

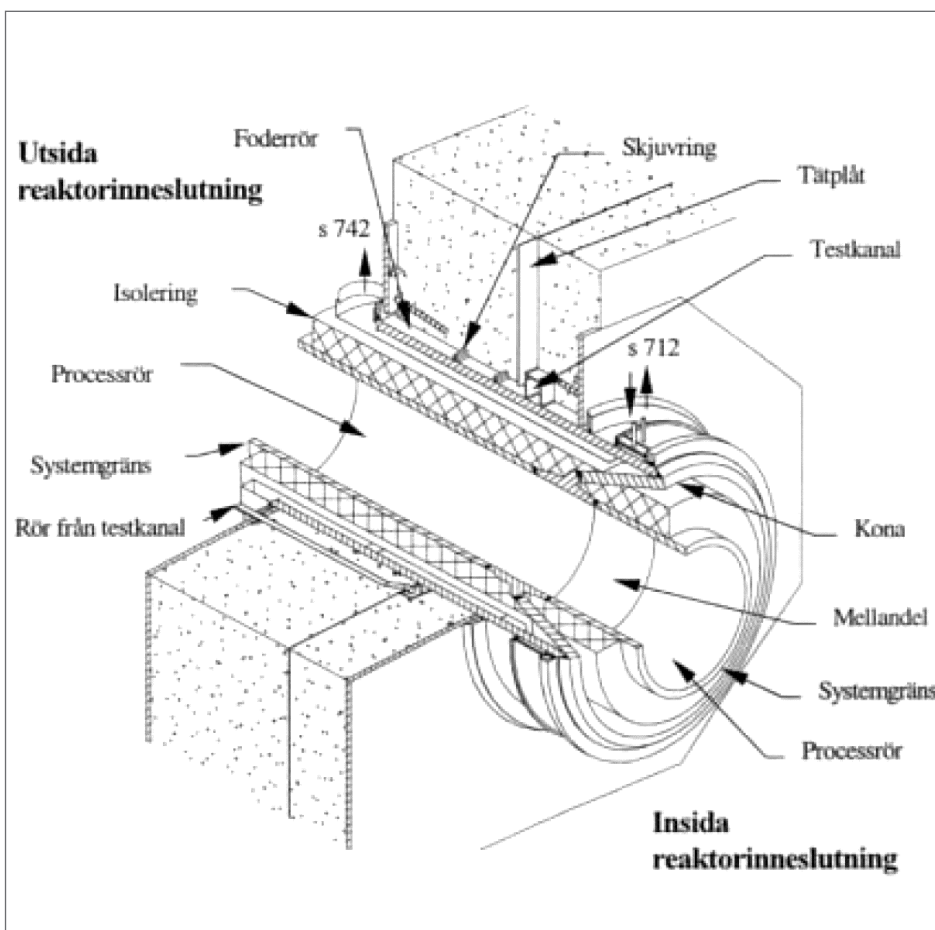
BETONGPROVNINGAR I NEDLAGDA REAKTORINNESLUTNINGAR

RAPPORT 2023:945



BETONGTEKNIK
KÄRNKRAFT

BETONGTEKNISKT PROGRAM
KÄRNKRAFT



Energiforsk

Betongprovningar i nedlagda reaktorinneslutningar

Undersökning av möjligheter och förslag på
provningstyper

DANIEL RYDLE

MANOUCHEHR HASSANZADEH

LEONARD SANDSTRÖM

ISBN 978-91-7673-945-7 | © Energiforsk maj 2023

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

Förord

De befintliga reaktorer som idag är i drift på de svenska kärnkraftverken och de flesta finska börjar passera sin tekniska livslängd enligt deras ursprungliga design. Därför erbjuder de reaktorer som avvecklas i Sverige ett tillfälle för att kontrollera statusen på betongkonstruktioner för att förstå hur dessa åldrats.

För att underlätta detta så syftar detta projekt till att utveckla och ta fram en generell provningsplan för uttag av provkroppar från nedlagda reaktorinneslutningar. Provplanen identifierar både kritiska konstruktionsdelar samt kända problemområden där man bör fokusera provtagningen. Planen för uttag rekommenderar även metod för uttag och hanteringen av provkropparna.

Vidare ger studien förslag på relevanta prover som kan utföras från grundläggande egenskaper hos betongen, till mer specifika materialegenskaper, t.ex. karbonatiseringsdjup samt specifika konstruktionsdetaljer, t.ex. infästningar.

Projektet har utförts av Vattenfall och Sweco där Manouchehr Hassanzadeh, Sweco, varit projektledare. Underlag till projektet har hämtats in från de svenska anläggningarna, inklusive Barsebäck där man redan genomfört omfattande provning.

Intressenterna bakom Betongtekniskt program kärnkraft är Vattenfall, Uniper, Fortum, Teollisuuden Voima Oy (TVO) i Finland, Skellefteå Kraft, Karlstads Energi samt Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) och Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB).

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

Sammanfattning

I kärnkraftverk finns ett stort antal olika betongkonstruktioner som är viktiga för säkerheten samt driften av verken, t.ex. reaktorinneslutningen och kylvattenvägarna. De befintliga reaktorer som idag är i drift på de svenska kärnkraftverken börjar passera sin tekniska livslängd enligt deras ursprungliga design. De fyra nu nedlagda reaktorerna i Sverige dimensionerades och byggdes för mer än 40 år sedan, och hade då en planerad drifttid på 30 år. För att säkerställa att betongkonstruktionerna vid aktiva reaktorer klarar en förlängd drifttid krävs att olika utredningar och teoretiska analyser genomförs. Störst tillförlitlighet i dessa analyser och utredningar erhålls om de baseras på data från genomförda prover på den aktuella betongen istället för på nominella värden utgående från använd betongkvalitet i konstruktionerna.

Föreliggande studie syftar huvudsakligen till att utveckla och ta fram en generell provningsplan för uttag och provning av provkroppar från nedlagda reaktorinneslutningar. Målet är att planen ska kunna användas vid planering inför utförande av uttag och provning av provkroppar. I tillägg är också ett mål att föreslå provningar för verifiering av olika dimensioneringsmodeller som använts vid utformning av konstruktionerna, samt de olika provningsmetoder som används under drift för att säkerställa inneslutningarnas funktionskrav.

Rapporten inleds med en översiktlig beskrivning av de svenska reaktorinneslutningarnas utformning i avsnitt 2. I efterföljande avsnitt 3 behandlas materialegenskaper och parametrar som är nödvändiga att känna till vid genomförande av dimensioneringsberäkningar och analys av inneslutningskonstruktioner. I avsnitten 4 och 5 ges förslag på olika provningar som bedöms viktiga att utföra vid nedlagda reaktorinneslutningar. Dessa inkluderar sofistikerade provningar kopplade till inneslutningarnas mekaniska respons och läckagetäthet, samt provning av olika materialegenskaper, materialens tillstånd, olika typer av infästningar, spännkablar, etc. I avsnitt 6 presenteras en bedömning av vilka provningar som är möjliga att genomföra i de anläggningar som i nuläget är nedlagda baserat på deras nuvarande tillstånd och planerat rivningsarbete. Dessutom behandlas övriga aspekter som är nödvändiga att beakta vid planering och genomförande av provningarna. Specifika anvisningar för provningarnas genomförande presenteras i avsnitt 7, medan mer generella avslutande råd och rekommendationer ges i avsnitt 8.

Nyckelord

Reaktorinneslutningar, Provning, Betong, Provningsplan, Materialegenskaper, Global och lokal respons, Läckage

Summary

There are many different concrete structures in nuclear power plants that are essential for the safety and operation of the plants, e.g., the reactor containment and structures directing cooling water to the reactor. The Swedish reactors that are currently in operation are starting to approach their designed technical service life. The four shutdown Swedish reactors were designed and built for more than 40 years ago, and had back then, a planned service life of 30 years. The service life of the Swedish reactors still in operation have been extended, and to ensure a continuing safe operation it is necessary to perform various investigations and theoretical analyses. The reliability of these analyses and investigations is greatly improved if they are based on data obtained from testing of the concrete material rather than on nominal values based on the concrete quality used in the structures.

The primary purpose of this study is to develop and compile a general test plan for extraction and testing of concrete specimens from shutdown reactor containment structures in Sweden. The goal is that the developed plan should be used during the planning phase, i.e., before the actual extraction and testing of the specimens are performed. Furthermore, an additional goal is also to propose tests aiming to validate different models used during design of the structures, and verify various test methods used during operation to ensure that the safety requirements of the containments are met.

The report starts with a brief description of the Swedish reactor containments' general design in section 2. Section 3 covers the necessary material properties and parameters to perform design calculations and analyses of the containment structures. In section 4 and 5, different tests found important to perform at shutdown reactor containments are proposed. These include advanced tests linked to the containments' mechanical response and leak tightness, as well as testing of different material properties, the material status, different types of anchorage, tendons, etc. Section 6 presents an evaluation of which tests that are possible to perform at the different facilities currently shutdown based on their current status and planned decommissioning work. Moreover, this section also covers additional aspects necessary to considered during planning and execution of the testing. More specific instructions on how to perform the proposed testing are covered in section 7, whereas more general concluding advice and recommendations are given in section 8.

Innehåll

1	Inledning	8
1.1	Bakgrund	8
1.2	Syfte och mål	8
1.3	Genomförande	8
1.4	Begränsningar	9
2	Reaktorinneslutning	10
2.1	Uppbyggnad	10
2.2	Skalkonstruktioner	14
2.2.1	Inre betongvägg	15
2.2.2	Yttre betongvägg	15
2.2.3	Bottenplatta av betong	17
2.2.4	Tak	17
2.2.5	Tätplåt	18
2.3	Genomföringar	19
2.4	Infästningar	22
2.5	Beläggningar	23
2.6	Bassänger	24
2.7	Kärna	26
3	Nödvändiga materialegenskaper och parametrar vid dimensionering och analys	29
4	Tester och kontroll av RI som helhet	31
4.1	Allmänt	31
4.2	Konstruktionens täthet och läckage vid trycktester	31
4.2.1	Konstgjort läckage	31
4.2.2	Bestämning av gastryck i material och mellan olika materialskikt	31
4.3	Konstruktionens deformationer vid trycktest	32
4.3.1	Bestämning av konstruktionens globala beteende	32
4.3.2	Bestämning av konstruktionens lokala respons	33
5	Förslag på provningar	35
5.1	Standardtester	35
5.1.1	Betongens tryckhållfasthet	35
5.1.2	Betongens draghållfasthet	36
5.1.3	Betongens elasticitetsmodul	38
5.1.4	Betongens densitet och porositet	39
5.2	Tester av specifika material- och tillståndsegenskaper	40
5.2.1	Hydratationsgrad och strukturutveckling	40
5.2.2	Fuktprofil	40
5.2.3	Karbonatiseringsdjup	41
5.2.4	Inverkan av joniserande strålning på betongens struktur	41

5.2.5	Kontaktzon mellan tät- och bassängsplåt och betongkonstruktionerna	42
5.2.6	Korrosionsrisker	42
5.2.7	Brottenergi	42
5.3	Injekteringsbruk i foderröret	45
5.3.1	Allmänt	45
5.3.2	Foderrörens allmänna tillstånd och utfyllnad	45
5.3.3	Laborrietester	45
5.3.4	Förslag på provtagningsställen	46
5.4	Infästningar i betong och ankarplattor	46
5.5	Tätplåt och dess infästningar	46
5.6	Spännlinor och spännrådar	47
6	Anläggningar	48
6.1	Möjliga tester och provningar vid nedlagda anläggningar	48
6.2	Möjliga tester och provningar vid ännu ej nedlagda anläggningar	49
6.3	Hantering och friklassning av provkroppar	50
7	Anvisningar för provningars genomförande	51
7.1	Borrkärnor för standardtester	51
7.1.1	Allmänt	51
7.1.2	Borrlägen	52
7.1.3	Borrkärnor för bestämning av betongens tryck- och spräckhållfasthet samt E-modul	53
7.1.4	Borrkärnor för bestämning av betongens densitet och porositet	54
7.2	Tester och borrkärnor för specifika material- och tillståndsegenskaper	54
7.2.1	Borrkärnor för bestämning av hydratationsgrad och strukturutveckling	54
7.2.2	Bestämning av strukturutveckling	54
7.2.3	Borrkärnor för bestämning av betongens sorptionsisotermer	54
7.2.4	Bestämning av fuktfördelning i borrhål	55
7.2.5	Borrkärnor för bestämning av karbonatiseringsdjup	55
7.2.6	Testning av inverkan av joniserande strålning på betongens struktur	55
7.2.7	Undersökning av kontaktzonen mellan tät- och bassängsplåt och betongkonstruktioner	56
7.2.8	Borrkärnor för bestämning av betongens krympning	56
7.2.9	Borrkärnor för bestämning av betongens krypning	57
7.2.10	Testning av brottenergi	57
7.3	Provning av Injekteringsbruk i foderröret	57
7.4	Spännlinor och spännrådar	57
8	Avslutande råd och rekommendationer	58
9	Referenslista	59

1 Inledning

1.1 BAKGRUND

I kärnkraftverk finns ett stort antal olika betongkonstruktioner som är viktiga för säkerheten samt driften av verken, t.ex. reaktorinneslutningen och kylvattenvägarna. De befintliga reaktorer som idag är i drift på de svenska kärnkraftverken börjar passera sin tekniska livslängd enligt deras ursprungliga design. De fyra nu nedlagda reaktorerna i Sverige dimensionerades och byggdes för mer än 40 år sedan, och hade då en planerad drifttid på 30 år. För att säkerställa att betongkonstruktionerna vid aktiva reaktorer klarar en förlängd drifttid krävs att olika utredningar och teoretiska analyser genomförs. Störst tillförlitlighet i dessa analyser och utredningar erhålls om de baseras på data från genomförda prover på den aktuella betongen istället för på nominella värden utgående från använd betongkvalitet i konstruktionerna.

De svenska tillståndshavarna har själva utfört en del betongprovningar i samband med t.ex. genomförda reparationer. Resultat från dessa provningar finns sammanställda i [1]. Från denna sammanställning framkom dock att provningsresultaten som finns inte är helt kompletta, och att väsentlig information kring provningarna saknas för att kunna använda dessa i t.ex. teoretiska analyser. Därför rekommenderas i rapporten att insamlad provningsdata bör utökas genom mer provning. De fyra reaktorer som under senare år stängts ner i Sverige ger en unik möjlighet att utföra ytterligare provningar och utöka databasen med för kärnkraftsindustrin värdefulla data.

1.2 SYFTE OCH MÅL

Föreliggande studie syftar huvudsakligen till att utveckla och ta fram en generell provningsplan för uttag och provning av provkroppar från nedlagda reaktorinneslutningar. Målet är att planen ska kunna användas vid planering inför utförande av uttag och provning av provkroppar. I tillägg är också ett mål att föreslå provningar för verifiering av olika dimensioneringsmodeller som använts vid utformning av konstruktionerna, samt de olika provningsmetoder som används under drift för att säkerställa inneslutningarnas funktionskrav.

1.3 GENOMFÖRANDE

Arbetet har utförts i samarbete med anläggningarnas tillståndshavare via representanter från dessa i styrgruppen för Energiforsks forskningsprogram *Betongtekniskt program kärnkraft*. Det första steget i framtagandet av provningsplanen var därför att stämma av behovet med tillståndshavarna samt undersöka vilka möjligheter som finns till provning vid respektive anläggning.

Som underlag för arbetet genomfördes även en litteraturstudie av tidigare publicerade rapporter inom Betongtekniskt program kärnkraft. Även pågående projekt inom forskningsprogrammet har beaktats genom kommunikation med representanter från dess styrgrupp. I tillägg har en genomgång utförts av övrig

tillgänglig och relevant litteratur, t.ex. rapporter om olika skadefall samt reparations- och förstärkningsåtgärder i svenska reaktorinneslutningar.

Baserat på erhållet och studerat underlag har följande aktiviteter och aspekter vidtagits respektive beaktats vid framtagandet av provningsplanen som presenteras i föreliggande rapport:

- Identifiering av anläggningar och betongkonstruktioner i vilka provningar är möjliga att utföra.
- Identifiering av viktiga konstruktionselement av betong i anläggningarna och beskrivning av deras funktion.
- Identifiering av provningsmetoder och modeller, inklusive deras ingående parametrar, som ursprungligen användes för att beskriva funktionerna och definiera gränsvärden för acceptanskriterier.
- Identifiering av betongelement som inte uppfyllt sina funktionskrav.
 - × Orsaker till varför elementen inte har kunnat uppfylla funktionskraven.
 - × Möjligheter att utvärdera prestandan hos de eventuella åtgärder som vidtagits för att återställa/förbättra elementets prestanda.
- Ta hänsyn till skillnader mellan dagens krav/normer och de som gällde under byggtiden av befintliga anläggningar vid identifiering av relevanta provningar.
- Bestämning av vilka typer av provningar som bör utföras i de identifierade områdena.
- Bestämning av provningarnas omfattning, t.ex. antalet provkroppar som ska tas ut eller antalet mätpunkter, för respektive provning i de identifierade områdena.
- Framtagning av generella anvisningar för hur provningarna ska genomföras.

1.4 BEGRÄNSNINGAR

Den framtagna provningsplanen är begränsad till reaktorinneslutningar. Mer specifikt inkluderar planen betongkonstruktioner som utgör inneslutningarnas omslutande skal, bassänger samt relevanta konstruktionselement av betong som finns på insidan av inneslutningarna. Omfattningen av arbetet är vidare begränsad till anläggningar i Sverige. Notera dock att Olkiluoto 1 och 2 (OL1 och OL2) i Finland har snarlik utformning som sina syskonreaktorer Forsmark 1 och 2. Därför är de rekommendationer som ges i denna rapport tillämpbara även för OL1 och OL2 i Finland. I både Sverige och Finland förekommer skillnader i inneslutningarnas detaljutformning. Denna rapport avser endast beskriva anläggningarna översiktligt för att kunna identifiera och motivera olika provningar och tester.

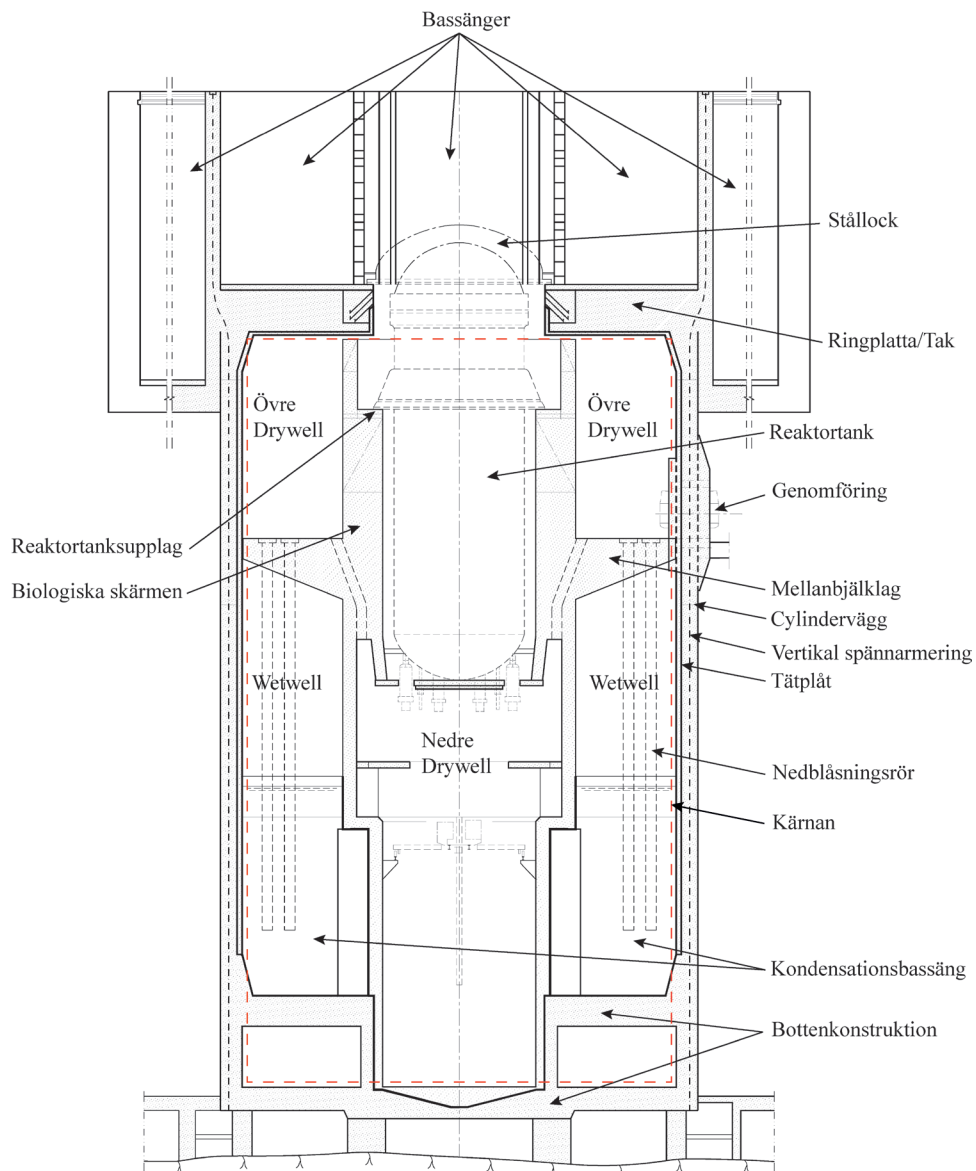
2 Reaktorinneslutning

2.1 UPPBYGGNAD

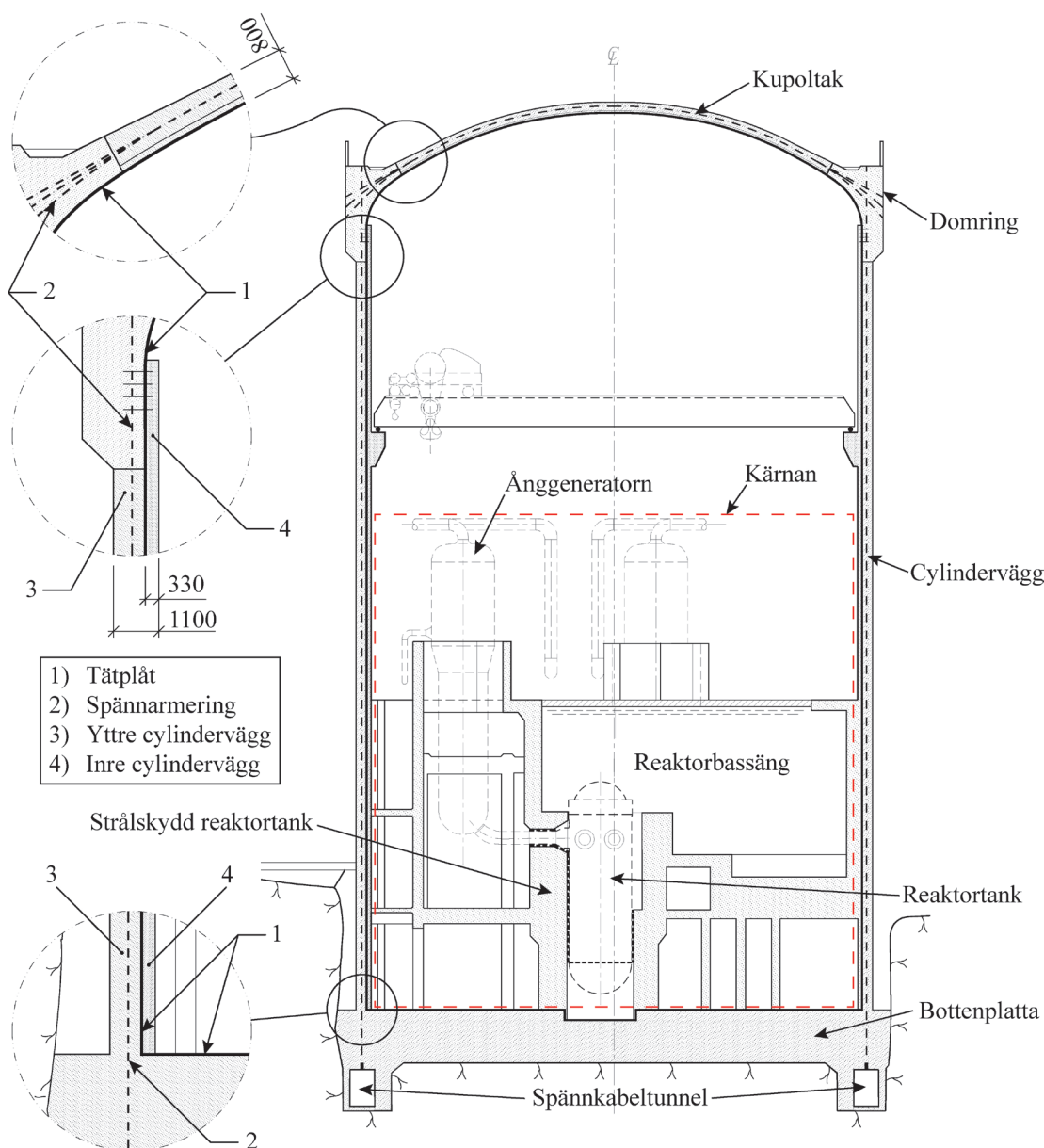
Vid de svenska kärnkraftverken finns både kokvattenreaktorer (BWR) och tryckvattenreaktorer (PWR). Oavsett reaktortyp utgör reaktorinneslutningen den yttersta barriären i kraftverkens djupförsvar, där den senare termen innebär att olyckor förebyggs och avhjälpas med flera av varandra oberoende nivåer av skyddssystem. Inneslutningarnas primära funktioner kan sammanfattas enligt följande:

- Innesluta reaktorns primärsystem och utgöra ett biologiskt skydd mot radioaktivitet
- Skydda reaktorns primärsystem från yttre påverkan
- Att vid dimensionerande haveri på insidan av inneslutningen kunna bära det uppkomna övertrycket och förhindra spridning av radioaktiva produkter till omgivningen.

Inneslutningarna är således tänkta att vara en passiv konstruktion som vid normaldrift är att betrakta som obelastad, men som vid haverier ska kunna motstå uppkommen last. Trots de många skillnader som finns mellan BWR:er och PWR:er är dock den strukturella utformningen av reaktorinneslutningarna förhållandes lika. Båda reaktortyperna är inneslutna av en spännarmerad betongkonstruktion tillsammans med en ingjuten tätplåt av stål. Exempel på utformningen av svenska reaktorinneslutningar för en BWR visas i Figur 2-1 och för en PWR i Figur 2-2.



Figur 2-1 Sektion genom BWR-inneslutningen vid Forsmark 1. Figur från [2].



Figur 2-2 Sektion genom PWR-inneslutningen vid Ringhals 3. Figur från [2].

Som framgår av de två figurerna ovan separerar den ingjutna tätplåten inneslutningarnas vertikala väggar i två delar. De yttre tjockare väggarna är armerade med både konventionell armering och spännarmering, medan de inre tunnare väggarna endast innehåller konventionell armering.

Avseende reaktorinneslutningarnas tak finns dock större skillnader i utformning mellan de svenska BWR:erna och PWR:erna. Den vanligaste utformningen av taket för BWR:er utgörs av en armerad eller spännarmerad ringformad platta samt en ringbalk. Ovanpå reaktortanken används ett stållock för förslutning av densamma, men som också möjliggör åtkomst till tankens insida vid t.ex. underhållsarbete. PWR:erna har istället ett kupolformat tak som förspänts med

samma typ av spännarmering som används i de yttre inneslutningsväggarna. Som kan ses i Figur 2-2 ligger inte heller tätplåten skyddad inuti taket, utan är här exponerad mot den omgivande miljön i inneslutningen. Grundläggningen av inneslutningarna skiljer sig mellan de olika anläggningsplatserna för kraftverken, och beror på de lokala geologiska förhållandena. Grundläggningsplattorna innehåller dock inte spännarmering.

Reaktorinneslutningar kring PWR:er är avsevärt mycket större än de för BWR:er. Den invändiga volymen hos en PWR-inneslutning kan t.ex. vara upp till fyra gånger större än för motsvarande BWR. En ytterligare skillnad är att BWR-inneslutningarna är placerade i, och därmed omslutna, av en reaktorbyggnad, vilken t.ex. fungerar som ett klimatskydd. Notera dock att denna byggnad ej finns utritad i Figur 2-1. Det inre tryck som PWR- och BWR-inneslutningarna dimensionerats för att kunna motstå uppgår till ca 0,5 respektive 0,6 MPa. I Tabell 2-1 presenteras en övergripande sammanställning av genomsnittliga dimensioner samt andra viktiga konstruktionselement för svenska BWR- och PWR-inneslutningar.

Tabell 2-1 Genomsnittliga dimensioner och andra viktiga konstruktionselement för svenska reaktorinneslutningar. Från referens [3].

Beskrivning	BWR	PWR
Cylindervägg:		
Vägghöjd	28-34 m	52-59 m
Innerdiameter	18,6-25,5 m	35,4 m
Tjocklek yttervägg	0,84-1.2 m	0,76 m
Tjocklek innervägg	0.26-0.3 m	0,33 m
Tätplåt i vägg	Tätplåt placerad mellan inner- och yttervägg	Tätplåt placerad mellan inner- och yttervägg
Tjocklek tätplåt	5-10 mm	5-10 mm
Takkonstruktion	Ringbalk/ringplatta med tjocklek 1,5-4 m	Kupol med innerdiameter \approx 28 m och tjocklek 0,8-0,9 m
Spännarmering:		
Fabrikat och typ	BBRV 44-139 trådar \varnothing 6 mm	BBRV 139 trådar \varnothing 6 mm
	VSL 19 linor med 7 trådar. Linornas diameter är \varnothing 13 mm.	
Antal spännkablar	Cylindervägg: 88-140 vertikalt 120-156 horisontellt	Cylindervägg: 153 vertikalt 245 horisontellt Kupol: 138
Korrosionsskydd	Cementinjektering Injektering med fett Ventilation med torr luft	Injektering med fett
Spännkabelkraft	\approx 1,2-5 MN	\approx 4,5 MN

I följande delavschnitt beskrivs de olika huvuddelarna av en reaktorinneslutning i mer detalj vad gäller deras funktion, utformning, konstruktionernas designförutsättningar, tester och inspektioner som utförs, kända skador och skadeorsaker samt eventuella reparationsåtgärder som vidtagits vid de svenska kärnkraftverken. En betydande del av den data som presenteras är hämtad från en sammanställningsrapport författad av Roth et.al. [2].

2.2 SKALKONSTRUKTIONER

Inom ramen för denna rapport avser begreppet skalkonstruktioner i reaktorinneslutningar primärt själva tätplåten samt de konstruktionsdelar av betong längs med vilka tätplåten löper och är förankrad i. Notera att plåten antingen kan vara ingjuten eller exponerad för miljön som råder inuti inneslutningen, se Figur 2-1 och Figur 2-2. I rapporten avser vidare begreppet *inre betongvägg* en vägg i inneslutningens skal som befinner sig på insidan av tätplåten medan *yttre betongvägg* avser en motsvarande vägg men på utsidan av tätplåten.

2.2.1 Inre betongvägg

Allmänt

Den inre betongväggens primära funktion är att skydda den ingjutna tätplåten från invändiga missiler, t.ex. i form av flygande rör eller splitter vid en olycka. Väggen är däremot inte avsedd att bära last från det övertryck som kan uppstå vid ett haveri. Som framgår av Tabell 2-1 varierar tjockleken på de inre väggarna mellan 0,26–0,33 m i de svenska inneslutningarna. Väggen är enbart armerad med vanlig slakarmering.

Betong

De inre väggarna har gjutits med betongkvaliteterna K40 och K50, med ett vct som varierar mellan 0,41–0,53. Cementet som använts i en majoritet av inneslutningarna är ett långsamhärdande (LH) Limhamncement. Även standardcement har använts i några av inneslutningarna, se [2] för en mer komplett sammanställning. I inneslutningen vid Oskarshamn 3 har massivcement använts. Uppmätt tryckhållfasthet från prover tagna i den färdiga konstruktionen varierar mellan 40–99 MPa. Betongens ålder vid genomförd provning varierar i spannet 15–22 år.

Armering

Armering av typerna Ks40S, Ks40 och St44 har använts i de inre väggarna. Armeringsdiametern varierar mellan Ø10- Ø32 mm. Notera att ingen spännarmering finns i de inre väggarna.

Skador och reparationer

I samband med upptagning av ett hål för ånggeneratorbyte vid Ringhals 3 upptäcktes sprickbildning mellan den inre väggen och tätplåten [2]. En utredning visade att sprickorna hade uppkommit vid avlastning av spännkraften i den yttre väggen för att kunna ta upp hålet. Vid uppspänning av spännarmeringen torde dock huvuddelen av sprickorna, i alla fall teoretiskt, sluta sig igen. På grund av förekomsten av bestående sprickor blir dock spänningarna i den inre väggen större än tidigare. Det visades dock i en separat utredning att dessa tillskottsspänningar kan accepteras.

2.2.2 Yttre betongvägg

Allmänt

De yttre betongväggarnas primära uppgift är att bära det inre övertryck som kan uppstå i samband med haverier, t.ex. en LOCA-händelse (Loss of Coolant Accident). Väggarne är därmed utformade att klara stora invändiga tryck, typiskt i storleksordningen 0,5 MPa. En sammanställning av de invändiga designtrycken för samtliga svenska reaktorinneslutningar presenteras i Tabell 1 i referens [4]. För att klara trycken är väggarna konstruerade med spännarmering som ligger i både vertikal och horisontell riktning. Spännarmeringen är vidare utformade så att väggarna befinner sig i ett tryckt spänningstillstånd vid invändiga tryck lägre än designtrycket. Detta innebär att inga dragspänningar är tänkta att uppstå i varken

vertikal eller horisontell riktning så länge designtrycket inte överskrids. I väggarna finns också vanlig slakarmering. Utöver den lastbärande funktionen bidrar även väggarna till att skydda tätplåten mot yttre missiler och andra faror. Som framgår av Tabell 2-1 varierar tjockleken på de yttre väggarna mellan 0,76-1,2 m i de svenska inneslutningarna.

Betong

De yttre väggarna har gjutits med betongkvaliteterna K40, K45 och K50, med ett vct som varierar mellan 0,41–0,50. Cementet som använts i en majoritet av inneslutningarna är ett långsamhärdande (LH) Limhamncement. Även massivcement samt Degerhamn och Limhamn standardcement har använts i några av inneslutningarna, se [2] för en mer komplett sammanställning. Uppmätt medeltryckhållfasthet från betongprover tagna under produktion med en ålder på 91 dagar varierar mellan 55–70 MPa.

Armering

Vanlig slakarmering av typerna Ks40S och Ks40 har använts i de yttre väggarna. Armeringsdiametern varierar mellan Ø12- Ø40 mm.

I de svenska inneslutningarna har de två spännarmeringssystemen BBRV (Birkenmaier, Brandestini and Ros type V) och VSL (Vorspann System Losinger) använts [5]. En sammanställning av genomsnittliga siffror avseende spännarmeringen i de yttre väggarna finns i Tabell 2-1, medan en mer detaljerad sammanställning återfinns i [2]. Båda systemen förekommer utan och med vidhäftning genom att foderrören som spännarmeringen placerats i cementinjekterats. Den enda reaktor som för närvarande är i drift med cementinjekterad spännarmering är Oskarshamn 3. Övriga reaktorer i drift har spännarmering utan vidhäftning där foderrören antingen ventileras med torr luft eller har injekterats med ett specialfett.

Enligt USNRC Regulatory Guide 1.35 [6] ska spännarmering utan vidhäftning inspekteras vart 5:e år. I samband med varje inspektion genomförs en okulärbesiktning och spännkraften kontrolleras i 4 % av kablarna med hjälp av en domkraft. Vidare demonteras några av de testade kablarna och dras ur foderrören för inspektion av eventuell förekomst av korrosion eller andra materialdefekter. Om korrosionsskador upptäcks i en kabel byts den ut mot en ny. En noggrannare beskrivning av inspektionsförfarandet samt olika alternativ att inspektera injekterade spännkablar återfinns i [5]. Det förekommer dock vissa skillnader vad gäller intervall för avsyning och provning av spännkablar mellan anläggningarna.

Skador och reparationer

Vid en inspektion av inneslutningen vid Forsmark 3 år 1986 upptäcktes att en stor andel av trådarna i två horisontella spännkablar var avslitna [2] [4]. De skadade spännkablar byttes ut. Enligt utredning antas skadan vara orsakad av vatten från byggtiden [4]. Den observerade skadan medförde även ett förtätat kontrollprogram av spännkabelventilationen samt tätare spännkabelinspektioner.

Vid en inspektion år 2000 av reaktorinneslutningens yttre vid Ringhals 3 hittades skadad betong runt domringens underkant. Orsaken till skadan bedömdes vara

vittring, enligt [4] saknas ytterligare beskrivning av den nedbrytningsmekanism som föranlett skadan. Det bedömdes dock att det fanns risk för den skadade betongen att falla ner på förbipasserande, varför skadan åtgärdades. Information kring skadans storlek och eventuella inverkan på inneslutningen hållfasthet och beständighet, genom t.ex. ökad risk för armeringskorrosion, saknas.

2.2.3 Bottenplatta av betong

Allmänt

Utformningen av betongplattorna som utgör inneslutningarnas grundläggning skiljer sig mellan kraftverken och beror på de geologiska förhållandena på platsen. Bottenplattorna är inte spännarmerade utan innehåller endast vanlig slakarmering. Deras primära funktion är att fungera som ett lastöverförande konstruktionselement från komponenter och övriga konstruktionselement i inneslutningarna till underliggande mark. Dessutom fungerar bottenplattorna som upplag för tätplåten. Det bör noteras att tätplåten i några av inneslutningarna inte ligger helt inbäddad i bottenplattorna, medan den i andra är helt ingjuten.

Betong

Bottenplattorna har gjutits med betongkvaliteterna K30, K35, K40 och K50, med ett vct som varierar mellan 0,42–0,60. Cementet som använts i en majoritet av bottenplattorna är ett långsamhärdande (LH) Limhamncement. Även massivcement, Degerhamn standardcement och LH Gullhögen har använts i några av inneslutningarna, se [2] för en mer komplett sammanställning. Uppmätt medeltryckhållfasthet från betongprover tagna under produktion med en ålder på 91 dagar varierar mellan 42-78 MPa.

Armering

Armering av kvaliteterna Ks40S, Ks40 och Ss26 har använts i bottenplattorna. Armeringsdiametern varierar mellan Ø10- Ø32 mm. Notera att ingen spännarmering finns bottenplattorna.

Skador och reparationer

Inga betongskador av relevans inom ramen för denna rapport har rapporterats i inneslutningarnas bottenplattor.

2.2.4 Tak

Allmänt

Den principiella utformningen av reaktorinneslutningarnas tak skiljer sig mellan BWR:erna och PWR:erna. I svenska BWR:er består inneslutningarnas tak generellt av en slak- och spännarmerad ringformad platta. Ingen spännarmering finns dock i taket vid Ringhals 1. I vissa av inneslutningarna finns även en ovanliggande betongkon som är sammangjuten med ringplattan. Tätplåten är antingen fritt exponerad eller ingjuten i takkonstruktionen. De svenska PWR:erna vid Ringhals har istället ett kupolformat tak som försetts med både slakarmering och

spännarmering av samma typ som används i cylinderväggarna. Tätplåten är inte ingjuten i betongen utan fritt exponerad mot omgivande miljö i inneslutningen.

Betong

Taken i inneslutningarna har gjutits med betongkvaliteterna K35, K40, K45 och K50, med ett vct som varierar mellan 0,41–0,54. Cementet som använts i en majoritet av taken är ett LH-cement men även massivcement och standardcement från Limhamn har använts i några av taken, se [2] för en mer komplett sammanställning. Uppmätt medeltryckhållfasthet från betongprover tagna under produktion och med en ålder på 91 dagar varierar mellan 53–75 MPa.

Armering

Vanlig slakarmering av typerna Ks40S och Ks40 har använts i inneslutningarnas tak. Armeringsdiametern varierar mellan Ø12- Ø32 mm, där de grövre dimensionerna utgör den större andelen av inlagd armering. Samma typ av spännarmeringssystem (BBRV och VSL) som installerats i ytterväggarna används även i inneslutningarnas tak. En mer komplett sammanställning finns i [2].

Skador och reparationer

Inga betongskador av relevans inom ramen för denna rapport har rapporterats i inneslutningarnas tak.

2.2.5 Tätplåt

Allmänt

Tätplåten utgörs i båda reaktortyperna av en stålplåt som till större delen ligger inbäddad i betong, men är också delvis exponerad mot omgivande miljö. Längs med de cylindriska väggarna ligger tätplåten ingjuten mellan den inre och yttre inneslutningsväggen, och har en tjocklek som varierar mellan 5–10 mm. Den sammanhängande tätplåten har konstruerats genom att svetsa samman mindre segment av stålplåtar. Vid produktion av tätplåten svetsades även U- eller L-formade stålprofiler över svetsarna i tätplåten. Detta bildar kanaler som användes för täthetsprovning av svetsarnas efter färdigställande av tätplåten. Dessa har dock inte använts för regelbundna täthetsprovningar efter driftsättning av reaktorer. Tätplåtarna är generellt förankrade i de yttre inneslutningsväggarna.

I BWR-reaktorer utnyttjas kondensationsbassängen bottenplåt av rostfritt stål som tätplåt. Notera att bottenplåten under centraldelen vid vissa anläggningar utgörs av kolstål täckt med betong. Denna är i sin tur ansluten mot tätplåten av vanligt kolstål i den cylindriska inneslutningsväggen. I PWR:er finns ingen kondensationsbassäng och där har man istället monterat stålplåtar med en tjocklek på 5–8 mm som kälssvetsats mot ingjutna vinkelstålsprofiler i bottenplattan. Över dessa svetsfogar svetsades även remsor av tunnare stålplåt, vilket även bildade kanaler som användes för täthetsprovning. Vid Ringhals 3 och 4 är bottenplåtarna helt ingjutna, medan en annan lösning med Leca-kulor och skyddsbetong använts vid Ringhals 2.

I taken vid de svenska BWR-reaktorerna är tätplåten delvis exponerad mot omgivande miljö. I de kupolformade taken i PWR-inneslutningarna är däremot tätplåten helt exponerad mot den omgivande miljön.

För att testa inneslutningarnas täthet genomförs regelbundet trycktester. Dessa genomförs normalt med en inre trycknivå mellan 200–400 kPa beroende på reaktortyp och eventuella förändringar såsom effekthöjningar [2]. Trycktesterna sker regelbundet i enlighet med riktlinjerna och principerna för typ A prov (Option A) i [7], vilket innebär att de genomförs ca var tredje år (3 tester per 10 års-cykel). Läckaget i inneslutningarna bestäms genom att mäta tryckförlusten på insidan efter att avsedd trycknivå uppnåtts.

Material

De stålqualiteter som använts för tätplåten i de svenska inneslutningarna finns översiktligt sammanställda för bottenplattor, cylinderväggar och tak i Tabell 2-2. Datan är hämtad från [2].

Tabell 2-2 Översiktlig sammanställning av använda stålqualiteter och tjockleksintervall för tätplåten i de svenska inneslutningarna. Se referens [2] för en mer komplett sammanställning.

Del av inneslutning	Använda stålqualiteter	Tjockleksintervall
Bottenplatta	OX 520C, SS2343, SS2103-01, SS2102, SIS 2333, SIS 2333-2, SS1432-01	1,5-8 mm
Cylindervägg	SS2343, SS2102, SS2103-01, SS2102-01, SS141312	4-10 mm
Tak	Tryckkärilstål, SS2103-01, SS2102, SS141312, SS1432-01	4-10 mm

Skador och reparationer

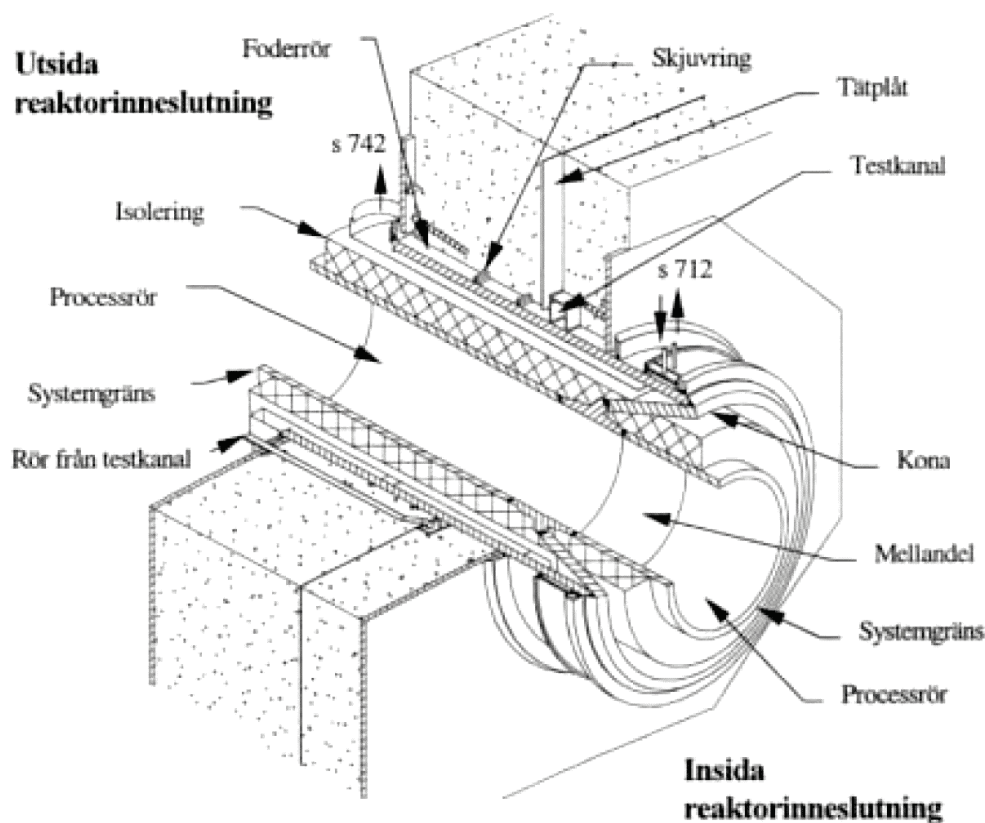
I de svenska inneslutningarna finns flera fall där man hittat korroderade områden på tätplåten. Orsaken till dessa korrosionsskador har dock varit bristfälligt arbetsutförande, där hålrum eller andra byggnadstekniska defekter uppstått vilket i sin tur resulterat i korrosion av tätplåten. Till exempel upptäcktes en korrosionsskada vid Barsebäck 2 år 1993 i samband med en återkommande täthetsprovning. I det aktuella fallet hade skadan uppkommit på grund av ett vattenfyllt hålrum från byggtiden i anslutning till en av inneslutningens genomföringar. Vidare har korrosionsskador på tätplåten påträffats i området kring konen både vid Forsmark och Ringhals. Fler observerade avvikelser relaterat till tätplåten finns beskrivna i [2] och [4]. Studier avseende potentiella korrosionsrisker i ingjutna tätplåtar finns presenterade i [8], [9] och [10].

2.3 GENOMFÖRINGAR

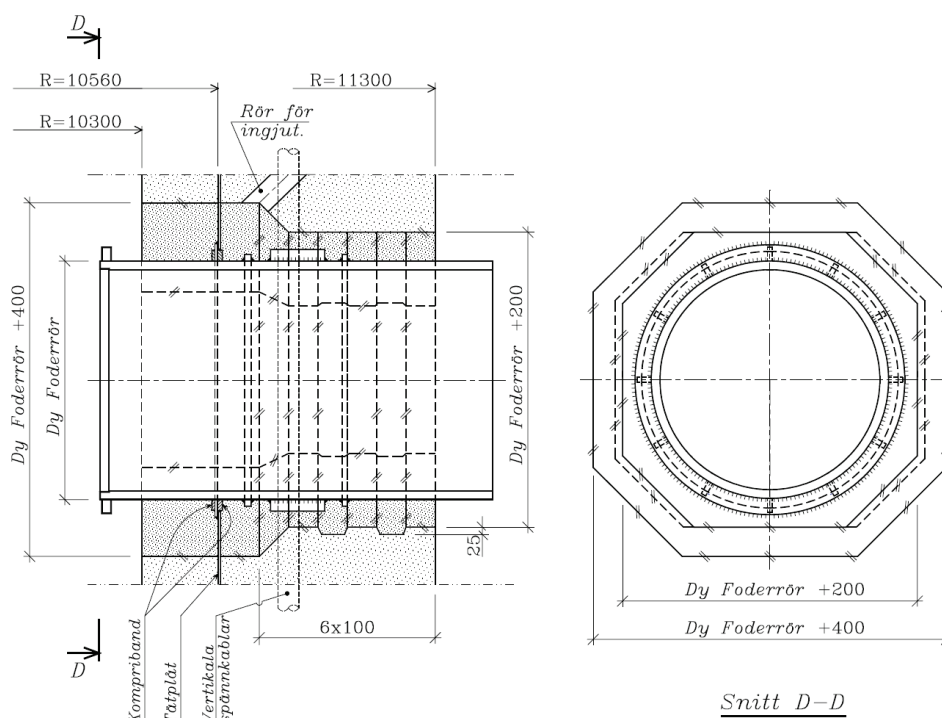
I inneslutningarnas skalkonstruktioner finns flertalet installerade genomföringar för t.ex. olika typer av processrör, elkablar, slussar för personal och utrustning, etc. Detaljutformningen av genomföringarna är inte helt identiska vid samtliga svenska inneslutningar och självklart inte heller mellan de olika typerna av genomföringar. De övergripande principerna för hur genomföringarna utformats

är dock förhållandevis lika, åtminstone för processrör och personslussar. En mer utförlig beskrivning av vanliga genomföringar i svenska inneslutningar återfinns i [11].

Genomföringar för rör har vanligen åstadkommit genom att ursparingar placerats i formen vid glidformsgjutningen. Efter genomförd gjutning har sedan hål tagits upp i tätplåten varpå foderrör med flänsar svetsats gas- och trycktätt mot tätplåten. Dessa rör genomföringar har också försetts med olika typer av skjuvförbindare mot omkringliggande betong, t.ex. genom påsvetsade fyrkantsstål. I anslutningen mot tätplåten har även testkanaler för täthetsprovning av genomföringarna installerats. Ursparningarna i betongväggen kompletterades med armering och gjöts igen med betong, alternativt injekterades. Notera även att foderrören och dess infästningspunkter ofta är utformade med en överstyrka i jämförelse med själva rören. Genomföringar för personal och utrustning är principiellt utformade på samma sätt vad gäller ingjutning och tätning mot omkringliggande konstruktionselement. Det bör även noteras att förhöjda temperaturer kan förväntas uppkomma i betongen kring genomföringar vid vissa typer av processrör. Vanligen håller sig dock de lokala temperaturerna under 100 °C i inneslutningarnas skalkonstruktion vid normaldrift [4]. Två principskisser av processrörsgenomföringar i inneslutningsväggarna på Ringhals 1 och Barsebäck 1 visas i Figur 2-3 respektive Figur 2-4.



Figur 2-3 Principskiss av en rör genomföring i inneslutningsväggen vid Ringhals 1. Illustration från [4].



Figur 2-4 Principskiss av foderröret och återgjutningen/injekteringen med betong vid en rör genomföring i inneslutningsväggen på Barsebäck 1. Illustration från [2].

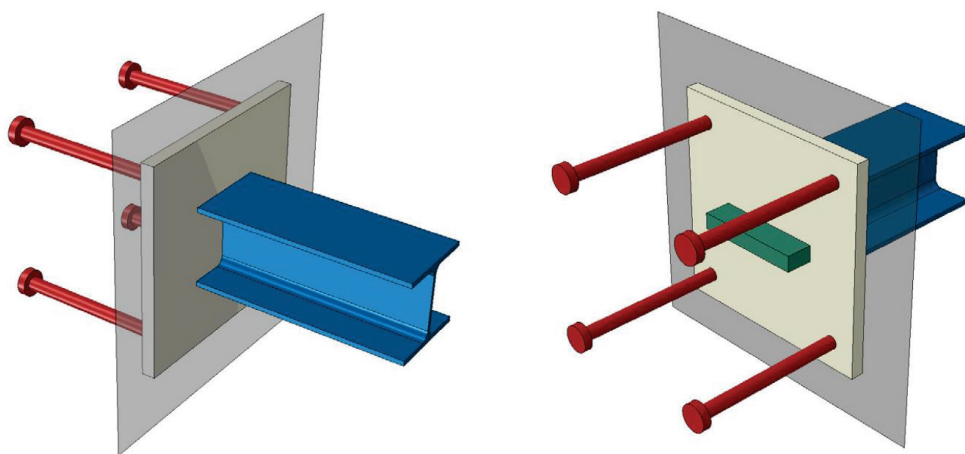
Lokal täthetsprovning av genomföringar och slussar sker regelbundet i enlighet med riktlinjerna och principerna för typ B prov (option B) i [7].

Skador reparationer

De skador som rapporterats i anslutning till genomföringar vid svenska inneslutningar är primärt kopplade till Barsebäck 2, där korrosionsskadan i tätplåten som beskrivs i avsnitt 2.2.5 är den allvarligaste. I samband med att denna skada upptäcktes kontrollerades samtliga 77 genomföringar vid Barsebäck 2, där det i 14 fall kunde konstateras håligheter vid tätplåten. På fem ställen fanns korrosionsangrepp med ett djup större än 5 mm och på 36 ställen noterades ytliga angrepp med ett djup mindre än 1 mm. Vid samtliga skadade områden bedömdes orsaken vara bristfälligt arbetsutförande vid återgjutning av ursparningarna för genomföringarna [8]. Vidare beskrivs i [8] att övriga svenska kraftverk anser att arbetsutförandet vid dessa varit bättre då man bl.a. har placerat ett avluftningsrör i ursparningarnas högsta punkt. Korrosionsangreppen vid Barsebäck 2 initierades redan vid byggnationen och inte som en följd av vatten som i ett senare skede ansamlats p.g.a. läckage. Eftersom inga avvikelser i dessa områden identifierats vid de återkommande täthetsprovningarna vid de övriga kraftverken är det sannolikt att liknande utförandefel inte skett vid byggnationen av dessa. I utredningen som presenteras i [8] konstateras dock att genomföringar bör betraktas som en svag punkt i inneslutningarna vad gäller risk för korrosion i tätplåten. Även i [4] pekas genomföringar ut som en potentiellt skadekänslig del i inneslutningarnas skalkonstruktion.

2.4 INFÄSTNINGAR

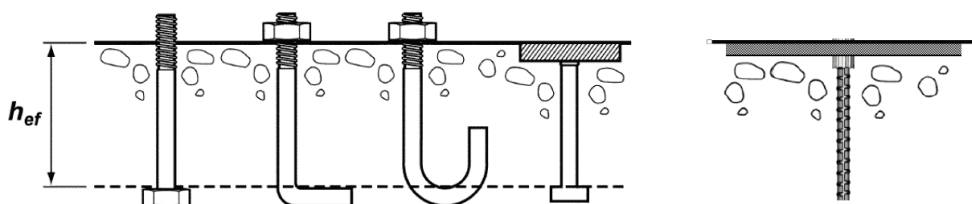
Förankringar i inneslutningarnas betongkonstruktioner förekommer i stort antal i samtliga svenska kärnkraftsanläggningar. Förankringarna fungerar som stöd för viktiga komponenter och system i anläggningarna, t.ex. rörsystem och lyftanordningar. Vidare finns ett stort antal olika typer av förankringssystem, men de kan generellt delas in i två huvudtyper: ingjutna och eftermonterade. En schematisk illustration av en typisk ingjuten förankring visas i Figur 2-5.



Figur 2-5 Illustration av typisk ingjuten förankring använd i inneslutningar som stöd för olika system och komponenter. Illustration från [12].

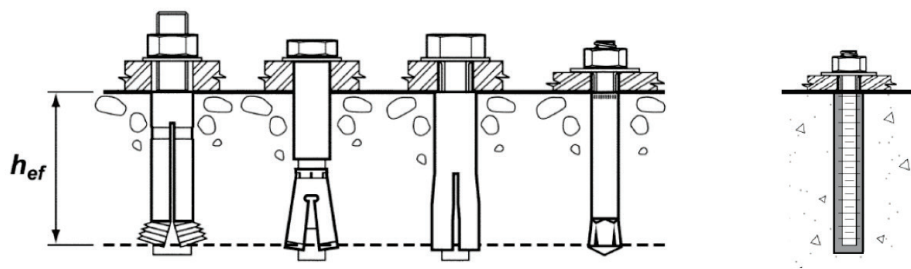
Den grå ytan i figuren visar betongkonstruktionens yta medan den beige delen utgör en förankringsplatta på vilken den blåa balken, som är själva upplaget för systemet eller komponenten, är monterad. De rödmarkerade bultarna utgör infästningen av förankringsplattan och är ingjutna i betongen. I vissa typer av förankringar kompletteras dessutom förankringsplattan med en skjuvklack för att öka förankringens skjuvkraftskapacitet, se den grönmarkerade delen i figuren.

De ingjutna infästningarna i betongen förekommer också av olika typ, där svetsbultar samt ingjutna skruvar eller stänger med ändkrokar är vanligt förekommande. Dessutom används ingjutna kamstänger där dragkraftskapaciteten erhålls via interaktionen med omkringliggande betong längs med stängerna. Några olika typer av ingjutna infästningselement finns illustrerade i Figur 2-6.



Figur 2-6 Exempel på olika typer av ingjutna infästningselement som används vid svenska kärnkraftverk. Illustration från [12].

Vid anläggningsändringar är det ibland nödvändigt att montera nya förankringsplattor. De eftermonterade infästningarna i betong utgörs vanligen av olika typer av expanderankare. Det bör noteras att kemiska ankare inte används i reaktorinneslutningar i Sverige och Finland. Några olika typer av eftermonterade infästningselement visas i Figur 2-7.



Figur 2-7 Exempel på olika typer av eftermonterade infästningselement, till vänster olika expanderankare och till höger ett kemiskt ankare. Notera dock att kemiska ankare inte förekommer i inneslutningar i Sverige och Finland. Illustration från [12].

Som beskrevs ovan används förankringarna som stöd för olika typer av lyftanordningar, rörsystem och säkerhetssystem, där kraven på säkerhet är höga. Förankringarna är dimensionerade för laster som uppstår både vid normaldrift och vid olika olycksscenarier. De senare avser främst olika typer av rörbrott men inkluderar också laster från t.ex. jordbävning. Den nu gällande europiska normen för dimensionering av förankringar i betong är SS-EN 1992-4 [13] från 2018, där ett flertal olika brottmoder skall beaktas. De svenska kärnkraftverken har dock normalt även egna riktlinjer och metodbeskrivningar kring hur förankringar i betong ska dimensioneras. I det underlag som erhållits för denna studie finns inga signifikanta betongskador kopplade till ingjutna eller eftermonterade infästningar rapporterade.

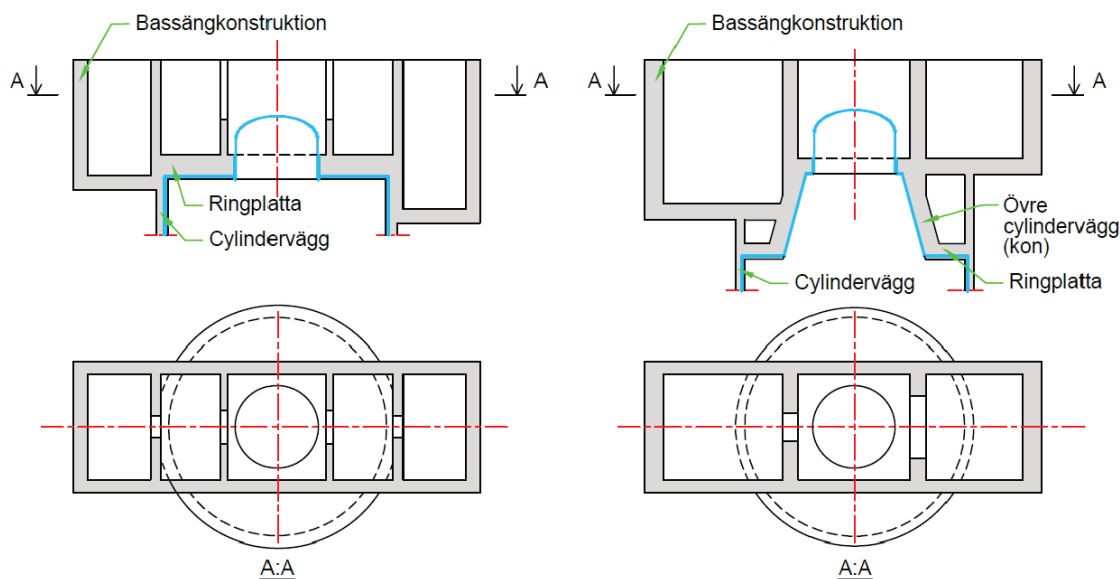
2.5 BELÄGGNINGAR

I svenska BWR:er är betongytorna i både övre och nedre drywell målade med en epoxyfärg, vilket fungerar som ett skydd mot fukt men även som en diffusionsspärr mot t.ex. syreinträngning i betongen [8]. I wetwell är inte betongytorna målade, dock är vissa ytor som utsätts för vattensprinkling förseglade med andra metoder. I den nedre delen av wetwell i BWR:er finns däremot en inklädnad med rostfri stålplåt på både väggar och i botten som fungerar som ett urlakningsskydd. Som nämndes i avsnitt 2.2.5 utgör den rostfria bottenplåten även en del av inneslutningens tätplåt då den är svetsad mot den ingjutna tätplåten av kolstål i inneslutningens cylindervägg [10]. I PWR:er är hela inneslutningens insida målade.

2.6 BASSÄNGER

I och omkring inneslutningarna finns ett antal olika typer av bassänger innehållandes vatten. Utformningen och typen av bassänger som finns i eller i direkt anslutning till inneslutningarna skiljer sig emellertid mellan BWR:er och PWR:er.

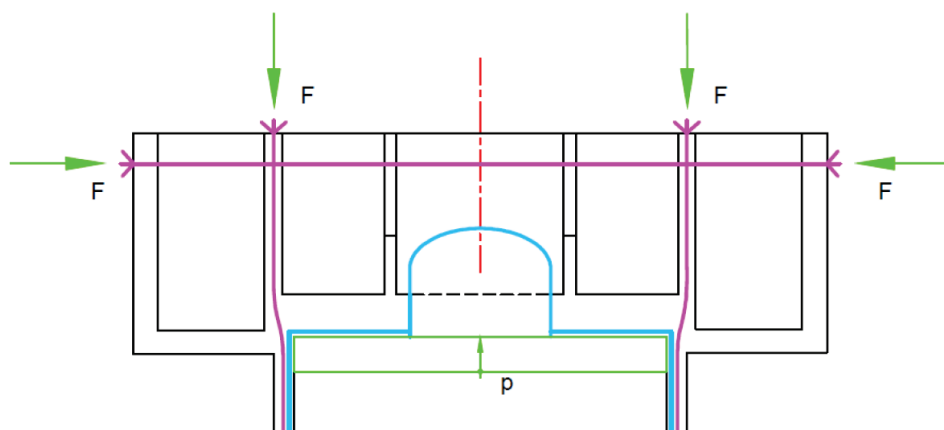
De bassängkonstruktioner som ligger ovanpå inneslutningarna i BWR:er ingår generellt i inneslutningarnas takkonstruktion som en del av det bärande systemet, där de längsgående bassängväggarna nyttjas som höga balkar. Dessa väggar är kraftigt armerade horisontellt i ovankant samt förankrade till cylinderväggen för att kunna bära last från inre höga övertryck i inneslutningen [11]. Själva takkonstruktionerna i de svenska BWR:erna kan delas in i två olika principiella konstruktionstyper. I den ena finns endast en horisontellt orienterad ringplatta medan den andra består av en ringplatta tillsammans med en övre cylindervägg (också benämnd kon), se även avsnitt 2.2.4. De två principiella utformningarna av de ovanpåliggande bassängerna och den undre takkonstruktionen illustreras schematiskt i Figur 2-8.



Figur 2-8 Illustration av de två principiella typerna av takkonstruktion med tillhörande bassänger som används vid svenska BWR:er. Till vänster alternativet med endast en ringplatta och till höger alternativet med ringplatta samt övre cylindervägg (kon). Figur från [11].

Utöver slakarmeringen är bassängkonstruktionerna i vissa inneslutningar även försedda med horisontell och vertikal spännarmering. Den vertikala spännarmeringen består dels av kablar från cylinderväggen som dras upp genom bassängväggarna och förankras i bassängernas ovankant. Förutom denna vertikala spännarmering finns också i vissa fall ytterligare vertikala spännkablar i långväggarna. Dessa är typiskt koncentrerade till långväggarnas upplagspunkter mot ringplattan och förankras i underkant av bränslebassängerna och överkant av långväggarna. De vertikala spännkablauppgiften är att utgöra upphängnings-

armering och vid inre övertryck föra ner de uppåtriktade upplagskrafter som uppkommer till cylinderväggen. Den horisontella spännarmeringen utgörs av kablar som löper längs med bassängernas långväggar. En illustration av spännkablar i långväggarna visas i Figur 2-9.

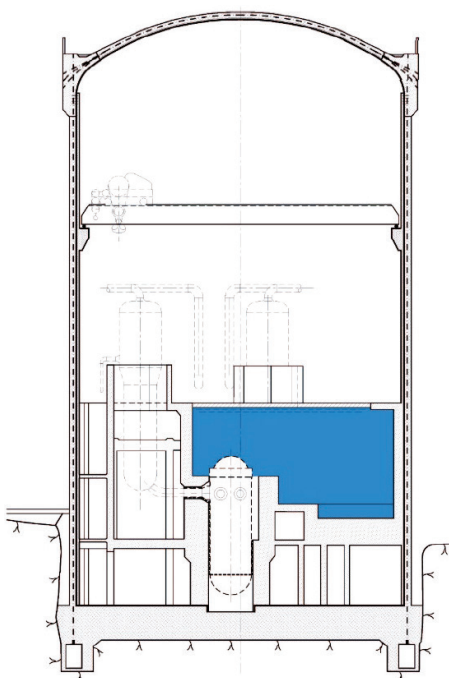


Figur 2-9 Spännkablar i bassängernas långväggar vid BWR:er, F betecknar spännkraft och p inre övertryck. Figur från [11].

Som illustreras i Figur 2-8 och Figur 2-9 finns utöver de längsgående väggarna dessutom ett antal tvärgående väggar i bassängkonstruktionerna. Antalet tvärväggar utöver de två på kortändorna skiljer mellan de svenska anläggningarna, men är två eller fyra till antalet. I vissa av de tvärgående väggarna finns även plats för sättluckor för att kunna avskilja eller öppna upp mellan delbassängerna. De olika delbassängerna utgörs typiskt av bränslebassänger, bränsleflaskbassänger, hanteringsbassänger samt interndelsbassänger (centrumbassänger ovan reaktortanken). Bränslebassängerna är alltid fyllda med vatten, och i de flesta anläggningarna är även hanterings- och interndelsbassängerna fyllda med vatten under drift. Vid Oskarshamn töms endast hanteringsbassängerna under revision, medan Forsmark endast tömmer interndelsbassängerna i samband med avlockning av reaktortanken. Då Ringhals 1 fortfarande var i drift var däremot både interndels- och hanteringsbassängerna tömda under drift [8]. Som tätskikt på bassängernas insida finns vid samtliga svenska anläggningar en inklädnad med rostfri plåt.

Förutom bassängerna ovanpå inneslutningarna utgör även den nedre delen av Wet well BWR-reaktorernas kondensationsbassäng. Som redan nämnts i avsnitt 2.5 är både väggar och botten i kondensationsbassängerna också inklädda med rostfri plåt.

På insidan av inneslutningarna i PWR:er finns enbart en reaktorbassäng/bränslebytesbassäng, se Figur 2-10. Denna är placerad ovanför reaktortanken och fylls bara med vatten under revision i samband med bränslebyte. Insidan av bassängerna är inklädd med rostfri plåt. Inga bränslebassänger finns i inneslutningen utan är istället placerade i en intilliggande bränslebyggnad.



Figur 2-10 Blåmarkerat område visar reaktorbasängen/bränslebytesbasängen i en PWR-inneslutning. Figur från [9].

Skador och reparationer

I samband med en revisionsavställning av Forsmark 1 år 1997 upptäcktes det vid provtryckning av inneslutningen att både inre och yttre toroid vid taket var otät. På den inre hade ett lokalt hål uppstått medan den yttre var kraftigt korroderad. Orsaken till korrosionen konstaterades vara fuktig isolering som varit i kontakt med toroiden. I samband med ingjutning av densamma hade en plastfilm placerats invid isoleringen för att skydda mot fukt. Dock var dess placering sådan att inläckande vatten från de ovanliggande bassängerna samlades upp i en ficka, vilket i sin tur orsakade korrosionsskadan [4].

Vid Oskarshamn 3 upptäcktes år 2002 ett 10×3 m stort område ovanför plåtinklädnaden med lätt yttlig betongerosion på insidan av en av bassängerna. Erosionen hade orsakats av kontinuerlig vattensprinkling från en angränsande sprinklingsdysa. Det eroderade området återställdes genom spackling och orsaken åtgärdades genom att förhindra fortsatt vattensprinkling av betongytan.

Vidare beskrivs i [8] att det är känt att svetsdefekter förekommer på de rostfria plåtinklädningarna i vissa bränsle-, hanterings- och kondensationsbassänger. Enligt författarna av innan nämnda rapport förekommer eller har det förekommit läckage från bassänger vid följande reaktorer: Ringhals 1, Forsmark 1-3 och Oskarshamn 1.

2.7 KÄRNA

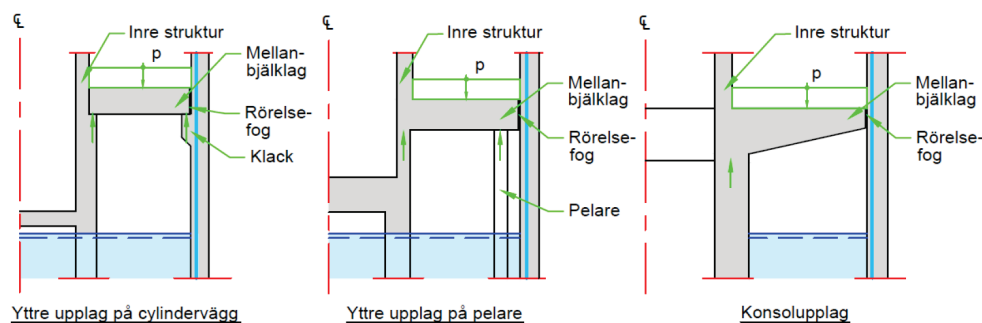
Med reaktorinneslutningars kärna avses i denna rapport de olika konstruktioner som finns på insidan av inneslutningarna, d.v.s. innanför skalkonstruktionerna enligt avsnitt 2.2. Notera att dessa konstruktioner vid vissa anläggningar istället

benämns den inre byggnadsstommen. Den generella utformningen av kärnan skiljer mellan BWR:er och PWR:er, se områdena innanför de rödstreckade linjerna i Figur 2-1 respektive Figur 2-2. Kärnans betongkonstruktioner har ett antal säkerhetsrelaterade funktioner som enligt [11] generellt kan indelas i följande huvudfunktioner:

- Uppbärning av viktiga system: De inre strukturerna har till uppgift att fungera som upplag för reaktortanken, övriga delar av primärsystemet, olika typer av säkerhetssystem samt andra system och komponenter. Stora krav ställs därför på konstruktionernas bärförmåga vid både inre och yttre händelser.
- Avskiljning och skydd av system: De inre konstruktionerna ska skydda och avskilja primärsystemet och övriga system så att de inte kan slås ut samtidigt vid en händelse.
- Upprätthållande av gas- och vattentäthet: Vissa konstruktioner i kärnan behöver utföras gastäta eftersom trycknivåerna i ett område av inneslutningen kan ha skadlig inverkan på strukturer, redundanta säkerhetssystem eller personal i angränsande utrymmen. Ett exempel där gastäthetskrav finns i BWR:er är mellan drywell och wetwell för att säkerställa trycknedtagningsfunktionen i denna reaktortyp. Vidare finns vattentäthetskrav för de olika typer av vattenfyllda bassänger som är belägna kärnan.
- Strålskydd: Strukturerna i kärnan utgör strålskydd mot flera av de strålkällor som finns inuti inneslutningarna. Skyddet åstadkoms generellt genom att väggar och bjälklag konstrueras med tillräcklig tjocklek mellan utrymmen där strålskydd är nödvändigt. Exempel på strålskyddande konstruktioner är de som finns kring reaktortankarna, se Figur 2-1 och Figur 2-2. I BWR:er kallas denna konstruktionsdel för den biologiska skärmen.
- Förhindra spridning av brand: Kärnans betongkonstruktioner i form av avskiljande väggar och bjälklag utgör den huvudsakliga brandcellsindelningen på inneslutningarnas insida.

I svenska BWR:er består de inre konstruktionerna i kärnan huvudsakligen av en övre del i form av en cylindervägg (även kallad biologiska skärmen), ett mellanbjälklag och en nedre cylindervägg, se även Figur 2-1. Dessa inre betongkonstruktioner är generellt slakarmerade. Den övre cylinderväggen omsluter reaktorschaktet, i vilket reaktortanken är belägen. Själva reaktortanken vilar på upplag som är förankrade i cylinderväggens ovankant. Insidan av väggen är typiskt inklädd med plåt. Mellanbjälklaget utgör en horisontell avskiljning mellan drywell (primärutrymmet) och wetwell (sekundärutrymmet). Dess primära strukturella funktion är att bära en nedåtriktad last av det övertryck som bildas i primärutrymmet vid ett eventuellt rörbrott. Nedblåsningrören till sekundärutrymmet är infästa i mellanbjälklaget, och laster på rören belastar därmed även mellanbjälklaget. Mellanbjälklagen är mot centrumsidan upplagda mot den övre cylinderväggen, medan olika konstruktionslösningar har använts för det yttre upplaget mot inneslutningsväggen. Enligt [11] har tre olika typlösningar använts i Sverige: ett vertikalt stöd med horisontellt glidlager på inneslutningsväggens insida, vertikalt stöd på pelare samt konsolupplag. I det senare utformningsalternativet finns således inget yttre vertikalt upplag vid inneslutningsväggen. Mellanbjälklagen är i övrigt strukturellt separerade från

inneslutningsväggarna för att tillåta att väggarna kan deformera fritt. Rörelsefogen är emellertid försedd med en tätning för att säkerställa gastäthet mellan primär- och sekundärutrymmet, denna är dock utformad på olika sätt vid de svenska anläggningarna. Mellanbjälklagen täthetsprovas ca vart 3:e år (3 gånger på 10 år) i samband med integral täthetsprovning av reaktorinneslutningen, se även avsnitt 2.2.5. En schematisk illustration av de tre konstruktionslösningarna för mellanbjälklagen visas i Figur 2-11.



Figur 2-11 Schematisk illustration av använda konstruktionslösningar för upplag av mellanbjälklaget. Illustration från [11].

Den nedre cylinderväggen avgränsar det nedre primärutrymmet från sekundärutrymmet. Väggen är i sin tur upplagd mot inneslutningens bottenkonstruktion, anslutnings utformning skiljer sig dock mellan de svenska anläggningarna. Den nedre delen av sekundärutrymmet utgör kondensationsbassängen varför utsidan av cylinderväggen och andra eventuella stödkonstruktioner i kontakt med vattnet är inklädda med rostfri stålplåt som ett urlakningsskydd för betongen, se även avsnitt 2.5.

I PWR:er är betongkonstruktionerna i kärnan huvudsakligen uppbyggda kring den primära utrustning bestående av reaktortank, ånggeneratorer, huvudcirkulationspumpar, tryckhållningskärl, etc. med de huvudsakliga funktioner som listats ovan. Ovanför reaktortanken, som en del av kärnan, finns dessutom en reaktor-/bränslebytesbassäng, se vidare beskrivning i avsnitt 2.6. Betongkonstruktionerna i kärnan är generellt slakarmerade och ligger upplagd på inneslutningens bottenplatta. I övrigt är kärnan och reaktorinneslutningen strukturellt separerade, vilket innebär att rörelser kan ske relativt oförhindrat.

Skador och reparationer

Inga betongskador av relevans inom ramen för denna rapport har rapporterats vid svenska anläggningar i de betongkonstruktioner som utgör reaktorinneslutningarnas kärnor. I [4] beskrivs dock att relativt höga lokala betongtemperaturer (upp till ca 170 °C) kan förekomma under normaldrift kring vissa genomföringar i biologiska skärmen vid BWR:er.

3 Nödvändiga materialegenskaper och parametrar vid dimensionering och analys

Det regelverk som ytterst styr hur konstruktioner i kärntekniska anläggningar ska dimensioneras är Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter. Strålsäkerhetsmyndigheten har även finansierat framtagandet av en vägledning DNB [14] (Dimensionering av Nukleära Byggnadskonstruktioner) som kompletterar Boverkets föreskrifter och Eurokoderna (se t.ex. [15] och [13]) för dimensionering av kärntekniska anläggningar. Det skall dock understrykas att det inte finns något krav att följa de vägledningar som presenteras i DNB såvida anläggningens tillståndshavare ej explicit anger detta i sin säkerhetsredovisning (SAR). Det är respektive anläggnings säkerhetsredovisning (SAR) tillsammans med framtagna konstruktionsförutsättningar som reglerar vilka specifika regler, normer och vägledningar som praktiskt ska tillämpas vid dimensionering och analys. För att kunna utföra dimensioneringsberäkningar samt andra typer av nödvändiga analyser och kontrollberäkningar av de olika betongkonstruktioner som finns i reaktorinneslutningar krävs dock tillgång till ett stort antal materialegenskaper och olika parametrar. För själva betongen behövs vetskap om bl.a. följande:

- **Tryckhållfasthet:** Nödvändig i alla typer av hållfasthetsberäkningar av betongkonstruktioner. Både statiska och dynamiska hållfasthetsvärden är relevant. De senare värdena används primärt vid analys av stöt- och impulslaster då töjningshastigheten är hög.
- **Draghållfasthet:** Viktig för konstruktionselementens tvärkraftskapacitet, minimiarmering, sprickinitiering, spricktillväxt och sprickvidd samt dimensionering av oarmerade betongelement och olika infästningar.
- **Elasticitetsmodul:** Nödvändig vid dimensionering av statiskt obestämda konstruktioner och beräkning av deformationer. Behövs t.ex. i modeller för dimensionering av reaktorinneslutningars yttre betongvägg, en viktig parameter för bedömning av spännarmerade konstruktioners långtidsdeformationer.
- **Brottenergi:** Nödvändig i beräkningar där betongens uppsprickning beaktas. Används primärt i icke-linjära numeriska analyser.
- **Densitet:** Nödvändigt för beräkning av betongkonstruktionernas egentyngd.
- **Uttorkningskrympning:** Betongens uttorkningskrympning är väsentlig för bedömning av krympsprickor samt konstruktioners långtidsdeformationer, t.ex. i reaktorinneslutningarnas spännarmerade skalkonstruktioner.
- **Krypning:** Betongens krypegenskaper är väsentliga i modeller för bedömning av konstruktioners långtidsdeformationer. I reaktorinneslutningar är det framförallt i modeller för de spännarmerade skalkonstruktionerna som krypningen är viktig att beakta eftersom den resulterar i minskande spännkraft i spännarmeringen.
- **Sorptionsisotermer:** Betongens sorptionsisotermer är nödvändiga för att kunna utföra analyser av fuktillståndet i konstruktionerna. Detta är viktigt eftersom det påverkar konstruktionernas uttorkningskrympning samt processer såsom karbonatisering och risken för korrosion.

- Porositet och porstorleksfördelningar: Betongens porositet återspeglar betongens kvalitet och tillstånd, samt är en viktig parameter för analys av konstruktionernas fuktillstånd och annan masstransport i dessa. Porsystemet styr i stor utsträckning materialets permeabilitet och diffusivitet för olika gaser.

För dimensioneringsberäkningar och andra typer av analyser är det också viktigt att kartlägga hur betongens materialegenskaper och parametrar påverkas över tid till följd av den omgivande miljö som råder i inneslutningarna. Detta är t.ex. betydelsefullt vid livlängdsbedömningar av nya konstruktioner eller i samband med beräkningar och analyser som görs vid anläggningsändringar eller livslängsförlängande åtgärder i befintliga anläggningar. Viktiga aspekter att ha kännedom om i detta hänseende inkluderar:

- Strålningsbeständighet: I vissa områden i inneslutningarna utsätts betongen för hög strålning, t.ex. i strålskärmar vid reaktortankar. Det är därför viktigt att kartlägga om och i vilken utsträckning betongens olika egenskaper alterneras av strålningen.
- Temperaturbeständighet: Viktigt att undersöka om och hur förhöjda temperaturer eventuellt påverkat och förändrat betongens egenskaper.
- Korrosionsbenägenhet: Viktigt att kartlägga om processer i betong som leder till en ökad korrosionsrisk i ingjutet stål påverkas av miljön.

Dimensionering och analys av betongkonstruktionerna som utgör inneslutningarnas skal är i stor utsträckning beroende av spännarmeringens egenskaper och tillstånd. Spännstålets materialegenskaper är förhållandevis väldefinierade utifrån den stålqualität som använts, men det är ändå av intresse att prova de spännkablar som suttit monterade i inneslutningarna, särskilt i inneslutningarna där de varit ingjutna. En ytterligare viktig aspekt är spännkraften i kablarna, vilken över tid avtar p.g.a. stålets relaxation samt betongens krympning och krypning. I tillägg är också förekomst av eventuell korrosion och spännkablarnas vidhäftning vid cementinjekterade foderrör viktiga aspekter.

Det är även centralt att känna till slakarmeringens materialegenskaper och tillstånd vid genomförande av dimensioneringsberäkningar och andra typer av analyser. Liksom för spännstålet är armeringens materialegenskaper normalt förhållandevis väldefinierade utifrån den stålqualität som använts. Ytterligare viktiga aspekter inkluderar: slakarmeringens vidhäftning mot betongen samt risk eller förekomst av korrosion.

4 Tester och kontroll av RI som helhet

4.1 ALLMÄNT

Under revision och drift genomförs olika tester och kontroller av reaktorinneslutningar (RI). Trycktester genomförs för att bestämma luftläckagemängden genom RI. Genom kompletterande undersökningar under trycktesterna kan man också upptäcka de ställen där läckaget sker. Trycktest genomförs med jämna mellanrum vid samtliga kärnkraftverk (KKV). Olika KKV utnyttjar även tryckteststillfället för att bestämma konstruktionens respons vid inre höga tryck genom bl.a. mätning av töjningar och deformationer hos RI:s olika konstruktionselement samt gastryck i material och mellan olika materialskikt. Följande förslag på provningar ger möjligheter att öka kunskapen om olika konstruktionselements respons vid höga inre tryck i RI.

Föreslagna provningar nedan kräver olika grad av metod- och instrumentutveckling.

4.2 KONSTRUKTIONENS TÄTHET OCH LÄCKAGE VID TRYCKTESTER

4.2.1 Konstgjort läckage

Konstgjort läckage med olika utformning och geometriska egenskaper kan placeras på olika ställen i konstruktionen. Läckaget genom de konstgjorda läckageställena bestäms vid olika trycknivåer och deras detekterbarhet prövas med olika metoder och instrument. De konstgjorda läckagen kan placeras på följande ställen:

1. Läckage rakt genom inre betongvägg, tätplåt och yttre betongvägg
2. Läckage i tätplåt
 - a. Läckaget kan placeras på de ställen där tätplåtens insida inte täcks med betong.
 - b. Ett hål borrar först genom den inre betongväggen och därefter fabriceras läckaget i tätplåten. Det borrarade hålet genom betongväggen kan tätas på olika sätt. Man kan även borra från utsidan.
3. Läckage genom genomföringar

4.2.2 Bestämning av gastryck i material och mellan olika materialskikt

1. Gastrycket i betong bestäms på olika ställen och vid olika nivåer av inre tryck
 - a. Gastrycket bestäms vid olika djup och på betongkonstruktionselement med olika fuktighet.
2. Gastrycket mellan inre betongvägg och tätplåt bestäms på olika ställen i konstruktionen och vid olika nivåer av inre tryck.

4.3 KONSTRUKTIONENS DEFORMATIONER VID TRYCKTEST

Vid ett trycktest utsätts RI för ett inre tryck som medför att olika konstruktionselement deformeras. Genom att mäta deformationerna kan man verifiera om konstruktionen och dess olika element beter sig som förväntat samt verifiera olika beräkningsmodellens prediktioner.

4.3.1 Bestämning av konstruktionens globala beteende

Konstruktionens globala beteende under ett trycktest kan studeras genom att mäta RI:s deformationer i axiell, radiell och tangentiell riktning. Det finns utvecklade metoder och utrustning för att utföra mätningarna.

Spännkraften hos icke ingjutna spännkablar kan mätas. Om spännkablar förses med lastceller kan spännkablares respons under ett trycktest bestämmas. Genom att förse några, på ett väl genomtänkt sätt, valda spännkablar med lastceller kan man bestämma förändringen av spännkraften över hela konstruktionen vid ett trycktest.

Trycktestet kan upprepas med olika antal verksamma spännkablar, eller ett antal spännkablar med reducerad spännkraft. På detta sätt kan man mäta konstruktionens globala respons när ett antal kablar är "brustna". Insikterna och resultaten är viktiga för att kunna simulera konstruktionens beteende när kabelbrott inträffar. Simulering av kabelbrott kan även göras i RI med cementinjekterade foderrör genom att kapa dessa i önskad sekvens. Kapningen kan t.ex. göras genom borrar. Förändringar i spännkraft på grund av ett kabelbrott i en RI med icke injekterade foderrör kan betraktas som en övre gräns av dito i en RI med cementinjekterade foderrör. Den globala respons som man mäter vid ett kabelbrott i ett icke injekterat foderrör kan därför betraktas som en övre gräns av samma typ av respons vid ett motsvarande kabelbrott i ett injekterat foderrör. Om den globala responsen vid ett kabelbrott i ett icke injekterat foderrör är icke mätbar eller har låg upplösning i någon eller några av sensorerna kan ett liknande kabelbrott i ett injekterat foderrör säkerligen vara omätbar eller ha betydligt sämre upplösning.

"Spännkraften hos de spännkablar som finns i de foderrör som inte är injekterade med cementbruk kan kontrolleras, och kan återspännas om det är nödvändigt. När det gäller kablar i injekterade foderrör saknas både kontroll och uppspänningsmöjligheter. Spännkraften hos kablar i injekterade foderrör kan bestämmas/kontrolleras på ett indirekt sätt. Den amerikanska Regulatory Guide 1.90 anger två metoder för kontroll av spännkablares prestanda enligt nedan:

- A. Övervakning av reaktorinneslutningens förspänningsnivå genom instrumentering och trycktest (Alternativ A)
 - Övervakning av töjningar i spännkablares linor, d.v.s. kontinuerlig mätning av linornas töjning genom, vid byggandet, påmonterad töjningsgivare.
 - Evaluering av förspänningsnivå genom påmonterade deformations/töjningsgivare på en sektion av konstruktionen.

- B. *Övervakning av reaktorinneslutningens deformation under trycktest (Alternativ B)*
- *Trycksättning av RI och utvärdering av dess elastiska respons. Den elastiska responsen under trycksättning är primärt en funktion av konstruktionens styvhet. Spännarmeringens uppgift är att styra sprickbildningens omfattning och sprickornas bredd under olycksbelastning. En betydande minskning av konstruktionens styvhet på grund av reducerad förspänning kan resultera i sprickbildning i konstruktionen.”, [16]*

Inverkan av reducering av spännkraft i RI med ingjutna spännkablar kan studeras genom att man först bestämmer RI globala deformationer vid ett trycktest och därefter kapar spännarmeringarna och upprepar trycktest. Kapningen utförs genom att borra/såga en/flera spännkabel/spännkablar på olika ställen. Arbetet kan göras stegvis och trycknivån behöver inte vara hög. Avsikten är bestämma inverkan av spännkraftsreducering på konstruktionens elastiska respons.

4.3.2 Bestämning av konstruktionens lokala respons

Konstruktionens lokala deformationer kan bestämmas vid trycktester. De lokala deformationer som är intressanta är töjningar i tätplåten, RI:s yttre betongvägg, slakarmering samt töjningskoncentrationer kring genomföringar.

Det finns välutvecklade mätmetoder och givare för att kunna genomföra arbetet.

Tätplåtens töjningar

Tätplåtens töjningar under ett trycktest kan mätas med trådtöjningsgivare. Mätningen genomförs i två, i förhållande till varandra vinkelräta, riktningar som sammanfaller med tätplåtens huvudtöjningsriktningar. Där plåten täcks av betong, d.v.s. i cylinderväggen, måste betong avverkas. Det är enklast att avverka den inre betongväggen, vilken är tunnare och inte heller lika signifikant påverkar tätplåtens deformationer under ett trycktest.

Tätplåtens töjningar i områden kring genomföringar bör även bestämmas. I områdena kring genomföringar är tätplåten utsatt för töjnings-/spänningskoncentrationer.

Yttre betongväggens töjningar

Den yttre betongväggens töjningar kan bestämmas med trådtöjningsgivare, lägesgivare eller annan typ av utrustning som mäter den relativa lägesändringen mellan två punkter. Mätningen genomförs i axiell respektive tangentiell riktning. Det är viktigt att töjningarna bestäms på olika nivåer, exempelvis i nivå med bottenplattan, högst upp samt på några nivåer däremellan. Den yttre betongväggens töjningar kring genomföringar bör även bestämmas. I dessa områden är den yttre betongväggen utsatt för töjnings-/spänningskoncentrationer.

Slakarmeringens töjningar

Den yttre betongväggen har slakarmering. Slakarmeringen påverkar den yttre väggens deformationer, krympning och krypning. Genom att montera

trådtöjningsgivare på slakarmeringen och mäta dess töjning under ett trycktest kan man bestämma samverkan mellan armering och betong. För att utföra mätningen bilas den betong som täcker armeringen bort över en sträcka på ca 30 cm. Ett par trådtöjningsgivare monteras på den frambilade armeringen. Töjningsförändringarna registreras under trycktestet. Om armeringens töjningsförändringar följer de beräknade/uppmätta globala töjningsförändringarna tyder det på att det råder god samverkan mellan betong och armering. Informationen kan användas för att uppskatta slakarmeringens inverkan på den yttre väggens töjningar orsakade av krympning och krypning.

5 Förslag på provningar

5.1 STANDARDTESTER

Standardtester avser bestämning av de materialegenskaper eller materialparametrar som används för dimensionering av olika konstruktionsdelar och för kontroll av olika konstruktionsdelars aktuella prestandanivå och tillstånd. Materialparametrarna kan vara mekaniska, fysikaliska och kemiska. De materialparametrar som kan vara aktuella att testa framgår av följande avsnitt.

5.1.1 Betongens tryckhållfasthet

Allmänt

Betongens tryckhållfasthet är en av de viktigaste parametrarna vid dimensionering av betongkonstruktioners bärförmåga. Betongens tryckhållfasthet ingår även i modeller för bedömning av betongens deformationsegenskaper vid långtidsbelastning, utmattning och slag. Vid projektering och dimensionering väljs/används en hållfasthetsklass som anger betongens hållfasthet vid en ålder på 28 dygn. Vid produktionstillfället kontrolleras betongens hållfasthet genom standardrutiner.

Betongens tryckhållfasthet fortsätter att öka även efter 28 dygn. En 50-procentig ökning av tryckhållfastheten efter lång tid är inte osannolikt. Hållfasthetsökningen kan öka marginalerna när det gäller konstruktionens bärförmåga vid korttids-, långtids- och utmattningsbelastning. Belastningsnivån samt lastväxlingsamplituden sjunker i förhållande till betongens tryckhållfasthet i och med att betongens hållfasthet ökar, vilket är gynnsamt ur bärförmågesyvinkel.

Betongens tryckhållfasthet kan avta om den utsätts för nedbrytning. De nedbrytningsmekanismer som verkar från betongens yta inverkar normalt inte på betongens tryckhållfasthet. De nedbrytningsmekanismer som påverkar betongens inre sänker däremot tryckhållfastheten. Överbelastning, utmattningsbelastning, slag, alkalisilikareaktioner, försenad etringitbildning och viss typ av strålning är exempel på mekanismer som i en RI kan påverka betongens inre och därmed dess tryckhållfasthet. Fenomen som urlakning kan förekomma i reaktorbasängerna, men de är ofta ytliga och påverkar inte betongens tryckhållfasthet.

Provningsresultatets medelvärde är beroende av antalet provkroppar, där ett större antal provkroppar ger ett säkrare medelvärde. Av ekonomiska skäl är det dock nödvändigt att begränsa antalet provkroppar då det som vinnas i noggrannhet inte överväger den ökande kostanden. Alla väsentliga betongparametrar som används vid dimensionering enligt Eurocode är relaterade till betongens tryckhållfasthetsklass. En befintlig konstruktions bärförmåga kontrolleras med hjälp av betongens tryckhållfasthetsklass. Tryckhållfasthetsklassen hos en befintlig konstruktion bestäms enligt SS-EN 13791:2019 [17], vilken också ger vägledning kring valet av antal nödvändiga provkroppar. Till exempel har i Tabell 5-1 48 provkroppar föreslagits, vilket är tillräckligt för att uppfylla kraven i Tabell 6 eller 7 i SS-EN 13791:2019 [17].

Provtagningsställen

Förslag på provtagningsställen redovisas i Tabell 5-1. Tabellen anger de konstruktionsdelar där provtagningen ska genomföras. Provtagningen genomförs genom kärnborrning, Ø100 mm. Tabellen anger inte borrställets exakta placering, utan ska bestämmas med hjälp av ritningar och platsbesök vid den aktuella anläggningen. Borrdjupet ska maximeras dels för att det möjliggör undersökning av konstruktionens inre delar, dels för att det underlättar provtagningen. Provtagning, hantering av borrkärnor och provning behandlas i avsnitt 7.

Tabell 5-1 Förslag på provtagningsställen och antal provningar.

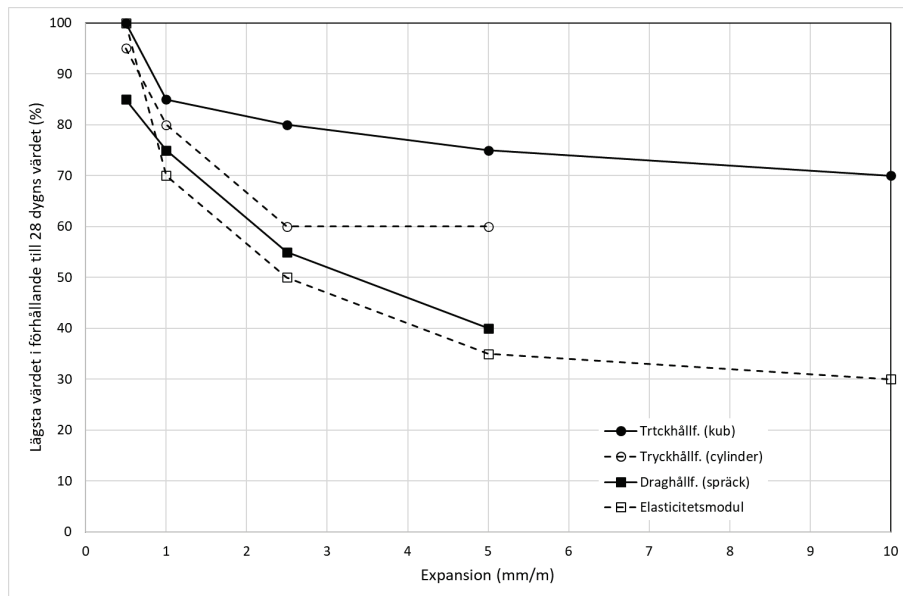
Konstruktionsdel	Antal ställen fördelade över konstruktionsdelen	Minst antal tryckprovningar/ställe
Rl:s yttre betongvägg	12	4
Rl:s inre betongvägg	12	4
Bottenplatta	12	4
Mellanbjälklag	6	4
Bassängsvägg utvändigt ¹⁾	4	4
Bassängsvägg invändigt ¹⁾	4	4
Strålskyddskonstruktion/Biologiska skärmen utvändigt ²⁾	2	4
Strålskyddskonstruktion/Biologiska skärmen invändigt ²⁾	2	4
Varmt och torrt ³⁾	2	4
Varmt och fuktigt ⁴⁾	2	4
1) Det gäller för samtliga bassängstyper. Det är inte säkert att det är genomförbart i alla bassänger. 2) Det är inte säkert att det är genomförbart. 3) Rl:s varmaste och torraste ställe. 4) Rl:s varmaste och fuktigaste ställe.		

5.1.2 Betongens draghållfasthet

Allmänt

Betongens draghållfasthet är en viktig parameter när det gäller dimensionering av betongkonstruktioner. Den är viktig för konstruktionselementens tvärkraftskapacitet, minimiarmering, sprickinitiering, spricktillväxt och sprickvidd samt dimensionering av oarmerade betongelement och olika infästningar. Betongens draghållfasthet vinkelrätt mot betongelementens yta styr vidhäftningen mellan betongytan och olika pågjutningar och ytbeläggningar. Nedbrytningsmekanismerna har normalt större inverkan på betongens draghållfasthet än dess tryckhållfasthet. Betongens draghållfasthet, särskilt vinkelrätt mot dess yta, reduceras relativt sett snabbare än dess tryckhållfasthet när den utsätts för olika nedbrytningsmekanismer. Figur 5-1 visar inverkan av expansion orsakad av ASR (alkalisilikareaktioner) på betongens mekaniska egenskaper. Den vertikala axeln visar parametrarnas lägsta kvarstående värde (lower band) i förhållande till deras värde vid 28 dygns ålder. Betongens tryckhållfasthet visas som kub- respektive cylinderhållfasthet. Betongens draghållfasthet avser spräckhållfasthet. Som framgår av figuren är både draghållfasthet och elasticitetsmodul känsligare än

tryckhållfasthet när det gäller ASR angrepp. Även cylindertryckhållfastheten är känsligare än kubtryckhållfastheten.



Figur 5-1 Inverkan av expansion i betong orsakad av ASR på betongens mekaniska egenskaper. Figuren är baserad på data från [17].

Uttorkningskrympning och snabba temperaturförändringar medför sprickbildning på betongens yta. Vidare försvagar armeringskorrosion betongens draghållfasthet vinkelrätt mot dess yta. Långt gången armeringskorrosion kan leda till delaminering av det täckande betongskiktet. Nedbryningsmekanismer såsom frostsprängning, alkalisilikareaktioner och sulfatangrepp kan leda till ytsprickor såväl som inre sprickbildning. Även radioaktiv strålning kan medföra yttre och inre försvagningar i betongen.

Vid dimensionering av ett konstruktionselement används betongens tryckhållfasthet som styrande parameter för bestämning av betongkvalité. Vid produktions- och utförandekontroll bestäms betongens tryckhållfasthet. Betongens draghållfasthet för dimensionerings- och sprickkontrolländamål bestäms via samband mellan tryck- och draghållfasthet som anges i olika normer och standarder. På grund av att nedbryningsmekanismer inverkar mer på betongens draghållfasthet än på dess tryckhållfasthet påverkas sambandet mellan tryck- och draghållfasthet. Därför kan man inte använda standardernas samband vid dimensionering och kontroll av olika betongelement. Om betongens tillstånd i ett konstruktionselement är okänt är det nödvändigt att även bestämma betongens draghållfasthet. Om betongens draghållfasthet är lägre än dito som uppskattas med standardens samband kan det eventuellt tyda på en pågående nedbrytning. Det krävs dock en statistiskt säkerställd avvikelse mellan mätvärdet och standardens värde för att kunna dra en sådan slutsats.

När det gäller betongkonstruktionselementen i RI rekommenderas att lika stor vikt läggs på betongens draghållfasthet som på dess tryckhållfasthet. Vidare bör betongens ytdraghållfasthet bestämmas på de ytor som har utsatts för strålning och de ytor som är täckta med beläggningar.

Provtagningsställen

Betongens spräckhållfasthet bestäms på de ställen som framgår av Tabell 5-1. Provtagning och hantering av borrhävar genomförs enligt avsnitt 5.1.1 och 7.1.3.

Draghållfastheten vinkelrätt mot betongens yta hos de konstruktionselement som är utsatta för strålning bestäms på de ställen som anges i Tabell 5-2. Vidare bestäms vidhäftningen mellan beläggningar och betongunderlaget på de ställen som framgår av Tabell 5-2. Provningsen kan antingen göras på plats i princip enligt SS-EN 1542 "Betongkonstruktioner – Provning av produkter och system för skydd och reparation – Vidhäftningshållfasthet (utdragsprov)" eller i laboratoriet genom dragprovning av en utborrad kärna vars basytor limmas mot stålcyllindrar som fästas i en dragprovningmaskin. När det gäller vidhäftningsprovning av beläggningar har kärnkraftverken sina egna rutiner och standarder, vilka företrädesvis ska användas.

Tabell 5-2 Förslag på provtagningsställen och antal provningar för draghållfasthet vinkelrätt mot en yta.

Konstruktionsdel	Antal ställen fördelade över konstruktionsdelen	Minst antal tryckprovningar/ställe
Strålskyddskonstruktion/Biologiska skärmen utvändigt	2	4
Strålskyddskonstruktion/Biologiska skärmen invändigt ¹⁾	2	4
Vidhäftningshållfasthet mellan beläggning och betong på ett varmt och torrt ställe	2	4
Samma som ovan på ett varmt och fuktigt ställe	2	4

1) Det är inte säkert att det är genomförbart.

5.1.3 Betongens elasticitetsmodul

Allmänt

Betongens elasticitetsmodul ingår i modeller för dimensionering av RI:s yttre betongvägg. Det är en viktig parameter för bedömning av den efterspända konstruktionens långtidsdeformationer. För övriga konstruktionselement har elasticitetsmodulen mindre betydelse jämfört med tryck- och draghållfasthet.

Provtagningsställen

Provtagning enligt Tabell 5-1, rad "RI:s yttre vägg".

Provtagning och hantering av borrhävar genomförs enligt avsnitt 5.1.1 och 7.1.3.

5.1.4 Betongens densitet och porositet

Allmänt

Betongens densitet och porositet, liksom betongens tryckhållfasthet, återspeglar betongens kvalité och tillstånd. Vidare kan porositeten hos de betongelement som finns innanför tätplåten påverka läckagemätningen under trycktest. Därför rekommenderas att betongens densitet och porositet bestäms.

Provtagningsställen

Förslag på provtagningsställen redovisas i Tabell 5-3. Tabellen anger de konstruktionsdelar där provtagningen ska genomföras. Provtagningen genomförs genom kärnbörning, Ø100 mm. Tabellen anger inte den exakta placeringen av borrningsställena utan placeringen ska bestämmas med hjälp av ritningar och platsbesök vid den aktuella anläggningen. Borrdjupet ska maximeras dels för att det möjliggör undersökning av konstruktionens inre delar, dels för att det underlättar provtagningen. Provtagning, hantering av borkärnor och provning behandlas i avsnitt 7.1.4.

Tabell 5-3 Förslag på provtagningsställen och antal provningar vid bestämning av densitet och porositet.

Konstruktionsdel	Antal ställen fördelade över konstruktionsdelen	Minst antal tryckprovningar/ställe
RI:s yttre betongvägg	6	3
RI:s inre betongvägg	6	3
Bottenplatta	6	3
Mellanbjälklag	3	3
Bassängsvägg utvändigt ¹⁾	2	3
Bassängsvägg invändigt ¹⁾	2	3
Strålskyddskonstruktion/Biologiska skärmen utvändigt ²⁾	2	3
Strålskyddskonstruktion/Biologiska skärmen invändigt ²⁾	2	3
Varmt och tort ³⁾	2	3
Varmt och fuktigt ⁴⁾	2	3

1) Det gäller för samtliga bassängstyper. Det är inte säkert att det är genomförbart i alla bassänger.
2) Det är inte säkert att det är genomförbart.
3) RI:s varmaste och torraste ställe.
4) RI:s varmaste och fuktigaste ställe.

5.2 TESTER AV SPECIFIKA MATERIAL- OCH TILLSTÅNDEGENSKAPER

5.2.1 Hydratationsgrad och strukturutveckling

Betongens hydratationsgrad inverkar på betongens hållfasthet och täthet. Den påverkar även betongens porstorleksfördelning, och därmed även fuktfixering samt betongens jämviktsfuktkurvor, d.v.s. betongens fukttransportegenskaper förändras med tiden. Betongens hydratationsgrad kan beroende på betongens *vct* och fukthalt utvecklas under lång tid. I och omkring en RI finns olika lokala klimatzoner med olika temperatur och fuktighet, vilket kan ha medfört att betongens hydratationsgrad och strukturutveckling uppnått olika mognadsnivåer. I torra områden kan hydratationsprocessen ha avstannat helt, medan den uppnått slutvärdet i fuktiga områden.

Bestämning av hydratationsgrad och porstrukturfördelning kan bl.a. förklara de skillnader som ev. noteras vid bestämning av sorptionskurvor, se avsnitt 5.2.2.

5.2.2 Fuktprofil

Allmänt

Betongelementens fuktprofil är viktig i många avseenden, bl.a. styr den elementens krympning och krypning samt gasgenomsläpplighet. Vidare kan den påverka ingjutna ståldetaljers korrosionsbenägenhet. De flesta nedbrytningsprocesser kräver fukt för att kunna påverka betongens tillstånd. Även vidhäftningen mellan betong och beläggningar styrs av betongens fuktighet.

Provtagningsställen

Förslag på provtagningsställen redovisas i Tabell 5-4. Tabellen anger de konstruktionsdelar där provningen ska genomföras. Provningen genomförs i borrhål enligt anvisningar i avsnitt 7.2.4. Antal borrhål och borrhjup styrs vid varje provningsställe av konstruktionselementets tjocklek och möjligheten att kunna borra från en eller två sidor av elementet, se avsnitt 7.2.4.

Mätningar i borrhål ger den relativa fuktighet (RF) som betongen är i jämvikt med. För att uppskatta betongens fuktinnehåll behövs sorptionskurvor, se avsnitt 7.2.4. Förslag på provtagningsställen anges i Tabell 5-4. Tabellen anger inte den exakta placeringen av borrhållena utan ska bestämmas med hjälp av ritningar och observationer vid platsbesök.

Tabell 5-4 Förslag på provtagningsställen och antal provningar för fuktprofilsmätning.

Konstruktionsdel	Antal ställen fördelade över konstruktionsdelen	Provtagning för sorptionskurva
RI:s yttre betongvägg	3	1
RI:s inre betongvägg	3	1
Bottenplatta	2	1
Mellanbjälklag	2	1
Bassängsvägg	2	1

5.2.3 Karbonatiseringsdjup

Armeringskorrosion orsakad av betongens karbonatisering är en viktig mekanism när det gäller betongkonstruktioners nedbrytning. Konstruktionselementen i ett kärnkraftverk är byggda med en hög betongkvalitet och tillräckligt tjockt täckande betongskikt. Inuti och utanför RI förekommer olika fuktbelastningar på de armerade betongelementen, därför kan karbonatiseringsdjupet variera beroende på betongelementens placering. En kartläggning av karbonatiseringsdjupets variation på insidan av RI och på dess yttre yta rekommenderas.

Karbonatiseringsdjupet kan bestämmas på de ställen där fuktprofilen bestäms. Provningen utförs genom att en ca 100 mm lång borrhärna tas ut från konstruktionen. Borrhärnan spräcks och en indikeringslösning sprayas på de spräckta ytorna, som därmed uppvisar två olika färger. Gränsen mellan områdena med olika färger är karbonatiseringsfronten. Provtagning och provningens utförande beskrivs i avsnitt 7.2.7. Det rekommenderas att tre prover tas ut vid varje provningsställe.

5.2.4 Inverkan av joniserande strålning på betongens struktur

Strålskyddskonstruktioner som omger reaktortanken (benämnd biologiska skärmen i BWR:er) är utsatta för joniserande strålning. Strålningen kan verka katalyserande på ASR och på karbonatisering av betong. Processerna kan pågå djupt in i materialet [18]. Fenomenen förväntas inte ge några effekter under de första 40 åren av drift. Däremot råder osäkerhet kring strålningens effekter under en drifttid på 60 till 80 år. Det är möjligt att man kan upptäcka fenomenens initiala skede genom tunnslipsanalys. Resultaten är intressanta för de kärnkraftverk som

ännu är i drift och nya kärnkraftverk med lång dimensionerad livslängd. Provningsen kräver dock hantering av kontaminerat material, och bör därför utföras av specialistpersonal och specialistlaboratorier.

5.2.5 Kontaktzon mellan tät- och bassängsplåt och betongkonstruktionerna

Kontakt mellan stålplåt och betong förekommer på relativt stora ytor. I RI:s betongvägg är tätplåten placerad mellan den inre och den yttre betongväggen, där den har till uppgift att göra RI-väggen tät. RI:s yttre vägg är tjockare än dess inre vägg och det klimat som väggarnas yta utsätts för är helt olika. Detta medför att två olika fuktillstånd uppstår i zonen mellan tätplåt och betong på tätplåtens in- respektive utsida. Dessutom råder olika klimatförhållanden kring RI:s betongvägg. På vissa ställen är konstruktionen i kontakt med bassängväggar medan betongväggen på andra ställen är utsatt för varm och torr luft. Det är viktigt att kunna kartlägga fuktillståndet i zonen mellan betong och tätplåt.

I RI:s olika bassänger täcks betongens yta med plåt för att skydda betongens yta mot urlakning och kontaminering. Bassängsplåten ska vara tät och inte läcka vatten. Man har dock vid flera anläggningar upptäckt läckage som tyder på att plåtarna inte alltid har varit täta. I samband med rivning finns det möjlighet att undersöka förhållandena, lokalisera läckagen och bedöma dess omfattning samt uppskatta nivån till vilken vattnet har stigit i zonen mellan plåtarna och betongen. Genom tunnslipsanalys kan man även bedöma hur skadlig processen varit för betongen.

5.2.6 Korrosionsrisker

Korrosionsrisker kan finnas på olika ställen, speciellt i områden med hög fuktighet. Områden med hög korrosionsrisk bör identifieras och riskerna bedömas genom potentialmätningar.

5.2.7 Brottenergi

Provningsmetod

Brottenergi bestäms enklast genom en deformationsstyrd stabil trepunktsböjningsprovning av en skårad borrhärna, se Figur 5-2. Den beskrivna metoden bygger på de rekommendationer som ges i [19] och [20]. Skåran sågas med en 2–3 mm tjocklek diamantklinga. Skårans djup är $\varnothing/2$, där \varnothing är kärnans diameter.

Brottenergin (G_F , N/m) beräknas med följande samband:

$$G_F = (A_{kurva} + (m_1 + 2m_2)g\delta_0)/A_{brott} \quad (5-1)$$

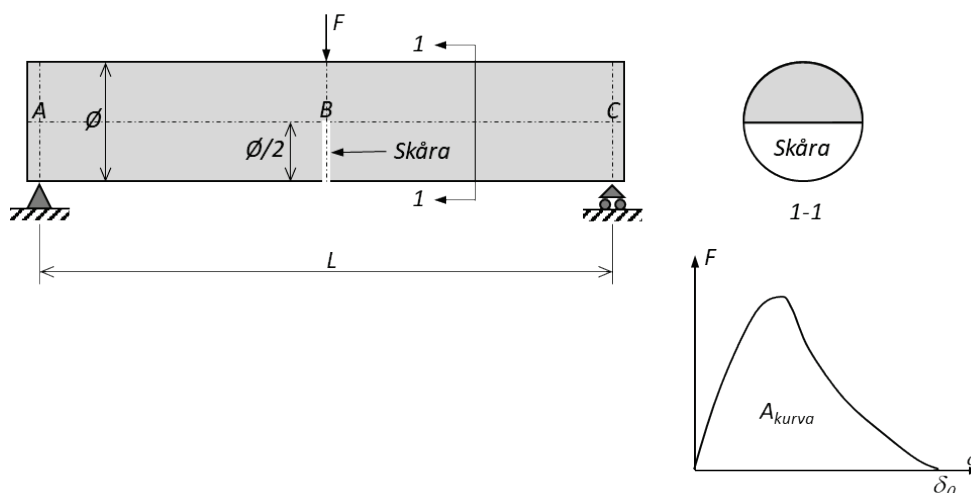
där

$$A_{kurva} = \text{ytan under } F - \delta \text{ kurvan (Nm)}$$

$$A_{brott} = \text{brottsnittets yta (m}^2\text{)} = \frac{1}{8} \pi \varnothing^2$$

$$\varnothing = \text{borrkärnans diameter (m)}$$

- L = avstånd mellan upplagen (m)
 m_1 = vikten hos den del av borrkärnan som är mellan upplagen (kg)
 m_2 = vikten hos ev. upplag som placeras på borrkärnan mellan borrkärnan och provningsmaskinen (kg)
 g = tyngdaccelerationen (m/s^2)
 δ = nedböjning (m), d.v.s. mittpunktens rörelse nedåt relativt upplagen som beräknas/bestäms enligt $\delta_B - (\delta_A + \delta_C)/2$.
 Punkterna A, B och C definieras i Figur 5-2.
 δ_0 = nedböjning (m) då provkroppen förlorar bärförmågan, se Figur 5-2.
 F = last (N)



Figur 5-2 Provningsuppställning för bestämning av betongens brottenergi.

Provningsen ska vara deformationsstyrd och stabil, d.v.s. provkroppens nedböjning får inte ske snabbare än belastningsanordningens (okets) rörelse neråt. Okets hastighet bör vara sådan att det tar minst 60 sekunder innan maxlasten uppnås. Okets hastighet efter maxlasten styrs av kravet på provningens stabilitet, som i sin tur styrs av provningsmaskinens egenskaper (såsom styvhet, closed-loopens reaktionshastighet och den parameter som styr closed-loopen) samt provkroppens geometri. Okets hastighet för olika delar av provningen bör fastställas genom förprovning. När de kritiska delarna av provningen väl har passerats kan okets hastighet ökas.

Eftersom provkropparna tillverkas av borrkärnor är deras längd beroende av tillgången till långa borrkärnor. Helst ska $L \geq 4\varnothing$. Ju längre L desto lättare blir det att uppfylla stabilitetskravet. Det bör noteras att de halvor som kvarstår efter en

brottenergiprovning även kan användas för annan typ av provning, t.ex. för provning av betongens tryck- och draghållfasthet, densitet, m.m.

Borrning och hantering av borrhärnor

Liksom för de övriga provkropparna är den nominella kärndiametern (\emptyset) 100 mm. Som framgick ovan är det viktigt att $L \geq 4\emptyset$, vilket medför att provkroppens längd (L_{prov}) minst ska vara $L_{prov} \geq 4\emptyset + 20 = 420$ mm och borrhärnans längd (L_{borr}) anpassas till det, se avsnitt 7.1 och Figur 7-2.

Borrhärnan ska vara fri från järn, kapade armeringsstänger eller annat ingjutningsgods inom en 200 mm lång centralt belägen del av provkroppen.

Omedelbart efter utbörning märks varje borrhärna enligt punkt 2 i avsnitt 7.1.3, och sedan förpackas i en förpackning som skyddar den mot uttorkning och mekanisk belastning. Borrhärnas beteckning skrivs även på förpackningen.

Skåran sågas med en 2–3 mm tjocklek diamantklinga. Klingan ska kylas med vatten under sågningen.

Den skårade borrhärnan är känslig för uttorkning. Ojämn uttorkning av borrhärnan kan medföra stora spänningar och ev. sprickor vid skårans spets som påverkar provningsresultatet. Därför ska skåran helst sågas tidigast ett par dagar före provningen. Den sågade provkroppen ska lindas i plastfolie som avlägsnas strax före provningen.

Hantering, placering och förflyttning av en skårad borrhärna ska utföras varsamt. Borrhärnan ska alltid lyftas/förflyttas med båda händer placerade på vardera sida av skåran.

Provningens uppställning och utförande

Provningens principiella uppställning framgår av Figur 5-2 och dess principiella utförande beskrivs i samma avsnitt som figuren. Det bör dock noteras att provkroppens tvärsnitt är cirkulärt, vilket kräver att upplagen är anpassade till tvärsnittets form. Utöver kravet på upplagens form ska upplagen även uppfylla följande krav:

- Ett av stödupplagen måste vara placerat på ett kullager som tillåter att upplagens plan kan luta i godtycklig riktning.
- Det andra stödupplaget ska vara placerat på ett rullager.
- Ett av stödupplagen ska också förhindra stelkroppsfröskjutning av provkroppen i längdaxelns riktning.
- Provkroppen ska belastas genom ett kullager som medger vinkeländring hos, men inte fröskjutning av, belastningsupplaget.

Förslag på provningsställena

Icke-linjära beräkningar berör vanligen RI:s yttre betongvägg, därför bör provningsställena först och främst vara placerade där. Provtagningarna bör företrädesvis ske på samma ställen där man borrar ut provkroppar för bestämning av betongens tryck- och draghållfasthet. Antal provningar behöver dock inte vara lika många som vid tryck- och dragprovningarna. Det bör noteras att

brottenergiprovkropparnas båda halvor efter genomförd provning kan användas för annan typ av provning om halvorna uppfyller de specifikationer som gäller för avsedd typ av provning.

Förslaget är att provningsställena väljs enligt första raden i Tabell 5-1, dock endast med 6 provningsställena.

5.3 INJEKTERINGSBRUK I FODERRÖRET

5.3.1 Allmänt

Foderröret injekteras med cementbruk. Cementbrukets uppgift är dels att via foderröret skapa samverkan mellan spännlinorna och betongen, dels att skydda linorna mot korrosion. Följande tester kan ge värdefulla insikt om hur väl injekteringen har genomförts, om injekteringsbruket har kunnat eller haft möjlighet att uppfylla sina funktioner samt huruvida injekteringsbruket kunnat uppfylla sina funktioner om driften hade fortsatt några år till.

5.3.2 Foderrörens allmänna tillstånd och utfyllnad

På några ställen bör foderrören bilas fram inom en ca 50 cm lång sträcka för besiktning av deras allmänna tillstånd, sprickbildning, korrosion och utfyllnadsgrad. Efter frambilningen kapas foderröret på två ställen för att ta ut en hel foderrörsträcka på ca 30 cm. Före kapningen ska provsträckans beteckning, placering och orientering markeras med beständig färg och fotograferas.

Under kapningen ska foderröret besprutas med vatten för att undvika uttorkning. Uttorkningen medför att karbonatisering av injekteringsbruket påskyndas. Omedelbart efter genomförd kapning:

1. vakuumpackas den kapade provkroppen för transport till laboratoriet samt
2. besprutas det kvarstannande foderrörets båda kapade tvärsnitt (som sticker ut från konstruktionen) med lösningen för indikering av karbonatisering och förses med en längdmätskala (linjal eller motsvarande) samt fotograferas.

Där efter avlägsnas foderröret (metallhöljen) från de utstickande delarna och besprutas med indikeringslösningen och fotograferas. Efter genomfört karbonatiseringstest avlägsnas det bruk som omger linorna. Linornas kondition noteras och fotograferas.

5.3.3 Laborrietester

Den vakuumpackade provkroppen tas till laboratoriet för ytterligare undersökningar. Vakuumpackningen är nödvändig för att förhindra syre- och koldioxidtillförsel till linorna och bruket. Följande tester rekommenderas att genomföras:

- Nytt karbonatiseringstest utförs om resultatet av det test som genomfördes vid provtagningstillfället inte är tillfredställande.
- Notering av spännlinornas placering i röret samt deras tillstånd när det gäller korrosion.

- Bestämning av brukets kloridhalt.
- Bestämning av brukets hydratationsgrad.
- Bestämning av brukets densitet och porositet.
- Tunnslipsanalys för bestämning av
 - × typ av cement som ingår i bruket om det är okänt,
 - × brukets vattencementtal,
 - × brukets porstorleksfördelning samt
 - × eventuella strukturella förändringar/defekter i bruket.

5.3.4 Förslag på provtagningsställen

De provtagningar och tester som föreslås i avsnitt 5.3.2 och 5.3.3 rekommenderas att genomföras på provtagningsställen och provkroppar enligt Tabell 5-5.

Tabell 5-5 Förslag på provtagningsställen och antal provningar för injekteringsbruk.

Konstruktionsdel: RI:s yttre betongvägg	Antal ställen fördelade över konstruktionsdelen	Vertikal- /horisontell kabel
Nedre del	2	båda
Mittendel	2	båda
Övre del	2	båda

5.4 INFÄSTNINGAR I BETONG OCH ANKARPLATTOR

Det förekommer många olika typer av infästningar och ankarplattor i en RI och på dess utsida. Dessa konstruktionselement dimensioneras och kontrolleras med hänsyn till krav ställda i DNB [14] och SS-EN 1992-4 [13]. I samband med nedläggning ges ett bra tillfälle att välja ut typiska och dessutom viktiga typer av infästningar och ankarplattor för att jämföra deras dimensionerande bärförmåga med den verkliga bärförmågan bestämd genom provning.

Om det beslutas att utföra testerna bör ett program sammanställas som inkluderar vilken typ av infästningar och ankarplattor som ska testas, testmetoder och de parametrar som ska bestämmas. Testmetoderna och de parametrar som ska bestämmas ska väljas med hänsyn till dimensioneringsmodellerna. Antal tester ska bestämmas på ett sådant sätt att det ger ett bra statistiskt underlag för utvärdering av dimensioneringsmodellerna men även för kalibrering och verifiering av mer avancerade beräkningsmodeller.

5.5 TÄTPLÅT OCH DESS INFÄSTNINGAR

Tätplåtens, och dess infästnings, mekaniska egenskaper bör bestämmas. Provningsmetod och de parametrar som bestäms ska baseras på dimensioneringsmodellerna. Antal tester ska bestämmas på ett sådant sätt att det ger ett bra statistiskt underlag för utvärdering av dimensioneringsmodellerna.

Tätplåtens infästning har dimensionerats på sådant sätt att den ger med sig innan en reva i tätplåten uppstår. Man bör undersöka möjligheten att kunna utforma en provningsmetod där det skapas belastningsfall som leder till brott i infästning eller att en reva uppstår i tätplåten.

5.6 SPÄNNLINOR OCH SPÄNNTRÅDAR

De spännkablar som finns i icke injekterade foderrör skyddas mot korrosion genom ventilation med torr luft eller injektering med fett. Dessa kablers spännkraft kan mätas och regleras samt plockas ur foderrören för inspektion och provning.

Provningarna kan bestå av visuell inspektion för att upptäcka ev. korrosion, standardprovningar för bestämning av materialets mekaniska egenskaper som används vid dimensionering samt bestämning av spännkablarnas spännkraft.

Ett provningsprogram bör utvecklas i samarbete med de inspektörer eller motsvarande kompetenser som kontrollerar spännkablarnas spännkraft samt inspekterar spännkablarnas tillstånd med avseende på korrosion, hållfasthetsändringar, etc. Provningsprogrammet ska baseras på de rutiner som gällde under drifttiden. Provningsställena och antal provningar ska bestämmas på sådant sätt att de ger ett bra statistiskt underlag för verifiering av konstruktionens spännkraft, enskilda kablers spännkraft, variationen av spännkraft mellan kablarna, d.v.s. medelvärde och karakteristiskt värdet av spännkraften, samt medelvärdet och karakteristiska värdet av linornas och trådarnas flyt- och brottgräns.

6 Anläggningar

I detta avsnitt presenteras huvudsakligen en genomgång av vilka tidigare föreslagna provningar och tester som bedöms möjliga att genomföra i de svenska anläggningarna utgående från deras nuvarande tillstånd och planerat rivningsarbete. Vidare behandlas ytterligare aspekter som är nödvändiga för planering och genomförande av provningar och tester vid anläggningarna.

De svenska anläggningar som i nuläget är nedlagda är följande:

- Barsebäck 1 och 2 (B1 och B2)
- Oskarshamn 1 och 2 (O1 och O2)
- Ringhals 1 och 2 (R1 och R2)

De anläggningar som är i drift inkluderar:

- Forsmark 1, 2 och 3 (F1, F2 och F3)
- Oskarshamn 3 (O3)
- Ringhals 3 och 4 (R3 och R4)

En viktig observation som kommunicerats till rapportförfattarna via tillståndsinnehavarnas representanter i styrgruppen för Betongtekniskt program kärnkraft är att betongens generella tillstånd i samtliga inneslutningar är god. Enligt representanterna har man inte observerat några ytterligare signifikanta betongskador än de som finns sammanställda i [4]. De betongskador som observerats och senare åtgärdats, har dock nästintill uteslutande kunnat konstateras vara orsakade av utförandefel vid bygget av inneslutningarna. Det bör vidare observeras att de allvarligaste skadorna som upptäckts är kopplade till korrosionsangrepp på tätplåten, vilka också kunnat kopplas till utförandefel. Eftersom betongens generella tillstånd är god finns således goda möjligheter att kunna extrahera representativa provkroppar från inneslutningarnas olika delar. Planerat och redan genomfört rivningsarbete begränsar dock möjligheten att genomföra vissa av de tester och provningar som föreslås avsnitt 4 och 5 i de nedlagda anläggningarna.

6.1 MÖJLIGA TESTER OCH PROVNINGAR VID NEDLAGDA ANLÄGGNINGAR

Det nuvarande tillståndet och planerat rivningsarbete vid de anläggningar som redan tagits ur drift i Sverige innebär vissa begränsningar för vilka tester och provningar som är möjliga att genomföra av dem som föreslås i denna rapport. Vid samtliga nedlagda anläggningar har diverse olika system redan sanerats och/eller demonterats. Dessutom har håltagningar och andra förstörande ingrepp genomförts i inneslutningarnas skalkonstruktioner vid B1, B2, O1 och O2. Vid O1 planerar man även att riva den biologiska skärmen under 2023. Vidare är det under hösten 2023 planerat att demontera spännkablarna i R2 och därpå ta upp hål i inneslutningens skalkonstruktion för att på sikt demontera och plocka ut interndelarna.

På grund av ovan nämnda åtgärder vid de nedlagda anläggningarna är det inte möjligt att genomföra de tester och kontroller av reaktorinneslutningarna som

föreslås i avsnitt 4. Detta eftersom de förutsätter att trycktester kan genomföras. I tillägg bör det nämnas att representanter från Ringhals i styrgruppen för Betongtekniskt program kärnkraft har kommunicerat att det inte heller är möjligt att genomföra trycktester vid R1 och R2 trots att inga håltagningar i inneslutningarnas skalkonstruktioner ännu gjorts.

De tester och provningar som föreslås i avsnitt 5 är möjliga att utföra i samtliga nedlagda anläggningar. I nedlagda och uppsågade inneslutningar påverkas dock klimatet som råder på insidan i förhållande till de omgivningsförhållanden som rått under drifttiden. Detta är en viktig aspekt att beakta vid planering och genomförande av vissa typer av tester och provningar. Förändrade omgivningsförhållanden på inneslutningarnas insida innebär t.ex. att fuktprofiler i betongkonstruktionerna förändras med tiden och att karbonatiseringsdjupet eventuellt kan öka med en förhöjd hastighet än tidigare. Det senare gäller framförallt i BWR:er eftersom inneslutningarna varit fyllda med kvävgas under drift, vilket inte görs i PWR:er [8]. För att erhålla så representativa resultat som möjligt är det därför viktigt att tester och provningar av tillstånd som riskerar att påverkas av förändrade omgivningsförhållanden utförs så fort det är möjligt efter en anläggning tagits ur drift. Vidare är föreslagna provningar av injekteringsbruk i foderrör för spännkabaler i avsnitt 5.3 självklart endast aktuella för de inneslutningar som försetts med injekterad spännarmering, d.v.s. B1, B2, O1, O2 samt R1. Provning av spännkablar och spännlinor enligt avsnitt 5.6 är däremot aktuellt för R2, eftersom denna inneslutning utformats med spännarmering som injekterats med fett.

6.2 MÖJLIGA TESTER OCH PROVNINGAR VID ÄNNU EJ NEDLAGDA ANLÄGGNINGAR

Vid de svenska anläggningarna som ej ännu är nedlagda finns av förekommen anledning möjlighet att i framtiden genomföra samtliga typer av provningar som föreslås i avsnitt 4 och 5 då de tas ur drift. För att möjliggöra de mer komplicerade provningar som föreslås i avsnitt 4 är det dock viktigt att man i tidigt skede inför framtida nedläggningar planerar för genomförandet av dessa, d.v.s. långt innan väsentlig utrustning demonteras eller håltagningar görs i inneslutningarna. Genomförandet av denna typ av provningar innebär en möjlighet att tillgängliggöra unik data för bl.a. en bättre förståelse av inneslutningarnas lokala och globala mekaniska respons, samt väsentliga data för verifiering och kalibrering av olika modeller. Provningsresultat av denna typ är således viktiga för förbättrad analys av både befintliga och nya anläggningar.

Provning av injekteringsbruk enligt avsnitt 5.3 är endast aktuellt för O3, då detta är den enda anläggningen med cementinjekterade spännkablar av de som fortfarande är i drift. Av samma anledning är de provningar av spännkablar och spänntrådar som föreslås i avsnitt 5.6 primärt aktuella för de övriga anläggningarna. Det bör återigen noteras att provning av parametrar och tillstånd som kan förväntas påverkas av förändrade omgivningsförhållanden bör planeras så att de kan utföras så fort det är möjligt efter en anläggning tagits ur drift. Detta gäller t.ex. mätning av fuktprofiler och karbonatiseringsdjup enligt avsnitt 5.2.2 respektive 5.2.3.

6.3 HANTERING OCH FRIKLASSNING AV PROVKROPPAR

För att kunna transportera uttagna provkroppar från anläggningarna till ett laboratorium krävs normalt att dessa friklassas, d.v.s. en kontroll av att provkropparna ej är kontaminerade. Vid betongprovning är viktigt att de uttagna provkropparna snabbt paketeras ändamålsenligt (se anvisningar i avsnitt 7) och transporteras till det laboratorium där provningen ska genomföras. Av denna anledning är det därför också ytterst viktigt att en tydlig plan och process för friklassning av provkroppar finns utarbetad och implementerad i samtliga led av organisationen som berörs innan arbetet startar. Annars finns risk att uttagna provkroppar i slutändan blir obrukbara för deras tilltänkta provningsändamål.

Tidigare erfarenheter från OKG, rapporterade av deras representanter i styrgruppen för Betongtekniskt program kärnkraft, har visat på att friklassning av betongprover generellt är komplicerat och tar tid. Samma erfarenhet har även rapporterats av en av medförfattarna till denna rapport i samband med tidigare utförda provningar vid nedlagda anläggningar i Sverige. Vid Barsebäck har hela inneslutningarna friklassats, men trots detta finns även här tidigare erfarenheter av problem som uppstått i samband med uttag av provkroppar och friklassningen av dessa. Planer finns även att, inom förhållandevis snar framtid, också friklassa hela O1. Vid Ringhals är den generella erfarenheten från representanter i styrgruppen däremot att inga tidigare större problem uppkommit med friklassningen av betongprovkroppar. För att minimera risken att eventuella problem uppkommer är det dock, precis som nämnts ovan, nödvändigt att en tydlig plan och process för friklassning utarbetas i ett tidigt skede under planeringsarbetet av provningarna.

I vissa konstruktionsdelar och en del av de föreslagna provningarna kan kontaminerade provkroppar förekomma. En separat plan och process behöver utarbetas under planeringsarbete av provningarna för hantering av dessa provkroppar. Uttag, hantering, transport och provning måste utföras av specialistpersonal och specialistlaboratorier.

I samband med uttag av provkroppar i betongkonstruktioner produceras dessutom avfall i form av t.ex. borr- och vattenbilnings slam samt borr- och vattenbilningsvatten. Det måste därför även planeras och bestämmas hur detta avfall ska hanteras och tas omhand vid uttag av provkroppar.

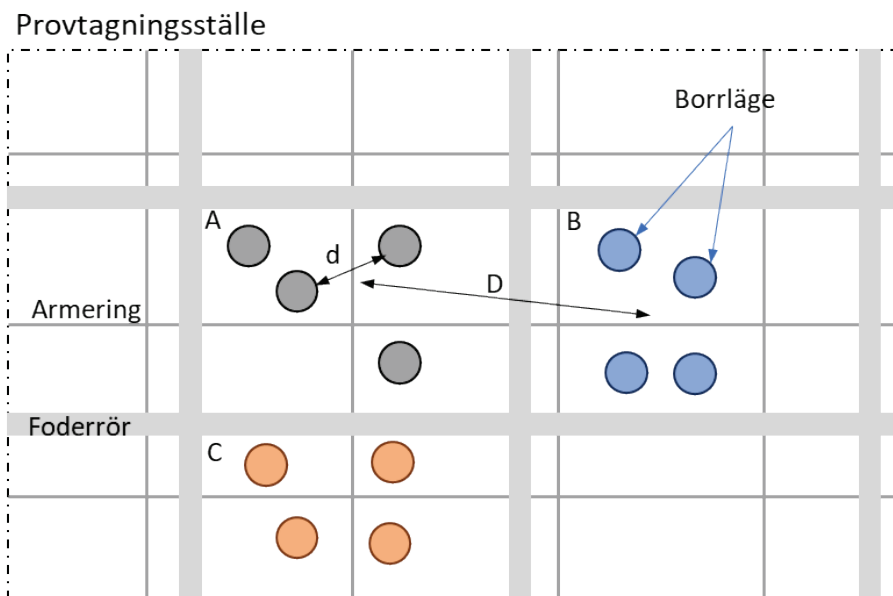
7 Anvisningar för provningars genomförande

I detta kapitel ges anvisningar för hur föreslagna provningar ska genomföras. För de provningar där det finns en befintlig standard för utförande så hänvisas till den. Anvisningar ges primärt för standardprovningar och provningar där det finns en etablerad metodik för utförande.

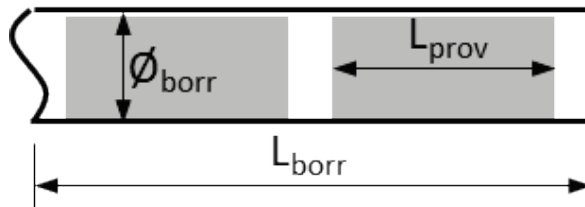
7.1 BORRKÄRNOR FÖR STANDARDTESTER

7.1.1 Allmänt

1. Bestäm provtagningsstället och markera det område inom vilket borrhämnarna ska borraras ut, se Figur 7-1.
2. Klarlägg eventuella skaderisker för konstruktionen innan provuttag sker.
3. Bestäm antal borrhämnarna inom det markerade området.
4. Antal borrhämnarna bestäms med hänsyn till typ av provning, antal provkroppar samt minsta borrhämnarlängd (L_{borr} , Figur 7-2) för att tillverka en provkropp.
5. Markera borrhämnarna där borrhämnarna ska borraras ut.
6. Se till att borrhämnarna genom armering, foderrör, tätplåt eller annan ingjuten detalj undviks.
7. Såvida inte annat särskilt angivits borraras kärnorna ut vinkelrätt mot ytan.
8. Borrhämnarnas nominella diameter är $\varnothing_{\text{borr}}=100$ mm, Figur 7-2.
9. Såvida inte annat särskilt angivits genomförs uttag, undersökning och tryckprovning av borrhämnarna i enlighet med SS-EN 12504-1 [21].



Figur 7-1 Schematisk presentation av markerat provtagningsställe/-område och borrläge. Förekomsten av armering, foderrör eller annan ingjuten detalj har upptäckts och markerats. I detta fall har placering av tre borrningsgrupper (A, B och C) och respektive borrlägen markerats.



Figur 7-2 Schematisk bild av en borkärna.

7.1.2 Borrlägen

Borrningslägen kontrolleras med OFP (oförstörande provningsmetoder) för att undvika armering, spännarmeringens foderrör, tätplåt eller annan ingjuten detalj. Borrningslägena kan vara utspridda eller bilda olika grupper inom provtagningsstället såsom visas i Figur 7-1.

En borkärna borrar ut från det valda borrläget. Borkärnans längd styrs av provningstyp, betongens egenskaper och tillstånd, tillåtet borrhjup samt borrhjupens egenskaper. Som nämnts i avsnitt 5.1.1 bör borrhjupet och längden på kärnan maximeras för att möjliggöra undersökning av konstruktionens inre delar och för att underlätta provtagningen.

Det är viktigt att hushålla med borrhärnorna. Borrningen ska utföras på sådant sätt att antalet borrlägen minimeras. Borrhärnans längd bestäms enligt nedan:

$$L_{borr} = \sum_{i=1}^n (L_{prov,i} + \Delta L_{prov,i}) + \Delta L_{borr} \leq L_{borr,t} \quad (7-1)$$

L_{borr} = borrhärnans längd

$L_{borr,t}$ = tillåtet borrhärningsdjup

$L_{prov,i}$ = för en specifik provning färdigbearbetad provkroppslängd

i = provkroppsnummer

n = antal provkroppar per borrhärna, OBS: borrhärna \neq borrläge.

Borrhärna = borrläge om borrning kan fortsätta oavbrutet till tillåtet borrhärndjup ($L_{borr,t}$) vid borrläget.

$\Delta L_{prov,i}$ = justeringslängd, den längd som behövs för att preparera provkroppen, t.ex. genom sågning och planslipning.

ΔL_{borr} = tillägglängd för borrhärna som tar hänsyn till de delar som inte medräknas för preparering av provkroppar, t.ex. 50 mm närmast ytan eller den del som skadas när borrhärman bryts för att tas ut.

7.1.3 Borrhärnor för bestämning av betongens tryck- och spräckhållfasthet samt E-modul

1. Betongens tryckhållfasthet bestäms enligt SS-EN 12504-1 [21] med $L_{prov} = 2\phi_{borr} \approx 200$ mm.
 - a. SS-EN 12504-1 "Provnings av betong i färdiga konstruktioner – Del 1: Borrhärnor – Uttag, undersökning och tryckprovning" behandlar bara tryckhållfasthet. Det finns inte motsvarande standarder för bestämning av spräckhållfasthet och E-modul. Det rekommenderas att SS-EN 12504-1 tillämpas för provtagning och preparering av provkroppar för bestämning av betongens spräckhållfasthet och E-modul. Det rekommenderas att provkropparna har samma geometri som provkroppar för bestämning av betongens tryckhållfasthet.
 - b. SS-EN 12390-6 [22] tillämpas för bestämning av betongens spräckhållfasthet.
 - c. SS-EN 12390-13 (Method A – Initial and stabilized secant modulus of elasticity) [23] tillämpas för bestämning av betongens elasticitetsmodul.
2. Varje borrhärna märks med beteckningen PsBlPmn, där
 - Ps = provtagningsställe,
 - Bl = borrläge,
 - Pm = provningsmetod och
 - n = borrhärnans nummer.
3. Efter borrningen konditioneras varje borrhärna under två timmar. Provkropparna placeras på ett bärbart bord med utbytbar plastduk. Därefter fuktisoleras (skyddas mot torkning) provkropparna. Borrhärnans beteckning skrivs även på fuktisoleringen. Provkropparna placeras i en låda för transport. Lådorna får inte placeras på golvet.

7.1.4 Borrkärnor för bestämning av betongens densitet och porositet

1. Betongens densitet bestäms enligt SS-EN 12390-7 [24] med $L_{prov} \geq 100$ mm.
2. Följ punkt 2 i avsnitt 7.1.3.
3. Följ punkt 3 i avsnitt 7.1.3.

7.2 TESTER OCH BORRKÄRNOR FÖR SPECIFIKA MATERIAL- OCH TILLSTÅNDEGENSKAPER

7.2.1 Borrkärnor för bestämning av hydratationsgrad och strukturutveckling

1. Det saknas en etablerad standard för testning av hydratationsgrad, flera provningsmetoder beskrivs i [25]. Samtliga av testerna kräver att cementhalten i provet är känd. Typ och antal provkroppar bör bestämmas i samråd med det laboratorium som genomför provningarna. $L_{prov} \geq 100$ mm kan antas vid planeringsskedet.
2. Följ punkt 2 i avsnitt 7.1.3.
3. Följ punkt 3 i avsnitt 7.1.3.

7.2.2 Bestämning av strukturutveckling

Bestämning av betongens strukturutveckling genomförs via utvärdering av dess porstorleksfördelning genom *Mercury Intrusion Porosimetry* (MIP). Detta görs enligt SS-ISO 15901-1:2016 "Part 1: Mercury porosimetry" [26].

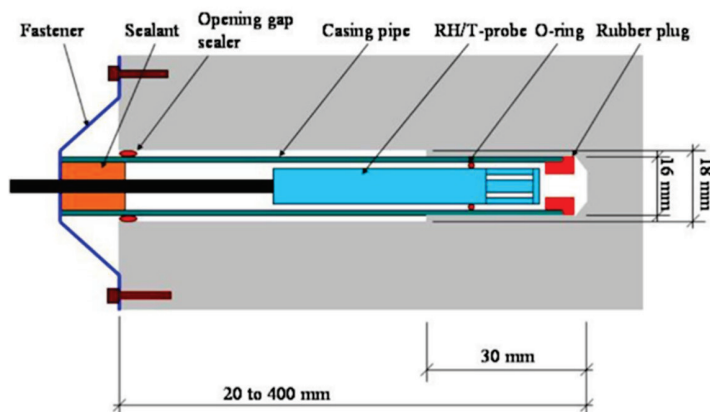
Porstorleksfördelningen ned till en viss storlek på porerna kan även bestämmas vid tunnslipsanalys. Även andra aspekter kopplade till betongens strukturutveckling kan utvärderas med tunnslipsanalys. För planering och genomförande av tunnslipsanalys bör ett specialistlaboratorium kontaktas.

7.2.3 Borrkärnor för bestämning av betongens sorptionsisotermer

1. Utvärdering av betongens adsorptionsisoterm och desorptionsisoterm kan göras enligt standard ASTM C1498 "Standard Test Method for Hygroscopic Sorption Isotherms of Building Materials" [27]. Typ och antal provkroppar bör bestämmas i samråd med det laboratorium som genomför provningarna. $L_{prov} \geq 100$ mm kan antas vid planeringsskedet.
2. Följ punkt 2 i avsnitt 7.1.3.
3. Följ punkt 3 i avsnitt 7.1.3.

7.2.4 Bestämning av fuktfördelning i borrhål

1. Fuktfördelningen bestäms genom att kontrollera betongens relativa fuktighet (RF) vid olika djup i konstruktionen.
2. Betongens fukttinnehåll (vattenhalt) bestäms med hjälp av betongens sorptionsisoterm.
3. RF mäts genom borrhållsmätning enligt [28] och/eller [29], se Figur 7.1.



Figur 7-3 Schematisk presentation av mätning av RF genom borrhållsmätning från [29].

4. Betongens sorptionsisoterm bestäms enligt avsnitt 7.2.4. Provkroppen (en borkärna, diameter = 100 mm, längd = 150 mm) tas ut vid mätstället.
5. Vid varje mätställe mäts RF i 5 olika punkter.
6. Vid varje punkt borrar ett hål (geometri enligt Figur 7–3) till ett specifikt djup (mätt från yttre betongväggs yta) enligt nedan:
7. Antalet mätpunkter som krävs är beroende på betongens tjocklek. För en vägg tjocklek större än 500 mm krävs 5 mätpunkter på varierande djup. För vägg tjocklekar mellan 400 – 500 mm tas 4 mätpunkter, för vägg tjocklekar under 400 mm tas 3 mätpunkter. För den första punkten borrar hålet 50 mm djupt. Den sista punkten tas 50 mm från väggens motsatta sida. Mätpunkterna emellan ska vara på ett jämt avstånd från varandra med en punkt i mitten av väggen.
8. Avståndet mellan varje borrhål skall vara minst 200mm.
9. Preparering och konditionering utförs enligt [28] och/eller [29].

7.2.5 Borkärnor för bestämning av karbonatiseringsdjup

1. Betongens karbonatiseringsdjup bestäms enligt SS-EN 14630:2006 [30].
2. Följ punkt 2 i avsnitt 7.1.3.
3. Följ punkt 3 i avsnitt 7.1.3.

7.2.6 Testning av inverkan av joniserande strålning på betongens struktur

1. För att utvärdera inverkan av joniserande strålning på betongen bör tester på betongens struktur, se avsnitt 7.2.2, jämföras mellan bestrålad betong med samma typ av betong som inte utsatts för strålning. Genomförande av MIP och tunnslipsanalyser på proverna kan kräva hantering av kontaminerat material. Typ och antal provkroppar bör bestämmas i samråd med det laboratorium

som genomför provningarna. $L_{prov} \geq 100$ mm kan antas vid planeringsskedet. Även karbonatiseringsdjupet kan jämföras mellan bestrålad och icke bestrålad betong där den icke bestrålade betongen blir ett referensprov, se avsnitt 7.2.5.

2. Följ punkt 2 i avsnitt 7.1.3.
3. Följ punkt 3 i avsnitt 7.1.3.

7.2.7 Undersökning av kontaktzonen mellan tät- och bassängsplåt och betongkonstruktioner

Tunnslipsanalys kan genomföras för att bedöma strukturutveckling eller strukturförändring under årens lopp. Strukturanalys kan t.ex. visa om betongen har urlakats p.g.a. läckage av avjoniserat vatten genom kontaktzonen. Specialistlaboratorium bör kontaktas för planering av provtagning och provning. Förekomst av eventuell korrosion i tätplåt och armering i närheten av kontaktzonen kan göras genom potentialmätning, för detta kontaktas specialistlaboratorium.

7.2.8 Borrkärnor för bestämning av betongens krympning

1. Det finns ingen etablerad standard för bestämning av krympning hos en borrkärna. SS-EN 12390-16 [31] kan dock anpassas för provning på borrkärnor. Borrkärnan ska konditioneras för att få en jämn fuktfördelning i en fuktät behållare innan provning. Efter utborrning ska dubbar monteras omgående på provet och en första kontrollmätning göras av referenslängden, vartefter borrkärnan fuktisoleras.
2. Följ punkt 2 i avsnitt 7.1.3.
3. Följ punkt 3 i avsnitt 7.1.3.

7.2.9 Borrkärnor för bestämning av betongens krypning

1. Det finns ingen etablerad standard för bestämning av krypning hos en borrkärna. SS-EN 12390-17 [32] kan dock anpassas för provning på borrkärnor. Borrkärnan ska konditioneras för att få en jämn fuktfördelning i en fukttät behållare innan provning. Efter utborrning ska dubbar monteras omgående på provet och en första kontrollmätning görs av referenslängden, varefter borrkärnan fuktisolerats.
2. Följ punkt 2 i avsnitt 7.1.3.
3. Följ punkt 3 i avsnitt 7.1.3.

7.2.10 Testning av brottenergi

Det saknas en etablerad standard för testning av brottenergi, provningsmetoden som beskrivs i avsnitt 5.2.7 kan tillämpas.

7.3 PROVNING AV INJEKTERINGSBRUK I FODERRÖRET

Provning på injekteringsbruk i foderrör görs enligt SS-EN 445:2007 [33].

7.4 SPÄNNLINOR OCH SPÄNNTRÅDAR

Materialtestning av spännlinor och spänntrådar görs enligt SS-EN ISO 15630-3:2019 [34]. Spännkraft i spännkablar mäts enligt rutin på respektive anläggning.

8 Avslutande råd och rekommendationer

Betongprovningar i nedlagda reaktorinneslutningar kräver noggrann planering redan i ett tidigt skede för att säkerställa att dessa kan genomföras på ett ändamålsenligt sätt. Vad gäller det praktiska genomförandet av provningarna behöver åtminstone följande aspekter beaktas i ett tidigt skede av planeringsarbetet:

- Utförare behöver genomgå utbildning, läkarundersökning samt säkerhetskontroller för tillträde till och arbete i kärnkraftverken.
- Borrning, avverkning av betong (mekanisk bilning, vattenbilning, sömborrning samt kombinationer av dessa) och andra åtgärder i samband med provtagning i betongkonstruktioner producerar olika typer av avfall som måste tas omhand, antingen på plats eller transporteras ut från kärnkraftverken. Arbetet kräver tillstånd samt tekniska, logistiska och ekonomiska resurser.
- Processer för friklassning av provkroppar och utrustning måste planeras och utarbetas i god tid innan utförandet av provningar. Man bör även ta ställning till eventuell ersättning för utrustning som inte friklassas och därmed kvarlämnas i kärnkraftverken.
- Utveckling av provtagnings- och provningsmetoder
 - × Typ av och antal ställningsbyggnader för avverkning av betong och provtagning.
 - × Typ av och antal tält för begränsning av dammspridning.
 - × Procedurer för lagring, förprovning på plats samt packning och transport av provkroppar.
- Utveckling av metoder för in situ-mätningar.
- Laboratorieresurser
 - × Planering för emottagning, lagring, tillverkning av provkroppar, konditionering och förprovning av provkropparna.
 - × Anskaffning av tilläggsutrustning för provningarnas genomförande.

I föreliggande rapport föreslås genomförande av standardprovningar och specifika provningar. De senare är speciellt viktiga för framtida anläggningar då de t.ex. kommer tillgängliggöra viktiga data för att skapa en bättre förståelse för inneslutningars lokala och globala respons. Dessutom kan denna data användas för kalibrering och verifiering av olika typer av modeller, vilket innebär bättre möjligheter att optimera inneslutningars utformning, samt förstå och bedöma eventuella anomalier under drift. Vidare kan det tyckas att antalet prover per testad storhet som föreslås i rapporten är stort. Detta är dock en nödvändighet för att erhålla ett pålitligt statistiskt underlag. Olika normer och standarder rekommenderar vanligen ett relativt stort antal tester för att bestämma en specifik materialegenskap i en färdig betongkonstruktion, se t.ex. SS-EN 13791:2019 [35] *"Bedömning av tryckhållfasthet i färdiga betongkonstruktioner och förtillverkade betongelement"*.

9 Referenslista

- [1] N. Zaraei och P. Lundqvist, "Compilation of Concrete Test Data from the Nuclear Industry," Energiforsk, Report 2021:761, Stockholm, 2021.
- [2] T. Roth, J. Silfwerbrand och H. Sundquist, "Betonginneslutningar i svenska kärnkraftverk - En sammanställning över konstruktion och material," SKI Rapport 02:59, Statens kärnkraftinspektion, 2002.
- [3] M. Hassanzadeh, "Tests and analysis to determine residual stress in post-tensioner grouted tendons - A research program within the R&D Arena Barsebäck," Elforsk rapport, Stockholm.
- [4] G. Barslivo, E. Österberg och B. Aghili, "Utredning kring reaktorinneslutningar - konstruktion, skador samt kontroller och provningar," SKI Rapport 02:58, Statens kärnkraftinspektion, 2003.
- [5] P. Lundqvist, "Assessment of Long-Term Losses in Prestressed Concrete Structures - Applications for Nuclear Reactor Containments," Lund University, Division of Structural Engineering, Lund, Sweden, 2012.
- [6] Regulatory Guide 1.35, "In-service inspection of ungrouted tendons in prestressed concrete containments," U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC), 1990.
- [7] US 10 CFR 50 Appendix J, "Primary Reactor Containment Leakage Testing For Water-Cooled Power Reactors," United States Nuclear Regulatory Commission.
- [8] B. Sandberg, B. Sederholm, C. Taxen, J. Trägårdh och J. Tidblad, "Genomgång av potentiella korrosionsrisker för ingjuten tätplåt i reaktorinneslutningar," Energiforsk, Rapport 2019:581, Stockholm, 2019.
- [9] R. Malm, M. Åhs och M. Hassanzadeh, "Syretransport genom reaktorinneslutningar och korrosion av ingjutna tätplåtar," Energiforsk, Rapport 2021:786, Stockholm, 2021.
- [10] J. Högberg, "Korrosionsrisker i blandskarv mellan kolstål och rostfritt stål i wet-well," Energiforsk, Rapport 2020:658, Stockholm, 2020.
- [11] P. Andersson, O. Elison och O. Jovall, "Krav på funktion, konstruktion och provning av reaktorinneslutningar," SSM, Rapport 2015:44, Solna, 2015.
- [12] P. Andersson, "Utvärdering av materialdata för befintliga betongkonstruktioner - med inriktning på verifiering av förankringar vid kärntekniska anläggningar," SSM, Rapport 2015:28, Solna, 2015.
- [13] SS-EN 1992-4, "Eurokod 2: Dimensionering av betongkonstruktioner - Del 4: Dimensionering av infästningar till betong," 2018.
- [14] O. Jovall, P. Andersson, J.-A. Larsson, J. Kölfors och S. Thelandersson, "Dimensionering av nukleära byggnadskonstruktioner (DNB), Stockholm: Strålsäkerhetsmyndigheten, rapportnummer 2021:23. Tillgänglig på www.stralsakerhetsmyndighete.se, 2021.
- [15] SS-EN 1992-1-1, "Eurokod 2: Dimensionering av betongkonstruktioner - Del 1-1: Allmänna regler och regler för byggnader," CEN European Committee for Standardization, Bryssel, Belgien, 2008.

- [16] M. Hassanzadeh, R. Malm och M. Åhs, Reaktorinneslutningars respons vid höga inre tryck och reducerad förspänning, Stockholm: Strålsäkerhetsmyndigheten, rapportnummer 2018:26. Tillgänglig på www.stralsakerhetsmyndigheten.se, 2018.
- [17] G. Somerville, CONTECVET - A validated users manual for assessing the residual service life of concrete structures - Manual for assessing ASR affected concrete structures, British Cement Association (BCA), UK, 2000.
- [18] P. Ljustell och J. Wåle, Degradering i betong och armering med avseende på bestrålning och korrosion, Stockholm: Strålsäkerhetsmyndigheten, rapportnummer: 2014:31. Tillgänglig på www.stralsakerhetsmyndigheten.se, 2014.
- [19] RILEM, "FMC 1 Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams," i *RILEM Technical Recommendations for the testing and use of construction materials*, London, CRC Press, 1994.
- [20] E. de Place Hansen, E. Aassved Hansen, M. Hassanzadeh och H. Stang, "Determination of the Fracture Energy of Concrete: A Comparison of the Three-Point Bend Test on Notched Beam and the Wedge-Splitting Test," SP Report 1998:09 Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, Borås, 1998.
- [21] SS-EN 12504-1:2019, "Provning av betong i färdiga konstruktioner-Del 1: Borrkärnor-Uttag, undersökning och tryckprovning," 2019.
- [22] SS-EN 12390-6:2009, "Provning av hårdnad betong - Del 6: Spräckhållfasthet hos provkroppar," SIS, Stockholm, 2009.
- [23] SS-EN 12390-13:2021, "Provning av hårdnad betong - Del 13: Bestämning av elasticitetsmodulens sekantvärde vid tryck," SIS, Stockholm, 2021.
- [24] SS-EN 12390-7:2019/AC:2020, "Provning av hårdnad betong-Del 7: Densitet," SIS, 2020.
- [25] G. Fagerlund, "Hydratationsgraden och dess tillväxt," i *Betonghandbok material*, Stockholm, Svensk Byggtjänst, 1997, pp. 281-282.
- [26] ISO, "Evaluation of pore size distribution and porosity of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption--Part 1: Mercury porosimetry," ISO 15901-1:2016, 2016.
- [27] ASTM, "Standard Test Method for Hygroscopic Sorption Isotherms of Building Materials," ASTM C1498, 2004.
- [28] "RBK - Rådet för byggkompetens," 2023. [Online]. Available: <https://www.rbk.nu/>.
- [29] M. Oxfall, "Climate conditions inside nuclear reactor containments," Lund University, Lund, 2016.
- [30] SS-EN 14630:2006, "Betongkonstruktioner - Provning av produkter och system för skydd och reparation - Bestämning av karbonatiseringsdjup," SIS, Stockholm, 2006.
- [31] SS-EN 12390-16:2019, "Testing hardened concrete - Part 16: Determination of the shrinkage of concrete," SIS, Stockholm, 2019.
- [32] SS-EN 12390-17:2019, "Testing hardened concrete - Part 17: Determination of creep of concrete in compression," SIS, Stockholm, 2019.
- [33] SS-EN 445:2007, "Betongkonstruktioner - Bruk för injektering av foderrör för spännkablar - Provning," SIS, Stockholm, 2007.

- [34] SS-EN ISO 15630-3:2019, "Armeringsstål och stål för spännarmering - Provningsmetoder - Del 3: Spännarmering (ISO 15630-3:2019)," SIS, Stockholm, 2019.
- [35] SS-EN 13791:2019, "Bedömning av tryckhållfasthet i färdiga betongkonstruktioner och förtillverkade betongelement," SIS, Stockholm, 2019.
- [36] P. Johansson, "Fuktmätning i betong med lågt vct, steg 3," SBUF ID: 12941 & 13085, 2016.

BETONGPROVNINGAR I NEDLAGDA REAKTORINNESLUTNINGAR

Studien syftar huvudsakligen till att utveckla och ta fram en generell provningsplan för uttag och provning av provkroppar från nedlagda reaktorinneslutningar. Målet är att planen ska kunna användas vid planering inför utförande av uttag och provning av provkroppar. I tillägg är också ett mål att föreslå provningar för verifiering av olika dimensioneringsmodeller som använts vid utformning av konstruktionerna, samt de olika provningsmetoder som används under drift för att säkerställa inneslutningarnas funktionskrav.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se