.

Tabell 1. Urklipp från tabell för val av mätmetod vid skada på huvudbärverk, [27].

BaTMan		Mätning och bedömning av broars tillstånd		
Val av mätmetod				
HUVUDBÄRVERK				
Skadetyper	Material	Konstruktions-element	Övrigt	Mätmetod
Vittring, Spjälkning	Armerad betong	Platta Balk	Höjd	10a
	Armerad betong	Valv	Areaförlust	1n
	Oarmerad betong	Valv	Areaförlust	1o
	Spännbetong	Platta Balk	Areaförlust	1p
Vittring, Spjälkning, Korrosion	Armerad betong, Armeringsstål	Platta Valv	Vidhäftningsförlust:	
			■ Huvudärmering	7a
			■ Sekundärärmering	7a
			Areaförlust:	
			■ Huvudärmering	1a
			■ Sekundärärmering	1a
Areaförlust med gravrost				
■ Huvudärmering	3a			
■ Sekundärärmering	3a			
		Balk	Vidhäftningsförlust:	
			■ Huvudärmering	7b
			■ Runelärmering	8a

Vidare kontrolleras tabell för mätmetod 1, se tabell 2. I tabell 2 anges skadetyper, konstruktionselement, material, övrigt, komplettering av mätmetod samt ett gränsvärde. För mätmetod 1p anges ett gränsvärde på 5 % areaförlust.

Tabell 2. Urklipp från tabell för information om mätmetod 1, [27].

BaTMan		Mätning och bedömning av broars tillstånd				
Mätmetoder för mätning av fysiskt tillstånd						
METOD 1						
Metod	Skadetyper	Konstruktions-element	Material	Övrigt	Komplettering av mätmetod	Gränsvärde
1j	Korrosion	Tvärbalk	Stål	Direkt lastbärande tvärbalk		5 %
1k	Korrosion	Tvärbalk	Stål	Ej direkt lastbärande tvärbalk		10 %
1l	Korrosion	Räckesständer	Armeringsstål	Huvudärmering	Medelvärde för två intilliggande räckesständer	20 %
1m	Korrosion	Räckesständer	Stål		Medelvärde för två intilliggande räckesständer	20 %
1n	Vittring, spjälkning	Frontmur Lagerpall - lagerundergjutning Pelare - Pelare - lagerundergjutning Skivpelare Skivpelare - lagerundergjutning Valv	Armerad betong			5 %
1o	Vittring, spjälkning	Valv	Oarmerad betong			5 %
1p	Vittring, spjälkning	Platta Balk	Spännbetong			5 %
1q	Urspolning	Fyllning Naturlig botten	Sten Grus		Mätning med tumstock, lodlina, sonar el dyl.	10 %

Det funktionella tillståndet beskrivs m.h.a. tillståndsklasser (TK). Dessa är fyra till antalet och kopplar samman konstruktionselementets funktion och tidsaspekten (degraderingens hastighet), se tabell 3.

Tabell 3. Beskrivning av tillståndsklasser vid bedömning av funktionellt tillstånd, [27].

Tillståndsklass	Bedömning av funktion
3	Bristfällig funktion vid inspektionstillfället
2	Bristfällig funktion inom 3 år
1	Bristfällig funktion inom 10 år
0	Bristfällig funktion bortom 10 år

Styrande vid bedömning av funktionellt tillstånd för det skadade elementet är:

- Konstruktionsdelens/elementets funktionella egenskaper.
- Kravställd funktion vid projektering.
- Aktuellt och tidigare mätvärden (fysiskt tillstånd).
- Nedbrytningshastighet (förväntad framtida nedbrytning).

Bedömningen av tillståndsklass kan göras med stöd av gränsvärdet för mätmetoden. Gränsvärdet ska ses som ett stöd och hjälp för broinspektören i sin bedömning. Om gränsvärdet för en mätvariabel överskrids kan skadeomfattningen innebära att konstruktionselementets funktion är bristfällig. Om funktionen bedöms bristfällig vid inspektionstillfället tilldelas elementet tillståndsklass TK3. Bedömningen görs alltid av inspektören utifrån sin kunskap, erfarenhet och iakttagelse. Anges flera mätmetoder som förslag ska samtliga metoder tillämpas och en bedömning görs på det samlade materialet. För dokumentation anges den primära skadekoden (material, skadetyper och skadeorsak) samt det uppmätta fysiska tillståndet.

Beslutsregler och särskild inspektion

Gällande inspektionsregler och skadornas tillstånd ligger som grund för när nästa inspektion ska utföras. Vägverkets beslutsdokument "Verksamhetskrav avseende förvaltning av broar, tunnlar och liknande byggnadsverk" daterat 2007-12-12 styr genom följande regler när nästa inspektion ska ske.

- Inspektioner ska göras med maximalt 6 års tidsintervall.
- Huvudinspektionen får delas upp och genomföras vid olika tillfällen, dock ska samtliga krav gällande huvudinspektionen vara uppfyllda inom ett kalenderår. Undantag gäller för byggnadsverk med fastställd drift och underhållsplan.
- För enskilt konstruktionselement med trafiksäkerhets- eller bärande funktion och tilldelad tillståndsklass TK2 ska aktuella skador följas upp innan bristande funktion för konstruktionselementet uppstår.

- Inspektörer ska i samband med en huvudinspektion ta ställning till om följande ska kontrolleras eller mätas vid en kompletterande särskild inspektion:
 - Bottenprofiler.
 - Kloridhalt samt karbonatisering i betong.
 - Korrosion på armering.
 - Skruv- och nitförband.
 - Svetsförband.
 - Tätskiktets funktion.
- Vidare ska inspektören ta ställning till om en särskild inspektion ska genomföras för konstruktionsdelar under vatten för att säkerställa dess funktion under en 10-årsperiod.

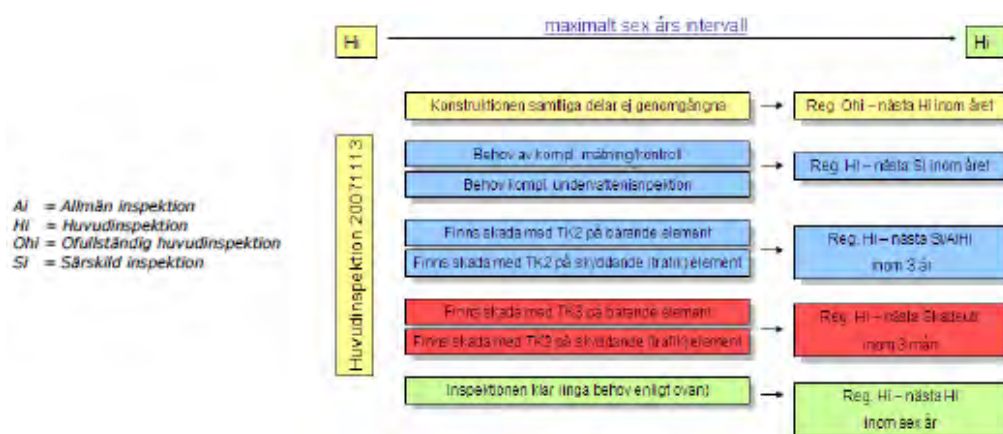
Krav på genomförande av skadeutredning

Följande regler styr när en skadeutredning ska genomföras:

- Bärande konstruktionselement som tilldelats TK3 ska utredas snarast (inom 3 månader). Utredningen ska klarlägga det funktionella tillståndets påverkan på konstruktionens bärrighet.
- Konstruktionselement med trafiksäkerhetsfunktion som tilldelats TK3 ska utredas snarast (inom 3 månader). Utredningen ska klarlägga det funktionella tillståndets påverkan för konstruktionens trafiksäkerhet. Åtgärder för att garantera trafikanternas säkerhet vid användning ska snarast utföras.

Nästa inspektion

Figur 2 visar schematisk beslutsordningen avseende nästa inspektion. För skador med TK2 alternativt TK3 måste inspektören ta hänsyn till ovanstående nämnda krav gällande kompletterade mätningar, undervattensinspektion och kontroll av skador etc.



Figur 2. Beslutsordning gällande nästa inspektion vid broförvaltning, [27].

Metoder för mätning av fysiskt tillstånd i betong

Nedan redovisas metoder för mätning av fysiskt tillstånd i betong. I [26] redovisas även metoder för provtagning av stål vilket inte tas upp i denna rapport. Provningsmetoderna går ej igenom på teknisk nivå utan istället lyfts eventuella rekommendationer för handhavandet med respektive metod. Metoderna är i [26] kategoriserade enligt: fältmetoder, laboratorieprovning och övriga provningsmetoder. Ingen kategorisering görs i denna rapport.

Primärt vill man inom broinspektion fastställa betongens aktuella tryck- och spräckhållfasthet, frostbeständighet, kloridjonhalt, karbonatiseringsnivå samt täcksikt. Vidare beskrivs i [26] ett antal provningsmetoder vilka är mindre vanligt förekommande. För samtliga metoder beskrivs relativt utförligt hur provningen ska genomföras samt med referens till standard i många fall. Tabell 4 redovisar provningsmetod tillsammans med refererad standard. Då [26] har några år på nacken och refererade standarder ofta är upphävda refereras även till nu aktuell standard.

Tabell 4. Refererade standarder i [26] avseende mätning och provtagning.

Provningsmetod	Refererad standard	Aktuell standard
Uttag av cylindrar för provning	SS 131113	SS-EN 12504-1:2009
Tryckhållfasthet	SS 137230	SS-EN 12390-3:2009/AC:2011
Spräckhållfasthet	SS 137213	SS-EN 12390-6:2009
Karbonatiseringsdjup	SS 137242	-
Kloridhalt	SS 137235	SS-EN 480-10:2009
Frostbeständighet	SS 137244	SS 137244:2005
Elektropotentialmätning	ASTM C876	ASTM C876 - 15

Tryck- och spräckhållfasthet – uttag av provkroppar

Publikationen [26] påpekar att vid bestämning av en bro hållfasthet är helhetsbilden väsentlig, d.v.s. uttag av cylindrar ska ske vid såväl de mest fördelaktiga som de mest ofördelaktiga positionerna. Valet av konstruktionsdel samt provplats bör göras i samråd med en brokonstruktör. I regel väljs positionerna för uttag av cylindrar på ett slumpmässigt sätt, dock får positionerna inte äventyra provtagarens säkerhet eller konstruktionens verkningsätt, eller på annat sätt orsaka onödiga risker för liv och egendom. I vertikala konstruktioner är hållfastheten i regel är lägre ju högre upp i konstruktionen provkropparna tas. Därför bör provkroppar tas både högt upp och långt ner.

Rekommenderad cylinderdiameter är 100 mm med en provkroppslängd på minst 100 mm. Minst 3 cylindrar tas ut för provning av tryck- respektive spräckhållfasthet från varje konstruktionsdel som avses hållfasthetsprovas. Med cylinder avses de borrprov som tas ut. Dessa kan sedan, beroende på geometrin, delas upp i flera provkroppar. Således behövs minst 6 provkroppar för hållfasthetsprovningen för varje konstruktionsdel, 3 för tryckprovet och 3 för spräckprovet. Om betong med hållfasthet högre än K 45 ska kunna tillgodoräknas krävs minst 2 gånger 9 provkroppar. Provkroppen får inte var påverkad av armering. Armering ska undvikas att borrar av, t.ex. genom att använda täcksiktmetare. Vid genomgående cylinderuttag ur broplattbebanor med underliggande strömförande ledningar måste avståndet till

ledning vara minst 4.5 m. Alternativt tas cylindrar ut intill varandra med icke genomgående längd.

Dokumentation av positioner för uttag av cylindrar ska göras på en skiss, samt att cylindrarna märks upp i relation till skissen. Foto från positionen för uttag av cylindrar samt på cylindrarna rekommenderas. Det är även väsentligt för helhetsbilden att iakttagelser från provtagningen dokumenteras.

Om konstruktionsdelar är känsliga för uttag av cylindrar kan andra mätmetoder utgöra ett värdefullt komplement. Dessa metoder är:

- Ultraljudsmätning
- Studshammarmätning
- Kombination av ultraljud- och studshammarmätning
- Intrycksmätning med kulhammare
- Penetrationsmätning, t.ex. Windsor probe test
- Brytprovning

Vid användandet av dessa metoder för bestämning av hållfastheten krävs särskilt tillstånd då de anses ge ett osäkrare resultat.

Karbonatisering

Mätmetoden med indikatorvätska bör inte användas om pH-värdet påverkats av andra faktorer än karbonatisering. Vidare kan fuktvandring i betongen föra med sig alkali till ytan och härigenom höja betongens pH-värde och därmed indikerar indikatorvätskan ej karbonatisering.

Två metoder beskrivs. Den första tar provbitar genom utborrning av cylindrar med minst 50 mm i diameter. Vatten ska ej tillföras provet och för vidare detaljer hänvisas till SS 137242. Den andra metoden är att provningen sker direkt i den färdiga konstruktionen genom att ett hål mejslas och indikatorvätskan förs in efter att initial renblåsning av hålet. Provytorna får ej tidigare varit i direktkontakt med luft då metoden kan ge felaktigt resultat.

Samtidigt som karboniseringsdjupet bestäms bör täckskiktets tjocklek bestämmas. Minst 3 prov bör tas från ett och samma provområde och karboniseringsdjupet bestäms som ett medelvärde av de olika provresultaten. Provområdet bör väljas så att maximalt karboniseringsdjup kan förväntas, t.ex. under sidan av broplattan eller där ytan ej varit exponerad för regn.

Täckskicktsmätning

Tre olika metoder nämns för täckskicktsmätning, bila bort en del av täckskiktet, elektromagnetisk mätning eller röntgen. Röntgen bedöms dyr och ej praktisk i dessa sammanhang. Elektromagnetisk mätning ger möjligheter att bestämma diameter hos armeringen men att resultaten i vissa fall kan vara svårtolkade.

Kloridmätning

Mätning av koncentrationen av kloridjoner görs enbart vid misstanke om innehåll av betydelse för nedbrytningsprocessen. Provtagning blir oftast aktuell vid borttagning av isolering alternativt vid nedstänkning av bropelare etc. Vid provtagning tas 3 mätningar i samma område och minst 3 olika områden på samma objekt bör mätas upp. Eventuellt ytterligare provtagning är aktuell om mätningarna är positiva. För referens mäts även koncentrationen av kloridjoner på en plats icke exponerad för kloridjoner.

Vattenlösliga kloridjoner höjer kraftigt risken för frostsador och armeringskorrosion. Med koncentrationer av kloridjoner över 0.3 % av cementets vikt anses skadeutvecklingen vara långt framskriden i betong med dålig frostbeständighet. Sådan betong bör ersättas med lufttillsatt betong med god kvalitet. Vid koncentrationer i spannet 0.15-0.3 % kan nedbrytningsprocessen ha påbörjats. Under 0.1 % koncentration bedöms som ofarliga. Naturligt förekommande koncentration av kloridjoner kan uppgå till 0.15 %.

Mätning av koncentrationen av kloridjoner ska göras på olika djup från betongytan i syfte att upprätta en kloridprofil.

Vid okulär kontroll av betong, med mindre handslägga eller huggmejsel, har man erfarenhetsmässigt vid ett flertal större reparationsobjekt kunnat fastställa samband mellan brottbeteendet hos betongen utan luftporbildande medel och olika halter av kloridjoner. Vid < 0.15 % kloridjonkoncentration (vattenlöslig kloridjonhalt i procent av cementets vikt) krossas eller spricker såväl cementpasta som ballastmaterial vid demoleringsarbetet. Vid > 0.3 % kloridjonkoncentration åtgår mindre arbete och ballasten lossnar från cementpastan utan att varken cementpastan eller ballasten krossas. Ballasten lämnar tydliga avtryck i cementpastan. Således kan dålig vidhäftning mellan ballast och cementpasta tyda på höga halter av klorider.

Sprickmätning

Genomförs m.h.a. mätlupp med förstoring 10 gånger och graderad skala om 0.1 mm.

Bomknackning

Bomknackning anges vara ett snabbt sätt att lokalisera dolda defekter som bom, skiktningar, håligheter, sprickor etc. Dock vilar metodens tillförlitlighet på utförarens kunskap och erfarenhet av provningsförfarandet.

Elektropotentialmätning (t.ex. halvcellspotential)

Elektropotentialmätning ger en bedömningsgrund för föreliggande armeringskorrosion förutsatt att den kompletteras med mätning av betongens elektriska motstånd, kloridhalt samt karbonatiseringsdjup. Mätningen ska även kompletteras med okulär observation vid misstanke om korrosion, d.v.s. armeringen måste bilas fram.

Denna metod är inte lämplig för mätning under vatten. Under vatten kan avsevärd korrosion pågå utan att svällande korrosionsprodukter uppkommer. Det mest tillförlitliga sättet att upptäcka armeringskorrosion under vattenytan bedöms vara genom

okulär besiktning av rentvättad betongyta utförd av t.ex. dykare eller m.h.a. undervattenskamera.

Provtagning i vatten

Provtagning och mätning i vatten medför vissa svårigheter och begränsningar. Inspektören är i större utsträckning beroende av okulära besiktningsmetoder vid undervattenskonstruktioner.

Valet av provställen för uttag av cylindrar bör göras baserat på aktuellt gjutningsprotokoll samt på en noggrann okulär besiktning av aktuell konstruktion. Olika gjutmetoder föranleder olika provställen. I BRO 94 kapitel 46 beskrivs provning av undervattensgjutning utförligare.

Frostbeständighet

För undersökning av frostbeständighet bör provkroppar med diametern 100 mm användas. Från denna sågas en 50 mm tjock provkropp. Vid fastställande av frostbeständighet skall min 6 stycken provkroppar mätas upp.

Mikroskopisk analys

En rad parametrar av stor betydelse för betongen kan studeras genom mikroskopisk analys. Normalt bestäms bindemedelstyp, innehåll av tillsatsmaterial, vct, lufthalt (storlek och fördelning av luftporer), hydratationsgrad samt karbonatisering. Vidare studeras även blandningsförhållande, sprickstruktur, porfyllnad, vidhäftning mellan ballast och cementpasta.

Ultraljudsmätning

Denna mätmetod används för att indirekt bestämma betongens hållfasthet genom att mäta ljudets utbredningshastighet.

Termografimätning

Under gynnsamma förhållanden kan termografimätning avslöja hålrum och lamineringsringar.

Betongytor under isolering

Vid inspektion av broplattor med isolering och beläggning kan impulsradar användas för att effektivt kartera avvikelser i fukthalt, salthalt, skiktjocklek samt hålrumshalt. Hög effektivitet uppnås genom att parallellmontera flera radarantennar på en bil och söka av ca 2,5 m i bredd i normal fordonshastighet.

Okulär inspektion genom ”fönster”

Vid misstänkt skada indikerad av impulsradarmätningen sker en vidare inspektion genom ett s.k. fönster. Fönstret kan tas upp av t.ex. en kärnborr där borrhningen genomförs stegvis skikt för skikt genom beläggning, eventuell skyddsbetong och isolering. En okulär kontroll sker av varje skikt för att bedöma om vittring eller urlakning pågår. Vidare kan följande provningsmetoder bli aktuella för brobaneplattan:

- Okulär kontroll av varje skikt i fönstret.
- Mätning av kloridjonkoncentration.
- Undersökning av frostbeständighet.
- Provning av hållfasthetsegenskaper.
- Okulär kontroll av borrhprov.

Betongen i de olika skikten bearbetas med mindre handslägga och huggmejsel. Brottytorna studeras noggrant då de kan ge god information om betongens status.

Undersökning av spännkablar

Mycket lite information ges angående undersökning av spännkablar. Provningsmetoder som nämns är ultraljud, röntgen och inspektion genom borrhål samt en vidare referens [28] i vilken ytterligare information om nämnda provningsmetoder ges.

10. Statusbestämning av betongkonstruktioner

Teknik och metoder för detektering av degradering, både ifråga om nuvärde/omfattning men också dess hastighet, är nyckelfaktorer för tillståndsbedömningar av betongkonstruktioner. Syftet är att upptäcka degraderingsprocesser i god tid för att möjliggöra vidtagande av erforderliga åtgärder på ett ekonomiskt, miljömässigt och säkert sätt, innan konstruktionens funktion faller under ställda krav på funktion, säkerhet och miljö.

Många provningsmetoder kräver specialistkunskap och erfarenhet då de flesta provningsmetoder kräver någon form av tolkning av resultaten. Vidare ska personalen vara certifierade för de metoder de använder. ASME XI Subsection IWL och ACI 349.3 R specificerar grundläggande kompetenskrav på personal och organisation.

Processen för statusbestämning av betongkonstruktionen kan delas upp i flera steg enligt [29]:

- Planering av inspektion samt insamling av bakgrundsinformation. Bakgrundsinformationen kan bestå i byggnadsritningar, materialförteckningar, konstruktionsritningar, dokumentation från tidigare inspektioner etc.
- Okulär besiktning. Detta kan ske inom handnära avstånd med lupp, hammare och mejsel, eller genom kameror på fjärrkontrollerad utrustning.
- In-situ provning samt laboriebaserad provning, genom förstörande eller oförstörande metoder.
- Utvärdering av mätresultat, studerande av degraderingshastigheter samt bestämning av orsak till degraderingsprocessen.

Provningsmetoder för betong

Provningsmetoder kan kategoriseras med utgångspunkt från olika egenskaper. En vanlig utgångspunkt är huruvida provningsmetoden konsumerar/förstör provobjektet eller inte, d.v.s. förstörande eller oförstörande provning. Vidare talas det ibland om semi-förstörande provning vilket innebär att metoden kräver en relativt sett liten mängd material från provobjektet och därmed inte påverkar dess globala egenskaper.

Oförstörande provningsmetoder kan användas för att kvantitativt bestämma någon egenskap hos materialet eller strukturen. Målet med en oförstörande mätning är bl.a.:

- Estimera materialegenskaper.
- Kvalitetsuppföljning från produktion av prefabricerade element.
- Återkommande kontroll för tillståndsbedömning under drift.

En annan kategoriseringsprincip kan vara om den sökta egenskapen ges direkt av mätmetoden eller om den beräknas genom mätning av andra egenskaper/karakteristika hos materialet. Denna kategorisering benämns direkt- eller indirekt mätmetod. Direkt metod kan vara visuell inspektion, uttag och analys på material. Indirekta metoder mäter någon/några egenskaper för att sedan beräkna den sökta parametern. Ofta används en kombination av direkt- och indirekt mätmetod vid inspektion av betongstrukturer [29].

Nedan följer en kort beskrivning av ett antal provningsmetoder.

Anslagsmetoder

Olika sorters metoder/teknik finns för att excitera vågor genom ett material. Systemet för anslagsmetoder består av tre komponenter: anslagskälla, mottagare för att lyssna på eko samt enhet för bearbetning av signal och presentation. Vågorna består av elastisk töjning i materialet och dessa interagerar med yttre rand, densitetsförändringar, materialstyvheter (elasticitetsmoduler) och inre defekter så som sprickor, d.v.s. förändringar i akustisk impedans. Ekot från anslaget, d.v.s. resonansfrekvensen, lyssnas av och signalen analyseras och presenteras. Reflektioner eller ekon indikeras som frekvensspikar i frekvensplanet. Informationen i signalen kommer ifrån hela, eller nästan hela, volymen på provobjektet till skillnad från vissa ultraljudsmetoder vilka tillåter fokusering av ljudvågorna. Därav är anslagsmetoder mer lämpade för plattliknade strukturer. Tillämpning av metoden kan göras för:

- Upptäcka sprickor samt mäta sprickdjup.
- Upptäcka delaminering samt bedömning av omfattning.
- Estimera objektgeometri och upptäcka defekter i balkar, pelare och plattliknande strukturer.
- Estimera ythårdhet och tryckhållfasthet.

Excitation av ljudvågor genom impuls görs med någon typ av hammare, t.ex. instrumenterad studshammare eller Schmidt hammare. Instrumenterad bomknackning är också en typ av anslagsmetod med hammare som utvecklats under senare år [30, 31]. Orsaken till instrumenteringen är viljan att erhålla objektiva och kvalitetssäkrade mätdata. Bomknackning har traditionellt skett genom att inspektören lyssnar efter ljudförändringar istället för att använda ett instrument för avlyssning och analys. Resultatet från bomknackning utan instrumentering beror således mycket på inspektörens kunskap och erfarenhet.

Ultraljudsprovning

Ultraljudsprovning är en indirekt in-situ metod. Ett flertal metoder och tekniker finns inom området ultraljudsprovning, t.ex. Phased Array, Coda wave interferometry, time-of-flight diffraction (ToFD), puls eko, etc. Vidare finns motsvarande skiktröntgen fast med ultraljud, d.v.s. tomografisk metod med ultraljud som klarar tjocklekar upp till 0.6 m, [32]. Varje metod har sina fördelar och begränsningar. Gemensamt för metoderna är att en eller flera sändare sänder ut pulser repetitivt in i betongen. Ljudvågorna lyssnas sedan av med en eller flera mottagare. Ljudvågorna har en frekvens i området 30-200 kHz vilket är avpassat för den större dämpning som be-

tong har i jämförelse med stål [29]. Ljudvågorna kommer på sin färd genom betongen påverkas av densitetsskillnader och materialstyvheter (elasticitetsmoduler), vilket gör att reflektioner uppstår samt att hastigheten på ljudvågen förändras. Mätmetoderna kommer uppfatta detta som skillnader i tid från att pulsen sänds ut till att den lyssnas av. Ballast, armering och håligheter (t.ex. sprickor) har densiteter och styvheter som skiljer sig väsentligt från cementpastan. Tillsammans med känd våghastighet i materialet kan strukturella förändringar inklusive sprickor, håligheter eller en yttre rand lokaliseras i betongen/strukturen. Fördelar med tekniken är att en snabb bedömning av betongens kvalitet och homogenitet tillåts. Begränsningar med ultraljudtekniken finns i att ljudvågorna påverkas av olika komponenter i betongen vilket medför svårigheter att tolka vad indikationerna representerar. Detta avhjälpas till viss del av 3D visualisering av reflektionerna. Vidare, kvalitén i signalen är beroende av en god kontakt mellan provobjekt och sändare för vissa system. Därför ska ytan på provobjektet helst vara slät och med begränsad krökning för vissa provningssystem. System utan krav på slät yta för god kontakt men med begränsad krökning finns marknaden [32].

Med ultraljud kan en in-situ uppskattning av tryckhållfastheten göras. Dock kräver det kalibrering av utrustningen till den specifika betongen. Trots det är resultatet förknippat med en del osäkerhet. Således bör regelrätt mekanisk tryckhållfasthetsprovning genomföras om data ska användas för hållfasthetstekniska beräkningar.

Karbonatiseringsmätning

Kemisk analys för förekomsten av karbonatisering görs antingen in-situ eller i laboratorium. Karbonatisering har ingen initial negativ påverkan på hållfastheten men leder till sänkning av alkaniteten och därmed efterföljande armeringskorrosion. Inträngningsdjupet mäts upp genom att indikatorvätska förs in i ett borrar hål eller penslas på en utborrad cylinder varmed en färgändring av vätskan sker vid positioner med lågt pH-värde. En annan metod för bedömning av inträngningsdjup är petrografi.

Kloridjonmätning

Kemisk analys för förekomsten av kloridjonkoncentrationen görs antingen in-situ eller i laboratorium. Koncentrationen av kloridjoner ges i procent av cement- eller betongvikt. Flera metoder finns tillgängliga för mätning av kloridjonhalten: rapid chloride test (RCT), petrografi och jonkromatografi. För fler metoder se [29].

Inträngningsdjupet bestäms genom att material med olika avstånd från ytan analyseras.

Elektromagnetiska metoder (Virvelström, radar etc.)

Elektromagnetiska metoder är oförstörande indirekta mätmetoder. Flera metoder existerar vilka baseras på elektromagnetism. Metod för täckskiktstämning baseras på att ett lågfrekvent magnetfält påverkas av närhet till armering (stål). Täcksjuktjocklek upp till 0.2 m kan mätas. En elektromagnetisk källa sveps över betongytan och när magnetfältet påträffar ett armeringsjärn påverkas magnetfältet. Virvelströmsmetoder, vilka även kan detektera icke-magnetiska objekt, fungerar på liknande sätt. På detta sätt kan man under vissa förutsättningar mäta tjocklek på täck-

skikt, diameter på armering och delning mellan armeringsjärn. Begränsningar med metoden är, [29]:

- Instrument baserade på magnetisk resonans detekterar endast ferromagnetiska objekt.
- Endast första lagret av armering kan detekteras.
- Noggrannheten i estimerat värde påverkas av armeringens diameter och delning.
- Möjligheten att särskilja individuella armeringsjärn påverkas av mätutrustningens specifikationer, tjockleken på täcksiktet samt delningen mellan armeringsjärnen.

Markradar/Georadar är en annan elektromagnetisk metod som används traditionellt inom geofysik. Metoden bygger på genomlysning av materialet med elektromagnetisk energi. Metoden fungerar analogt med Puls-eko ultraljudsmetoder och har anpassats till betongstrukturer. Med markradar kan armering, kablar, sprickor och håligheter lokaliseras i flera lager ner till ett djup av 0.3-0.5 m i betong. Metoden tillåter bestämning av armeringsdiameter samt delning, täcksiktstjocklek, armeringsdjup och densitet. En fördel med markradar är att antennen inte behöver vara i kontakt med provobjektets yta. Därmed blir metoden effektiv för att söka av stora ytor i hög takt.

Petrografi

Petrografi är en förstörande och direkt metod. Cylindrar borrar ut och bereds för undersökning. Petrografi ger information om textur och mineralinnehåll hos studerat material genom olika tekniker att visuellt studera materialet. Tunnslip och planslip är två olika sätt att förbereda materialet för en petrografisk undersökning. Strikt betraktat är petrografi en förstörande provningsmetod. Emellertid är erforderligt antal och storleken på provkropparna mycket små i jämförelse med de säkerhetsrelaterade betongkonstruktionerna inom kärnkraft.

Tunnslip är en prepareringsmetod av material för meso- och mikroskopianalys. En tunn plan skiva av materialet förbereds genom utskärning med hjälp av diamantsåg och prepareras vidare med efterföljande slipning i succesiva steg med allt finare kornstorlek. Tjockleken på tunnslipet är i storleksordningen 20-30 μm och tillåter ljuset att passera genom skivan. Planslip inkluderar endast planslipning av ytan (ingen tunn skiva) för studium på meso- och mikronivå varmed ytan studeras med hjälp av reflekterat ljus.

Strukturanalys av substrat inkluderar olika metoder. På makro- och mesonivå kan ögonen användas utan några optiska hjälpmedel. Stereomikroskopet fungerar i gränsområdet meso- och mikronivå och här används oftast planslip. Stereomikroskop tillåter generellt en förstöringsgrad på ca 50x. På mikronivå används polarisationsmikroskop (25-400x) på tunnslipssubstrat. Behövs ytterligare förstoring kan svepelektronmikroskop (SEM) användas. SEM tillåter studier ner på nano-skalan (1×10^{-9} m).

En petrografisk undersökning ger stora möjligheter till att bestämma aktuell och detaljerad status i betongen och även underliggande orsaker till uppkomna degraderingsprocesser. Syftet med en petrografisk undersökning kan vara:

- Fastställa orsak till undermålig kvalitet, degradering eller skada.
- Bestämma cementtyp, hydratationsgrad, vct, luftpormängd ev. tillsatsmedel etc.
- Bestämma graden av alkali-ballast reaktion samt ballastens reaktivitet.
- Fastställa kemiska reaktioner alt. fysikalisk påverkan från yttre miljö eller last.
- Bestämma fraktioner, blandningsgrad och luftporfördelning.
- Fastställa uppfyllnad eller ej av materialspecifikation.

En petrografisk undersökning kräver en specialist inom området med kunskap om degraderingsprocesser inom betong. Metodens nackdelar är kravet på uttag av cylindrar från betongstrukturen. Fördelarna ges av metodens möjligheter att undersöka och fastställa skadeorsaker, mineralinnehåll samt textur.

Visuell inspektion

Regelbundet återkommande visuell inspektion av fria betongytor är en effektiv metod för att snabbt söka av stora ytor. Visuell inspektion medger upptäckt av tillverkningsfel, sprickbildning, erosion, spjälkning, cement-ballast reaktioner, utfällningar/färgförändringar, förskjutningar/rörelser och volymförändringar i betongen. Data från inspektionen dokumenteras och följs upp i syfte att göra prognoser.

Betongytor under vattenlinjen kan inspekteras av dykare eller m.h.a. fjärrstyrd utrustning med kamera/videoutrustning. Många av de provningsmetoder som används ovanför vattenlinjen har anpassats så att dessa kan användas under vattenlinjen t.ex. ultraljudprovning och studshammare.

Begränsningar med visuell inspektion ligger i att endast fria ytor kan inspekteras och således erhålls ingen information om tillståndet inuti betongen om inte degraderingen yttrar sig på ytan.

Standarder, guider och specifikationer för genomförande av visuell inspektion ges bl.a. av ASME XI Subsection IWL, ACI 349.3.

EPRI har utvecklat en checklista för visuell inspektion av nukleära betongstrukturer [33]. Tillgång till [33] har ej kunnat erhållas inom aktuellt projekt.

Mekanisk provning

Mekanisk provning är en förstörande, direkt metod för fastställande av bl.a. drag- och tryckhållfasthet, böj- och spräckhållfasthet och elasticitetsmodul. Cylindrar borrar ut från strukturen och bereds för respektive provning. Lämpligen mäts förskjutningen via sensorer fastsatta på provkroppen och/eller via optiskt system [20]

(och lasten via lastcellen). Mekanisk provning ger möjlighet att studera påverkan av degraderingsmekanismers påverkan på hållfasthetsegenskaperna.

Korrekt genomförande av mekanisk hållfasthetsprovning kräver specialistkompetens. Vidare är en begränsning/nackdel att cylindrar måste borras ut från betongstrukturen. Fördelar är att metoden mäter direkta data kopplat till hållfastheten.

Radiografiska metoder

Radiografi är en oförstörande direkt metod. Metoden bygger på att elektromagnetisk högenergi-strålning passerar genom en struktur. På baksidan placeras en film på vilken eventuella defekter avbildas. Mer vanligt idag är digital framkallning, d.v.s. istället för film så används sensorer för att mäta intensiteten hos strålningen vid passage genom materialet. Densiteten hos materialet avgör hur mycket energi som tas upp från strålningen. Olika isotoper ger olika energinivåer hos strålningen och anpassning kan därför göras för olika material och tjocklekar på provobjekten.

Fördelar med radiografi är hög upplösning, förmodligen den oförstörande provningsmetoden med högst upplösning. Vidare produceras resultat som är relativt lättolkade. Begränsningar ligger främst kring säkerhet och handhavande med utrustningen.

Provmetoder för armering

Korrosion är det huvudsakliga hotet mot armeringens integritet, och därmed också mot betongkonstruktionens integritet. Primärt vilar bedömningen av statusen hos armeringen på kännedom om dess placering i betongen, dess vidhäftning till betongen samt eventuellt pågående korrosion. Flera metoder för bedömning av lokalisering och geometri har presenterats tidigare. Således redovisas här enbart ett par typiska metoder för bedömning om pågående korrosion sker.

Halvcellspotential (Potentialmätning)

Potentialmätning är en oförstörande indirekt mätmetod. Metoden bygger på att en potentialskillnad (korrosionspotentialen) finns mellan en referenselektrod kopplad till ett armeringsjärn via en voltmeter. Korrosionspotentialen är den potential som ett korroderande armeringsjärn antar i förhållande till omgivande miljö, d.v.s. potentialskillnaden mellan armering och betongen.

Den främsta begränsningen är kravet att fästa en tråd på armeringsjärnet vilken kan ligga inbäddat i betongen. Teoretiskt kan aktiv korrosionen fastslås redan innan utfällningar kan ses på betongytan. Metoden fungerar dåligt då armeringen har formen av ett nät p.g.a. att svårigheten att avgöra vilken väg strömmen går i nätet, d.v.s. stor osäkerhet om var mätningen görs. Mest lämpad är metoden för en konstruktion med några få kraftiga armeringsjärn som är tydligt separerade från varandra. Vidare fungerar metoden sämre (ökad osäkerhet) vid fuktig betong då resistansen i betongen sjunker och metoden fungerar inte alls under vatten. Att metoden är förknippad med stora svårigheter kan även uttydas från BaTMan [25, 26] då det krävs kompletterande mätningar av resistiviteten, kloridinträngnings- och karbonatiseringsdjupet samt okulär besiktning för en korrosionsbedömning.

Provytan delas oftast in i ett nätsystem för att definiera mätpunkterna. Mätresultaten plottas sedan i ett diagram för identifiering av områden med störst sannolikhet för korrosion. Metoden kan också användas för identifiering av läckströmmar samt bedömning av funktionen hos katodiska skydd.

Resistivitetsmätning

Detta är en oförstörande indirekt mätmetod. Torr betong har ingen eller liten elektrisk ledningsförmåga. Den elektriska ledningsförmågan ges främst av betongens porssystem, och mängden vatten samt fria joner i porvattnet. Resistivitetsmätning beskriver vilket motstånd en elektron upplever vid transport genom betongen. Lägre resistivitet ger högre sannolikhet för korrosion.

Metoden används för att lokalisera områden med högre vatteninnehåll och därmed större risk för armeringskorrosion. Resistiviteten kan även ge en indikation på betongens kvalitet, då betong av god kvalitet är kompakt och med lågt vatteninnehåll. Begränsningar med metoden finns i att mätningen begränsas till ett relativt grunt ytskikt hos betongen.

Ytpotentialmätning

Ytpotentialmätning är en oförstörande indirekt metod som innebär att potentialen mäts mellan en fix punkt på betongytan och andra punkter. På detta sätt kan elektronflöden detekteras och områden med högre sannolikhet för korrosion hittas. En högre positiv laddning, d.v.s. ett område som verkar som anod, ökar sannolikheten för att hitta korrosion. Till skillnad från halvcellspotentialtekniken krävs för föreliggande metod ingen elektrisk ledning kopplad till armeringen.

11. Resultat – Urval av provningsmetod baserat på typ av konstruktion och degraderande process

Baserat på informationen i tidigare kapitel matchas mätmetoder och degraderingsprocesser i reaktorinneslutningen och kylvattenvägarna, se tabell 5-6. Notera att listan inte utgör någon fullständig lista över degraderande mekanismer i betong utan endas listar mekanismer med någon nivå av risk för respektive konstruktion. Avseende reaktorinneslutningar är risken för pågående skadeprocess generellt lägre jämfört med den i kylvattenvägarna. Orsaken är den aggressiva miljön som råder i kylvattenvägarna. Vidare inkluderas en bedömning av lämpliga mätmetoder för övriga byggnader vilka ej har någon säkerhetsfunktion inom kärnkraften.

Tabell 6 redovisar samma informationer som tabell 5 med tillägget hur de olika degraderingsmekanismerna manifesterar sig. Degraderingsmekanismen sprickbildning är i egentlig mening inte en ursprunglig process utan en konsekvens av pågående degraderingsprocess. Dock är sprickbildning inkluderad i tabell 5 då majoriteten av degraderingsprocesserna resulterar i sprickbildning. Därmed utgör den en väsentlig faktor för identifiering av degraderingsprocesser.

I Betongreparation [22] definieras olika nivåer på degraderingsprocessens fortskridande och rekommenderade reparationsprinciper, d.v.s. en gradering av manifestationen hos skadorna.

Tabell 5. Sammanställning av degraderingsmekanismer samt lämpliga provningsmetoder för identifikation av pågående degraderingsprocess.

Provningsmetod Degraderingsfaktor	Anslagsmetoder (O)	Elektromagnetiska metoder (O)	Halvcellspotential* (O)	Karbonatiseringsmätning (O)	Kloridjonmätning (O)	Mekanisk provning (F)	Petrografi (F)	Radiografiska metoder (O)	Resistivitetmätning (O)	Ultraljudmetoder (O)	Visuell inspektion (O)	Ytpotentialmätning (O)
Alkali-ballast reaktioner (R)												
Biologisk påväxt (R, V)												
Dehydrering (R)												
Erosion (V)												
Karbonatisering (R, V, Ö)												
Kloridinträngning (R, V, Ö)												
Korrosion (R, V, Ö)												
Sprickbildning (R, V, Ö)												
Urlakning (R, V)												
Vittring (R, V, Ö)												

(F) förstörande provningsmetod, (O) oförstörande provningsmetod, (R) reaktorinneslutning, (V) kylvattenvägar, (Ö) övriga byggnader utan säkerhetsfunktion.

*Fungerar inte för kylvattenvägar p.g.a. fukt i betongen.

Tabell 6. Degraderingsmekanismer samt deras manifestering och lämplig identifieringsmetod.

Degraderingsfaktor	Manifestering	Position (R, V)	Metod för att identifiera
Alkali-ballast reaktioner	Sprickor, volympökning	(R) Insida centrumpelare kring hårdgeometrin.	Visuellt, petrografi
Dehydrering	Sprickor	(R) Kring genomföringar med varmt innehåll.	Visuellt, petrografi
Erosion	Ytförlust	(V) Lokala positioner med hög strömningshastighet.	Visuellt
Karbonatisering	Spjälkning, rostutfällning på yta	(R) Utsida PWR. (V, Ö) Ytor i fri atmosfär.	Petrografi, karbonatiseringsmätning
Kloridinträngning	Spjälkning, rostutfällning på yta	(R) Utsida bottenplatta. (V, Ö) Allmänt vattenvägar, övriga byggnader.	Petrografi, kloridinträngningsmätning
Korrosion (slakarmerad betong)	Korrosion	(R) Allmänt. (V, Ö) Skvalpzon samt under vattenytan, övriga byggnader.	Visuellt, kloridmätning, ultraljudprovning
	Spjälkning, rostutfällning på yta	(R) Allmänt. (V, Ö) Skvalpzon samt under vattenytan, övriga byggnader.	Visuellt, petrografi
Urlakning	Utfällning på yta	(V) Ytor i kontakt med vatten.	Visuellt, petrografi
Frysning/upptining	Avflagning, spjälkning, sprickor	(R) Utsida PWR. (V, Ö) Skvalpzon samt yta i fri atmosfär, övriga byggnader.	Visuellt, petrografi

(R) reaktorinneslutning, (V) kylvattenvägar, (Ö) övriga byggnader utan säkerhetsfunktion.

12. Diskussion och slutsatser

Terminologin inom förvaltning och underhåll av betongkonstruktioner saknar tydligt definierade begrepp. Som exempel kan nämnas tillståndsbedömning, kontroll, inspektion, okulär besiktning, visuell kontroll, avsyning. Vad dessa begrepp inkluderar framgår långt ifrån alltid. Ringhals har definierat ett antal begrepp vilket förtydligar situationen, tabell 7.

Tabell 7. Definition av begrepp kopplat till underhåll av betongkonstruktioner, [1].

Ord	Definition
Avsyning	Endast undersökning okulärt/visuellt
Inspektion	Undersökning med känsel och hörsel, ex. bomknackning. Avsyning ingår i inspektion.
Kontroll	Mätningar och provuttag. Ex. mätning av täckande betongskikt, uttag för klorid- och karbonatiseringsanalys.
Besiktning	Avser helheten, d.v.s. alla ingående moment: avsyning, inspektion och kontroll.
Tillståndsbedömning	En tillståndsbedömning ska ge svar på nuvarande och framtida status hos konstruktionen. Resultat av besiktning, resultat av analyserade prover, historik och anläggningsdata ger tillsammans underlag för en tillståndsbedömning.

Trafikverkets förvaltningssystem BaTMan för betongkonstruktioner är ett etablerat system för konventionella betongkonstruktioner. I systemet refereras till Vägverkets Handbok för Broinspektion [25] vilken utgör ett fullödigt hjälpmedel för inspektion och utbildning för inspektion av broar. Några punkter från metodiken bedöms som viktiga att lyfta fram kopplat till bedömningar av betongkonstruktioner inom kärnkraft:

- En inspektion ska alltid föregås av en konstruktionsanalys, d.v.s. studie av kraftflödet i konstruktionen, med syfte att identifiera konstruktionsdelar/element och betongytor av funktions- eller säkerhetsmässig betydelse där armeringen har dragspänningar. Ofta är det bara vissa delar/ytor av en konstruktionsdel som är nödvändiga att besiktiga, utöver en generell avsyning.
- Toleransvillkor för samtliga mätmetoder som tillämpas ska upprättas innan fält- eller laboratoriemätningar genomförs. Det är en viktig aspekt med avseende på objektivitetskrav i mätningar och bedömningar.

Metodiken i Trafikverkets förvaltningssystem BaTMan för statusbestämning av armerad betong är en mycket god bas för utveckling av en liknande metodik/system för betongkonstruktioner inom kärnkraft. Vissa tillägg och kompletteringar är nödvändiga, t.ex. införlivande av alkali-ballast reaktioner p.g.a. strålning, armerad betong utsatt eller dränkt i bräckt- eller saltvatten, metoder för besiktning av tätplåt samt spännarmering. Ett sådant system i kombination med befintligt system för reparation av betongkonstruktioner [22] utgör ett kraftfullt verktyg för drift och underhåll av betongkonstruktioner inom kärnkraft.

Armerad betong är ett kompositmaterial med goda möjligheter att skräddarsys till specifik applikation. Vid tiden för uppförandet av betongkonstruktionerna inom svensk kärnkraft var kunskapen kring betongs beständighet och motståndskraft begränsad. Detta tog sig t.ex. uttryck i att det inte fanns någon standard för miljöklassificering [34]. Först 1979 kom tre miljöklasser för korrosionsmiljöer, dessförinnan var det noll. Samma gäller för vct, 1979 kom de första kraven på högsta tillåtna värden för klassificeringen högsta korrosions- och frostrisk. Med denna bakgrund är det motiverat, utifrån ett riskperspektiv i avseende säkerhet och driftstillgänglighet, att genomföra återkommande besiktning av de åldrande betongkonstruktionerna inom svensk kärnkraft. Trots bristen på standarder och kunskap kring betongs beständighet har relativt få skador rapporterats i de svenska reaktorinneslutningarna relaterat till en avsaknad av beständighet hos betongen. Skadorna har oftast kopplats till produktionsfel eller brist på arbetsrutiner alternativt avsteg från konstruktionsunderlag [6].

- Redovisad analys visar att åtta olika degraderingsmekanismer (alkali-ballast reaktioner, biologisk påväxt, dehydrering, karbonatisering, kloridinträngning, korrosion, urlakning, vittring) är potentiellt möjliga i en reaktorinneslutning i Sverige. Driftserfarenhet har visat att risken för säkerhetsmässig påverkan är liten eller mycket liten för sju (alla utom korrosion) av dessa åtta degraderingsmekanismer. Således föreligger en relativt sett högre risk för säkerhetsmässig påverkan från korrosion. Den främsta orsaken till korrosion i tätskikt eller spännarmering torde vara produktionsfel eller brist på arbetsrutiner alternativt avsteg från konstruktionsunderlag [6] som nämnts tidigare.
- Skademekanismerna korrosion kan, i en reaktorinneslutning, identifieras alternativt riskbedömas med de konventionella metoderna avsyning, karbonatiserings- och kloridmätning, ultraljudprovning samt petrografi.

Möjligheterna till besiktning av spännarmeringen i en reaktorinneslutning är huvudsakligen styrd av huruvida dessa är ingjutna eller inte. För spännarmering i torrluftsventilerade rör alternativt rör injekterade med fettprodukter tillåts uttag av trådar för besiktning. Besiktning av ingjuten spännarmering är svårare och man hänvisas till oförstörande metoder, t.ex. [32], om inte påverkan på konstruktionen tillåts för förstörande provning.

Angående kylvattenvägarna har fler skador (och åtgärder) rapporterats [3] kopplat till brist på beständighet hos betongen och påverkan på armering.

- Redovisad analys visar att sju olika degraderingsmekanismer (biologisk påväxt, erosion, karbonatisering, kloridinträngning, korrosion, vittring, urlakning) är potentiellt möjliga i ett kylvattensystem av armerad betong i Sverige. Driftserfarenhet har visat att risken för säkerhetsmässig påverkan är liten eller mycket liten för två (biologisk påväxt, karbonatisering) av dessa sju degraderingsmekanismer. Således föreligger en relativt sett högre risk för säkerhetsmässig påverkan från erosion, kloridinträngning, korrosion, vittring samt urlakning.
- Skademekanismerna erosion, kloridinträngning, korrosion, vittring och urlakning kan, i ett kylvattensystem, identifieras alternativt riskbedömas med de konventionella provningsmetoderna avsyning, ultraljud, karbonatiserings- och kloridmätning samt petrografi.

Avsugning i kombination med någon systematiserad anslagsmetod, t.ex. instrumenterad bomknackning, s.k. inspektion enligt tabell 7 är en mycket snabb och effektiv metod och är ett bra första steg i processen för statusbestämning av betongen. Detta är också i princip det första som rekommenderas i BaTMan vid inspektion av betongkonstruktioner i fält. Avsugning identifierar samtliga skador som visar sig på betongytan och i princip samtliga degraderingsmekanismer manifesterar sig på betongytan i form av geometri- eller färgändringar i något steg av degraderingsprocessen. Avsugning kombinerad med instrumenterad bomknackning ger information om tillståndet under betongytan. Instrumenterad bomknackning ökar objektiviteten i mätförfarandet och tillåter identifikation av delaminiering, sprickor/håligheter, estimerar geometri och tryckhållfasthet. Metoden tillåter identifikation av degraderingsprocesser i ett något tidigare stadium, d.v.s. innan manifestering på betongytan. Om kravet på noggrannhet och objektivitet är högre än vad avsugning och instrumenterad bomknackning ger alternativt att misstänkt degradering/skada finns under ytan rekommenderas markradar. Markradar identifierar armering, kablar, sprickor och håligheter lokaliseras i flera lager ner till ett djup av 0.3-0.5 m i betong. Metoden tillåter bestämning av armeringsdiameter samt delning, täcksiktstjocklek, armeringsdjup och densitet. En fördel med markradar är att antennen inte behöver vara i kontakt med provobjektets yta. Därmed blir metoden effektiv för att söka av stora ytor i hög takt.

Vid identifikation av skada i det första inspektionssteget väljs provningsmetod för ytterligare utredning utifrån föreliggande misstänkta skadesituation. Rörande korrosionsskador hos armering väljs ofta ultraljudteknik i någon form. Degradering i betongen fastställs t.ex. med petrografi alternativt kemisk analys. Degraderingens omfattning kan eventuellt bedömas med ultraljud. Mätmetoden halvcellpotential ger mycket osäkra resultat och fungerar otillfredsställande i situationer med fuktig betong och nätarmering. Således rekommenderas ej halvcellpotentialen i dagsläget för fastställande av risken för armeringskorrosion i kylvattenvägarna. För reaktorinneslutningen och bedömning av risken för korrosion på tätplåt och spännarmering finns många studier publicerade, se t.ex. [35-36]. Generellt föreligger större tekniska svårigheter att bedöma risken för korrosion hos spännarmeringen om den är ingjuten jämfört med hos tätplåten. Vid injikerad spännarmering tillåts trådar att tas ut för bedömning av korrosionsrisken.

- Provningsmetoderna visuell avsugning och petrografi täcker in de degraderingsmekanismer som kan förväntas med någon risk. Vill man hellre använda oförstörande provningsmetoder kan petrografen bytas ut mot klorid- och karboniseringsmätning tillsammans med visuell avsugning.
- För bestämning av tryck-, drag-, spräckhållfasthet rekommenderas primärt användande av mekanisk metod och sekundärt en oförstörande provningsmetod för skattning av tryckhållfastheten.
- Baserat på information delgiven i föreliggande rapport görs bedömningen att konventionella provningsmetoder täcker in och kan användas för identifikation av de degraderingsmekanismer som kan förväntas föreligga med någon risk i de säkerhetsrelaterade betongkonstruktionerna i en kärnkraftsanläggning.

13. Rekommendationer

- Följande provningsmetoder rekommenderas för besiktning av reaktorinneslutningen i syfte att identifiera eventuella pågående degraderingsprocesser (främsta riskfaktorn är korrosion): inspektion (avsynning + instrumenterad bomknackning), karbonatiserings- och kloridmätning, ultraljudprovning samt petrografi. Dessa provningsmetoder täcker även in degraderingsprocesser med relativt sett lägre risk.
- Följande provningsmetoder rekommenderas för besiktning av kylvattenvägarna i syfte att identifiera eventuella pågående degraderingsprocesser (främsta riskfaktorer är erosion, kloridinträngning, korrosion, vittring, urlakning): inspektion (avsynning + instrumenterad bomknackning), karbonatiserings- och kloridmätning, ultraljud samt petrografi. Dessa provningsmetoder täcker även in degraderingsprocesser med relativt sett lägre risk.
- För bestämning av tryck-, drag-, spräckhållfasthet rekommenderas primärt användande av mekanisk metod och sekundärt en oförstörande provningsmetod för skattning av tryckhållfastheten.
- Metodiken tillämpad av Trafikverket i förvaltningssystemet BaTMan för tillståndsbedömning av betongkonstruktioner utgör en mycket god grund för utveckling av motsvarade inom kärnkraften. Tillsammans med verktyget [22] utgör detta ett kraftfullt verktyg för drift, underhåll och förvaltning av betongkonstruktioner inom kärnkraften.
- Begrepp med tillhörande definitioner enligt tabell 7 rekommenderas för tillämpning i föreliggande kontext.

14. Förslag till fortsatta insatser

- En detaljerad analys av kompletterande åtgärder och förändringar, av metoden tillämpad i BaTMan, för anpassning till förutsättningarna inom kärnkraften.
- Med inrättandet av program för provning/förvaltning av betongkonstruktioner inom kärnkraften kan degraderingsskador komma att upptäckas. En riktad informationsinsamling av denna information för utredning av generella och gemensamma skadebilder i de olika verken skulle effektivisera och gynna tillståndshållarnas förvaltningsarbete.

15. Erkännanden

Denna rapport är finansierad av strålsäkerhetsmyndigheten, SSM. Författarna och projektdeltagare tillstår sin tacksamhet för möjligheten att genomföra studien.

16. Referenser

- [1] ”Ringhals 1 - 4 Underhållsprogram för intagskanaler och kylvattentunnlar”. Darwin ID 1892991/3.0. 2013.
- [2] Roth T., Silfwerbrand J. & Sundquist H. ”Betonginneslutningar i svenska kärnkraftverk”, SKI Rapport 02:59, 2002.
- [3] Torbjörn N. & Silfwerbrand J. ”Reparationsmetoder för kärnkraftsindustrin. Kartläggning”, ISBN 978-91-7673-161-1, Energiforsk 2015:161, 2015.
- [4] Ljustell P. & Jan W. ”Degradering i betong och armering med avseende på bestrålning och korrosion”, Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) 2014:31, 2014.
- [5] Kaspar W., Yunping X. & Naus D. ”A review of the effects of radiation on the microstructure and properties of concrete used in nuclear power plants”, NUREG/CR-7171, ORNL/TM-2013/263, 2013.
- [6] Barslivo G., Österberg E. & Aghili B. ”Utredning kring reaktorinneslutningar – konstruktion, skador samt kontroller och provningar”, SKI Rapport 02:58, 2003.
- [7] D. Breysse. ”Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures”, Vol: 3-Deterioration-processes-in-reinforced-concrete-an-overview. Eds: Christiane M., Hans-Wolf R. & Gerd D. Woodhead Publishing Limited, 2010.
- [8] Silfwerbrand J., Sundquist H. ”Drift, underhåll och reparation av Konstbyggnader”. Kungliga Tekniska Högskolan (KTH). Institutionen för byggkonstruktion, TRITA-BKN. Rapport 53, Brobyggnad utgåva 2, 2001. ISSN 1103-4289.
- [9] Naus D., Oland C. B., Ellingwood B. R. ”Report on Aging Nuclear Power Plant Reinforced Structures”, NUREG/CR-6424, ORNL/TM 13148, 1966.
- [10] Jönsson H., Tornberg R. ”Betongens hållfasthet vid moderata temperaturbelastningar”, Elforsk rapport 13:84, 2013.
- [11] Byfors K., Fratesi R., Grønvold F., Gudmundsson G., Janz M., Klinghoffer O., Mattila J., Miller J. B. & Poulsen E. ”Repair and Maintenance of Concrete Structures. Repair Methods – A Review”, Norwegian Public Roads Administration, 2004. ISBN 82-91228-28-0.
- [12] Einar B. ”Corrosion and Protection – (Engineering materials and processes)”. ISBN 1-85233-758-3, Springer 2004.
- [13] Ichikawa T., Miura M., ”Modified Model of Alkali-Silica Reaction”, Cement and Concrete Research, Vol. 37, 2007.
- [14] Ichikawa T., Koizumi H., ”Possibility of Radiation-induced Degradation of Concrete by Alkal-Silica Reaction of Aggregates”, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 39, 2002.
- [15] Primak W. et al.. ”Effects of Nuclear Reactor Exposure on Some Properties of Vitreous Silica and Quartz”, Journal of the American Ceramic Society, Vol. 38(4), Pages 135-139, 1955.
- [16] Primak W. et al.. ”Fast Neutron-Induced Changes in Quartz and Vitreous Silica”, Physical Review, Vol. 110(6), Pages 1240-1254, 1958.
- [17] Gray B. S. ”The Effect of Reactor Radiation on Cements and Concretes”, Commission of the European Communities, Luxembourg, Pages 17 – 39, 1966.
- [18] Maruyama I., Kontani O., Sawada S., Sato O., Igarashi G., Takizawa M. ”Evaluation of Irradiation Effects on Concrete Structure – Background and

- Preparation of Neutron Irradiation Test”, Proceedings of the ASME 2013 Power Conference, Boston, USA, Juli 29 – Augusti 1, 2013.
- [19] Mikael O. “Climatic conditions inside nuclear reactor containments”, ISBN 978-91-7673-287-8. Energiforsk 2016:287, 2016.
- [20] Jan Erik L., Mathias F. & Erik H. “Analysis of irradiated concrete – Microscopic and mechanical tests on concrete from a nuclear power plant containment structure”, ISBN 978-91-7673-239-7. Energiforsk 2016:239, 2016.
- [21] Göran C. “Korrosionsskydd av stål i betongkonstruktioner – Handbok”, Rapportutkast (version 6). Elforsk 10:110, 2010.
- [22] <http://www.betongreparation.se>, IT-baserad handbok för betongreparationer. Utgivare - Rebet. 2013.
- [23] Office of Federal Regulations, “Appendix J – Primary Reactor Containment Leakage Testing for Water-Cooled Reactors,” pp. 748-753 in *Code of Federal Regulations*, 10 CFR Part 50, Office of Federal Register, Washington, D.C., 1995
- [24] Abdul H. S. “Aging management of nuclear prestressed concrete containments – U.S. experience”, ISBN 978-91-7673-146-8. Energiforsk 2015:146, 2015.
- [25] “Handbok för broinspektion”, Utgåva 2, mars 1999, Vägverket publ. 1993:34, 1993.
- [26] “BaTMan – Bro och tunnel management, Handbok för inspektion av byggnadsverk”, Rev. januari 2015, Trafikverket, 2015.
- [27] “BaTMan – Bro och tunnel management, Mätning bedömning av broars tillstånd”, Rev. juni 2008, Vägverket, 2008.
- [28] “Inspektion og reparation af forspændte betonbroer”, Udvalg 61 - Broer og færger. Nordiska Vägtekniska Förbundet 17:1984, 1984.
- [29] “Ageing management of concrete structures in nuclear power plants”, IAEA nuclear energy series No. NP-T-3.5, International atomic energy agency - Vienna, 2016.
- [30] Ulriksen P. “Instrumenterad bomknackning – Test av mätmetod och verifiering i verkliga skadefall i Ringhals”, Elforsk 12:09, 2011.
- [31] Ulriksen P., Jonsson P. “Projektorstyrd avsökning och documentation”, ISBN 978-91-7673-162-8. Energiforsk 2015:162, 2015.
- [32] <http://www.acsys.ru/eng/production/detail/a1040-mira/>, Acoustic Control Systems, 2016.
- [33] “Aging Identification and Assessment Checklist: Civil and Structural Components”, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA 2005.
- [34] Göran F. “Betongkonstruktioners beständighet – En genomgång av officiella svenska regler 1926-2010”, Lunds Tekniska Högskola (LTH), avd. Byggnadsmaterial. Rapport TVBM-3153, 2010.
- [35] Richard S. “Utredningsrapport avseende oförstörande provningsmetoders förutsättningar och möjligheter för kontroll av betongkonstruktioner i kärnkraftverk”, Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM), SSM2011-800-2, 2012.
- [36] Allan Lion K. “Non-destructive testing of concrete structures in nuclear applications – evaluation on follow up on the CONMOD project, Part I”, ISBN 978-91-7673-245-8. Energiforsk 2016:245, 2016.
- [37] Ulriksen P. “Ultraljudsmetod för att detektera korrosion i tätplåt i reaktorinneslutningar – Etapp 1”, ISBN 978-91-7673-246-5. Energiforsk 2016:246, 2016.



2018:10

Strålsäkerhetsmyndigheten har ett samlat ansvar för att samhället är strålsäkert. Vi arbetar för att uppnå strålsäkerhet inom en rad områden: kärnkraft, sjukvård samt kommersiella produkter och tjänster. Dessutom arbetar vi med skydd mot naturlig strålning och för att höja strålsäkerheten internationellt.

Myndigheten verkar pådrivande och förebyggande för att skydda människor och miljö från oönskade effekter av strålning, nu och i framtiden. Vi ger ut föreskrifter och kontrollerar genom tillsyn att de efterlevs, vi stödjer forskning, utbildar, informerar och ger råd. Verksamheter med strålning kräver i många fall tillstånd från myndigheten. Vi har krisberedskap dygnet runt för att kunna begränsa effekterna av olyckor med strålning och av avsiktlig spridning av radioaktiva ämnen. Vi deltar i internationella samarbeten för att öka strålsäkerheten och finansierar projekt som syftar till att höja strålsäkerheten i vissa östeuropeiska länder.

Strålsäkerhetsmyndigheten sorterar under Miljödepartementet. Hos oss arbetar drygt 300 personer med kompetens inom teknik, naturvetenskap, beteendevetenskap, juridik, ekonomi och kommunikation. Myndigheten är certifierad inom kvalitet, miljö och arbetsmiljö.

Strålsäkerhetsmyndigheten
Swedish Radiation Safety Authority

SE-171 16 Stockholm
Solna strandväg 96

Tel: +46 8 799 40 00
Fax: +46 8 799 40 10

E-mail: registrator@ssm.se
Web: stralsakerhetsmyndigheten.se