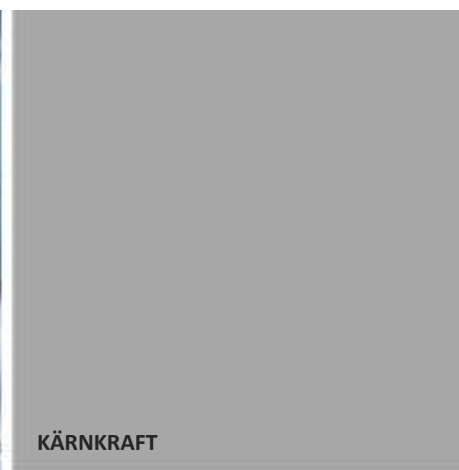


REPARATIONSMETODER FÖR KÄRNKRAFTSINDUSTRIN

RAPPORT 2015:161



Reparationsmetoder för kärnkraftsindustrin

Kartläggning

TORBJÖRN NIIA, VATTENFALL SAMT JOHAN SILFWERBRAND, KTH

ISBN 978-91-7673-161-1 | © 2015 ENERGIFORSK

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

Förord

Sedan 2007 pågår inom Energiforsk (Elforsk) ett forskningsprogram kring betongkonstruktioner inom kärnkraftverken. Det finns ett behov av att både bygga upp kompetens inom området och att utveckla teknikbasen för teknisk förvaltning av byggnader och konstruktioner inom kärnkraftsindustrin. Det övergripande målet med det betongtekniska programmet är att säkerställa avsedd livslängd och hög tillgänglighet för svenska kärnkraftverk med bibehållen säkerhet. Programmet finansieras av Vattenfall, E.ON, Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM), Teollisuuden Voima Oy (TVO), Fortum, Skellefteå Kraft samt Karlstads Energi.

Inom ramen för detta forskningsprogram har denna pilotstudie "Kartläggning av reparationsmetoder för kärnkraftsindustrin" beställts. Studien har utförts av professor Johan Silfwerbrand, KTH, samt Torbjörn Niia, Vattenfall AB.

De tio svenska kärnkraftsreaktorerna byggdes för 40-50 år sedan i en tid då kunskapen om att producera betong effektivt var större än kunskapen om betongs beständighet. Många delar av kärnkraftverken behöver renoveras och det är då viktigt att välja metoder som är ekonomiskt, tekniskt och miljömässigt de bästa. Ett exempel på en utsatt konstruktion är kylvattenvägarna. Kunskapen om reparation av hus och infrastrukturanläggningar i betong är viktig som bas för reparation av kärnkraftindustrins konstruktioner. Konstruktionerna, geometrin och därmed tillgängligheten, materialen samt den lokala miljön är dock väsentligt annorlunda än för både hus och broar, och därigenom krävs anpassade och vidareutvecklade reparationsmetoder. Föreliggande projekt syftar till att utveckla ett verktyg som ska kunna användas av industrin för att göra bästa val av reparationsåtgärd. Detta utgör en pilotstudie, och huvuddelarna handlar om en inventering av några genomförda reparationsobjekt samt deltagande i kommande reparationsobjekt.

Projektet har följts av en referensgrupp bestående av Henrik Bäckström och Philip Persson, Vattenfall Forsmark, Bengt Adolphsson och Johan Klasson, Vattenfall Ringhals, Ulrik Brandin, E.ON Oskarshamn, Jan Trägårdh, CBI, Bror Sederholm, Swerea/KIMAB samt Manouchehr Hassanzadeh, Vattenfall AB/Energiforsk AB. Energiforsk tackar referensgruppen för värdefulla kommentarer och synpunkter under projektgenomförandet.

Energiforsk i augusti 2015

Monika Adsten
Programområde Kärnkraft

Sammanfattning

Pilotstudien av reparationsmetoder för kärnkraftsindustrin startar med en genomgång av de skadetyper som återfinns i kylvattenvägar vid svenska kärnkraftverk. Eftersom vattenvägarna vilka är utförda av armerad betong befinner sig under normal vattennivå, i skvalpzon och över skvalpzonerna har betongkonstruktionerna olika förutsättningar för att motstå betongskador. För att få en beständig konstruktion i de miljöerna krävs det att man utför konstruktionerna med en tät betong med ett lågt vattencementtal (kvoten mellan mängden vatten och mängden cement). För att öka tiden tills skadliga klorider når armeringen behöver man ett tillräckligt stort täckande betongskikt.

För att kontrollera om betongreparationer är nödvändiga kan man kontrollera betongens kloridjonkoncentration vid den nivå som armeringen ligger på. Man jämför då det uppmätta värdet med ett så kallat kloridtröskelvärde för att se om det föreligger risk för armeringskorrosion. Vid bestämning av klorid-tröskelvärde är det många faktorer som spelar in. Slutsatsen är att det är svårt att fastställa ett värde som med säkerhet visar att armeringskorrosionen har startat och att den pågår. Kloridtröskelvärde uttryckt i halten kloridjoner i % av cementvikten kan i vissa fall vara så lågt som 0,2 %, enligt [15].

För befintliga betongkonstruktioner har inga andra reparationsmetoder hittats för de undersökta objekten förutom att avverka och ersätta skadad betong och armering. Vid försök har man visat att katodiskt skydd kan minska eller helt ta bort den pågående korrosionen så länge som det katodiska skyddet är verksamt. Katodiskt skydd åtgärdar dock inte en eventuell förlust av armeringsarea, sprucken eller avspjälkad betong.

Vid utförande av nya betongkonstruktioner eller betonglagningar kan man blanda in tillsatsmedel i den färska betongen. Permeabilitetsreducerande tillsatsmedel minskar betongens genomsläpplighet mot exempelvis kloridhaltigt vatten och korrosionsinhibitorer kan förlänga initieringstiden för armeringskorrosion och reducera korrosionshastigheten. Deras långtids-egenskaper är i dagsläget osäkra och det mest avgörande för betongens livslängd är att den är anpassad för den förväntade miljö.

Vid genomgång av de processer för underhållsplaner och återkommande inspektioner finns det instruktioner utarbetade både för Forsmark och Ringhals. Där har man genom tillståndsbedömningar och reparationer av kylvattenvägar tagit fram instruktioner och metoder som ska användas vid kommande inspektioner och reparationer. I Oskarshamn har man låtit CBI genomföra inspektioner och ta fram åtgärdsförslag för kylvattenvägarna.

Val av reparationsmetod för betongkonstruktioner kan göras med hjälp av en IT-baserad reparationshandbok www.betongreparation.se. Där kan man få hjälp att välja metod utifrån vilka skador som finns på betongkonstruktionerna och man kan utvärdera vilka metoder som kan vara mest lämpliga.

Summary

The pilot study of repair methods for the nuclear industry starts with an overview of the types of damage found in cooling waterways at Swedish nuclear power plants. The waterways are constructed of reinforced concrete and they are located below the normal water level, in splash zone and above the splash zone. The structures have different ability for resisting concrete damage. To obtain a resistant structure in the waterways it is necessary to make structures with a dense concrete which has a low w/c ratio. To increase the time for chlorides to reach the reinforcement a sufficient concrete cover is needed.

Before concrete repair the chloride ion concentration at the level of the reinforcement is measured and compared to the chloride threshold value to see if reinforcement corrosion may have been initiated. For determination of chloride threshold value there are many factors to consider. The conclusion is that it is difficult to determine a value which is certain to show that reinforcement corrosion has started and is ongoing. The threshold value expressed in the level of chloride ions in % of cement weight can be as low as 0,2%, according to [15].

For existing concrete structures no other repair methods have been found for the investigated objects than removing and replacing damaged concrete and reinforcement. In experiments it has been shown that cathodic protection can reduce or eliminate the ongoing corrosion as long as the cathodic protection is active. Cathodic protection does not fix the possible reinforcement area loss, cracked or spalled concrete.

When making new concrete structures or repairing existing concrete structures admixes can be added in fresh concrete to reduce the concrete permeability or prolong the induction time for the corrosion. Their long term properties are in the current situation uncertain and the most crucial for a long life time of the concrete is that it is made for the expected environment.

From earlier inspections and repairs of waterways both Forsmark and Ringhals have developed instructions and methods which could be used for maintenance and periodic inspections. Oskarshamn has commissioned CBI to inspect and create action plans for cooling waterways.

Choosing repair method for concrete structures can be done from an IT-based repair manual www.betongreparation.se. There are guidelines to choose repair method based on the damages in concrete structures and evaluate which methods that are most suitable.

Innehåll

1	Inledning	8
1.1	Bakgrund	8
1.2	Problem och tidigare forskning	8
1.3	Syfte och mål	9
1.4	Metod	9
2	Litteratur- och erfarenhetsinsamling	10
2.1	Avgränsning	10
2.2	Generella skadetyper	11
2.2.1	Betongytterskiktet som skydd mot armeringskorrosion	11
2.2.2	Betongytterskiktets beständighet mot frostangrepp	13
2.2.3	Betongytterskiktets beständighet mot kalkurlakning	14
2.2.4	Betongytterskiktets beständighet mot syror	14
2.2.5	Betongytterskiktets beständighet mot alkaliballastreaktioner	15
2.3	Ytrepåreparation av betongkonstruktioner	16
2.4	Betongens motstånd mot kloridinträngning	17
2.5	Korrosion på stål i betong	19
2.6	Metoder för bedömning av korrosionstillståndet för stål i betong	23
2.7	Katodiskt skydd	25
2.7.1	Allmänt om katodiskt skydd	25
2.7.2	Olika typer av katodiskt skydd	25
2.7.3	Termiskt sprutade offeranoder av zink	26
2.8	Korrosionsinhibitorer	28
2.9	Permeabilitetsreducerande tillsatser	28
3	Allmän beskrivning av kylning av kärnkraftverk	31
4	Instruktioner och underhållsprogram vid Ringhals	33
4.1	Underhållsprogram	33
4.2	Underhållsinstruktioner	33
4.3	Guide till Strategiska Underhållsplaner, Slakarmerad betong	34
4.4	Strategisk underhållsplan, kylvattenanläggningar	35
5	Renovering av kylvattenvägar vid Ringhals 3 & 4	37
5.1	Beskrivning av kylvattenkanaler R3 och R4	37
5.1.1	Kylvattentillopp – system 170 och 171:	38
5.1.2	Kylvattenavlopp – system 172	39
5.1.3	Översikt av Kylvattensystemen	40
5.1.4	Historik	40
5.2	Underhållsspecifikation, Renovering av kylvattenutlopp	42
5.3	Införandebeskrivning – Bygg. Dränering, besiktning och åtgärdsprogram av kylvattenavlopp	42
5.4	Besiktningssprogram för betongkonstruktioner i utloppstunnlar, R2, R3 och R4	43

5.4.1	Besiktningens omfattning	43
5.4.2	Avsyning	44
5.4.3	Inspektion och kontroll	44
5.5	Tillståndsbedömning av dränageschakt, utloppsstudsar och kylvattenavloppstunnel	46
5.5.1	Översikt	46
5.5.2	Besiktning	48
5.5.3	Resultat av betongprover	53
5.5.4	Åtgärdsförslag	55
6	Tillståndsbedömningar av kylvattenutlopp vid Oskarshamn	56
6.1	Tidiga tillståndsbedömningar inloppstunnlar, O2	56
6.2	Tidiga tillståndsbedömningar utloppstunnlar, O2	58
6.3	Utförda reparationer	63
6.3.1	Inspektion och zinksprutning av betongytor i Rensverk	63
6.3.2	Reparation av kylvattenutlopp	65
6.4	Nya tillståndsbedömningar av kylvattenutlopp	66
7	Tillståndsbedömningar av kylvattenvägar vid Forsmark	69
7.1	Tillståndsbedömningar kylvattenvägar, F3	69
7.2	Provprogram för hjälpkylvattensystem	69
7.3	Inspektion och åtgärder - hjälpkylvattenkanaler L3 och L4	70
7.3.1	Inspektion och åtgärder	70
7.3.2	Korrosionsmätningar hjälpkylvattenkanaler L3 och L4	72
7.3.3	Kloridmätning och tillståndsbedömningar hjälpkylvattenkanaler L3 och L4	76
8	Reparationsprocess enligt SS-EN 1504 och REHABCON	80
8.1	Reparationsprocessen enligt REHABCON	80
8.2	Reparationsstandard SS-EN 1504	83
8.2.1	Innehåll	83
8.2.2	Bedömning av konstruktionen	83
8.2.3	Skydd och reparationer	84
8.2.4	Utförande av reparationer	86
8.3	Genomgång av utförda reparationer	86
8.3.1	Inspektioner och tillståndsbedömningar	86
8.3.2	Krav	87
8.3.3	Tekniska lösningar	87
8.3.4	Utvärdering	89
8.3.5	Slutligt val och utförande	90
9	Diskussioner och slutsatser	91
9.1	Sammanfattning av inspektioner och reparationer	91
9.2	Slutsatser	92
10	Referensförteckning	93

1 Inledning

1.1 BAKGRUND

Sverige har idag tio kärnkraftreaktorer i drift, fyra i Ringhals, tre i Oskarshamn och tre i Forsmark. De togs i drift mellan 1972 och 1985 och är nu (2015) 30-40 år gamla. Byggtiden för kärnkraftverk är lång vilket innebär att de projekterades enligt ett regelverk som gällde på 1960- och 1970-talen, dvs. innan kunskapen om betongs beständighet var allmänt känd och inlemmad i regelverket. Svenska Betongföreningens betongrapport nr 1 – som blev banbrytande inom detta delområde – publicerades så pass sent som 1991 [1]. Krav på täthet för betongkonstruktioner i aggressiv miljö (uttryckt som ett högsta tillåtna *vct*) började först ställas 1979. Krav på minsta lufthalt introducerades 1965 och skärptes därefter två gånger, först 1979 och sedan 1988 [2]. Således är kraven skärpta för betongkonstruktioner ifall ett nytt kärnkraftverk skulle projekteras idag.

Betongen till våra kärnkraftverk uppfyller alltså inte dagens krav. Skador förekommer i många konstruktionsdelar. En typ av konstruktion som är extra utsatt är de betongtunnlar som utgör kylvattenvägar. Här tar man in kylvatten från antingen Östersjön (Oskarshamn och Forsmark) eller Nordsjön (Ringhals). Vattnet är antingen bräckt eller salt. Då vattnet passerat reaktorn har vattnets temperatur höjts ca 10°C. På vintern sker en höjning från +4°C till +15°C och på sommaren från 15-20°C till 25-30°C. Skadorna yttrar sig främst som korrosionsskador på armeringen. Korrosion är en kemisk process som går fortare vid högre temperatur. Den lokala miljön i kylvattenvägarna är mycket aggressiv och borde klassas som XS3, dvs. den högsta exponeringsklassen för korrosion i havsvatten, se [3]. Frågan är om huruvida den lokala miljön i detta fall egentligen inte är ännu mer aggressiv.

1.2 PROBLEM OCH TIDIGARE FORSKNING

Skadorna på kärnkraftverkens kylvattenvägar påminner om dem som förekommer på broar. Brobänneplattan repareras normalt genom att skadad betong elimineras genom vattenbilning och därefter ersätts med pågjutning, se t.ex. [4]-[7]. Brobänneplattans undersida och brobalkars vertikala ytor repareras ofta med vattenbilning och sprutbetong [8].

Miljöerna, skadetyperna, skadeorsakerna i kärnkraftverken är inte i detalj kända av experter inom reparationsområdet. De flesta av dem har sin kunskaps- och erfarenhetsbas inom antingen husbyggnad eller infrastruktur. Större delen av deras arbete, FoU och uppdragsverksamhet är riktad mot reparation av hus, väg, bro, tunnlar m.m. Vidare, är de sällan medvetna om de villkor som råder vad det gäller utförande av reparationer i kärnkraftverk.

Eftersom förutsättningar för kärnkraftverken och de skador som kan uppstå kan skilja sig från de skador som gäller för hus och broar krävs en kartläggning av reparationsmetoder som tar sin utgångspunkt i just kärnkraftsindustrin och den erfarenhet som finns där. Självfallet skall kunskap som finns inom hus och anläggning utgöra en bas för arbetet – en bra start är SS-EN 1504 serien (10 delar) [9] som är svensk standard – men minst lika viktigt är att utgå från verkliga reparationer av kärnkraftverk, både lyckade och mindre lyckade projekt.

Bland de projekt som Energiforsk (Elforsk) tidigare stöttat inom området kan nämnas BET 001 "Status för reaktorinneslutningar med cementinjekterade kablar", BET 104 "*Climatic conditions inside nuclear reactor containments*", BET 008 "Korrosion på stål i betong i kylvattenvägar", BET 011 "Korrosionsskydd av stål i betongkonstruktioner – Handbok" samt BET 110 "Saltinverkan på betong".

1.3 SYFTE OCH MÅL

Syftet med kartläggningen är att dra lärdomar från planerade eller påbörjade reparationsobjekt. De utgör ett värdefullt underlag för att på ett systematiskt sätt beskriva reparationsarbetena inom kärnkraftverken. De processer som berörs bör förslagsvis ligga mellan processerna för tillståndsbedömning, d.v.s. när man har bestämt sig att reparera, och reparationsarbetets färdigställande.

Utvärdering av de genomförda och de planerade reparationer kan utföras parallellt. Utföraren kan följa reparationsprocesserna, t.ex. val av reparationsmetoder, upphandling och genomförande, samt systematisera och tillhandahålla existerade kunskaper och erfarenheter av specifika reparationsmetoder.

Pilotstudien kan byggas på med ett huvudprojekt. I det projektet kan man addera på ytterligare c:a fyra reparerade objekt och lika många som skall repareras. Analysdelen fördjupas i huvudprojektet samt detaljeringsgraden på rekommendationerna.

1.4 METOD

Kartläggningen görs med hjälp av såväl genomförda som planerade eller påbörjade reparationsobjekt. Både framgångsrika och mindre framgångsrika objekt kan väljas där lärdomar kan dras från båda. Huvudmomenten inom de båda delarna är följande:

Tidigare reparerade objekt:

- Kartlägg reparationsprocesserna och jämför med rekommenderade processer (t.ex. EN 1504, REHABCON, mm).
- Undersök ifall de genomförda processerna ställdes mot några alternativ och sök ta reda på grunden för prioriteringen.
- Identifiera de delprocesser som bör förbättras/effektiviseras.
- Undersök om den valda och genomförda reparationsmetoden uppfyller ställda krav, om inte ta reda på orsakerna och föreslå åtgärder.
- Undersök om det finns nyare reparationsmetoder som kan ersätta den äldre metoden.

Kommande reparationsobjekt:

- Ta fram en reparationsprocess för objektet, t.ex. enligt SS-EN 1504, REHABCON, mm.
- Kartlägg med hjälp av experter de reparationsmetoder som är tillämpliga för det aktuella objektet.
- Ta fram krav, parametrar eller motsvarande för utvärdering av reparationsmetoderna.
- Utvärdera reparationsmetoderna.
- Välj reparationsmetod.

2 Litteratur- och erfarenhetsinsamling

2.1 AVGRÄNSNING

Inom området betongreparationer finns en stor mängd litteratur. För att avgränsa de genomgångna publikationer som finns så har detta avgränsats till faktorer och objekt kopplade till de skadetyper som författaren har deltagit i.

För rent generella skadetyper och reparationsmetoder kan utförligare information hittas i www.betongreparation.se [10]. Denna IT-baserade handbok beskriver vanligt förekommande reparationsmetoder och en enkel kvalitativ utvärdering av dessa. Initiativtagarna till den är CBI Betonginstitutet, Lunds Tekniska Högskola, Banverket, Vattenfall AB, dåvarande Vägverket och Sika Sverige AB. Under projektets gång har även ÅF och SABO deltagit i projektet. Arbetet har finansierats av Banverket, Energiforsk (Elforsk), dåvarande Vägverket och Rebet.

Litteraturstudien har koncentrerats till reparationer och skador som återfunnits inom kärnkraftsindustrin och till reparationer av konstruktioner som liknar kylvattenkanaler såsom bropelare i anslutning till vatten, kajer och dylikt.

2.2 GENERELLA SKADETYPER

Avsnittet är baserat på den IT-baserade reparationshandboken www.betongreparation.se, [10], avsnitt: Ytreparation av betongkonstruktioner – beständighet och livslängd. Avsnittet är en orientering i ämnet och för en djupare förståelse hänvisas till reparationshandboken och dess referenser, se även [11].

2.2.1 Betongytterskiktet som skydd mot armeringskorrosion

Betongens ytterskikt har till uppgift att ge tvärsnittet erforderlig tjocklek för strukturell bärlighet och att förankra armeringen. Grundläggande dimensioneringsregler och lastkombinationer återfinns i SS-EN 1990 med laster i SS-EN 1991. För betongkonstruktioner ställs krav på bärförmåga, beständighet och brukbarhet. Det ställs även krav på det minsta täckande betongskikt med avseende på beständighet hos betongkonstruktioner enligt SS-EN 1992-1-1 [12]. De exponeringsklasser som konstruktionerna delas in miljöer som konstruktionerna förväntas befinna sig i enligt SS-EN 206:2013 [13] och presenteras i Tabell 2.1.

Tabell 2.1 Val av exponeringsklass enligt [13].

Korrosion föranledd av karbonatisering		
När betong med armering eller ingjuten metall är utsatt för luft och fuktighet, skall exponeringen indelas enligt följande:		
XC1	Torr eller ständigt våt	Betong inomhus med låg luftfuktighet Betong ständigt stående under vatten
XC2	Våt, sällan torr	Betongytter utsatta för långvarig kontakt med vatten Många grundläggningar
XC3	Måttlig fuktighet	Betong inomhus med måttlig eller hög luftfuktighet Utvändig betong skyddad mot regn
XC4	Cykliskt våt och torr	Betongytter utsatta för kontakt med vatten, vilka inte hänförs till exponeringsklass XC2
Korrosion orsakad av klorider från havsvatten		
När betong med armering eller annan ingjuten metall är utsatt för kontakt med klorider från havsvatten eller luftburet salt från havsvatten, ska exponeringen indelas enligt följande:		
XS1	Utsatt för luftburet salt men inte i direkt kontakt med havsvatten	Konstruktioner nära eller vid kusten
XS2	Ständigt under vatten	Delar av marina konstruktioner
XS3	Tidvatten, skalp- och stänkzon	Delar av marina konstruktioner

”Betongytterskiktets viktigaste uppgift är att förhindra att armering och annat ingjutet stål korroderar.

Skyddet mot korrosion ska ha minst lika lång varaktighet som den önskade livslängden hos konstruktionen.” [10]

För att kunna skydda armeringen mot korrosion måste betongytterskiktet vara tillräckligt tätt mot inträngande kloridjoner och koldioxid och beständig mot exempelvis havsvatten. En opåverkad (nyttillverkad) betong har ett högt pH-värdet

som ligger mellan 12,5 och 13,5. Vid dessa höga pH-värden befinner sig det ingjutna stålet i ett passivt tillstånd. Korrosionshastigheten i stålet är i princip noll. För att då kunna initiera armeringskorrosion krävs att pH-värdet sänks i betongen genom exempelvis karbonatisering eller att kloridhalten vid armeringen överskrider en kritisk nivå, kloridtröskelvärdet.

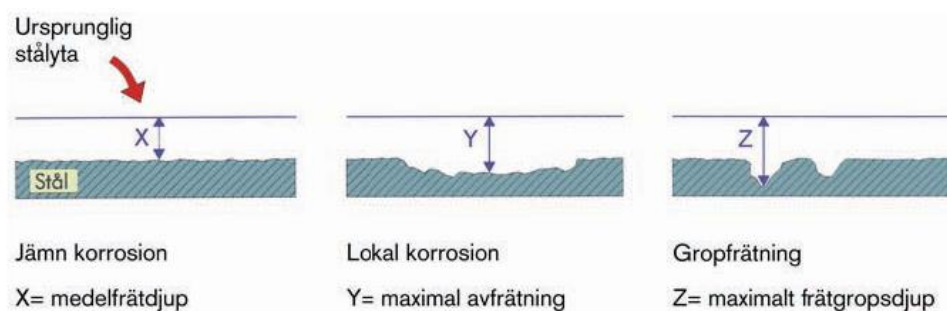
"Armeringskorrosion kan orsaka två typer av skador. Den ena är att armeringens diameter minskar och därmed även dess lastbärande förmåga. Den andra skadetyper är täcksiktssprängning och sprickbildning i betongen som orsakas av att korrosionsprodukterna har en betydligt större volym än det ursprungliga stålet." [10]

Armeringskorrosion delas in två typer; karbonatiseringsinitierad respektive kloridinitierad armeringskorrosion.

Korrosionsprocessen utveckling kan indelas i ett initieringsskede och ett propageringsskede. Stål korroderar hela tiden men det sker mycket långsamt när det är passiviserat och snabbare när passiviteten upphör. Passiviteten upphör när pH-värdet i betongen understiger 9,5, enligt [14], eller om klorider bryter oxidskiktet som bildas när stålet är passivt. Livslängden definieras här när oxidskiktet försvinner antingen genom att betongskiktets pH-värde sjunker under 9.5 genom karbonatisering eller om det förstörs av klorider.

Olika typer av armeringskorrosion

Korrosionsangreppen på det ingjutna stålet pågår i en så kallad korrosionscell, enligt [14]. Sker korrosionsangreppet jämnt över hela eller på delar av stålytan kallas det jämn korrosion (allmän korrosion). När korrosionsangreppen sker på endast några få eller endast på ett ställe är det så kallad lokal korrosion. När den lokala korrosionen koncentreras till ett litet område sker gropfrätning.



Figur 2.1 Olika typer av korrosion av stål i fuktig miljö, enligt [14].

Armeringskorrosion orsakad av karbonatisering

För att korrosion ska kunna ske måste pH-värdet vid armeringsstålets yta sänkas kraftigt, från 12,5 till 9,5. Detta kan ske genom att koldioxid från omgivande luft tränger in i betongens porer. När den reagerar med det kalkhaltiga material som finns i betongen så fås en reaktionsprodukt som huvudsakligen består av kalciumkarbonat. Denna har ett så lågt pH-värde att armeringskorrosion kan ske. Karbonatiseringsfronten sker inte jämnt fördelat över hela betongens yta vilket gör att korrosionen inte

heller sker jämnt. Täcksiktet kommer så småningom att spricka och sprängas bort på grund av att rosten har en större volym än det stål som rostar bort.

"Karboniseringshastigheten bestäms främst av betongens täthet, vilken i sin tur bestäms av betongens vattencementtal, cementtyp och fuktnivå." [10]

Armeringskorrosion orsakad av kloridinträngning

För att armeringskorrosion ska kunna ske måste kloridinnehållet vid armeringen överskrida en kritisk nivå, det så kallade kloridtröskelvärdet.

"Kloridjoner från kloridhaltigt vatten, som finns vid betongens yta, tränger gradvis in i betongen. När en tillräckligt hög koncentration av kloridjoner nått fram till armeringen blir korrosion möjlig.

Ju högre pH-värdet är i betongen desto högre koncentration av kloridjoner erfordras för att korrosion ska starta." [10]

Kloridinitierad armeringskorrosion sker till att börja med vid lokala punkter på armeringen och man får en så kallad gropfrätning. Detta kan ske mycket snabbt och minskar armeringsarean, vilket inte alltid märks på betongytan. Dessutom ger kloridinträngningen en allmän ytkorrosion som kan ge en kraftig sprickbildning och så småningom avsprängning av täcksiktet.

2.2.2 Betongytterskiktets beständighet mot frostangrepp

Betongytterskiktet kan angripas av två sorters frostangrepp, saltfrostangrepp och inre frostangrepp.

Saltfrostangrepp

Om en betongyta utsätts för frost och lösalt eller havsvatten samtidigt kan den drabbas av ytavskalning som går in i betongen vid ett upprepat antal frysningar. Det gör att det täckande betongskiktet minskar med tiden och skyddet mot armeringskorrosion också minskar. Vid långt gången ytavskalning kan armeringens förankringskapacitet minskas.

"För att betongen ska ha försumbar frostavskalning måste vattencementtalet understiga 0,45 samtidigt som den är försedd med luftinblandning som ger ett luftporsystem av hög kvalitet." [10]

Inre frostangrepp

Frostangrepp på betong kan ske om den vattenhalt som finns i betongen överskrider ett kritiskt värde med omfattande skador som följd.

"Vattencementtalet bör inte överstiga 0,50 i måttligt fuktig miljö och 0,45 i mycket fuktig miljö." [10]

Enligt SS-EN 206:2013 [13], gäller:

För måttlig vattenmättnad, exponeringsklass XF1, ställs inget krav på en lägsta lufthalt och för miljö med hög vattenmättnad, exponeringsklass XF3, kan lufthaltskravet ersättas med frysprovning.

"Man bör alltid genomföra frysförsök även i exponeringsklass XF3. Att enbart förlita sig på en viss lägsta lufthalt är mycket riskabelt." [10]

2.2.3 Betongytterskiktets beständighet mot kalkurlakning

För betong som omges av vatten kan kalkbaserade föreningar i betongen, främst kalciumhydroxid, lösas upp av det omgivande vattnet eller vatten som strömmar genom betongen, enligt [10]. Kalkurlakningen ur betongen ökar när det omgivande vattnets temperatur sänks. Den ökar även om vattnet är mjukt eller om det har ett lågt pH-värde.

En urlakad betong kan göra att kloridtröskelvärdet för armeringskorrosion sänks och kan bli så lågt som 1/10 av icke urlakad betong enligt [15].

Enligt [10] så kan man tillsätta masugnsslagg eller silikastoft till betongen som skydd mot kalkurlakning. Detta kan dock medföra negativa effekter som:

"Tillsättning av masugnsslagg försämrar saltfrostbeständigheten kraftigt.

Såväl tillsättning av masugnsslagg som silikastoft kan försämma skyddet mot armeringskorrosion genom att den kritiska kloridjonkoncentrationen minskar. Detta kompenseras dock helt eller delvis av att transportkoefficienten för kloridjoner minskar." [10]

2.2.4 Betongytterskiktets beständighet mot syror

Syror angriper betongytan och äter sig in i betongen, enligt [10]. Syran angriper de kalciumhaltiga och basiska materialen medan övriga material kvarstår. Djupet på den angripna betongen växer proportionellt mot kvadratroten ur tiden.

2.2.5 Betongytterskiktets beständighet mot alkaliballastreaktioner

Enligt [10] kan alkaliballastreaktioner i betong ge upphov till två huvudtyper av skador, inre sprickbildning och svällning på ytan. Den inre sprickbildningen bildar ett fint sprickmönster på betongytan och svällningen ger utsprängningar av betongytan i form av små kratrar, så kallade popouts.

"Ballast som innehåller alkalilöslig kiselsyra reagerar med den starkt alkaliska porlösningen i betongen. Reaktionsprodukten (en alkali-kiselsyra-gel) är starkt fuktabsorberande och sväller därför när betongen har riklig tillgång till fukt. Omfattande inre sprickbildning uppstår vilket medför hållfasthetsförlust, och som även kan försämra frostbeständigheten." [10]

Ballast som är dolomithaltig kan reagera med OH-joner i cementpastan och den svällande dolomitreaktionen är långsam.

Det finns vissa saltjoner lösta i vatten som är aggressiva mot betong och det gäller främst sulfat, ammonium och magnesium. Angreppet sker från ytan och inåt. Det är ett sprängande angrepp som kan förorsaka en omfattande sprickbildning och hållfasthetsförlust. Sulfatangrepp kan ske som ett ytangrepp med en yttre sulfatkälla, eller som ett inre angrepp orsakat av sulfater i betongens delkomponenter.

2.3 YTREPARATION AV BETONGKONSTRUKTIONER

Ytparation av betong kan ske genom pågjutningar och betonglagningar, enligt [10]. Båda metoderna bygger på att man tar bort skadad och/eller förorenad betong och ersätter den med en ny frisk betong.

Ytrepationsmetoder som kan användas utgör en eller flera av de nedan-stående reparationsprinciperna, se [10]:

"Princip 3: Reparation av betong (återställa till ursprunglig form och funktion)

Princip 4: Förstärkning (utöka eller återställa bärförmågan)

Princip 5: Fysikalisk motståndsförmåga (förbättra motståndet mot mekaniskt angrepp)

Princip 6: Motståndsförmåga mot kemikalier (förbättra ytans motståndsförmåga mot angrepp av kemikalier)

Princip 7: Bevara eller återställa passivitet hos armeringen.

Pågjutningar och betonglagningar kan delas in i ett antal olika delmoment, se nedan. Samtliga momenten behöver dock inte alltid vara med. Arbetet med en pågjutning eller betonglagning kan innehålla följande delmoment:

1. *Betongavverkning*
2. *Rengöring av betong*
3. *Sprickreparation*
4. *Rengöring av armering, Korrosionsskydd av armeringen, Komplettering av armering*
5. *Montering av dubb*
6. *Materialval (tjocklek, egenskaper, armering)*
7. *Konditionering av betongytan*
8. *Formsättning*
9. *Applicering av betong genom gjutning, utlagning eller sprutning*
10. *Härdning*
11. *Ytbehandling*
12. *Beaktande av vibrationer*
13. *Provning och kontroll*

För att resultatet ska bli fullgott måste alla för reparationen relevanta moment genomföras korrekt. Resultatet blir inte bättre än den svagaste länken. Misslyckas ett moment finns det således stor riska att slutresultatet blir bristfälligt." [10]

2.4 BETONGENS MOTSTÅND MOT KLORIDINTRÄNGNING

För betongkonstruktioner är kylvattenvägar i ett kärnkraftverk en miljö som ger höga kloridhalter i betongen. Kloridinitierad armeringskorrosion initieras när tröskelnivån för fria klorider har uppnåtts, se avsnitt 2.2.1.

Kloridinträngningen beror på vilken kloridkoncentration som finns i betongytan vilken styrs av var konstruktionen befinner sig. Klorid-koncentrationen i Östersjön varierar men som medelvärde uppgår den till ca 4 g Cl-/l och i Nordsjön uppgår den till ca 17 g Cl-/l, se [17]. Kloridhalten i skvalpzonen blir antagligen högre på grund av det ständigt pendlande från våt till torr betong.

Kloridhalten i betongen ställer sig i jämvikt med kloridhalten i den miljö som betongen befinner sig i efter långtidsexponering. I betongen förekommer då den som fri och som bunden klorid. Den fria kloriden är löst i betongens porvatten och den bundna kloriden är kemiskt och fysikaliskt bunden till betongens cementgel. Den totala kloridhalten i betongen är summan av fri och bunden klorid. Det är den fria kloridhalten som kan medföra armerings-korrosion.

Det är svårt att bestämma halten av de fria kloriderna. De tröskelvärden som används blir olika beroende på om man beaktar den fria kloridhalten eller den totala kloridhalten, se [15]. Därför baseras bedömning av korrosionsrisk oftast på total kloridhalt och det tröskelvärde som anges avser total kloridhalt.

I cementgelen finns det ett samband mellan de fria och de bundna kloriderna där de fria kloriderna i cementgelens porlösning styr mängden bundna klorider.

"Vid en given kloridhalt i porlösningen och en given temperatur binds en bestämd mängd klorider i cementgelen. Ökad kloridhalt i porlösningen medför ökad bunden klorid. Minskad kloridhalt i porlösningen medför minskad bunden klorid." [15]

Samtidigt gäller även att:

"Cementgelens förmåga att binda klorider styrs av temperaturen. Vid i övrigt konstanta förhållanden ökar mängden bundna klorider med minskad temperatur." [15]

Kloridbindningsisotermen är sambandet mellan fria och bundna klorider i betongen. Det pH-värde som betongen har påverkar betongens förmåga att binda klorider. När CSH-gelens (KalciumSilikatHydrat) struktur i betongen är oförändrad från urlakning ökar bindning av klorider och därmed ökas också betongens totala kloridhalt.

"Ökad total kloridhalt leder till ökad fri kloridhalt i porlösningen när temperaturen stiger vilken ökar risken för armeringskorrosion." [15]

När omfattande urlakning av kalciumhydroxid sker ur betongen påverkas CSH-gelens struktur och betongens kloridbindningsförmåga reduceras kraftigt. Hur stor urlakningen blir beror bl.a. på betongens täthet vilken i sin tur styrs av betongens sammansättning och produktionsförhållanden. Man kan därför få en stor spridning på betongens täthet vilket i sin tur påverkar urlakningen av betongen och dess kloridbindningsförmåga. Eftersom tröskelvärdet för korrosionsrisk styrs av flera olika faktorer t.ex. betongens hydrationsgrad, vct och temperatur, är det därför svårt att ange ett tröskel-värde som med säkerhet kan användas för att bedöma om det i konstruktionen finns risk för armeringskorrosion. Eftersom halten av bundna klorider

stys av betongens temperatur och att förmågan att binda klorider ökar med minskad temperatur så kommer halten av fria klorider i betongen att variera under ett år när temperaturer ändras. Risken för korrosion och den hastighet som korrosionen har kommer därför att variera under året, enligt [15].

För Forsmarksmiljö har tröskelvärden beräknats med antagna värden på temperatur, betongens vct och hydrationsgrad se [15]. Dessa har beräknats med avseende på totalkloridhalt och presenteras i Tabell 2.2.

Tabell 2.2 Frikloridtröskelvärde för urlakad och icke urlakad betong över resp. under vattenytan, hämtad ur [15].

PH		$[OH]$ mol/l	$[Cl_{Tf}]$ mol/l	$C_{Tf,C}$ % av cementvikt	$C_{T,C}$ % av cementvikt
Ovanför vatten	13.5	0.320	0.192	0.2	1.4
	12.5	0.032	0.019	0.02	0.5
Under vatten	13.5	0.320	0.384	0.5	1.9
	12.5	0.032	0.038	0.05	0.7

Tabell 2.3 Tröskelvärde baserat på total kloridhalt, enligt [16]. Tabellens beteckningar har anpassats till och är hämtad från [15].

Exponering, marin miljö	Tröskelvärde, $C_{T,C}$, i % av cementvikt		
	Portlandcement (CEM I) med $vct =$		
	0.5	0.4	0.3
Ständigt under vatten	1.6	2.1	2.3
Stänk- och tidvattenzon	0.5	0.8	0.9
Luftburet salt	0.5	0.8	0.9

Jämförelser med beräknade tröskelvärden och uppmätta kloridvärden i skvalpzon där armeringskorrosion redan har initierats visar att tröskelvärdena kan vara lägre än de som antagits [15]. Det finns även osäkerhet i hur länge de provningsstället har varit under eller över vattenytan. Tröskelvärdet kan vara så lågt som 0,2 Cl-/cementvikt-% för gällande objekt, enligt [15].

Olika sorters betong har använts i fältförsök för att mäta kloridinträngning enligt [18]. Det har visat sig i försöken att betong innehållande slaggcement har gett större gropfrätning på armeringen än på betong utan eller med tillsatser av flygaska och silika.

Vid fältförsöken enligt [18] har det visat sig att betong i skvalpzon med vct 0,30 har gett en högre kloridinträngning än för betong med vct 0,40. Orsaken är okänd men troligtvis har fler mindre sprickor uppstått i betongen med ett vct 0,30 och att klorider

lättare har kunnat tränga in i betongen. Eftersom hög presterande betong, med ett vct under 0,40, är mer benägen att spricka jämfört med normal betong.

Man har dessutom i [18] påvisat att genom att tillsätta 5 % silika i form av en slurry i betong med vct 0,40 sänkt den effektiva kloriddiffusiviteten med en faktor 3 till 5. Om man samtidigt sänker vct från 0,40 till 0,30 och blandar i silika så har man kunnat reducera den effektiva kloriddiffusiviteten med en faktor på 8 till 10.

I [10] har exempel på den kritiska kloridkoncentrationen i havsmiljö visats.

Tabell 2.4 Kritiska kloridkoncentrationen i havsmiljö enligt [10].

Miljö	vct	Kritisk kloridjonkoncentration ^{a)} (vikt-% av total bindemedelsmängd)	
		PC ^{b)}	PC + 8% S ^{c)}
Låg yttre kloridkoncentration Upprepad uppfuktning och uttorkning	0,45	0,7 (0,6 – 2,2) ^{d)}	0,4 (0,3 – 1,5) ^{d)}
Låg yttre kloridkoncentration Konstant hög fuktnivå	0,45	1,5 (1,5 – 2,2) ^{d)}	0,8 (0,8 – 1,9) ^{d)}
Marin miljö	0,40	0,8 (0,6 – 2,2) ^{d)}	0,5 (0,3 – 1,5) ^{d)}
Tösaltningsmiljö	0,40	0,6 (0,4 – 1,0) ^{d)}	0,3?

^{a)} Alla kloridjoner, dvs. summan av kemiskt bundna och fritt rörliga joner.

^{b)} Vanligt portlandcement

^{c)} Silikastoft

^{d)} Värden inom parantes ger osäkerhetsintervallet.

"Av tabellen framgår att tillsättning av silikastoft minskar den kritiska kloridjonkoncentrationen kraftigt. Effekten kompenseras delvis av att kloridjontransporten minskar. Den negativa inverkan är dock så stor att man om möjligt bör undvika att använda silikastoft i reparationsbetong.

Tabellen visar att en total kloridhalt understigande 0,3% av cementvikten bör ge god säkerhet mot korrosion." [10]

2.5 KORROSION PÅ STÅL I BETONG

Konstruktioner kan delas in i olika zoner, se Figur 2.2, enligt [15].

I område D är betongen helt under vatten och kan anses vara vattenmättad och i område A är betongen torr. För dessa områden är korrosionen som minst. I område A är det den låga fukthalten och i område D är det den låga syrehalten som bromsar korrosionsprocessen. Korrosionsprocessen startar om kloridtröskelvärde för respektive zon överstigs men korrosionshastigheten är låg.

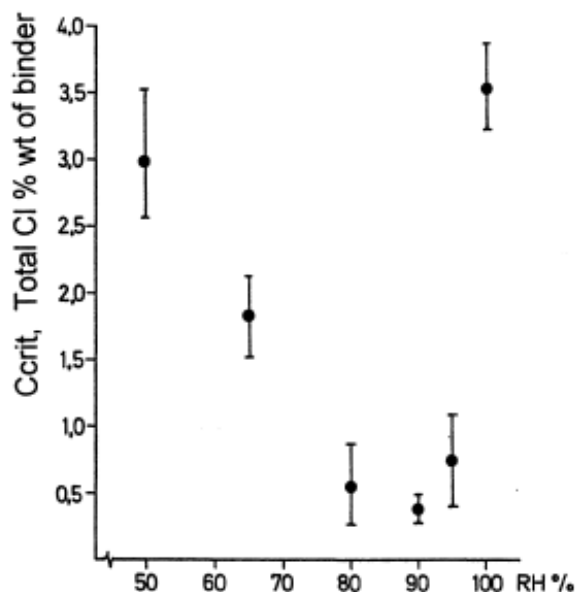
Korrosionsrisken är störst inom områdena B och C. Inom område B sugs vatten upp kapillärt och tar med sig klorider. Kloridhalten kan bli hög och i kombination med karbonatisering, med ett sjunkande pH värde minskar betongens förmåga att skydda armeringen. I område C är fukthalten relativt hög och kloridhalten är beroende av

vattennivåns variationer. Vid beaktande av dessa faktorer så har område B de bästa teoretiska förutsättningarna för korrosion.

Torr betong God tillgång till syre Låg kloridhalt Ingen risk för urlakning Lufttemperatur	A	
		Kapillär fukttransport
Fuktig betong Lagom tillgång till syre Relativ hög kloridhalt (ackumulering) Liten risk för urlakning Lufttemperatur	B	Högvattennivå
Fuktig betong Relativ dålig tillgång till syre Hög kloridhalt (ackumulering) Risk för urlakning Vattentemperatur	C	Medelvattennivå
		Lågvattennivå
Vattenmättad betong Dålig tillgång till syre Hög kloridhalt Risk för urlakning Vattentemperatur	D	Armering

Figur 2.2 Schematisk indelning av områden med varierande förutsättningar för korrosion, enligt [15].

Kloridtröskelvärdet är bland annat beroende av betongens fukthalt och visas som funktion av relativ fuktighet i Figur 2.3 enligt [18].



Figur 2.3 Inverkan av fuktighet på total kloridtröskelvärde [18].

Den mätbara korrosionen uppstår i området med 90 – 97 % relativ fuktighet, enligt försök gjorda i [19]. Vid högre eller lägre relativa fuktigheter blir korrosionshastigheterna avsevärt lägre och för att korrosionen ska bli besvärande så krävs kloridhalter som är betydligt högre än tröskelvärdet. I [19] föreslås att framtida undersökningar av kloridtröskelvärden bör utföras i 95 % relativ fuktighet med tillhörande referensprover.

I [20] har man modellerat korrosionshastigheter för vattenmättade betongkonstruktioner och där har man påvisat att korrosionshastigheterna är låga vilket även gäller vid tunna täcksikt. Vid täcksikt på 20 mm har man fått korrosionshastigheter på 0,1 μm per år. Detta kan jämföras med den beräknade korrosionshastigheten vid vattenlinjen som uppgick till 1 mm per år. Man kunde även konstatera att olika flödes hastigheter utanför betongytan gav en försumbar påverkan på korrosionshastigheten.

Experimentella försök i [20] har visat att det är ofarligt att sammankoppla kolstål exponerade för fritt vatten med armering i betongkonstruktioner. Problem kan uppstå om det är en konstruktion av rostfritt stål som är oskyddad eller ofullständigt katodiskt skyddad, vilket har noterats vid huvudkylpumpar i Forsmarks kraftstation. Det har också noterats att läckström för likströmsöverföringar kan öka risken för armeringskorrosion, speciellt för långsträckta konstruktioner där armeringen är sammanhängande.

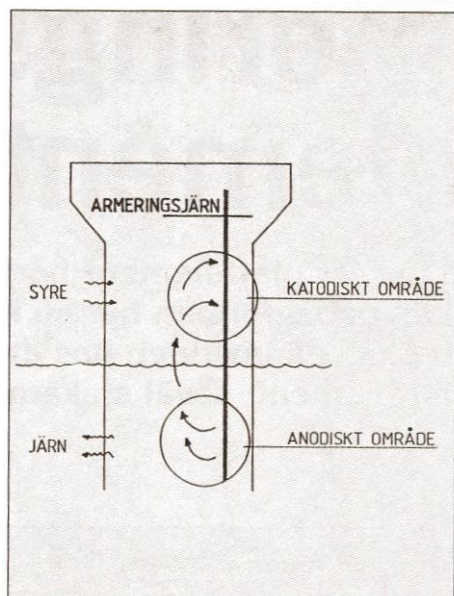
"Nära pumparna har man vidare konstaterat att, för skydd av armeringen, installerade offeranoder har en mycket högre förbrukning än anoder i övriga delar av kylvattenvägarna. Detta måste bero på att pumparnas egna katodiska skydd inte räcker till utan att "betonganoderna" får hjälpa till. Dessa anoder installerades för bara några år sedan. Innan dess har armeringen troligen offrat sig mot pumparna." [20]

Två fall av betydande armeringskorrosion i undervattenskonstruktioner har diskuterats i [20], Ölandsbron och kajkonstruktioner i Göteborgs hamn.

För Ölandsbron så har platsgjutna pelare fått armeringskorrosion både ovan och under vattenlinjen. Armeringskorrosion upptäcktes flera meter under vattenytan vilket inte kunde ha förväntats, på grund av brist på syre. Orsaken är, enligt [20], fortfarande okänd.

Angående Ölandsbron kan man läsa i [21] att:

"Även delar av bron som ligger helt under vatten, är skadade. Enligt tidigare betongkunnande skulle detta inte vara möjligt. Man trodde att armering under vatten, utan tillgång till syre, inte kunde rosta. Armeringsjärnen i en bropelare, som står i saltvatten, kan alltså vara anodiska under vattenlinjen där metallupplösning sker och katodiska över vattenlinje. Ett sådant galvaniskt element i stor skala skapas, när betongen har olika salthalt ovanför respektive under vattenytan."



Figur 2.4 Figur över galvaniskt element i stor skala, bropelare vid Ölandsbron [21].

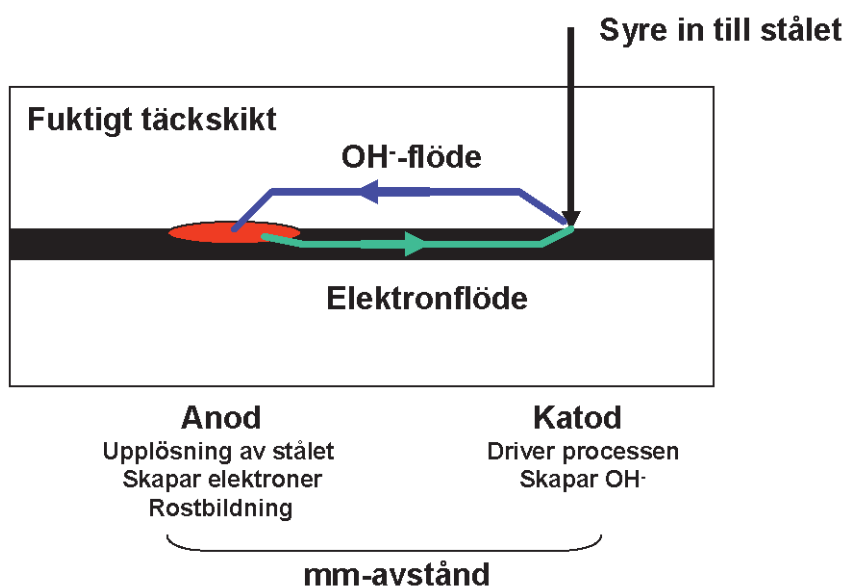
I Göteborgs hamn har kraftiga korrosionsproblem upptäckts i kajkonstruktionerna. Betongpålar som stöttar kajerna har fått kraftiga korrosionsskador långt under vattenytan. Orsaken var inte klarlagd när rapport [20] publicerades men där anger man en trolig förklaring att det är eftermonterade isskydd av rostfri plåt som omsluter pålen vid vattenlinjen. Om plåten kommer i kontakt med pålens armering så kan galvanisk korrosion göra att pålens armering långt ner kan fungera som offeranod till den rostfria plåten.

2.6 METODER FÖR BEDÖMNING AV KORROSIONSTILLSTÅNDET FÖR STÅL I BETONG

För att bedöma korrosionstillståndet i betongkonstruktioner kan man förutom besiktning och provtagning utföra mätningar av armeringens korrosions-potential och betongens resistivitet enligt [14].

- Fältmätning av betongresistiviteten
- Potentialkartering
- Linjär polarisationsresistans, LPR

Korrosionen sker i en så kallad korrosionscell som består av anodyta, katodyta och elektrolyt. Elektrolyten har kontakt med både anoden och katoden och transporterar korrosionsströmmen, vilken går mellan anod- och katodytan. Vid anoden upplöses järnet och elektroner frigörs. Vid katoden bildas hydroxidjoner vilken är löst i fuktig betong. Järnjonerna vid anoden reagera med hydroxidjonerna och bildar järnhydroxid (rost), se Figur 2.5.



Figur 2.5 Korrosionsprocessen enligt [11].

När de rätta förutsättningar för korrosion finns uppstår en skillnad i potentialen mellan anod- och katodytan. Potentialskillnaden alstrar då korrosionsströmmen och korrosionshastigheten är beroende av flera faktorer. Med en stor potentialskillnad, god ledningsförmåga i betongen och en stor katodyta i förhållande till anodytan flyter korrosionsströmmen lättare och kan ge höga korrosionshastigheter.

Man kan undersöka vilken ledningsförmåga en betongkonstruktion genom att mäta resistiviteten. Den anges som det inverterade värdet av materialets konduktivitet (ledningsförmåga), enligt [14]. När resistiviteten är låg så har materialet en god ledningsförmåga. Resistiviteten beror på en rad faktorer som vct, fukthalt, kloridhalt, temperatur, cementtyp och eventuella tillsatsmedel. En betong med hög kloridhalt har betydligt lägre resistivitet än samma betong utan klorider. För fuktig betong ligger värdena på resistiviteten mellan 20 och 60 Ωm . För en torr betong kan värdena ligga mellan 100 och 2000 Ωm .

Mätning av armeringens korrosionspotential, så kallad potentialkartering, ger enligt [14] ett snabbt besked om det finns risk för armeringskorrosion och kan utgöra ett viktigt komplement till besiktning och provtagning. Det framkommer att för betongkonstruktioner under vatten kan man få missvisande resultat pga. betongens höga fukthalt. Detta gäller även för konstruktioner som är utsatta för snö, regn och salter, t.ex. en brobana. Där varierar resistiviteten under de olika årstiderna. Om mätvärdena visar på en mycket negativ potential så är ytorna aktiva dvs. det pågår korrosion. Vid positiv potential är ytorna passiva och det pågår ingen korrosion vid mättillfället.

Vid potentialkartering så får man olika resultat för betong som befinner sig i atmosfären, så kallad luftad betong. I [20] så skiljer man på potentialer för gropfrätning och för allmän korrosion. Typiska potentialer för luftad betong finns sammanställt i Tabell 2.5.

Tabell 2.5 Potentialer för luftad betong enligt [20].

Korrosionsstadie	Uppmätt intervall för potential uppmätt relativt en referenselektrod
Passivitet ^{a)} i frånvaro av klorider	+200 mV till -700 mV
Passivitet ^{a)}	Normala värden: +100 mV till -200 mV
Gropfrätning	-200 mV till -500 mV
Allmän korrosion	-350 mV till -600 mV

^{a)} Passivitet innebär inte att ingen korrosion sker. För att upprätthålla det passiverande oxidskiktet sker en låg korrosion.

Med hjälp av Tabell 2.6 kan man bedöma vilken sannolikhet som finns för pågående armeringskorrosion.

Tabell 2.6 Utvärdering sannolikhet för pågående korrosion för luftad betong enligt ASTM C876-09, [22], hämtad från [20].

Uppmätt potential mot Cu/CuSO ₄ - Referenselektrod	Sannolikhet för pågående korrosion
-200 mV och mera positiv	Låg (10%)
-200 mV till -350 mV	Osäker bedömning ("gråzon")
-350 mV och mera negativ	Hög (90%)

"Tabellvärdena baserar sig på statistisk analys av ett mycket stort antal mätningar på brodäck i det amerikanska motorvägsnätet. Riktvärdena gäller därför endast för betongkonstruktioner i atmosfären (i luft), exempelvis broar, parkeringshus och vattentorn. Det är endast i betong i atmosfären, där syretillgången är mycket god, som så positiva potentialer kan föreligga som anges i tabellen." [20]

För vattenmättad betong som kännetecknas av en betong med låg tillgång på syre har höga negativa potentialer erhållits, ner mot -800 mV enligt [20]. Korrosionen kan fortfarande vara aktiv men med låga korrosionshastigheter.

Trots de osäkerheter som finns vid potentialmätningar är det den vanligaste metoden för att bedöma om det pågår korrosion i luftad betong.

Med LPR-metoden kan man mäta hastigheten hos pågående korrosion. Metoden är ännu inte färdigutvecklad för mätning av betongkonstruktioner i fält enligt [14].

2.7 KATODISKT SKYDD

2.7.1 Allmänt om katodiskt skydd

Avsnittet om katodiskt skydd är baserat på [14]. Katodiskt skydd är en elektrokemisk skyddsmetod som går ut på att göra det stål som man vill skydda tillräckligt elektriskt negativ vilket gör att man hindrar elektrokemiska korrosionsreaktioner. Man sänker stålytans korrosionspotential några tiondels volt och gör därmed stålet katodiskt och tar bort de anodiska partierna dvs. de korroderande ytorna.

Genom att mata en svag likström genom betongen till de stålytor som man ska skydda åstadkommer man en potentialsänkning. Likströmmen går in i stålytorna och gör dessa katodiska vilket i sin tur gör att dessa inte kan rosta.

Skyddsströmmen matas från strömelektroder, anoder, som antingen gjuts in i betongen eller ligger mot betongytan. Strömmen går via elektrolyten som i detta fallet är betongen till det skyddade stålet vilka i sin tur är ihopkopplat till anoden.

2.7.2 Olika typer av katodiskt skydd

Det finns två typer av katodiskt skydd:

Katodiskt skydd med offeranoder:

Skyddsström alstras på galvanisk väg genom att utnyttja den potentialskillnad mellan stål och en oädlare metall. I huvudsak används aluminium, zink och magnesium och för stål ingjuten i betong är det nästan bara zink som används som offeranod.

Anoden ansluts med kabel till stålet och avger en galvanisk ström. Strömgivningen gör att anoderna förbrukas och med tiden måste ersättas med nya för att upprätthålla skyddet.

Stångformade anoder fungerar i jord och vatten där man har en någorlunda god ledningsförmåga. Ovan jord och vatten har betong en hög resistivitet och ett högt ledningsmotstånd, vilket gör att stångformade anoder ger en mycket låg strömgivning och skyddet för armeringen blir nästan obefintligt. För dessa konstruktioner krävs en stor anodyta som placeras mot betongytan, vilket kan åstadkommas med termisk sprutad offeranod.

Katodiskt skydd med påtryckt ström:

Skyddsströmmen alstras av en yttre likströmskälla. De anoder som används är i det närmaste olösliga vilket gör att de har en lång livslängd. För ingjutna anoder i betongkonstruktioner i atmosfären används vanligtvis anoder av titan belagda med oxider av ädelmetall. För konstruktioner i vatten eller jord används anoder av kiseljärn. Anoderna kopplas till pluspolen på strömkällan och stålet till minuspolen. Den påtryckta strömmens spänning kan regleras enligt behov och skiljer sig för

betongkonstruktioner i luft respektive vatten. Anläggningen för påtryckt ström kräver återkommande tillsyn och övervakning.

Gynnsamma effekter:

Förutom att den katodiska skyddsströmmen är korrosionshämmande så får den negativt laddade joner, främst kloridjoner, att vandra mot anoden. Vid stålytan bildas kalciumhydroxid vilket höjer pH-värdet och förstärker det passiviserande oxidskiktet på stålet.

Negativa effekter:

Vid katodiskt skydd i vatten är strömtätheten på anoden hög vilket gör att främmande stålföremål i närheten till de katodiskt skyddade stålkonstruktionerna kan få läckströmskorrosion i de punkter där strömmen når ut till det främmande stålföremålet. Vanligtvis är risken liten för läckströmskorrosion. Det sker även en upptorkning kring anoden men i utomhusmiljöer tillförs oftast vatten från omgivningen vilket gör att ingen upptorkning sker.

Anodsystem i atmosfären:

Det finns ett antal olika anodsystem som kan användas. Vid nyinstallation är det vanligast med nät- och trådanoder som monteras på betongytan och täcks med sprutbetong. Anoden kan också gjutas in i betongen. En trådanod med kopparkärna och elledande plasthölje är ca 8 mm i diameter medans titananoder är tunnare och behöver mindre täckskikt.

För befintliga konstruktioner kan man använda punktanoder. Anoden består då av tunna titanstavar som borras in på ett nära avstånd till varandra. Anoderna kan också fräsas in i betongen och då består anoderna av en tråd exempelvis av titan. Anoden bäddas in i elledande eller vanligt bruk.

Som alternativ kan man använda kolfibernet som fästs i ett brukslager och sedan täcks med ett tunt lager bruk. Vartdera brukslager kan vara upp till 5 mm tjockt.

Termiskt sprutat zinkskikt appliceras genom att smält zink sprutas på betongytan. Kontakt fås till armeringen genom att frilägga den på ett antal ställen och koppla ihop zinkskiktet med metalledare. Tjockleken brukar ligga mellan 0,3 och 0,5 mm och livslängden kan bli upp till tio år.

Anodsystem i vatten och under jord:

Både offeranoder och anoder med påförd ström kan användas. Offeranoder används främst på konstruktioner i havsvatten där stora block av zink används som offeranoder.

2.7.3 Termiskt sprutade offeranoder av zink

För att uppnå ett gott katodiskt skydd krävs en god vidhäftning av det påsprutade skiktet. Det krävs att betongytan är torr och fri från smuts. Dessutom måste all löst sittande betong avlägsnas före sprutningen. Vidhäftningen mellan det sprutade skiktet och betongytan kan förbättras genom att betongytan sandblästras lätt, enligt [23]. Förvärmning av betongen förespråkas ofta för att ge bättre vidhäftning enligt [24].

Olika blandningar av det påsprutade skiktet kan användas eller ett rent zinkskikt (Zn). Vid provning av olika zink och aluminiumlegeringar gav en aluminium-zink-indiumlegering (AL-Zn-In) högsta strömvärdet vid ihop-kopplat tillstånd. En undersökning i utomhusmiljö i icke aggressiva miljöer gav efter ett års exponering resultatet att både ren zink och AL-Zn-In-legering hade ett gott korrosionsskydd enligt [25]. Vid skvalpzon rekommenderas en Al-Zn-In-legering enligt [26] då den har lägre egen-korrosion och längre livslängd än ett rent zinkskikt.

Enligt [26] gjordes år 2003 en installation av termisk sprutad zink i intagsbyggnaden på Forsmark 3. Tjockleken varierade mellan 0,3 och 0,5 mm och utfördes på 4 ställen med en total yta på ca 85 m². Väggarna rengjordes med högtryckstvätt och sandblåstring och före sprutningen torkades ytorna med gasolbrännare. Efter 8 års drift så togs borrhärlor från konstruktionerna. Dessa togs ur konstruktionerna 2 m ovanför normalvattenytan, vid normal-vattenytan och 0,5 m under normalvattenytan. Zinkskiktet var helt intakt på de borrhärlor tagna 2 m ovanför normalvattenytan. Borrhärlorna vid normal-vattenytan hade zinken korroderat och bildat vitrost. På de borrhärlor som togs under normalvattenytan hade zinkskiktet försvunnit. Armering som följde med borrhärlorna visar att ovanför och vid normalvattenytan är den helt oangripen av korrosion. Under normalvattenytan hade armeringen angripits av korrosion. Vidhäftningsprov av zinkytorna togs och för alla tre ställena visade en god vidhäftning där värdena varierade från 1,65 MPa 2 m ovanför normalvattenytan till 1,25 MPa 0,5 m under normalvattenytan. För provet under normalvattenytan bör man beakta *"att Zn-skiktet nästan är förbrukat genom egenkorrosion."* Enligt [26].

Det man konstaterade var att:

- Termiskt sprutat zinkskikt har en god vidhäftning mot betong.
- Skyddsförmågan hos zinkskiktet bedöms vara god. Detta gäller dock inte för ytor som exponeras under vattenytan.
- Transporten av klorider in till armering påverkas inte nämnvärt av det sprutade zinkskiktet.
- Att använda katodiskt skydd med termiskt sprutade offeranoder ger goda möjligheter för att skydda betongkonstruktioner.
- Livslängden bedöms vara över 11 år för konstruktioner som utsätts för stänk av vägsalt och bräckt vatten. För konstruktioner nedsänkt i bräckt vatten understiger livslängden 8 år.

2.8 KORROSIONSINHIBITORER

En inhibitor är en kemisk substans som kan fördröja initieringen av armeringskorrosion och/eller minska korrosionshastigheten. Man kan blanda in den i en i färsk betong eller applicera den på en befintlig betongyta. Vid användning av inhibitorer bör man ha i åtanke på de skadliga effekter på miljön som kan uppstå från dessa ämnen om det exempelvis innehåller kromater, se [27].

Enligt [28] har inblandning av inhibitorer i färsk betong haft goda resultat i Amerika, Japan och i Mellanöstern. Däremot har inhibitorer som applicerats på färdiga betongytor inte haft några bättre resultat.

Inhibitorerna finns både som organiska och oorganiska. De kan dessutom delas in i tre typer: Anodisk, katodisk och en blandning av anodisk och katodisk. De anodiska inhibitorerna gör att potentialen blir mer positiv men rätt mängd måste blandas in annars kan korrosionen accelerera på anodens sida. Katodiska inhibitorer reducerar de katodiska reaktionerna och potentialen blir mera negativ. Blandade inhibitorer reducerar både de anodiska och katodiska reaktionerna.

För armerad betong kan man dela in dessa i hur de fungerar:

- Absorberande inhibitorer agerar som anodisk, katodisk eller blandad inhibitor.
- Filmskapande inhibitor som blockerar både anodisk och katodiska reaktioner.
- Passivatorer vilka leder till passivering av armeringsstålet.

Enligt [28] har korrosionsinhibitorer använts för att skydda stålkonstruktioner som tankar, pipelines, etc. över flera decennier. För stål i betong är användningen inte lika lång och effekterna är inte lika goda.

De kommersiella produkter som finns på marknaden har oftast testats i laboratorium med goda resultat, men det är noterbart att laboratorietester inte speglar den verkliga miljön. Den bästa metoden att bestämma inhibitorens skyddande förmåga är att mäta potentialen eller den linjära polarisationen. Det saknas fortfarande fältstudier som kan visa inhibitorernas förmåga att skydda stål i betong, enligt [28].

Frågor som kvarstår är hur doseringen av inhibitorn utförs med tanke på vilka kloridtröskelvärden som man kan förvänta i den tilltänkta konstruktionen. Med tanke på att armeringskorrosion kan förväntas att initieras efter 20 till 30 år eller längre, hur mycket av inhibitorn återstår i betongen när den behövs. När korrosionen redan har startat så finns det inga undersökningar som visar att inhibitorn kan reducera korrosionshastigheten enligt [28].

Enligt [29] har ett flertal tester gjorts på ytbelagda inhibitorer som ska transporteras in till den korroderande armeringen och stoppa eller reducera den pågående korrosionen. För att lyckas med behandlingen krävs det höga koncentrationer och lång behandlingstid för att reducera den aktiva korrosionen.

2.9 PERMEABILITETSREDUCERANDE TILLSATSER

En väl proportionerad och hydratiserad betong med lågt vct ger en betong med god hållbarhet och låg permeabilitet men ingen betongkonstruktion är helt vattentät, enligt [29]. Eftersom betong är ett poröst material, kan vatten tränga in genom porer och mikrosprickor, genom kapillär sugning eller från ett hydrostatiskt tryck.

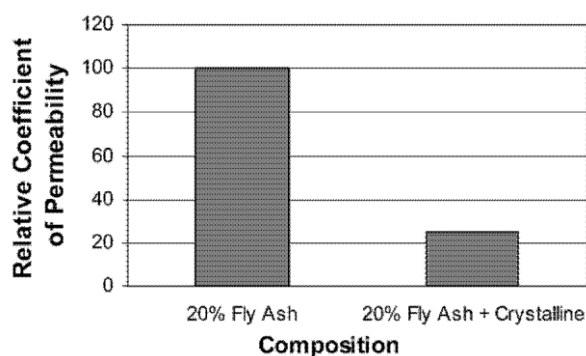
För att minska vatteninträngningen i betongen har permeabilitetsreducerande tillsatser, PRA, utvecklats enligt [29]. Genom att minska fuktens och vattnets rörelse och reducera inträngande av kloridjoner kan man förbättra betongens hållbarhet. PRA kan delas upp i två underkategorier:

- PRA för betong som inte är exponerad för vattentryck = PRAN
- PRA för betong exponerad för vattentryck = PRAH

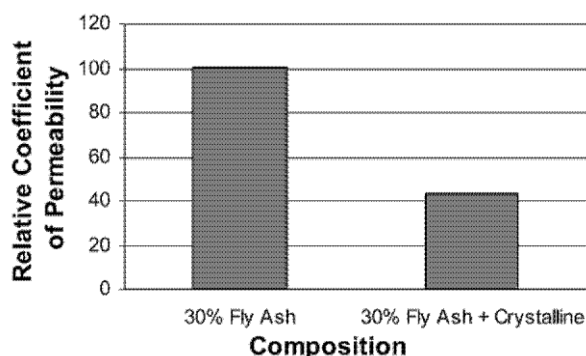
Enligt [29] delas PRA in med verksamma ämnen som:

- Hydrofoba eller vattenavvisande kemikalier vilka skapar ett vattenavvisande skikt längs porer i betongen, men porerna förblir fysiskt öppna. Gruppen baseras på tvålprodukter och långkedjade fettsyra-derivat, vegetabiliska oljor och petroleum.
- Finfördelade fasta ämnen innefattar material såväl inerta som kemiskt aktiva fyllmedel t.ex. talk, bentonit, kiselhaltiga pulverkalk, silikater och kolloidal kiseldioxid. De finfördelade fasta ämnena agerar som fyllnadsmedel som fysiskt begränsar passage av vatten genom porerna.
- Kristallina material som består av aktiva kemikalier vilka kan vara varumärkesskyddade. Kemikalierna levereras i en bärare av cement och sand. Den hydrofila naturen hos dessa material får dem att öka tätheten av kalciumsilikathydrat och/eller generera portätande insättningar vilka ska motstå vatteninträngning.

Vid prover av permeabiliteten för betong med inblandat flygaska samt flygaska och en kristalliserande tillsats har man påvisat en reduktion av permeabiliteten, enligt [29], se Figur 2.6 och Figur 2.7.



Figur 2.6 Permeabilitet för betong med en kristalliserande tillsats och/eller 20 % flygaska enl. [29].



Figur 2.7 Permeabilitet för betong med en kristalliserande tillsats och/eller 30 % flygaska enl. [29].

Valet av en PRA beror på de yttre förhållandena. Då betongen utsätts för en liten mängd vatten med tryck eller inget vatten är hydrofoba och vattenavvisande PRAN ofta tillräckliga.

Vid anläggningar med vattenlagring, t.ex. dammar som exponeras för hydrostatiskt tryck väljs med fördel ett PRAH som tätar genom att kristallina formationer bildas i betongen och blir en permanent del av den, enligt [29]. Kristallstrukturerna tätar mot inträngning av vatten från hydrostatiskt tryck. Kristallerna är fortsatt aktiva och i närvaro av fukt så självvtätar sig dessa sprickor.

PRAH är lämplig för vatteninneslutande strukturer, underjordskonstruktioner, tunnlar och tunnelbanor, broar och dammar, och fritidsanläggningar med akvarium. Dessa tillsatser med en riktigt proportionerad blandning med vct på 0,45 eller mindre tål generellt aggressiva miljöer med exponering för salt och många aggressiva kemikalier. " [29]

Resultat av reduktion för permeabilitet i betong visas i Tabell 2.7.

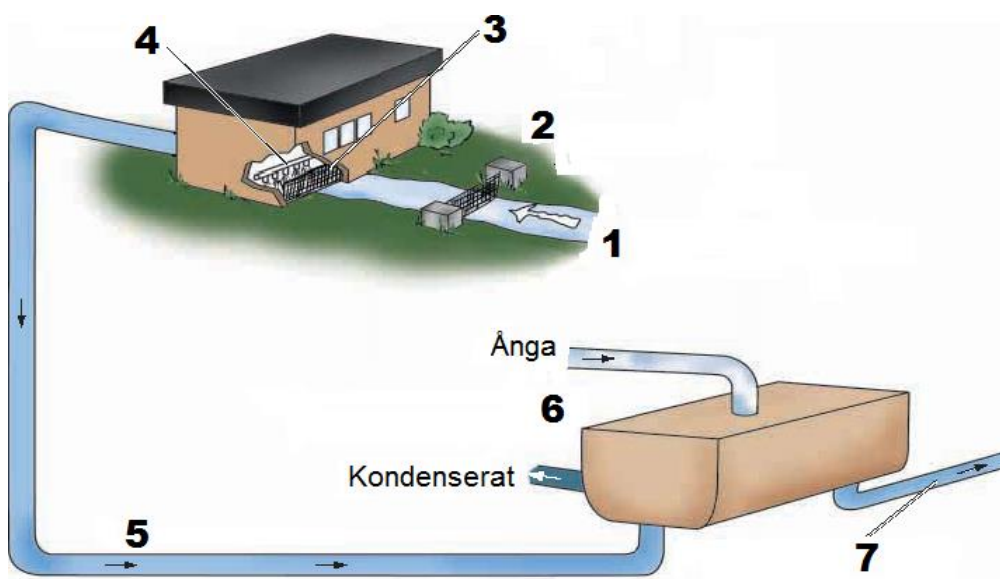
Tabell 2.7 Reduktion av permeabilitet i betong med PRA, [29].

Typ av tillsats	Permeabilitets-koefficient för referensprover	Permeabilitets-koefficient för betong-prov med PRA	Reduktion av permeabilitet i %
Kristalliserande	$4,29 \times 10^{-14}$	$1,28 \times 10^{-14}$	70
Kolloidal silika	$1,98 \times 10^{-13}$	$1,61 \times 10^{-13}$	19
Hydrofobisk porblockerare	$2,23 \times 10^{-12}$	$1,14 \times 10^{-12}$	49

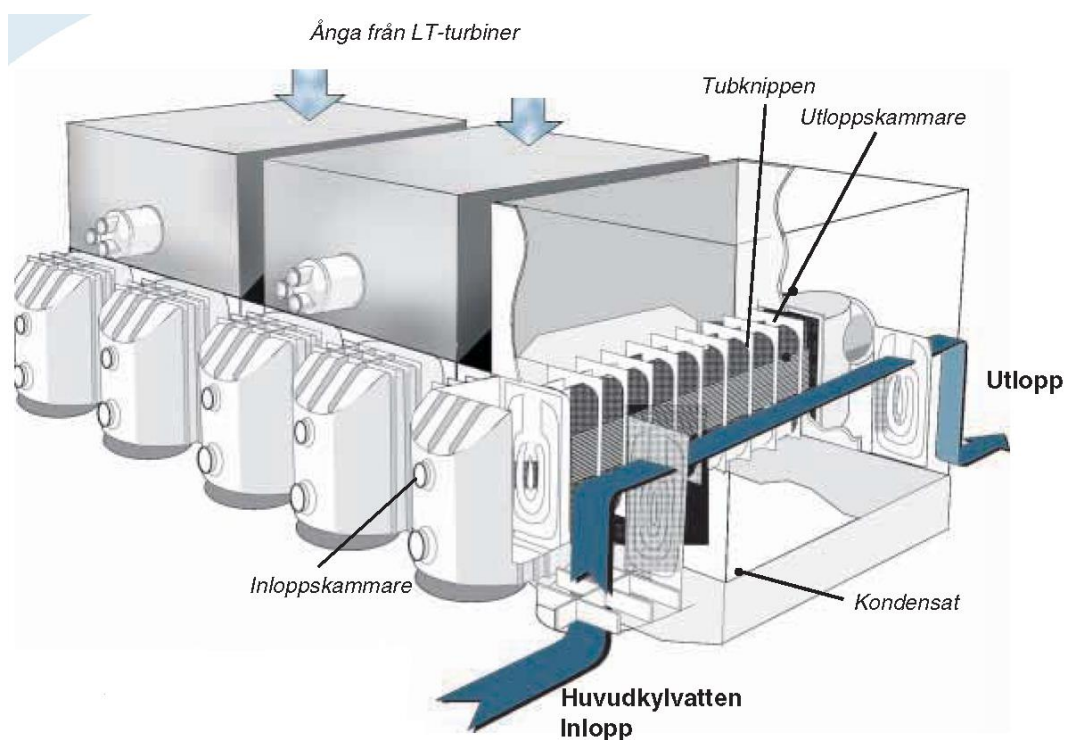
3 Allmän beskrivning av kylning av kärnkraftverk

Allmän beskrivning av kylning av kärnkraftverk, se Figur 3.1.

1. Kylvatten från havet leds in till intagsbyggnaden via kylvatteninlopp med ca 20 – 60 m³/s för varje turbin.
2. Rensgaller grovrensar vattnet.
3. Finrensning sker i intagsbyggnaden.
4. Ev. dosering av ämnen för att minska påväxt i systemet.
5. Från tillloppstunnel pumpas vatten till kondensorn som ligger i turbinbyggnaden.
6. Kylvattnet upptar värme från ångan som passerar turbinanläggningen. Det kondenserade vattnet pumpas tillbaka in i anläggningen, se Figur 3.2
7. I avloppstunneln går kylvattnet ut i havet igen. Det utgående vattnet är ca 10°C varmare än det ingående vattnet.



Figur 3.1 Princip för kylvatten i ett kärnkraftverk, enl. utbildningsmaterial från KSU [30].



Figur 3.2 Vattenflödet i kondensorn, enl. utbildningsmaterial från KSU [30].

4 Instruktioner och underhållsprogram vid Ringhals

4.1 UNDERHÅLLSPROGRAM

Underhållsprogram finns för Ringhals reaktorinneslutningar samt för övriga säkerhetsrelaterade byggnadsstrukturer inklusive kylvattenvägarna.

Underhållsprogrammet, [31], vilka har utarbetats för kylvattensystem som exempelvis kanaler, tunnlar och skumbalkar. Där sammanställs alla kontroller av byggrelaterade system vars funktion är att säkerställa kylvattentillförsel.

De instruktioner som styr kontrollerna listas tillsammans med de inspektionsintervall som ska tillämpas. Det finns även angivet riktlinjer för hur de tillämpade instruktionerna ska vara utformade.

I programmet har ett kontrollintervall för respektive byggnadsdel tagits fram. Det framgår även att det kan vara motiverat med tätare kontroller för nya eller reparerade konstruktioner. T.ex. bör reparerade betongkonstruktioner inspekteras ca ett år efter reparation.

Kontrollintervallerna varierar mellan en gång per år till en gång var 6:e år beroende på konstruktionernas betydelse.

4.2 UNDERHÅLLSINSTRUKTIONER

Hjälpkylvattentunnlar för R1 - R4 har en underhållsinstruktion, [32], där man anger att inspektionsintervallet för respektive hjälpkylvattentunnel besiktigas vartannat år.

Syftet med byggnadsbesiktningen för säkerhetstekniska förutsättningar (STF) är att säkerställa att anläggningens kylvattenvägar är driftklara och identifiera slumpmässiga fel i anläggningen. Besiktningen omfattar endast inspektion av kylvattenvägarna.

Vid inspektion av tunnarna ska dessa vara fria från större synliga skador. Om större skador misstänks ska dessa kontrolleras och utvärderas. Om mindre rostutfällningar eller sprickor återfinns och det bedöms inte påverka tunnelns funktion fram till nästa besiktning är dessa tillåtna.

Ingen kontroll utförs dvs. inga provtagningar görs om inte det finns misstanke om mer omfattande skador.

Besiktning:

Besiktningen dokumenteras i ett besiktningsprotokoll, vilket innehåller relevanta uppgifter för byggnaden/konstruktionen, iakttagelser, mätvärden, provningar eller konstruktionens status. Besiktningen delas in i inspektion och kontroll.

Inspektion:

- Sprickor i betongen undersöks
- Släppor från sprutbetong kontrolleras. Vid tveksamhet om vidhäftningen mot berg utföres provdragning

- Dold armeringskorrosion och vidhäftningsbrister kontrolleras med bom-knackning
- Injekteringsfogar undersöks
- Kontroll av eventuella korrosionsproblem map. ingjuten armering
- Övrigt, t.ex. uppskattad mängd "rens"
- Dilatationsfogar undersöks
- Gjutskarvar undersöks

Kontroll:

- Kontroll av betong genom uttag av borrhärdar. Dessa skickas till laboratorium för analys. Vid analys undersöks kloridhalt och eventuell rostgrad på armering.
- Kontroll av katodiska skyddet med offeranoder, referensanod vägs
- Renspolning av dränagerör
- Kontroll/rengöring av bubbelrör utförs enligt instruktioner

När instruktionen gått igenom och inga kvarstående anmärkningar finns i besiktningsprotokollet gäller det, signerat och vidimerat, som driftklarhetsverifierande dokument.

4.3 GUIDE TILL STRATEGISKA UNDERHÅLLSPÄNOR, SLAKARMERAD BETONG

Guiden, [33], innehåller en genomgång av materialegenskaper, exponerings-miljöer, degraderingsmekanismer, provningsmetoder och reparationsmetoder baserat på Betonghandboken. Tabell 4.1 är hämtat ur dokumentet.

Tabell 4.1 Guide till provningsmetoder kopplade till nedbrytningsprocesser enligt [33].

Nedbrytnings-process	Symtom	Rekommenderade provningar	
		Prov	Skadebedömning
Ballastreaktioner	Sprickor	Kärnborrhprov	Visuell Ultraljudsmätning Stötvågsmätning Modalanalys
Sulfatangrepp	Sprickor	Kärnborrhprov Kemisk analys	Visuell Ultraljudsmätning Stötvågsmätning Modalanalys
Urlakning	Vittrade ytor Kalkavlagringar	Kärnborrhprov	Visuell
Bas, syra och saltkristallisering, betong	Förlust av cementpasta	Kärnprov Kemisk analys	Visuell
Fuktförändringar	Sprickbildning	Kärnborrhprov	Visuell Infraröd termografi Stötvågsmätning Modalanalys
Frostangrepp	Flagning Spjälkning Sprickbildning	Kärnborrhprov	Visuell Ultraljuds och puls-hastighetsmätning Stötvågsmätning Modalanalys

Nedbrytnings-process	Symtom	Rekommenderade provningar	
		Prov	Skadebedömning
Värmeexponering och cykling, betong	Spjälkning Hållfasthetsminskning	Kärnborrprov	Visuell Ultraljuds och pulshastighetsmätning Stötvågs-mätning
Nötning Erosion Kavitation	Ytavnötning	-	Visuell
Utmattningsvibrationer, betong	Mikrosprickor Sprickor Deformation	Kärnborrprov	Visuell Ultraljuds och pulshastighetsmätning Stötvågs-mätning
Krypning, armering	Sprickor Deformation	-	Visuell Modalanalys
Korrosion	Korrosion	Kärnborrprov Elektrisk potentialmätning Kemisk analys Nukleär mätmetod	Visuell Stötvågs-mätning Radiologisk mätmetod
Korrosion	Sprickor Delaminering	Kärnborrprov Stötvågs-mätning	Visuell Infraröd termografi Stötvågs-mätning Modalanalys

4.4 STRATEGISK UNDERHÅLLSPÅN, KYLVATTENANLÄGGNINGAR

En strategisk underhållsplan, SUP 17 [34], har tagits fram för Kylvatten-anläggningar - system 185 för R1/R2, samt för R3/R4, Kylvattentillopp – system 170, Intagsbyggnad – system 171 och Kylvattenavlopp – system 172. Enligt underhållsplanen så ska kylvattenanläggningarna vara prioriterade system för att kunna hålla en stabil och säker drift. Det ordinarie underhållsprogrammet, UP se avsnitt 4.1, innefattar fortlöpande tillsyn och kontroll samt hantering av åldersrelaterade försämringar och skador.

Syftet med SUP:en är att den ska fånga upp underhåll som de återkommande kontrollerna och besiktningarna inte gör. Den behandlar därför långsiktiga och återkommande åtgärder och det är tänkt att SUP:en ska styra underhållsprogrammet i framtiden. Den ska innefatta tydliga krav och förutsättningar för underhållet samt baseras på analys av historiska erfarenheter, aktuell status och underhållsbehov.

I SUP 17 beskrivs ingående byggnadsdelar med avseende på funktion ungefärliga storlekar, flöden, materialkvalitet och exponeringsklass. Där listats aktuell status, kända degraderingsmekanismer forskning- och utvecklingsbehov, underhållsanalyser, framtida underhållsbehov, planerad livslängd och värdering av risker.

Strategin för SUP är att:

- Underhållsprogram ska följas och hållas aktuellt.
- Underhållsarbetet dokumenteras och förs in i ett dokumenthanterings-system.

- Tillståndsbedömningar ska göras så att en livslängduppskattning av anläggningen kan göras.
- Skador som hittats på anläggningen ska repareras för att inte förvärra omfattningen på skadorna.

5 Renovering av kylvattenvägar vid Ringhals 3 & 4

5.1 BESKRIVNING AV KYLVATTENKANALER R3 OCH R4

Beskrivning av konstruktionerna är hämtade från SUP 17 [34].

Kylvattenanläggningarna för Ringhals består av byggnader, tunnlar och kanaler. För Ringhals 3 och 4 består de av tre system 170, 171 och 172.

System 170 ska leda fram kylvatten till system 171, intagsbyggnaderna 3 och 4. Därifrån leds det renade huvud- och hjälpkylvattnet till block 3 och 4.

System 172 ska avleda det använda och uppvärmda kylvattnet från block 3 och 4 genom avloppstunnlar (kylvattenavlopp) till Kattegatt. Kylvattnet kan även återledas till intagskanalen genom tunnlar för återanvändning av kylvattnet.

För en mera ingående beskrivning av systemen och för schematiska bild av kylvattenkanalerna, se [34].

5.1.1 Kylvattentillopp – system 170 och 171:

Intagskanal 170L1 leder kylvatten från havet till intagsbyggnaderna 3 och 4. Kanalen är huvudsakligen sprängd i berg och den är ständigt havsvattenfylld.

Huvudkylvattentillopp, 3-170L2 startar ifrån intagsbyggnad 3. Den för kylvatten till pumpstationerna för huvudkylvatten till block 3. Tunneln är sprängd ur berg och utförd som platsgjuten betongtunnel. Där tunneln ansluter till turbinbyggnaden, finns partier i tunneln där den är exponerad från luft på tunnelns utsida samtidigt som tunneln invändigt är havsvattenfylld. Tunneln tilldelas exponeringsklass XS2, ständigt havsvattenfylld och tunnelns schakt tilldelas exponeringsklass XS3, skvalpzon. Med ständigt vattenfylld så är kanalerna eller tunnarna vattenfyllda förutom vid de revisionsavställningar där de torrläggs för inspektion eller underhåll.

Hjälpkylvattentillopp, 3-170L3 startar från intagsbyggnad 4. Den för kylvatten till pumpstationerna för hjälpkylvatten till block 3. Tunneln är sprängd ur berg och utförd som platsgjuten betongtunnel. Där tunneln ansluter till turbinbyggnaden, finns partier i tunneln där den är exponerad från luft på tunnelns utsida samtidigt som tunneln invändigt är havsvattenfylld. Tunneln tilldelas exponeringsklass XS2, ständigt havsvattenfylld.

Huvudkylvattentillopp, 4-170L2 startar från intagsbyggnad 3. Den för kylvatten till pumpstationerna för huvudkylvatten till block 4. Tunneln är sprängd ur berg och utförd som platsgjuten betongtunnel närmast intags- och turbinbyggnaden. Övriga delar är sprutbetonerade. Där tunneln ansluter till turbinbyggnaden, finns partier i tunneln där den är exponerad från luft på tunnelns utsida samtidigt som tunneln invändigt är havsvattenfylld. Tunneln tilldelas exponeringsklass XS2, ständigt havsvattenfylld.

Hjälpkylvattentillopp, 4-170L3 startar från intagsbyggnad 3 och den för kylvatten till pumpstationerna för hjälpkylvatten till block 4. I övrigt är den utförd lika hjälpkylvattenutlopp 3-170L3.

Intagsbyggnaderna 3, system 171, har till uppgift att rena huvudkylvattnet till block 3 och 4. Intagsbyggnad 4 har till uppgift att rena hjälpkylvattnet. Intagsbyggnad 3 och 4 är integrerade i samma konstruktion.

5.1.2 Kylvattenavlopp – system 172

Huvudkylvattenavloppstunnel 3-172L1 leder det använda och uppvärmda kylvattnet från block 3 till svallbassäng 172T1. Tunneln är sprängd ur berg där tak och väggar är sprutbetonerade. Bottenplattan är utförd med platsgjuten betong. Tunneln tilldelas exponeringsklass XS2, och är ständigt havsvattenfylld med tempererat använt kylvatten.

Huvudkylvattenavloppstunnel 4-172L1 leder det använda och uppvärmda kylvattnet från block 4 till svallbassäng 172T1. I övrigt är den utförd lika huvudkylvattenavlopp för 3-172L1.

Svallbassäng 172T1 fungerar som ett utjämningsmagasin för kylvattenflödet. Svallbassängen är utsprängd i berg och dess överyta ligger mellan +100,0 och +102,0. Svallbassängens övre del upp till +103,0 utgörs av en betongmur försedd med räcke.

Tunnel 3-172L3 avleder hjälpkylvattnet från block 3 till huvudavloppet 172L2 och är utförd som bergtunnel.

Tunnel 3-172L4 leder uppvärmt hjälpkylvatten från block 3 till recirkulationstunnel 172L5. Därifrån leds vattnet vidare till intagskanalen för att hindra isbildning. Den är utförd som bergtunnel.

Tunnel 4-172L3 avleder hjälpkylvattnet från block 4 till huvudavloppet 172L2 och är utförd som bergtunnel.

Tunnel 4-172L4 leder uppvärmt hjälpkylvatten från block 4 till recirkulationstunnel 172L5. Därifrån leds vattnet vidare till intagskanalen för att hindra isbildning. Den är utförd som bergtunnel förutom första delen närmast block 4 vilken är utförd som en betongkulvert. Tunneln tilldelas exponeringsklass XS2, och är ständigt havsvattenfylld med tempererat använt kylvatten.

Tunnel 172L5 leder uppvärmt hjälpkylvatten från block 3 och 4 till intagskanalen för att hindra isbildning. Den är utförd som bergtunnel med undantag för tunnelns utlopp. Tunneln tilldelas exponeringsklass XS2, och är ständigt havsvattenfylld med tempererat använt kylvatten.

Från tunnel 172L6 och 172L8 kan hjälpkylvatten alltid tas in från havet. De används även för att återföra uppvärmt kylvatten till intagskanalen. Tunnel 172L6 är ansluten till svallbassäng 172T2 är utförd som bergtunnel.

Genom tunnel 172L7 kan hjälpkylvatten alltid tas in från havet och den är ansluten till intagsbyggnaden. Den är utförd som bergtunnel.

Svallbassäng 172T2 fungerar som ett utjämningsmagasin för anslutna hjälpkylvattentunnlar. Bassängen är utsprängd i berg och övre delen av svallbassängen består av grov stenfyllning.

Huvudavloppstunnel 172L2 leder använt, uppvärmt kylvatten från svallbassäng 172T1 ut i Kattegatt. Den är utförd som bergtunnel.

5.1.3 Översikt av Kylvattensystemen

I Tabell 5.1 och Tabell 5.2 har exponeringsklasser och materialdata sammanställts.

Tabell 5.1 Exponeringsmiljöer för betongkonstruktioner enligt SUP 17, [34].

Nivå	Exponeringsmiljö:	Exponeringsklass:	Korrosivitetsklass:
+80,5 - +99 ^{b)}	Havsvatten	XS2	Im2
+99 - +103,0 ^{b)}	Skvalpzon	XS3 + XF4 ^{a)}	C5-M
+ 103 ^{b)} -	Marin miljö	XS1	C5-M

^{a)} Exponeringsklass för frysning gäller för utomhuskanaler

^{b)} Nivåerna är generellt angivna och en viss variation kan finnas för enskilda konstruktionsdelar.

Tabell 5.2 Betongkvaliteter enligt SUP 17, [34].

Tunnel	Betongkvalitet:	Armeringskvalitet:	Täckande betongskikt:
3-170L2	K300, vattentät, LH-cement	Ks40	50 mm
3-170L3	K300, vattentät, LH-cement	Ks40	50 mm
4-170L2	K300, vattentät, LH-cement	Ks40	30 - 60 mm
4-170L3	K300, vattentät, STD-cement	Ks40, Ks40S	30 - 60 mm
3-172L1	K300, vattentät, LH-cement	Ks40	60 mm
4-172L1	K300, vattentät, LH-cement	Ks40	60 mm
172T1	Ingen uppgift	Ingen uppgift	Ingen uppgift
3-172L3	Bergtunnel	-	-
3-172L4	Bergtunnel	-	-
4-172L3	Bergtunnel	-	-
4-172L4	Bergtunnel, Ingen uppgift	-	-
172L5	K300, vattentät, LH-cement	Ks40	45 mm
172L6	Bergtunnel		
172L7	Bergtunnel		
172L8	Bergtunnel		
172T1	Ursprängd ur berg		
172L2	Bergtunnel		

Hållfasthetsklasser för betong och stålqualiteter har ändrats sedan byggnationen. En betong med angiven som K300 kan motsvara en betong med hållfasthetsklass C25/30 enligt dagens gällande norm, jämfört med BBK94. Armeringsstål Ks40 och Ks40S har en sträckgräns mellan 370 – 410 MPa beroende på diametern. Ks40S är ett svetsbart armeringsstål. Nps50 är ett svetsat armeringsnät som har en sträckgräns på 510 MPa.

5.1.4 Historik

I den strategiska underhållsplan, SUP 17 [34], har man gått igenom de olika konstruktionernas kondition och vilka åtgärder som har utförts på dessa.

Intagsbyggnad 3 och 4:

Det har konstaterats att samtliga konstruktionsdelar upp till bjälklaget på nivå + 103 har korrosionsskador. Reparationer har pågått och pågår kontinuerligt. Katodiskt skydd ovanför vattenlinjen bör ses över för att säkerställa att det fungerar.

Huvudkylvattentillopp, 3-170L2:

Bommar och mindre betongsläpp och synliga injekteringsslangar har noterats och de flesta har reparerats. År 2007 frilades armeringen i ett bområde men armeringen hade inga tecken på korrosion. År 2005 försågs tunneln med katodskydd/offeranoder.

Huvudkylvattentillopp, 4-170L2:

1987 utfördes kontroll av sprutbetongens vidhäftning mot berg på några slumpvis utvalda partier i tunneltaket. Resultatet av kontrollen var att värdena var knappt godkända. Kontrollen initierades pga. att dålig vidhäftning konstaterats redan under byggtiden. Pga. detta bör vidhäftningskontroller implementeras i inspektionsprogram för samtliga åtkomliga sprutbetonerade tunnlar.

År 2003 utfördes omfattande betongreparationer på de brädformade tunneldelarna upp mot huvudkylvattenpumparna. Pga. armeringskorrosion hade betong sprängts loss på dessa delar. Tunneln försågs år 2005 med katodskydd/offeranoder.

Hjälpkylvattentillopp, 4-170L3:

Inspektioner som utfördes på 90-talet visade på bortsprängda distansklossar samt antydning till korrosionsskador på betongkonstruktioner/väggbalkar vid luckschakt 4-170.

Vid inspektion år 2008 hittades skador i betongkonstruktionerna kring hjälpkylvattenpumparna där korroderande armering sprängt bort omgivande betong. Katodiskt skydd med offeranoder installerades år 2008 i tunneln.

Huvudkylvattenavloppstunnel 3-172L1 och 4-172L1:

Avloppstunnlarna har aldrig inspekterats i torrlagt tillstånd. Däremot har tunnel 3-172L1 filmats med undervattensrobot s.k. sjöuggla år 2009.

Då man för liknande konstruktioner på block 2 har konstaterat att det finns omfattande skador på betong och armering på tunnelns torra sida, dvs. den andra sidan av tunnelns tak, väggar och golv förväntar man sig liknande skador på dessa konstruktioner.

När kylvattnet passerat kondensorn fortsätter det ner i vertikala utloppsstudsar som ansluter till avloppstunneln. Utloppsstudsarnas översta del har inspekterats där det konstaterats betong- och armeringsskador främst i skvalpzonen. Utloppsstudsarnas nedre delar kan endast inspekteras om avloppstunneln töms.

Tunnel 172L5, 172L6, 172L7 och 172L8:

Bergtunnlarna och svallbassängen T2 har aldrig inspekterats i torrlagt tillstånd. Däremot har tunneln filmats med undervattensrobot s.k. sjöuggla år 2009. Inga synliga defekter har observerats på filmen förutom mindre betongsläppor i de sprutbetonerade delarna. Omfattning bedöms inte äventyra tunnelns funktion. Delar av berg hade även släppt i mindre omfattning.

Hjälpkylvattentunnel 3-172L3, 4-172L3, 3-172L4 och 4-172L4:

Bergtunnlarna har aldrig inspekterats i torrlagt tillstånd.

Huvudavloppstunnel 172L2:

Tunneln har inte inspekterats i torrlagt tillstånd. Status på berget, bergsförankringar och sprutbetong är okänt. Tillhörande svallbassäng 172 T1, har inte heller inspekterats.

Sammanfattning av historik:

"Status för kylvattenanläggningarna på Ringhals är till stor del okänd. Tillståndsbedömning krävs för alla tunnlar, kanaler och byggnader.

Kylvattentunnlarna på R3-4 ska tillståndsbedömas klart under 2010. Detta gör att en helhetsbild av tunnarnas status skapas, vilket underlättar framtida och strategiskt underhåll." [34]

5.2 UNDERHÅLLSPECIFIKATION, RENOVERING AV KYLVATTENUTLOPP

Underhållsspecifikationen, [35], presenterar det övergripande arbetet för hela åtgärden med renovering av kylvattenutlopp på R3/R4. Syftet med arbetena är att säkerställa driften för kylvattenavloppen för en livslängd om 50 år.

Underhållsarbetet påbörjades våren 2012 med de identifierade skadorna på utloppsstudsarna och dränageschakten. För övriga delar av kylvattenavloppen som inte är besiktigade kommer ett åtgärdsprogram att tas fram efter besiktningarna. Besiktningarna ska utföras enligt instruktion för SUP, slakarmerad betong, [33].

Val av betong:

Undervattensgjutning (+83,9 - +99)

Betong: UV 35/45 VCT = 0,45 ANL 16 F5

Exponeringsklass: XS2

Konsistensklass: F5

Gjutning i skvalpzon (+99 - +102,7)

Betong: C35/45 VCT = 0,40 Frystestad ANL 16 S3

Exponeringsklass: XS3/XF4

Konsistensklass: S3

De nya- och temporära stålkonstruktioner kommer att förses med nytt katodiskt skydd då de gamla har slutat fungera p.g.a. bristande underhåll.

Arbetet utförs genom avtal där ett byggtreprenadföretag utför konstruktion och montage.

5.3 INFÖRANDEBESKRIVNING – BYGG. DRÄNERING, BESIKTNING OCH ÅTGÄRDSPROGRAM AV KYLVATTENAVLOPP

År 2013 vid revisionsavställningarna på Ringhals 3 & 4 skulle kylvatten-avloppen 3- & 4-172 L1 mellan kondensorutloppsstudsarna och svallbassängen 172 T1 tömmas och besiktas, enligt införandebeskrivningen [36].

Arbetet omfattade dränering, besiktning, reparationer och att en underhållsanvisning (åtgärdsprogram) skulle tas fram.

Efter att kylvattenavloppen hade tömts och rengjorts besiktades tunnlarna. Under revisionen på Ringhals 4 utfördes enbart besiktning medans för Ringhals 3 påbörjades även renovering på det centrala dränageschaktet samt på två utloppsstudsar. Planeringen av arbetena skulle kunna behöva justeras efter erfarenheter från besiktningen på Ringhals 4.

Beskrivning av renovering av utloppsstudsar, R34:

Det planerades att renovera varje utloppsstuds ned till +95.00, ca 4 höjdmeter. Renoveringen planerades att ske genom att de skadade ytorna skulle tas bort genom vattenbilning och att ny sprutbetong skulle påföras.

Beskrivning av renovering av ett dränageschakt, R34:

Renoveringen för ett av dränageschakten planerades att ske från +103.70 ner till +95.00. De delar som var åtkomliga från utsidan skulle sågas ned och ersättas med nya delar. De delar som var gjutna mot berg skulle vattenbilas och återställas med armerad sprutbetong.

5.4 BESIKTNINGSPROGRAM FÖR BETONGKONSTRUKTIONER I UTLOPPSTUNNLAR, R2, R3 OCH R4

5.4.1 Besiktningens omfattning

Ett besiktningsprogram, [37], togs fram för utloppstunnlarna till revisionsavställningen 2013 där man också skulle utföra reparationer.

Tabell 5.3 Förklaringar enligt [37].

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

För R3 omfattade besiktningen avsyning av 5 st dränageschakt, 9 st utlopps-studsar och kylavloppstunneln 3-172L1 t.o.m. svallbassäng 172T1. Av dessa skulle 2 st dränageschakt, en utloppsstuds och kylavloppstunneln även genomgå inspektion och kontroll.

För R4 omfattade besiktningen avsyning av 5 st dränageschakt, 9 st utlopps-studsar och kylavloppstunneln 4-172L1 t.o.m. svallbassäng 172T1. Av dessa skulle ett

dränageschakt, en utloppsstuds och kylavloppstunneln även genomgå inspektion och kontroll.

Efter avslutad besiktning redovisades resultaten i en besiktningsrapport.

5.4.2 Avsyning

Avsyningen omfattade en allmän översyn av konstruktionerna och skadekartering av åtkomliga betongytor. Särskild uppmärksamhet vid avsyningen riktades mot:

- Sprickor och delamineringar (bompartier), görs tillsammans med bom-knackning
- Betongspjälkningar
- Vidhäftningsproblem
- Armeringskorrosion
- Gjutfogar och dilatationsfogar
- Urlakningsproblem och kontroll av ev. porösa ytor
- Övriga defekter, ex gjutsår

5.4.3 Inspektion och kontroll

Inspektionen avsåg avsyning inklusive bomkartering. Kontrollen avsåg uttag av betongprover, förstörande provningar och mätningar.

Bomkartering:

Bomkartering skulle utföras på samtliga åtkomliga betongytor. Vid identifierade bompartier skulle en bedömning göras av bakomliggande orsaker t.ex. om det fanns armeringskorrosion eller vidhäftningsproblem. Bompartier skulle karteras och kvantifieras och föras in på ritningsunderlag.

"Särskild uppmärksam måste riktas vid bomkartering på nivåer under normal vattenyta. Vid dessa nivåer kan svartrost förekomma, korrosion kan förekomma utan tydlig bomindikering." [37]

Friläggning av armering:

För att upptäcka armeringskorrosion hos konstruktionerna utan synliga skador, områden där svartrost skulle kunna förekomma, skulle armering bilas fram och friläggas med omfattning enligt tidigare förutbestämt besiktningsprogram. Områden som valdes skulle vara utan okulära skador, utan bom, under normal vattenyta och i närheten av uttaget kloridprov.

Mätning av täckande betongskikt:

Täckskiktsmätning skulle utföras på samtliga konstruktionsdelar som inspekterades och kontrollerades. I områden där man tog betongprover skulle alltid täckskiktsmätning utföras. Mätningen utfördes med en kalibrerad täckskiktsmätare.

Uttag av betongprover:

Uttagna betongprover skulle märkas och förvaras i tätförslutande provpåsar. De uttagna provernas positionering markerades i ritningsunderlaget och benämndes med samma märkning som de uttagna provkropparna.

Tryckhållfasthetsprover:

Uttag och provning av borrhärlor för tryckhållfasthet skulle följa SS-EN 12504-1:2009, [38], och 12390-3:2009, [39], och vid bestämning av hållfasthetsklass skulle minst 3 st tryckhållfastprover tas ut för respektive konstruktionsdel. Diameter på borrhärlorna skulle vara Ø100 mm och längden minst 100 mm.

Kloridprover:

Diametern på borrhärlorna skulle vara ca Ø 50 mm. På avspjälkade områden skulle betongbitar kunna lämnas in för kloridanalys. Kloridhalter bestämdes enligt CBI:metod 5.1995 och resultaten uttrycktes i kloridjoner/cement vikt-%.

Karbonatiseringsprover:

Diametern på borrhärlorna skulle vara Ø 50 mm och karbonatiseringsprov utfördes enligt SS 137242 [40]. Från de torra sidorna på dränageschakten och på ytor ovanför havsvattennivån skulle de flesta av karbonatiserings-proverna tas ut.

Uttag av prover för tunnslipsanalys:

Diametern på borrhärlorna skulle vara Ø 50 mm och längden minst vara 50 mm. Tunnslipsanalysen skulle utvärdera cementpastans homogenitet, betongens vct, lufthalt, förekomsten av mikrosprickor, eventuella cement-ballast reaktioner och urlakning av betongens bindemedel.

5.5 TILLSTÅNDBEDÖMNING AV DRÄNAGESCHAKT, UTLOPPSSTUDSAR OCH KYLVATTENAVLOPPSTUNNEL

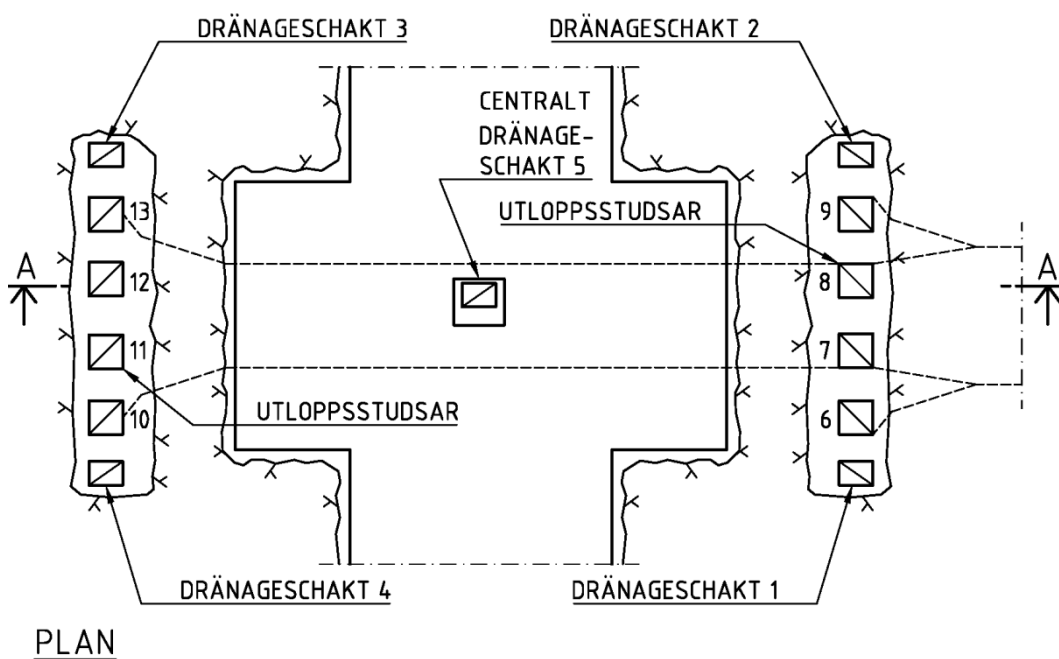
5.5.1 Översikt

Tillståndsbedömningen, [41], bygger på de besiktningar som gjordes 2013.

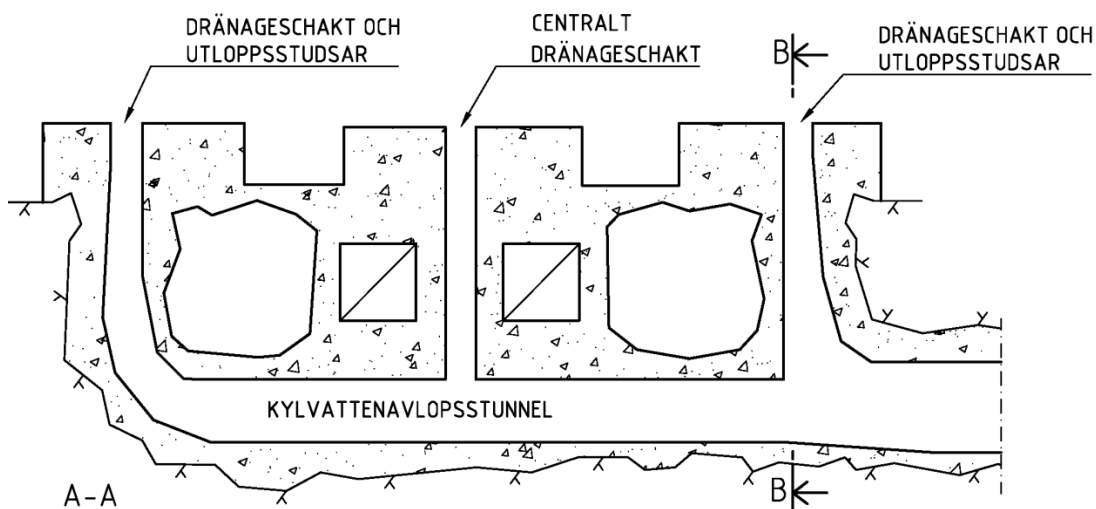
Konstruktionernas skador var av varierande omfattning. Skador på betong och armering fanns på ett antal områden och bedömdes utgöras av kloridinitierad armeringskorrosion.

Betongkvalitet enligt ritningar för utloppsstudsarna och dränageschakten är K300 för platsgjutna konstruktioner med armeringskvaliteten Ks40 och för sprutbetonerade delar är den K350 med nätarmering Nps 50. Täckande betongskikt var satt till 50 mm för dränageschakten och utloppsstudsarna. I kylvattentunneln hade bottenplattan ett täckande betongskikt på 60 mm och för väggar och tak av sprutbetong 25 mm.

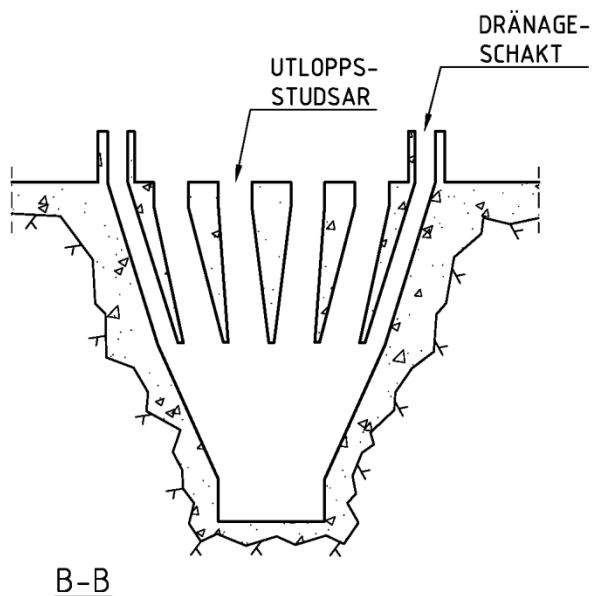
Figur 5.1 till Figur 5.3 visar utloppsstudsar, dränageschakt och kylvattentunnel för R3.



Figur 5.1 Plan över dränageschakt, utloppsstudsar och kylvattenavloppstunnel för R3.



Figur 5.2 Sektion A-A över dränageschakt, utloppsstudsar och kylvattenavloppstunnel för R3.



Figur 5.3 Sektion B-B över dränageschakt och utloppsstudsar för R3.

Utloppsstudsar:

Kylvattnet som går igenom kondensorn leds via stålrör till utloppsstudsar i platsgjuten betong. Kylvattnet ansluter sedan till kylvattenavloppstunneln. Utloppsstudsarnas insidor är ständigt exponerade för havsvatten under drift, där temperaturen är förhöjd och sker med ett högt flöde.

Utloppsstudsarna inspekterades år 2010 okulärt och med bomknackning. Man fann rostutfällningar med möjlig armeringskorrosion och man fann bompartier på samtliga utloppsstudsar. Borrkärnor togs för bestämning av kloridhalt, fukthalt och hållfasthet. Vid tidigare tillståndsbedömningar har man konstaterat att de har ett reparationsbehov och att en noggrannare tillståndsbedömning borde göras.

Dränageschakt:

Dränageschakten leder använt kylvatten från turbinens hjälpsystem till kylvattenavloppstunneln. Schakten består av platsgjutna betongkonstruktioner vilka har en skvalpzon vid havsvattennivån. Vid tidigare besiktningar har man upptäckt höga kloridhalter, armeringskorrosion och betongskador och bedömt att de har ett reparationsbehov.

Kylvattenavloppstunnel 3-172 L1:

Dränageschakten och utloppsstudsarna ansluter till taket på kylvatten-avloppstunneln. Den leder använt kylvatten ut till svallbassängen och därifrån vidare ut i havet via anslutande avloppstunnel. Tunneln har sprutbetonerade tak och väggar samt en platsgjuten bottenplatta. Tunneln har aldrig tidigare inspekterats i torrlagd miljö.

5.5.2 Besiktning

Tillståndsbedömningen, [41], gjordes 2013 på konstruktionerna enligt framtaget besiktningsprogram, [37], se även avsnitt 5.4.

- Avsugning = Okulär undersökning
- Inspektion = Undersökning med känsel, hörsel och okulär undersökning.
- Kontroll = Mätningar och provningar, t.ex. täcksiktetsmätning, uttag av kloridprover.

Besiktningsresultat - Utloppsstudsar:

Skador fanns på samtliga utloppsstudsar på alla undersökta nivåer. Skadorna hittades främst på nivåer mellan +98,0 (underkant stålplåt) och +96,0 och avspjälkningsskadornas djup var upp till 40 mm. Ett stort antal rostutfällningar hittades i samtliga utloppsstudsar i områden där betongen såg ut att vara oskadad. På en del rostutfällningar fanns kvarvarande korroderade fäst-don. Ett antal mindre bompartier hittades i samtliga dränageschakt mindre än 1 m² stora. Lokalt i utloppsstudsarna hade betongytorna frilagd ballast.

På 4 st områden i utloppsstuds 6 frilades armeringen, två på synbart oskadade områden och två på områden med rostutfällningar. Friläggningen utfördes med mekanisk handbilning med en storlek på 50x50 cm. Områdena utan synliga rostutfällningar hade små eller inga rostangrepp på armeringen. På de områden med rostutfällningar på ytan hade armeringen kraftiga rostangrepp.

"Sammanfattningsvis indikerar resultatet av friläggningen att vid ytliga rostutfällningar kan man dra slutsatsen att armering är rostangripen tillsammans med de höga kloridhalterna. I områden utan rostutfällningar är risken mindre för armeringskorrosion men kan dock inte uteslutas." [41]



Figur 5.4 Bild på mindre rostutfällningar utloppstuds 8, enligt [41].

Observationer i samband med reparationer – Utloppsstudsar:

Reparationerna utfördes från nivå +98,0 ner mellan 2 - 4 meter. Efter utförd vattenbilning kunde man konstatera att kraftig armeringskorrosion fanns på flera områden. På vissa ställen var armeringen nästan helt bortkorroderad. Vid flera områden som inte hade visat på bom före vattenbilningen var armering rostangripen. Vattenbilningen utfördes så långt neråt i schaktet tills man kunde okulärt se att armeringen var oskadad. Den skadade armeringen ersattes och ett nytt lager sprutbetong påfördes.



Figur 5.5 Vattenbilad yta vid reparation av utloppstuds 12, enligt [41].

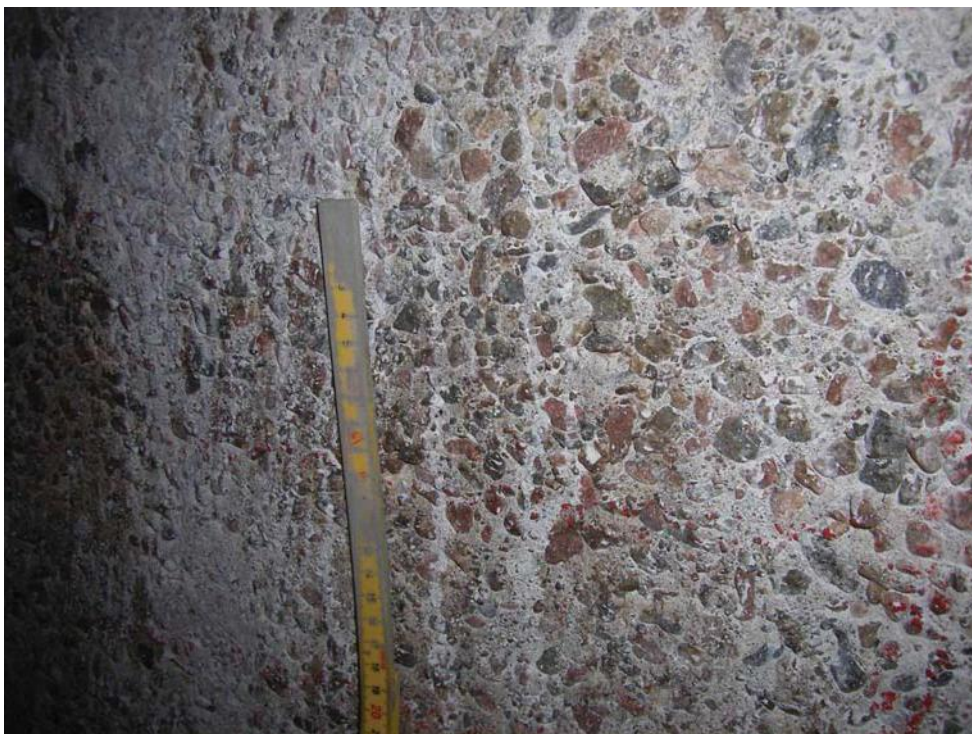
Besiktningresultat – Dränageschakt:

Dränageschakt 1 till 4 avsynades från insidan och dränageschakt 5 avsynades i samband med reparation av schaktet. Alla avsynade dränageschakt hade mellan nivå +103,7 och +101,0 områden med bompartier och avspjälkningar. Där man hittade avspjälkningar var också armeringen kraftigt korroderad och schakten hade vittrade ytor och områden som var urlakade. Dessa områden låg främst under nivå +101,0 dvs. på ytor där vatten förekommer mer eller mindre konstant.

Samtliga av dränageschaktens utsidor, (schakt 1-5) bomkarterades och avsynades. Utsidorna var överlag utan bom och spjälkningar.



Figur 5.6 Spjälkad betong och kraftigt korroderad armering på dränageschakt 3, enligt [41].



Figur 5.7 Vittrad betongyta och frilagd ballast på dränageschakt 2, enligt [41].

Observationer vid reparation av dränageschakt 5:

För dränageschakt 5 utfördes reparation på insidorna, från överkant +104,0 ner till ca +98,0. Betongen avverkades med vattenbilning till ett djup av ca 80 mm. På flera områden var armeringen kraftigt korroderad och hade stora tvärsnittförluster. Den skadade armeringen ersattes och ett nytt lager sprutbetong påfördes med anläggningscement med $v_{ct} < 0,40$.

Besiktningresultat – Kylvattenavloppstunnel 3-172 L1:

Tunneln avsynades samt golv, väggar och tak bomknackades. På en väggyta frilades armeringen genom vattenbilning så att armeringen var inspekterbar.

I den sprutbetonerade delen av tunneln kunde inga större skador observeras. Enstaka mindre bompartier på väggpartier identifierades och inga bompartier i taket hittades. Sprutbetongen var överlag utan skador men lokalt var den något eroderad.

I den platsgjutna delen observerades främst skador kring gjutfogar och vid gamla injekteringar. Skadorna bestod av delaminerad och spjälkad betong med ett djup på ca 10-30 mm. Vid skadorna kunde inte den bakomliggande armeringen observeras. Ett antal områden med svarta rostutfällningar i väggar och tak. Ett flertal av dessa bildar ett mönster och härrör troligen från gamla formstag. Överlag var det inga bomparier kring de observerade rostutfällningarna.



Figur 5.8 Rostutfällningar på tunnelvägg vid golv på utloppstunnel, enl. [41].

Friläggning av armering gjordes på ett väggparti på ca 2 m² i den platsgjutna tunnelväggen. Friläggningen gjordes mellan det centrala dränageschaktet och det inre utloppet. Friläggningen gjordes ca 0,5 m över bottenplattans överkant och över en gjutskarv med avspjälkning. Armeringen var i ett gott skick och hade ingen betydande armeringskorrosion. Kammarna på armering var hela och hade endast enstaka lokala

korrosionsangrepp. I samband med friläggningen observerades formstag med rostangrepp på dess yttre del.

"De observerade mönsterorienterade rostutfällningar i tunneln kan sannolikt härledas till formstagens ändar nära betongytan." [41]



Figur 5.9 Frilagd armering på väggparti utloppstunneln med oskadad armering, enligt [41].

5.5.3 Resultat av betongprover

I tillståndsbedömningen, [41], redovisades resultatet av betongproverna enligt följande:

Kloridhalter - Utloppsstud:

Kloridkoncentrationen vid armeringsdjup 40-50 mm in i betongen varierade mellan 0,8 och 1,5 Cl-/cementvikt-% för 4 prover från nivå +92,0 till +95,0.

Kloridhalter - Dränageschakt:

Kloridnivåer på insidorna av dränageschakten varierade mellan 0,2 och 0,5 Cl-/cementvikt-% på prover från nivå +91,0 och uppåt. Förutom dränageschakt 3 som hade kloridhalter mellan 0,7 och 2,5 Cl-/cementvikt-% från nivå +101,0 till +103,0.

Dränageschaktens utsida hade låga kloridnivåer med undantag av dränageschakt 5:s utsida runt nivå +103,0 till +103,5, vilken hade förhöjda kloridhalter. Kloridprofilerna gjordes till ett djup av 90 mm.

Kloridhalter – Kylvattenavlopp:

Kloridkoncentrationen 40 - 50 mm in i betongen varierade mellan 0,7 och 1,3 Cl-/cementvikt-% från 3 st prover från väggar och tak. I ett prov i taket uppmättes kloridhalten till 3,6 Cl-/cementvikt-%.

Täckande betongskikt:

De täckande betongskiktens medevärden varierade från 40 mm till 56 mm.

Karbonatisering:

I betongen från de provade dränageschakten hade karbonatiseringsfronten trängt in mellan 1 till 4 mm på alla prov förutom på ett prov. På det avvikande provet uppmättes karbonatiseringsdjupet till 31 mm. Provet togs på utsidan av dränageschakt 5 där schakt var omålat.

Tryckhållfasthetsprovning:

Resultatet av tryckhållfasthetsprovningen visade på en mycket hög tryck-hållfasthet på samtliga konstruktionsdelar. Provningen visade att betong-konstruktionerna hade en tryckhållfasthetsklass som var flera steg högre än från de ursprungliga enligt ritningsunderlaget. De framräknade hållfasthetsklasserna från provningsresultat varierade från C40/50 till C70/85 jämfört med hållfasthetsklass enligt ritning K300 (C25/30).

Tunnslipsanalys:

Utförd tunnslipsanalys visade att de uttagna betongproverna var i ett gott skick. Betongen var marginellt påverkad av urlakning och vattentransport-processer.

- Betongen var av standardcement CEM I med ett lågt vct omkring 0,40.
- Ballasten bestod i huvudsak av granitiska bergarter.
- Ingen luft var tillsatt i betongen.
- Sprutbetongen var mycket tät, vct under 0,35.
- Luftporer i betongen var delvis fyllda med ettringit vilket kan påvisa att transportprocesser i betongen förekommit, dock i begränsad omfattning.
- Betongen hade god homogenitet och låg mikrospricksfrekvens, dock var urlakningen lite större i ett av proven taget högt upp i utloppsstuds 6.

5.5.4 Åtgärdsförslag

I tillståndsbedömningen, [41], redovisades även åtgärdsförslag för konstruktionerna enligt följande:

Åtgärdsförslag – Dränageschakt och utloppsstudsar:

Tillståndsbedömningen föreslog att dränageschakten 1-4 och utloppsstudsar som inte hade reparerats tidigare borde repareras. Kloridhaltig och skadad betong borde avverkas och ersättas med ny för att undvika framtida skador. Samtliga ytor på insidan av dränageschaktens borde åtgärdas i sin helhet från ca +99,0 till +103,7 eller tills oskadad armering påträffas. Utloppsstudsarna borde repareras från +99,0 ner ca 2 m eller tills oskadad armering påträffas.

Den lokala skadan som påträffats på dränageschakts 5 utsida borde repareras. Man borde även skydda utsidorna mot kloridhaltigt vatten från avrinningar och svallningar. Insidorna skulle kunna skyddas mot förhöjda halter av klorider genom att påföra ett tätskikt. Alternativt så kunde man förhindra en framtida korrosionsprocess genom installation av ett katodiskt skydd.

Åtgärdsförslag – Kylvattenavloppstunnel:

Inga åtgärder bedömdes vara nödvändiga vid tiden för besiktningen. Förslagsvis borde en kontinuerlig övervakning och besiktning av tunneln ske med ett 5-års intervall, för att säkerställa fortsatt drift av tunneln. De lokala skadorna bedömdes inte ha någon betydelse för funktionen av tunneln.

6 Tillståndsbedömningar av kylvattentutlopp vid Oskarshamn

6.1 TIDIGA TILLSTÅNDSBEDÖMNINGAR INLOPPSTUNNLAR, O2

Under sommaren 1977 undersöktes rensverket och inloppskulvertar vilket finns dokumenterat i en rapport för kontroll av betongkonstruktioner, [42].

Där framkom att:

Rensverket som består av fyra stråk vilka leder havsvatten till en gemensam pumpkammare. Väggarna är gjutna med LH K300 vattentät betong med armering Ks40 och ett minsta täckande betongskikt på 30 mm. I undervattensdelarna på rensverket skyddas armeringen delvis av befintligt katodiskt skydd för skydd av mekanisk utrustning.

Inloppskulvertarna är utförda som slakarmerade betongkonstruktioner av LH K400 vattentät betong med armering Ks40 och ett minsta täckande betong-skikt på 45 mm. Det finns en gjutfog till väggarna ca 150 mm ovanför överkant bottenplatta som har försetts med fogband. Kulvertarna är sektionerade på ett avstånd av ca 8,5 m med en ett fogband av rostfri plåt.

I rapporten pekades på vilka risker som de undersökta konstruktionerna utsattes för och där konstaterades att för betong i atmosfären:

"Normalt anses den kritiska kloridhalten i betongen som är i kontakt med armeringsjärnet vara 0,03 – 0,05 % Cl relativt betongvikten."

"I Bro 94 anges max Cl-halt för betong i kontakt med armeringen; ... 0,045 % Cl relativt betongvikten." [42]

För betong som ligger under vatten konstaterades att:

"Enligt tidigare observationer i liknande konstruktioner finns ett samband mellan skador orsakade av armeringskorrosion och kloridkoncentrationer av ca 0,2 % relativt betongvikt (total eller syrelöslig kloridhalt)."

"Är vattnet strömmande och turbulent – om ja så kommer syretillförseln till armeringen att accelerera – hög korrosionsrisk." [42]

Kloridhalterna i [42] anges i förhållande till betongvikt och inte till cementvikt. Det är svårt att dra slutsatser med kloridhalter angivna i förhållande till betongvikt, se avsnitt 2.4.

Följande kontroller gjordes:

- Okulär kontroll
- Stickprov på armeringens täckande betongskikt
- Stickprov på betongens kloridhalt
- Kontroll av armeringens elektro-kemiska potential (EKP), metod enligt ASTM C876-91, [43].

Inga karbonatiserings- eller hållfasthetsprover gjordes.

Okulär kontroll rensverk:

Det fanns inga synliga betongskador på de inspekterade delarna.

Okulär kontroll inloppskanal:

I inloppskulvertarna fanns det talrika rostutfällningar från skadade armerings-järn. Skadorna var koncentrerade till fogen mellan bottenplatta och vägg. Golvplattan är till synes oskadad. I takplattan finns längsgående monterings-järn på distansklossar vilka har mest skador.

Provresultat rensverk:

För stående armering var täcksiktet i genomsnitt 35 mm.

Den uppmätta kloridhalten var generellt låg och under den kritiska nivån med avseende på armeringskorrosion, 0,045 %. Kloridhalten mättes i skvalpzon och på mätintervallet 20 till 40 mm från ytan varierade kloridhalten mellan 0,005 och 0,033 % Cl relativt betongvikten.

EKP-mätningar på armeringen gjordes i skvalpzonen där södra väggen hade positiva värden, +30 mV, vilket tyder på att armeringen var passiv. Potentialen ökade från vattenlinjen neråt där man uppmätt värden på -470 mV. Den ökande potentialen förklarades med att betongen får en högre fuktighet. Under vattenlinjen uppmättes potential på -680 mV vilket visar på att det katodiska skyddet fungerar för undervattensdelen.

På östra väggen uppmättes potentialer på -125 mV, vilket kan bero på en hög betongfuktighet eller att det pågick aktiv korrosion vid mätningen.

Provresultat inloppskanal:

Täckskikten på stående armering i väggar varierar från 20 till 80 mm. För takplattor varierar täckskikten för huvudarmeringen från 30 till 45 mm och för monteringsjärn 25 till 30 mm.

Den uppmätta kloridhalten på 20 mm djup var 0,074 % Cl relativt betongvikt och vid 40 mm djup 0,05 %. Som jämförelse kan kloridhalten beräknas bli 0,56 respektive 0,038 Cl/cementvikt-%, enligt nedanstående antagande.

Den totala kloridhalten uttryckt i förhållande till cementhalten kan beräknas genom att multiplicera den uppmätta kloridhalten relativt betongvikt med förhållandet mellan betongvikten och cementhalt, vilka måste antas.

$$C_{Cl,C} = C_{Cl,B} \frac{G_{BTG}}{C_C}$$

$C_C = 320 \text{ kg/m}^3$ Antagen lägsta cementhalt för en betong C30/37 med vct 0,50 enligt SS-EN 206:2013 [13].

$G_{BTG} = 2400 \text{ kg/m}^3$ Antagen betongvikt enligt SS-EN 1991-1-1 [44].

$C_{Cl,B} = 0,074 \%$ Total kloridhalt per volymenhet betong.

$$C_{Cl,C} = C_{Cl,B} \frac{G_{BTG}}{C_C} = 0,074 \frac{2400}{320} = 0,56\%$$

$C_{Cl,B} = 0,005 \%$ Total kloridhalt per volymenhet betong.

$$C_{Cl,C} = C_{Cl,B} \frac{G_{BTG}}{C_C} = 0,005 \frac{2400}{320} = 0,038\%$$

EKP-mätningar gjordes även på inloppskanalerna och generellt låg den uppmätta potentialen på -450 mV. De skillnader som fanns vid mätningen fanns på takplattorna och den vägg som ligger mot den högaktiva kulverten. På dessa områden låg potentialen på omkring -180 mV. En förklaring till att just dessa konstruktioner hade mer positiva potentialer var att de vetter mot luftade utrymmen och att det sker en utjämnning av potentialerna mellan armeringslagren på var sida om väggen. För bedömning av potentialer och risk för korrosion se Tabell 2.5 och Tabell 2.6.

"Eftersom betongen är mycket fuktig påverkas armeringens egenpotential på grund av syrebrist vid järnet. Det är normalt att värden på omkring -400 mV (Ag/AgCl) uppmäts i sådana miljöer." [42]

"Om järnet skall skyddas med ett katodiskt skydd skall potentialen sänkas (öka numeriskt) till min. - 700 mV (Ag/AgCl)." [42]

Tillståndsbedömning av rensverk:

Risken för armeringskorrosion på väggarna i rensverket bedömdes som små men det kan ha förekommit på isolerade områden. Kloridkoncentrationen i väggarna är nära den kritiska nivån.

Tillståndsbedömning av inloppskulvertar:

Skadorna var än så länge begränsade till vertikala armeringsjärn i gjutfogarna mellan golv och vägg samt i monteringsjärn i takplattan. Skadorna kommer att öka med tiden.

Kloridhalten i takplattan visade att koncentrationen inte var speciellt hög men allt eftersom sprickbildningen ökar på grund av korrosion på monterings-järnen kan skadorna komma att öka. Kulvert 2 kunde redan haft skador på huvudarmeringen.

6.2 TIDIGA TILLSTÅNDSBEDÖMNINGAR UTLOPPSTUNNLAR, O2

Inloppskulvertarna vilka tidigare hade undersökts, se avsnitt 6.1, visade på omfattande korrosionsskador. Detta resulterade i att man gjorde en mera detaljerad undersökning på rensverket, inloppskulvertarna och på utlopps-kulvertar under 1998.

Undersökningen omfattade okulär kontroll, täckskikts-mätning, friläggning av armeringsjärn och kartläggning av avrostningsgraden. För utloppskulvertarna togs dessutom borrhärlor för okulär kontroll och det gjordes akustiska mätningar en s.k. Impact Echo-mätning. Resultaten finns presenterade i rapporten, Betong- och armeringsprovning, [45].

Resultat inloppskulvertar:

Den maximalt beräknade avrostningsgraden för inloppskulvertarna angavs till 45 % per m längd av kulvert. Avrostningen gällde för gjutfogen.

Resultat utloppskulvertar:

Utloppskulvertarna 1 till 4 bedömdes vara i sämre skick än inloppskulvertarna. Skador på väggar fanns vid gjutfogar mot bottenplatta och takplatta. Tak-plattan hade

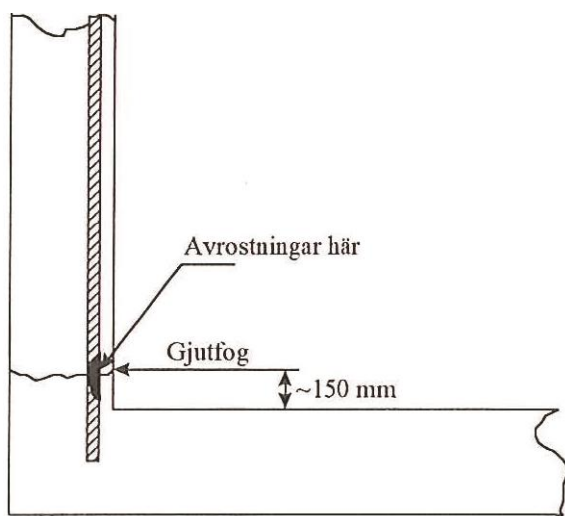
omfattande skador med sprickbildning och möjliga skiktningar av betongen. I kulvert 4 fanns dessutom omfattande skador på golvplattan.

Avrostningen på väggarna beräknades till 45 % förutom för kulvert 4 där avrostningen bedömdes vara 90 %. Avrostningarna presenterades i diagram, se typexempel i Figur 6.2.

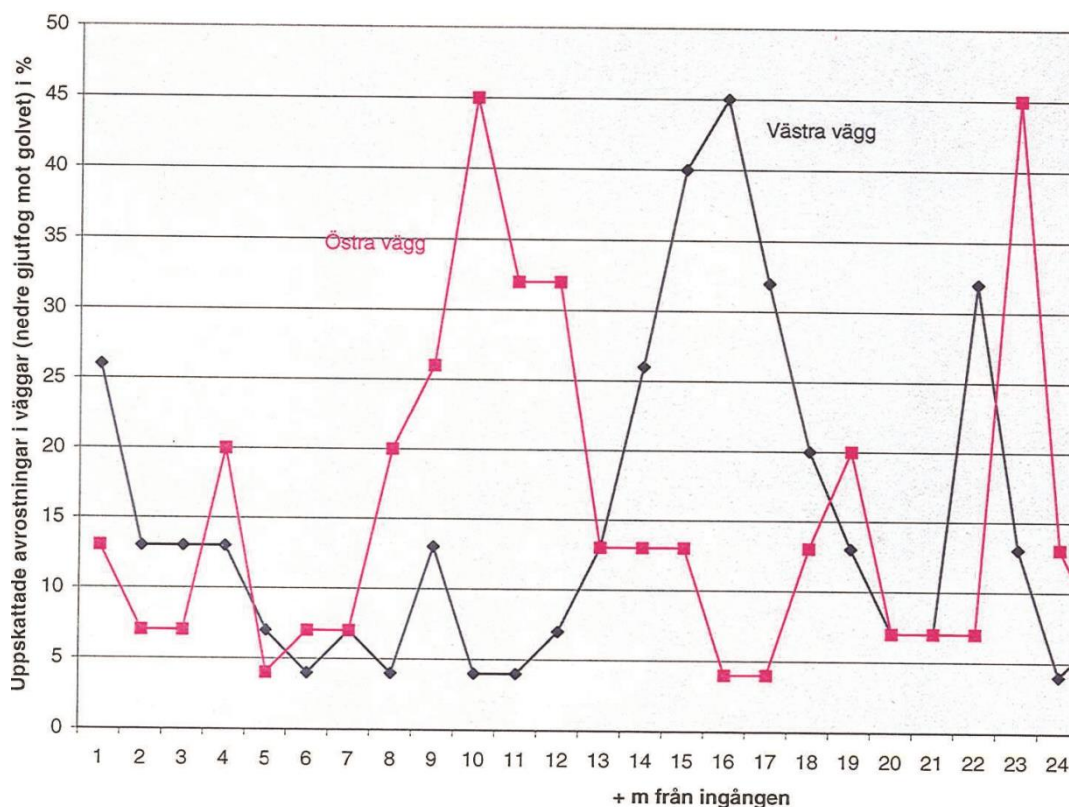
I takplattan förekom korrosion längs större delen av armeringsjärnen och inte bara i gjutfogen vilket gjorde det svårt att bedöma avrostningen. Den uppmätta avrostning vid frilagda områden var mellan 25 och 40 %. Vid bomknackning på undersida av takplattan upptäcktes skiktade partier och en borrkärnor togs ur samt akustiska mätningar gjordes för att bedöma omfattning av skiktningen. Borrkärnorna visade på skiktningar vid huvud-armeringen som låg ca 30 mm in i konstruktionen samt ovanför det övre lagret armering som låg ca 60 mm in i konstruktionen. Från den akustiska mätningen kunde man se skiktningar inom 150 mm från ytan underifrån tak-plattan. På 50 % av de mätställen man gjorde fanns tecken på skiktningar.

Avrostningsgrad:

En beräkning på avrostningsgrad per längdmeter av kulvert uppges i %. Den baseras på antal synliga rostutfällningar/antal armeringsjärn med avseende på uppmätt avrostning för enskilda järn vid friläggning av armeringen, se Figur 6.1.



Figur 6.1 Armeringsskador på kulvert vägg, hämtad från [42].



Figur 6.2 Uppskattning av avrostning i gjutfog mellan vägg och bottenplatta inlopp 1, hämtad från [45].

Bedömning och åtgärd, utloppskulvertar:

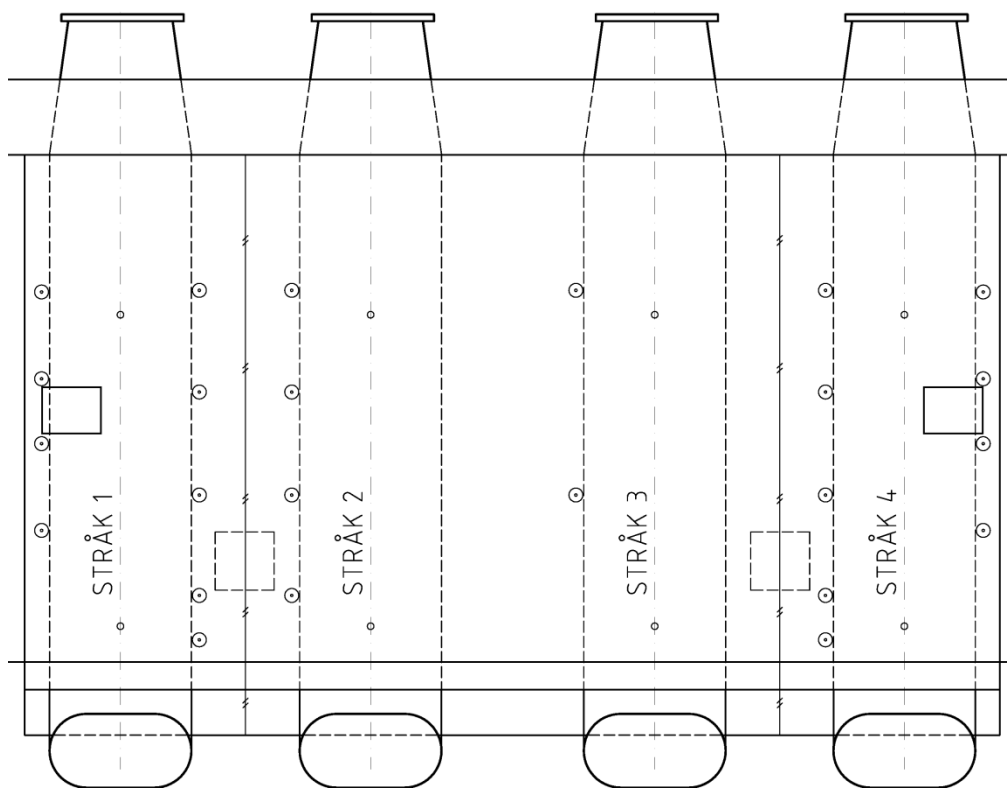
Avrostningarna var omfattande i väggar och tak. För takplattan fanns även sprickor och delamineringar. Man kom fram till följande: En statisk kontroll av takplattan och väggar borde utföras för att bedöma graden av tillåtna avrostningar. Takplattan borde repareras genom att frilägga uk-armeringen genom bilning till ett djup av ca 100 mm (30 mm bakom det andra armeringslagret). Vertikala armeringsjärn i väggar borde friläggas. Armering skulle kompletteras där det ansågs vara nödvändigt och sedan återställas med sprutbetong och sedan borde ett katodiskt skydd installeras. Som katodiskt skydd gavs förslag att offeranoder eller skydd med påtryckt ström kunde användas.

Statiska beräkningar:

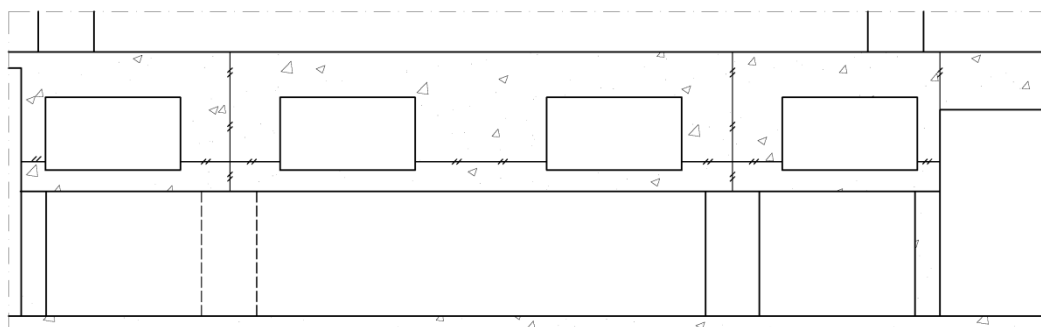
Statiska beräkningar utfördes för att se hur stor överkapacitet som fanns i gjutfogen i [45]. Detta för att vid en besiktning se vilken armeringsreduktion som var tillåten map. armeringskorrosion. Beräkningarna byggde på tillståndsbedömningar som gjordes 1997 och det presenterades inga åtgärds-förslag i beräkningsrapporten, utan man inväntade resultat från de besiktningar som skulle utföras 1998.

"Hela kulvertsystemet vilar på fyra pelare och en vägg, där väggarna i kulvertarna bär huvuddelen av lasten mellan pelare och vägg. Bottenplattan och vattnet i kulvertarna hänger i väggarna. För att bestämma storlek av moment och upphängningskrafter har en ramberäkning gjorts.... För att bestämma storleken av tvärkrafterna i väggarna har en plattberäkning utförts med finit elementprogrammet Prefem". [45]

För plan och sektioner se Figur 6.3 och Figur 6.4.



Figur 6.3 Planskiss av utloppskulvert.



Figur 6.4 Tvärsektionskiss av utloppskulvert.

Vid kapacitetskontrollen har den inlagda armeringsarean jämförts mot erforderliga armeringsareor för driftslaster. Kontrollen gjordes med avseende på moment- och tvärkraftskapacitet.

Beräknade överkapaciteter för stråk 1 framgår av

Tabell 6.1. Resultat för övriga stråk presenterades i beräkningsrapporten [45].

Tabell 6.1 Överkapacitet i gjutfog för stråk 1, utloppskulvert O2. Sammanställt ur [45].

Längdmätning	Vägg	Överkapacitet
0 – 2,4 m	Västra väggen	15 %
2,4 – 4,8 m	Västra väggen	43 %
4,8 – 7,0 m	Västra väggen	0 %
7,0 – 8,85 m	Västra väggen	0 – 60 %
0 – 8,85	Östra väggen	35 %

6.3 UTFÖRDA REPARATIONER

6.3.1 Inspektion och zinksprutning av betongytor i Rensverk

Inspektionen av betongytorna samt inspektionen av zinksprutningen finns dokumenterad i [46].

På grund av att betongytorna ovanför vattenlinjen utsätts för klorid-inträngning av varierande grad och därmed fanns risk för armeringskorrosion. Åtgärder som fanns tillgängliga vara att avverka betongen och ersätta med ny frisk betong eller att montera katodiskt skydd.

Betongytorna ovanför vattenlinjen kan inte skyddas med fjärrmonterad offeranoder som kräver att vattnet är en strömledare. Man valde då att flamspruta ett tunt zinksikt som fungerar som offeranod. Den minsta tjocklek på zinksiktet var 0,25 mm vilken ska ha en livslängd på 10 – 15 år.

Arbetsutförande:

1. Flamsprutningen gjordes av personal vilka hade omfattande erfarenhet av liknande arbete.
14. Betongytorna kontrollerades okulärt efter sandblästring och lösa betongsjok bilades bort.
15. Armeringen frilades på 6 ställen med en längd av minst 100 mm för att koppla ihop zinksiktet och armeringsnätet.
16. För att säkerställa att armeringen där de var frilagda inte var frikopplade kontrollerades den elektriska kontinuiteten mellan armeringsjärnen. Man uppmätte även deras elektrokemiska potential (EKP) för att kunna kontrollera det katodiska skyddets effekt. Man upptäckte då att delar av armeringsnätet hade aktiv korrosion.
17. Betongytan värmdes upp innan flamsprutningen.
18. Flamsprutning med Zn utfördes.
19. Zinksiktets tjocklek kontrollerades på 6 st punkter.

Resultat av kontrollerna:

Inga anmärkningar fanns på betongytorna endast ett mindre antal skadade partier avlägsnades innan ytbehandlingen.

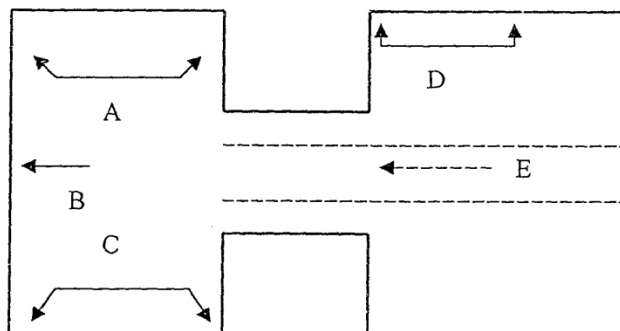
Zinksiktet uppmättes till minst 0,4 mm på samtliga ställen.

Som anmärkning kan man tillägga att de EKP-mätningar som gjordes enligt [46] vilka visas i Figur 6.5 och Figur 6.6 kan man se att potentialen blir mer negativ när man

kommer neråt i konstruktionerna till sådana värden då man kan konstatera aktivt pågående korrosion, se även Tabell 2.6.

OKG 2. Rensverk Stråk 4 - Passavant

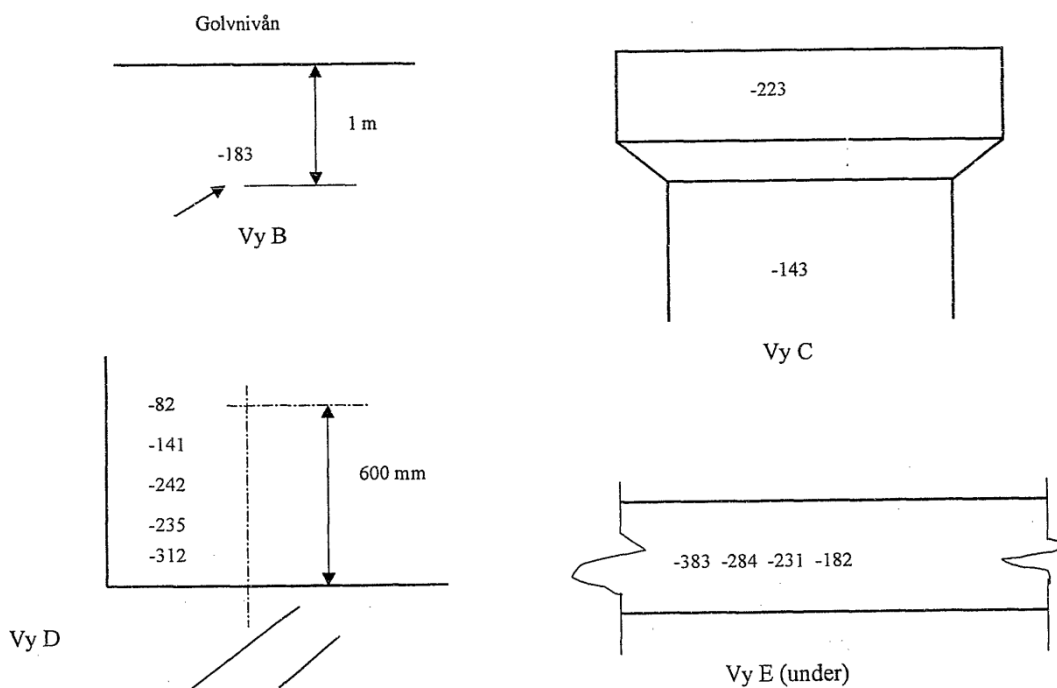
Betongväggar från + 100,3 till + 103,0 m - Armeringens elektro-kemisk potential innan behandling med Zn.



Figur 6.5 Plan figur över EKP mätning, enligt [46].

OKG 2. Rensverk Stråk 4 - Passavant

Armerings ekp.



Figur 6.6 Mätvärden vid EKP mätning, enligt [46].

6.3.2 Reparation av kylvattenutlopp

Reparation av kylvattenutlopp gjordes vid revisionsavställningen -99 för O2 och den finns dokumenterad i [47]. Reparationen föregicks av bedömningen att armeringen var så pass angripen av korrosion att den erforderliga armeringsarean hade underskridits på flera avsnitt på in- och utlopps-kanalerna till kondensorn. Reparationen omfattade stråk 1 till 4 vilka tidigare hade undersökts och som det även hade gjorts kontrollberäkningar på.

Arbetsordning för utförandet enligt ritningar, [47]:

1. "Takytor: Vattenbilning av taket i stråk 1 och 2, område längdmätning 6 – 10 m. Övriga takytor i stråk 1 och 2 samt takytor i stråk 3 och 4 bomknackas. Bomma partier vattenbilas till ca 100 mm djup. All frigjord armering rengörs från rost och betongrester. Skadade armeringsstänger kompletteras med nya. Takytan lagas med sprutbetong, hållfasthetsklass lägst K40."
2. "Golv: Samtliga golvytor bomknackas och skadade ytor lagas med betong K40. "
3. "Skadade partier på samtliga väggar vattenbilas och lagas med sprutbetong K40. "
4. "Vertikala förankringsstänger borrar, montage och injektering enligt utförarens ^{a)} anvisningar."

^{a)} Namnet borttaget och ersatts med utförare.

Före reparationen fanns en kontrollplan upprättad. Den bestod av kontroll att bomknackning och utmärkning av områden vilka skulle vattenbilas. Kontroll av de vattenbilade ytorna utfördes. Katodiskt skydd med offeranoder och referensanoder utfördes. Kontroll av betongkvaliteten för lagning av golv och sprutbetong utfördes enligt betongrecept. Förstärkningsarmering (spännstag) utförts enligt separat kontrollplan.

Enligt checklista på sprutbetong framgår det endast att:

- Blandas i en minibetongstation
- Anläggningscement
- Typ av ballast, Baskarp 0-8 mm
- Kommunaltvatten
- Blandningsförhållande cement/ballast 1:3
- Ytor rengjorda med sandblästring
- Efterbehandling med dimfuktning

Ingen provtagning av tryckhållfasthet och vidhäftning har noterats.



Figur 6.7 Bild efter vattenbilning, stråk 3, enligt [47].

6.4 NYA TILLSTÅNDSBEDÖMNINGAR AV KYLVATTENUTLOPP

2013 gjordes tillståndsbedömningar av betongkanaler efter kondensorn vilka presenteras i en rapport, [48]. Dessa konstruktioner har redan tidigare undersökts och reparerats 1997 resp. 1998, för plan se Figur 6.3 och för sektion se Figur 6.4.

Den nya undersökningen utfördes med okulärundersökning, täckskikts-mätning och uttagning av borrhövar för kloridhalt, karbonatisering, tryck-hållfasthet och tunnslipsanalys.

Vid den okulära undersökningen hittades eroderade ytor med frilagd ballast, enstaka bruna utfällningar och missfärgningar, korroderad armering vid friläggning samt delaminerad betong vid bomknackning. Delamineringen hittades runt tidigare lagade ytor.

Armeringens täckskikt varierade i stråkens insidor från 24 till 39 mm och på stråkens utsidor från 10 till 52 mm.

Kloridhalten varierade på stråkens insidor från 0,13 till 1,41 kloridjoner per cementvikt-% och på stråkens utsidor från 0,02 till 0,04 cementvikt-%.

Karbonatiseringsdjupet var som mest 3 mm.

Betongen tilldelades tryckhållfasthetsklass C55/67 genom tryckhållfasthetsvärdering.

Genom tunnslipsanalys har vct-ekvivalent uppskattats till 0,35 och cementet bedömts vara anläggningscement.

Varierande grad av armeringskorrosion hittades från endast ytliga korrosions-angrepp till helt avrostade armeringsjärn.

Bedömning:

Korrosionsangreppen på stråkens insidor är omfattande och behöver åtgärdas.

Borrkärnorna från insida av stråken hade en mycket hög kloridhalt. Flertalet av de kontrollerade armeringsjärnen uppvisade korrosionsangrepp av s.k. svartrost.

”Svartrost är typiskt förekommande i undervattenskonstruktioner och kan identifieras av de svarta korrosionsprodukterna. Svartrost bidrar till en mindre volymökning av korrosionsprodukterna jämfört med traditionell rödrost på grund av den begränsade syretillgången. Den mindre volymökningen bidrar inte till synliga skador på utsidan som ofta förekommer i samband med rödrost. Det är troligt att den högre temperaturen av vattnet bidrar till en något påskyndad korrosionsprocess.” [48]

Rapporten anger följande som åtgärder: De offeranoder som har installerats har troligen inte bidragit till att korrosionsangreppen avstannat pga. att bomområden har hittats. Stråkens samtliga invändiga ytor bör repareras. Eftersom betydande tvärsnittsreduktion har hittats bör åtgärd utföras inom en 3-årsperiod.

Betongen avlägsnas förslagsvis med vattenbilning och bilningsdjupet anpassas till den reparationsbetong som ska användas. Armeringen rengörs från rost och ersätts eller kompletteras där så är nödvändigt. För väggar och tak kan sprutbetong användas och till golvet traditionell gjutning.



Figur 6.8 Bild på armering i tak, stråk 3, kontrollområde 11, enligt [48].



Figur 6.9 Bild på armering i golv, stråk 4, kontrollområde 13, enl. [48].

7 Tillståndsbedömningar av kylvattenvägar vid Forsmark

7.1 TILLSTÅNDSBEDÖMNINGAR KYLVATTENVÄGAR, F3

FKA har i sin instruktion för besiktningsrutiner för driftsatta byggnadssystem, [49], en beskrivning om vad som ska ingå i besiktning av vattenvägar. Besiktningarna kan endast göras vid tömning av dem och det sker normalt vid revisionsavställningarna.

I besiktningarna ingår:

- Visuell avsyning av konstruktionerna efter korrosions- och betongskador.
- Bomknackning
- Prover på kloridhalt och karbonatiseringsdjup

När kloridhalter överstiger 0,4 % av cementvikten ska en livslängdsanalys skapas som underlag för långsiktig underhållsplanering (LUP).

Besiktningarna rapporteras i besiktningsprotokoll där anmärkningar planläggs för åtgärd.

7.2 PROVPROGRAM FÖR HJÄLPKYLVATTENSYSTEM

Vid byggnadsbesiktningar har degradering av betong i kylvattenvägar upptäckts. För att kunna göra statusbedömningar och livslängdsanalyser krävs det omfattande undersökningar och därför hade ett provprogram som skulle utföras under revisionsavställning 2007 tagits fram, [50].

Provprogrammet omfattar tunnlar för hjälpkylvattensystem för Forsmark 3.

De bedömda miljöklasserna är konstruktioner ständigt under vatten XS2, skvalpzoner XS3 och övriga konstruktioner XC4.

Tunnlarna har en tvärsnittsarea på 2,5 m² och hjälpkylvattenkanal L3 har en längd på ca 60 m och hjälpkylvattenkanal L4 en längd på 130 m.

Betongkvalitet är K300 och K400, vattentät, LH-cement med armering i kvalitet Ks40. Täcksiktens varierar från 30 till 45 mm.

Provprogrammet delas in i tre delar, inspektion, provtagning på plats och provtagning på utborrade betongkärnor.

Inspektion:

Den består av okulärbesiktning där skador kartläggs och bomknackning.

Provtagning på plats:

Proven som utförs är mätning av relativ fuktighet i betongen, täcksiktensmätning och kontroll av pågående armeringskorrosion som utförs av SP, Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, med dess egen utrustning. På de till synes oskadade områden som SP-mätningen ger utslag på ska kontroll av kloridprofiler göras samt friläggning av armering.

Provtagning från uttagna borrhärlor:

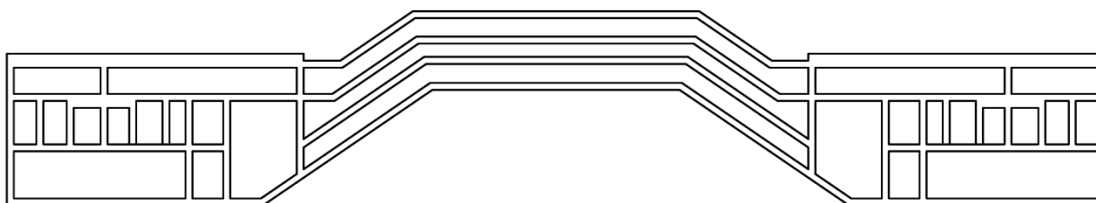
Kontroll av kloridinhåll med RCT-metoden ska användas (Rapid Chlorid Test).

Kontroll av karbonatisering sker enligt SS 137242, [40].

Kontroll av hållfasthet sker enligt SS 137207:2005, [51].

Kontroll av vattentäthet sker enligt SS 137214, [52] vilken är ersatt av SS-EN 12390-8:2009, [53].

Efter avslutad besiktning presenteras resultatet i en rapport och ett åtgärdsprogram.



Figur 7.1 Skiss över hjälpkylvattenvägar på F3. Se även [50].

7.3 INSPEKTION OCH ÅTGÄRDER - HJÄLPKYLVATTENKANALER L3 OCH L4

7.3.1 Inspektion och åtgärder

Inspektioner, underhålls- och reparationsåtgärder på hjälpkylvattenvägar utfördes vid revision 2007 på Forsmark 3, se [54]. Inspektionernas syfte var att se vilken status som vattenvägarna hade och för att man skulle kunna utföra livslängdsberäkningar samt för att man skulle kunna ta fram ett åtgärdsprogram. Vid tidigare inspektioner av vattenvägarna hade man sett skador på betongkonstruktionerna orsakade främst av armeringskorrosion.

Prover som gjordes följde ett framtaget provprogram, [50], och innehöll:

- Okulär inspektion
- Bomknackning med hammare
- Täcksiktmetning
- Kontroll av armeringskorrosion med SP-metoden.
- Urtag av borrhärlor med prov på klorid- och fukthalt, pH-värde, karbonatiseringsdjup, vattentäthet, porositet, hållfasthet och klorid-migrationskoefficient

Underhållsåtgärderna gjordes genom att med vattenbilning ta bort korrosionsskadad betong och ersätta med ny sprutbetong. De områden i vattenlinjen som inte hade någon synbar korrosion fick vara kvar och flamsprutades med zink. Offeranoder av zink monterades under normal vattennivå och skvalpzonen flamsprutades med zink.

Hjälpkylvattenkanal L3 förser hjälpkylvattensystemen med havsvatten.

Okulär besiktning:

Man fann mindre rostutfällningar i hela kanalen, troligtvis från formstag eller monteringsjärn, se Figur 7.2. Armering som frilades under vattenlinjen vid

anodmontage hade inga rostangrepp. I och över vattenlinjen fanns synliga sprickor i betongen och på vissa delar hade betongen spjälkats av.

Täckskiktsmätning visade att täckskikten varierade mellan 45 och 70 mm för väggar och mer än 130 mm i golv.



Figur 7.2 Rostutfällningar som troligen härrör från formstag, enligt [50].

Bomknackning:

I nästan alla skvalpzoner fanns bompartier och frilagd armering hade synliga rostangrepp. Under vattenlinjen fanns endast mindre bompartier.

Åtgärder:

I pumputrymmen avverkades skadad betong med vattenbilning och ersattes med ny sprutbetong, se Figur 7.3. I övrigt bilades enbart lös betong bort och flamsprutades med zink pga. tidsbrist, se Figur 7.4. Åtgärder utfördes enligt [55].



Figur 7.3 Vattenbilade bompartier i tak och vägg, enligt [50].



Figur 7.4 Handbilning av lös betong, enligt [50].

Hjälpkylvattenkanal L4 leder avloppsvatten från hjälpkylvattensystemen till svall- och luckschakt.

Okulär besiktning:

Mindre rostutfällningar fanns under vattenlinjen i hela kanalen, troligtvis från formstag eller monteringsjärn. Armering som frilades under vattenlinjen vid anodmontage hade inga rostangrepp.

Täckskiktsmätning visade att täckskikten varierade mellan 45 och 70 mm för väggar och mer än 130 mm i golv.

Bomknackning:

I nästan alla skvalpzoner fanns bompartier och frilagd armering hade i dessa områden synliga rostangrepp. Under vattenlinjen fanns endast mindre bompartier.

Åtgärder:

Där betongen hade synliga skador och var avspjälkad handbilades den bort och armeringen zinksprutades. Åtgärder utfördes enligt [55].

7.3.2 Korrosionsmätningar hjälpkylvattenkanaler L3 och L4

Korrosionsmätningar gjorda på hjälpkylvattenkanalerna redovisas i rapport, [56]. Uppmätningen av betongens resistivitet, korrosionshastigheten och korrosionspotentialen utfördes med RapiCor utrustning. Mätningarna delades in i tre delar:

Konstruktionsdelar under vatten:

På de delar av konstruktionerna som låg under vattenytan när vattenvägarna var i drift hade en mycket låg negativ halvpotential $<-350 \text{ mV}_{\text{CSE}}$, (Copper Sulfate Electrode), och en låg resistivitet $<100 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ uppmäts. En stor negativ halv-potential indikerar att det med stor sannolikhet pågick korrosion i det kontrollerade området. En låg resistivitet indikerar att betongen hade en hög fukthalt. Slutsatsen från mätningarna var att konstruktionerna befunnit sig under vattenytan och att armeringen därför varit i ett depassiverat tillstånd. När konstruktionerna får tillgång på syre så kommer armeringskorrosionens hastighet att vara hög.

Mätresultatet visade att pågående armeringskorrosionen $>20 \mu\text{m}/\text{år}$ fanns i ett stort område i tunnelns ändar och i mindre omfattning på lokalt begränsade områden i tunnelns mitt. Den uppmätta korrosionen speglade omfattningen vid mättillfället, dvs. när tunneln var tömd på vatten. När konstruktionen åter blivit vattenfylld kommer korrosionshastigheten att minska under vattenytan pga. minskad tillgång på syre.

Konstruktionsdelar i skvalpzonen:

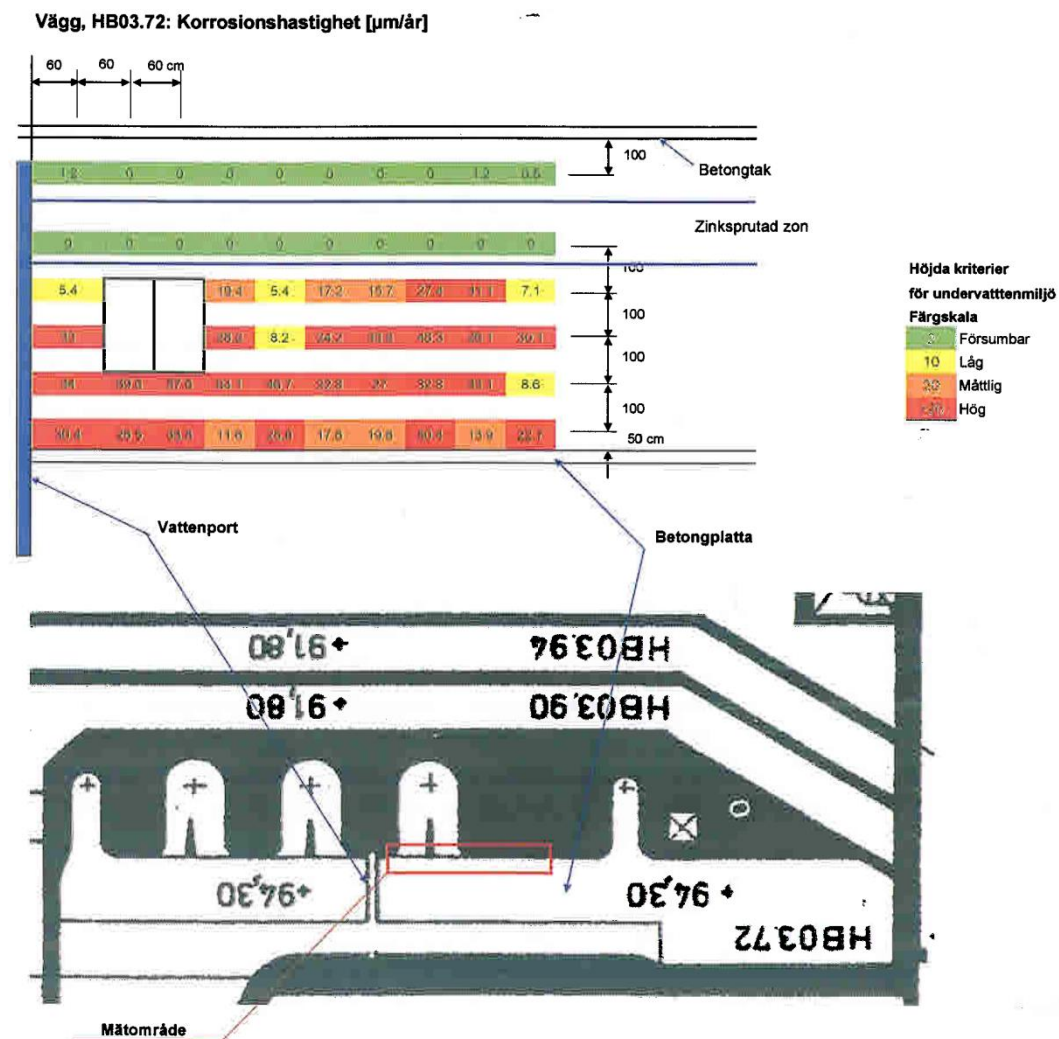
På områden där betongytor hade spjälkats loss i skvalpzonen pågick zinksprutning vid mättillfället. Halvpotential var mycket negativ $<-900 \text{ mV}_{\text{CSE}}$, mer negativ än betongen under vattenytan. Resistiviteten var också lägre jämfört med betongen under vattenytan. Trots detta var den uppmätta korrosionshastigheten noll. Den lägre resistiviteten kan förklaras med att zinkskiktet har en god elektronisk ledande förmåga och den negativa halvpotentialen ger indikation på en pågående korrosion av zinkskiktet istället för armeringskorrosion.

Konstruktionsdelar i luftzonen:

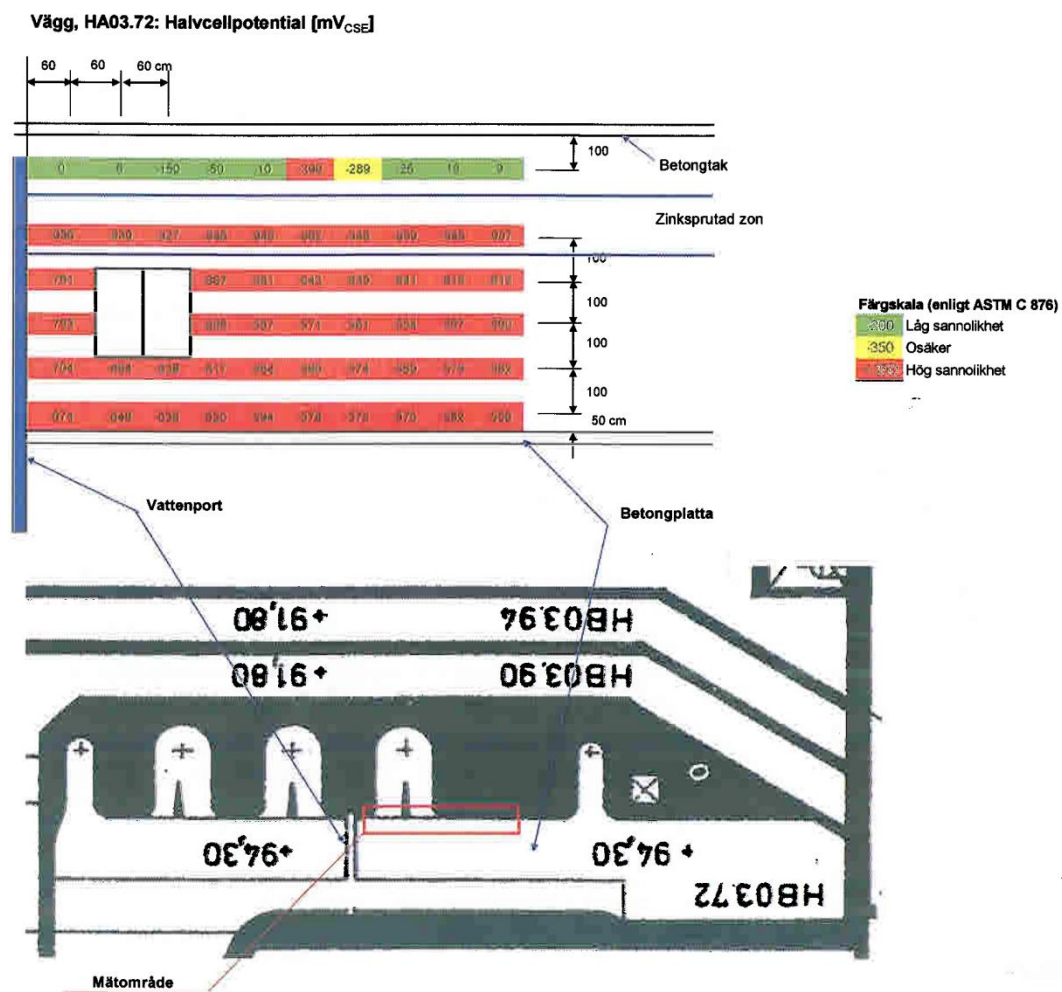
De zoner som endast exponeras för luft är i god kondition. Därför gjordes endast mätning i ett område. Den uppmätta korrosionshastigheten var nästan noll, halvpotentialen var mer positiv än $900 \text{ mV}_{\text{CSE}}$.

"Detta innebär enligt ASTM C876 att sannolikheten att ingen korrosion pågår är $>90\%$." [56]

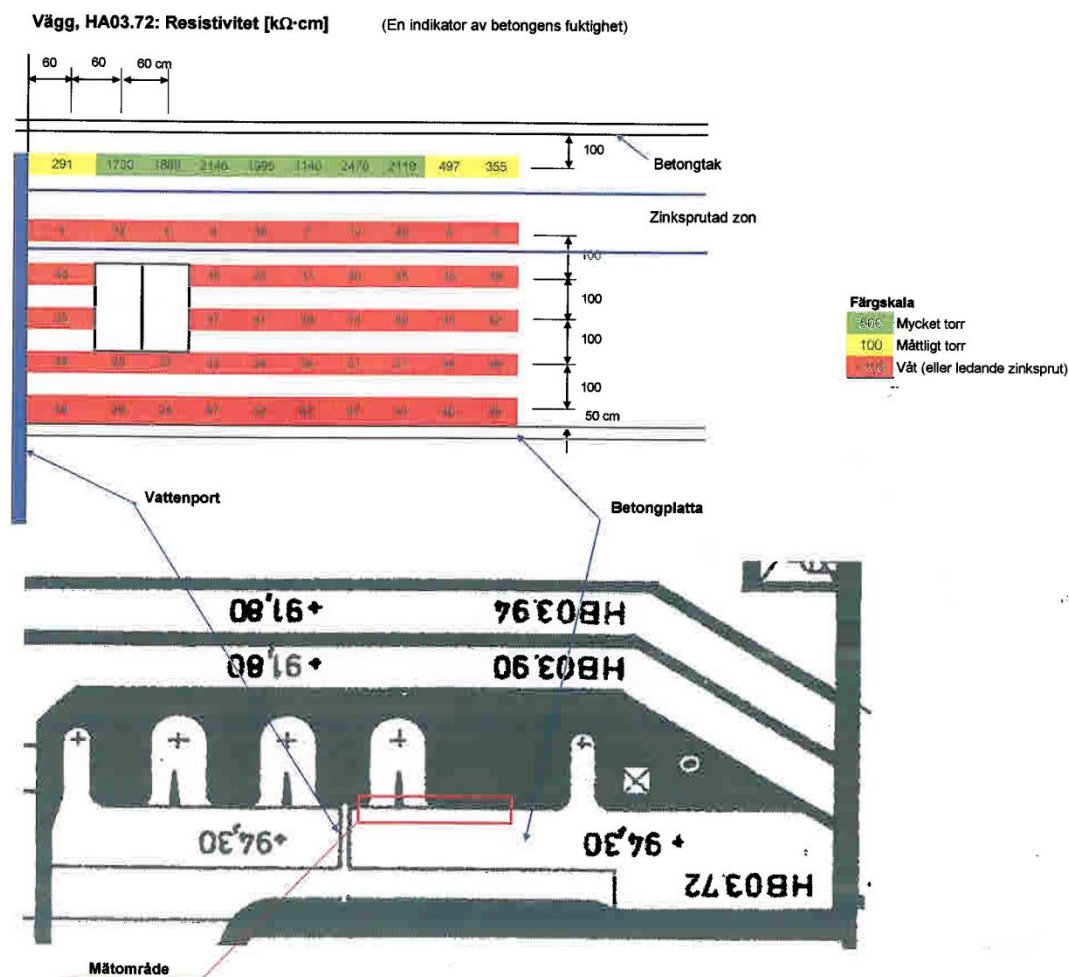
Den relativt höga resistiviteten som uppmättes antyder att betongen är relativt torr. Slutsatsen är att ingen korrosion pågår i luftzonen på de uppmätta ställen.



Figur 7.5 Uppmätt korrosionshastighet, enligt [56].



Figur 7.6 Uppmätt halvpotential, enligt [56].



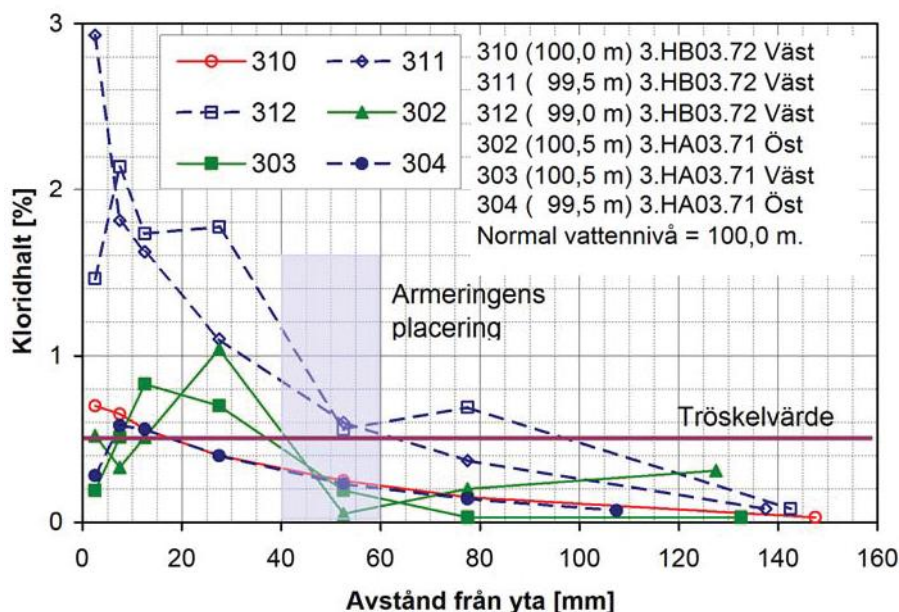
Figur 7.7 Uppmätt resistivitet, enligt [56].

7.3.3 Kloridmätning och tillståndsbedömningar hjälpkylvattenkanaler L3 och L4

I rapporten, [15], har man beräknat förväntad kloridhalt för betong-konstruktioner i Forsmarksmiljö med antagandet om en betongkvalitet K40 vilket motsvarar en betong med vct 0,50. Hydrationsgraden var okänd men ansattes till 0,85 och omgivande vattentemperatur varierade men ansattes till 10°C. Den totala kloridhalten i en provkropp blev då 1,2 % $\pm$ 0,20 %. De uppmätta maxvärdena i de prover som tagits visar att kloridprofilerna har en stor spridning men ligger inom den beräknade kloridprofilen.

"Osäkerheten hos data som används i beräkningsmodeller gör det svårt att förutse kloridprofilerna genom beräkningar." [15]

Tröskelvärden för betongkonstruktioner baserat på total kloridhalt togs fram i [15], där de blev 0,7 % för undervattenskonstruktioner och 0,5 % i skvalpzonen. Värdena gäller för en betong där de lättlösliga alkalierna, Natrium och Kalium har lakats ur. Detta medför att betongens pH blir ca 12,5 och ingen urlakning av Kalciumhydroxid har skett.



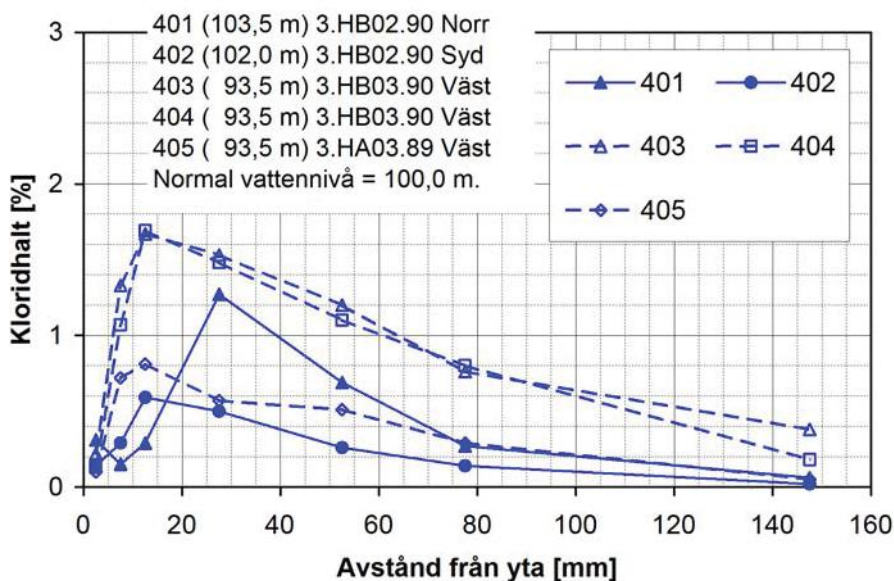
Figur 7.8 Uppmätta kloridhalter i hjälpkylvattenkanaler, F3, enl. [15].

Mätningar på kloridhalter vid vattenlinjen visade på en kloridhalt enligt Figur 7.8 vid armeringen, vilken antagits ha ett täckande betongskikt på 50 mm. Det beräknade kloridtröskelvärde, 0,5 %, var högre än de flesta uppmätta kloridhalterna vid armeringens djup, vilket betyder att armeringen inte skulle korrodera. I besiktningsprotokollet framgår det att armeringskorrosion fanns kring vattenlinjen. Orsakerna till att korrosion uppstod trots att de uppmätta kloridvärdena visade att korrosion inte skulle finnas kunde det bero på att kloridtröskelvärde i verkligheten var lägre än det som beräknats fram. Det skulle också kunna bero på att kloridhalterna haft stor variation vid den provtagningsnivån som hade valts. Eftersom kloridhalterna ökade med ökat vattendjup och det inte med säkerhet kunde bestämmas vad vattennivån före provtagningen var blev det svårt att bedöma orsaken till den låga kloridhalten.

Vid bestämning av fuktnivåer på borrhämnarna fanns det strax över vatten-linjen fuktnivåer över 90 % vilken ger en bra miljö för armeringskorrosion. Samtidigt uppvisade betongen ett lågt pH-värde vilket gjorde att klorid-tröskelvärde kunde vara för högt satt.

"Den slutsats som kan dras här är att tröskelvärde för armeringskorrosion i områden kring skvalpzon är lägre än det som antogs".

"Tröskelvärde kan bli så lågt som 0,2 %." [15]



Figur 7.9 Uppmätta kloridhalter i hjälpkylvattenkanaler, F3, enl. [15].

För konstruktioner som låg under vatten var kloridhalten vid armeringen under det beräknade kloridtröskelvärde på 0,7 %. Ett fåtal bom hittades under vattenlinjen och den pågående armeringskorrosionen var långsam på grund av syrebrist.

Tillståndsbedömningen resulterade i:

- Korrosionen under vattenytan pågick med låg intensitet och man behövde endast bevaka konstruktionerna de närmsta åren.
- Konstruktioner som inte löper någon risk för armeringskorrosion låg över vattenytan och långt från skvalpzonen.
- Konstruktioner kring vattenlinjen var speciellt utsatta. Vattennivåer borde registreras för att se vilka delar som ligger över respektive under vattenlinjen och för att veta under vilka tider de gör det.
- Täthetsprovning av betongen visade att de uppfyllde BBK94:s krav på en vattentät betong.

Övervakningsprogram:

Konstruktioner under vatten:

Korrosionshastigheter under vattenytan var låga pga. begränsad tillgång på syre. Att tidsbestämma när korrosionen uppnår en kritisk nivå är svårt. Korrosionsprodukter från miljöer med låg syretillgång blir inte lika volyminösa och kan urlakas ur betongen utan att avspjälkning och bom noteras vid inspektion.

"Den röda rostens volym är fyra gånger det ursprungliga stålets. Den "svart-rost" som bildas vid begränsad syretillgång är mindre volyminös än den röda. Den svarta rostens volym är två gånger det ursprungliga stålet. Dessutom kan den svarta rosten lösas och transporteras ut från betongen om den är porös. Resultatet blir att det krävs djupare armeringskorrosion och längre tid för att sprickor ska kunna bildas på konstruktionsdelar som är under vatten. Korrosionsdjupet hos en svart rost måste vara minst två gånger korrosionsdjupet hos en röd rost." [15]

För att hålla konstruktioner under uppsikt föreslogs visuella inspektioner och bomknackning t.ex. vartannat år. För att kontrollera armeringens tillstånd borde man frilägga armeringen på några ställen. För att bestämma en bra nivå på frekvens och omfattning kan man ta vägledning från liknande inspektioner. Om armeringen inte visar några tecken på armeringskorrosion kan ett glesare intervall utföras på t.ex. 8 år.

Som alternativ skulle man kunna mäta korrosionsströmstyrkan med jämna mellanrum vid drift av anläggningen, dvs. när vattenvägarna är fyllda, genom att montera givare på ställen med uppmätt hög korrosion för tömda vattenvägar.

Konstruktioner vid vattenlinjen:

Av de korrosionsskador som upptäckts låg de flesta kring vattenlinjen. Vid mätningar på armeringskorrosionen var korrosionshastigheten hög.

"Med antagandet om att korrosionen befinner sig inom propageringsskedet kan sprickbildning på betongytor förväntas inom en snar framtid. Det är svårt att ange exakt tid men 2 till 4 år kan vara en rimlig uppskattning. Det bör noteras att detta inte avser de områden som redan är spruckna eller skyddas genom katodiskt skydd." [15]

Med tanke på detta borde inspektioner med okulär besiktning och bom-knackning utföras årligen för kritiska konstruktionsdelar vilka är sådana som har stor betydelse för konstruktionens bärförmåga och driftsäkerhet.

Konstruktioner belägna över vattenlinjen:

De konstruktionsdelar som låg över vattenlinjen, dvs. ca 2 m från normal-vattennivån, hade en liten risk för armeringskorrosion. Okulär besiktning och bomknackning skulle kunna utföras med ett intervall på 2-3 år.

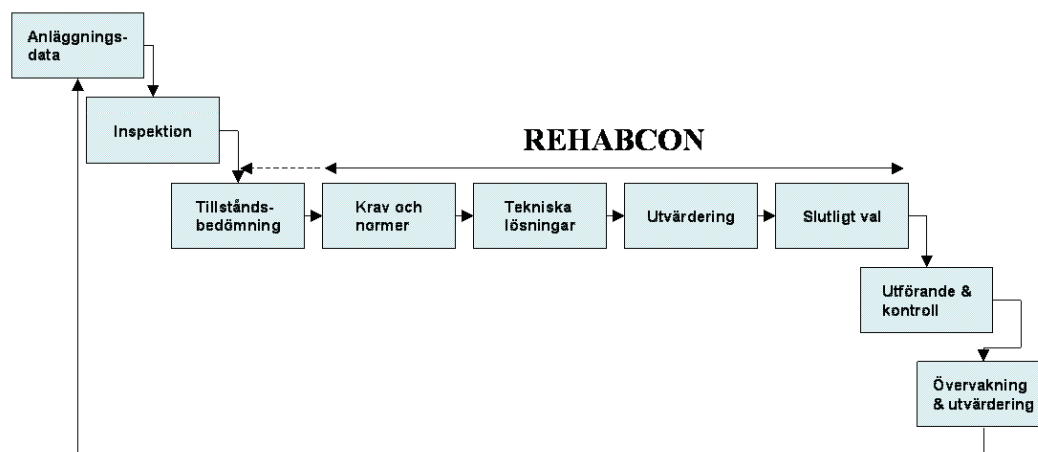
8 Reparationsprocess enligt SS-EN 1504 och REHABCON

8.1 REPARATIONSPROCESSEN ENLIGT REHABCON

I förvaltningsprocessen ingår underhåll av betongkonstruktioner och i REHABCON [57] beskrivs den enligt Figur 8.1. Hur reparationsprocessen kan tillämpas enligt REHABCON beskrivs i Elforsk rapport, [58].

Förvaltningsprocessen kan förenklat delas in i:

- Anläggningsdata
- Inspektion
- Tillståndsbedömning
- Krav och normer
- Tekniska lösningar
- Utvärdering
- Slutligt val
- Utförande och kontroll
- Övervakning och utvärdering



Figur 8.1 Beslutsflöde enligt REHABCON [57], hämtad ur [58].

Anläggningsdata:

Anläggningsinformation bör finnas arkiverat innehållande konstruktionsdata, utförda inspektioner och reparationer enligt [57].

- Originalritningar och beräkningar
- Övrig konstruktionsdata som erfarenheter och problem från byggnation
- Protokoll från genomförda inspektioner och besiktningar
- Information om utförda reparationer

Inspektion:

Inspektionen utförs okulärt och med enkla mätningar. Brister som upptäcks vid inspektion behöver tillståndsbedömas för att rätt åtgärd ska kunna utföras.

Tillståndsbedömning:

Den ska ge svar på skadeorsak, placering, omfattning, skadans effekter, framtida nedbrytning och skadans framtida effekt. Om konstruktionen uppfyller sin funktion trots skadan så behöver ingen åtgärd vidtas. Om den inte uppfyller kraven kan man antingen vänta med reparationen, utfärda restriktion i användningen, reparera eller riva och bygga nytt. Om tillståndsbedömningen inte utförs eller ej är tillräckligt bra utförd kan reparationen misslyckas, bli onödigt omfattande och därmed kostsam, få för kort livslängd eller behöva göras om.

Krav och normer:

Samhället ställer olika bindande krav. Man kan t.ex. ställa krav på tillräcklig säkerhet. Krav som inte är bindande kan ställas av anläggningsägaren och dessa kan t.ex. vara reparationens livslängd, nivå på periodiskt underhåll, reparationens byggtid, tidpunkt för reparationen, ekonomi- och miljökrav utöver de lagstadgade.

Tekniska lösningar:

Vid tillståndsbedömningen bör tillräcklig information om skadan erhållas och därifrån kan en eller flera tekniska lösningar väljas.

I REHABCON ges i tabellform en hjälp till val av reparationsmetod t.ex. kan man välja metod beroende på skadetyper och orsak. Reparationsmetoderna bygger på de principer som finns i standarden EN-1504-9 [67]. Tabellen återfinns i omarbetad version i [10].

Utvärdering:

De tekniska lösningarna utvärderas med avseende på livslängd, bärförmåga, utförande, miljö och hälsoaspekter samt ekonomi. Utvärderingen kan göras antingen kvantitativt eller kvalitativt.

En kvalitativ utvärdering listar synpunkter och risker m.a.p. livslängd, bärförmåga, utförande, miljö och hälsoaspekter samt ekonomi och återfinns i REHABCON, [57], och finns också i omarbetad version i [10].

"För att göra en kvantitativ utvärdering krävs betydligt mer omfattande ingångsparametrar i form av relevanta modeller och materialdata. I REHABCON manualen finns omfattande dokumentation om hur en kvantitativ utvärdering kan genomföras, främst med avseende på beständighet och livslängd. I vissa fall är dock dagens kunskapsläge sådant att en kvantitativ utvärdering inte låter sig göras." [58]

Slutligt val:

"Det slutliga valet av en reparationsmetod kan ingen annan än ägaren göra.

Beslutet baseras på den information som tagits fram i tidigare steg." [58]

Utförande och kontroll:

De saker som innefattas under denna rubrik är detaljprojektering, upprättande av förfrågningsunderlag, anbudsutvärdering, entreprenadens utförande, kontroll under entreprenaden och slutbesiktning.

I detaljprojektering bör de ingående delmomenten beskrivas och kan innefatta metod- och materialval och man kan t.ex. beskriva avverkningsmetod, betongkvalitet och täckskikt. I förfrågningsunderlaget bör administrativa föreskrifter och tekniska beskrivningar av reparationen ingå.

Uppföljning:

Metoder för övervakning av konstruktionerna och reparationerna bör finnas enligt [57]. Dessa kan vara pågående mätningar av deformationer, sprickor, armeringskorrosion, kloridprofiler och återkommande inspektioner. Information om utförda reparationer och övervakning ska implementeras i anläggningsdata.

8.2 REPARATIONSSTANDARD SS-EN 1504

8.2.1 Innehåll

SS-EN 1504 består av 10 olika delar:

- SS-EN 1504-1 Definitioner [59]
- SS-EN 1504-2 Ytskyddsprodukter för betong [60]
- SS-EN 1504-3 Reparation av bärande och icke bärande konstruktioner [61]
- SS-EN 1504-4 Produkter för vidhäftning mot betong [62]
- SS-EN 1504-5 Injektering av betong [63]
- SS-EN 1504-6 Material för förankring av armering [64]
- SS-EN 1504-7 Material för skydd [65]
- SS-EN 1504-8 Kvalitetsstyrning och utvärdering av överensstämmelse [66]
- SS-EN 1504-9 Allmänna principer för val av produkter och system [67]
- SS-EN 1504-10 Utförande [68]

Del 9 behandlar reparationsprocessen med dess huvudmoment:

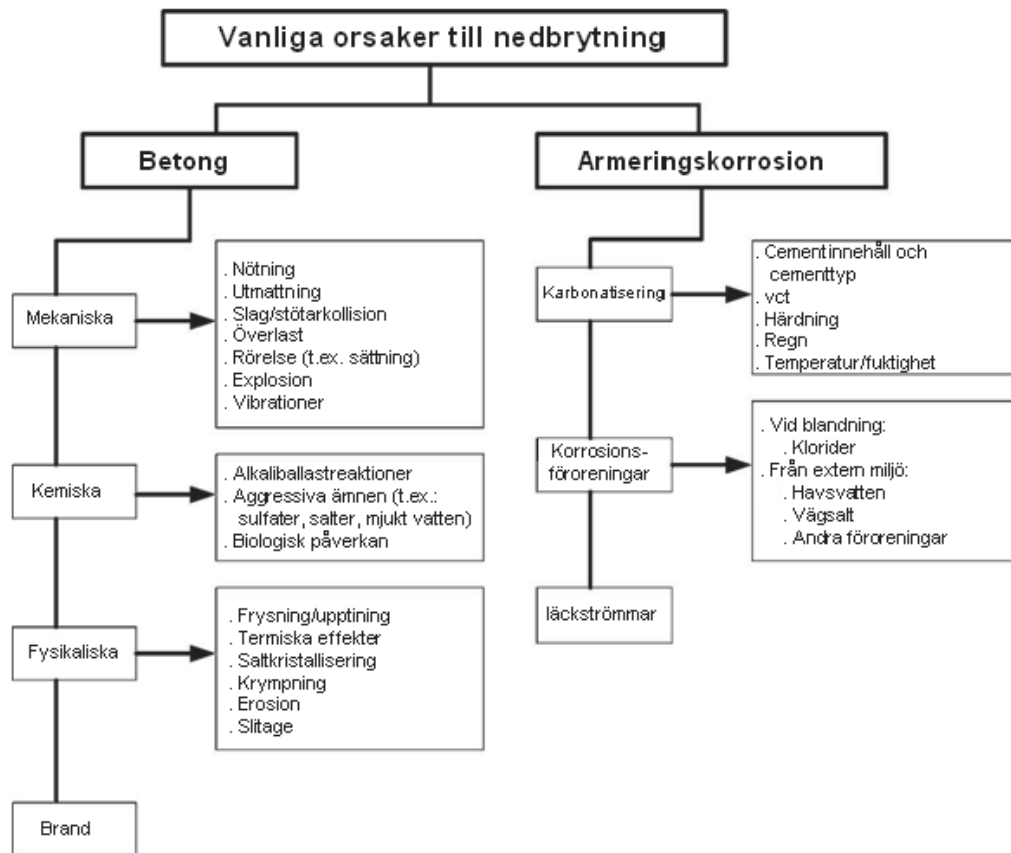
- Tillståndsbedömning av konstruktionen
- Identifiering av orsakerna till nedbrytning
- Val av alternativ för skydd och reparation
- Val av lämplig(a) princip(er) för skydd och reparation
- Val av metoder
- Definiera produkternas och systemens egenskaper
- Specificering av underhållskrav som följer efter utförande av skydd och reparation

8.2.2 Bedömning av konstruktionen

Enligt SS-EN 1504-9 [67] ska en bedömning innehålla, men inte begränsas, till följande:

- Okulärbesiktning av den befintliga betongkonstruktionen
- Provning för bedömning av betongens och armeringens tillstånd
- Fastställande av ursprunglig konstruktionsmetod
- Omgivande miljö, inklusive exponering av föroreningar
- Betongkonstruktionens historik, inklusive miljöexponering
- Omständigheter under användningstiden (exempelvis belastning eller andra aktiviteter)
- Krav på konstruktionens framtida användning

Olika typer av fel och orsaker till fel illustreras i Figur 8.2.



Figur 8.2 Vanliga orsaker till fel, enligt [67].

8.2.3 Skydd och reparationer

De förvaltningsalternativ som finns tillgängliga vid betongreparationer enligt SS-EN 1504-9 [67] är följande:

- Gör ingenting under en viss tid, men övervaka
- Analysera bärförmågan på nytt, vilken möjligen kan leda till nedklassning av funktionen
- Förebygg eller dämpa fortsatt nedbrytning
- Förstärk eller reparera och skydda hela, eller delar av, betongkonstruktionen
- Bygg om eller byt ut hela, eller delar av, betongkonstruktionen
- Riv hela, eller delar av, betongkonstruktionen

"Principerna för skydd och reparation utgår ifrån kemiska, elektrokemiska eller fysikaliska principer, som kan användas för att förhindra eller stabilisera nedbrytningen av betong eller elektrokemisk korrosion på ståltytor, eller för att förstärka betongkonstruktionen." Enligt [67].

Reparationsprinciper delas in två huvudkategorier.

Principerna 1 till 6 omfattar fel i betong eller betongkonstruktioner och principerna 7 till 11 relateras till armeringskorrosion.

De principer som finns i SS-EN 1504-9 [67] är:

1. Skydd mot inträngning
2. Fuktkontroll
3. Reparation av betong
4. Förstärkning
5. Ökning av fysikalisk motståndsförmåga
6. Motståndsförmåga mot kemikalier
7. Bevara och återställa passivitet
8. Ökning av resistiviteten
9. Katodisk kontroll
10. Katodiskt skydd
11. Kontroll av anodområden

När princip och metod valts enligt SS-EN 1504-9 [67] ska de produkter och system som kommer att användas väljas ut i enlighet med kraven enligt SS-EN 1504-2 [60] till 1504-7 [65] eller någon annan lämplig standard.

För reparationsprinciperna 3, 4 och 7 kan funktionskrav ställas på reparationen enligt SS-EN 1504-3 [61].

8.2.4 Utförande av reparationer

SS-EN 1504-10 "anger krav på beskaffenheten hos underlaget före och under genomförandet, samtidigt som krav ställs på konstruktionens stabilitet. Vidare ställs krav på förvaringen, förberedelserna och genomförandet, för produkterna och systemen för skydd och reparation av betongkonstruktioner, tillsammans med krav på kvalitetsstyrning, underhållet, arbetsmiljön samt miljöskyddet." [68].

Standarden innehåller bland annat:

- Allmänna krav
- Metoder för skydd och reparation
- Preparering av underlag
- Applicering av produkter och system
- Kvalitetsstyrning

För valda reparationsmetoder hänvisas man till krav och anvisningar enligt respektive avsnitt i [68].

Principer och metoder		Förberedelser Se avsnitten	Genomförande Se avsnitten	Kvalitetsstyrning Se avsnitten
	Metoder som uppfyller princip 7 – Bevara eller återställa passiva förhållanden Följande metoder uppfyller principen att skapa kemiska förhållanden som medför att armeringsytan bibehålls vid eller återgår till ett passivt tillstånd.			
7.1	Ökning av armeringens täckande betongskikt genom påföring av cementbaserat bruk eller betong eller påläggning av ytskikt Dessa metoder är att öka det täckande betongskiktet eller att lägga på ett ytskikt som förhindrar att nedbrytande ämnen tränger in: — Påföring av betong eller bruk — Påläggning av ytskikt	7.1, 7.2.1, 7.2.2, 7.2.3, 7.2.4 7.1, 7.2.1, 7.2.2	8.1, 8.2.1, 8.2.2, 8.2.3, 8.2.4, 8.2.5 8.1, 8.2.1, 8.2.7	9.1, 9.2 9.1, 9.2
7.2	Utbyte av förorenad eller karbonatiserad betong Denna metod är att byta ut karbonatiserad betong mot ej förorenat material (bruk/betong).	7.1, 7.2.1, 7.2.2, 7.2.3, 7.2.4	8.1, 8.2.1, 8.2.2, 8.2.5	9.1, 9.2

Figur 8.3 Metoder för skydd och reparationer, Tabell 1 enligt [68].

SS-EN 1504-10 [68] beskriver i tabellformat:

- Hur beredning av underlaget går till
- Applicering av produkter och system
- Sammanfattning av provningar och observationer vid kvalitetstyrning

8.3 GENOMGÅNG AV UTFÖRDA REPARATIONER

8.3.1 Inspektioner och tillståndsbedömningar

Kylvattenvägarna har i framtiden behov av reparationer och det finns framtagna underhållsplaner där man har planerat in reparationer vid framtida revisionsavställningar. Eftersom kylvattensystemen är i drift den största delen av tiden och endast någon/några av dem kan torrläggas under korta tider vid de årliga revisionsavställningarna, är inspektion av dessa svåra att utföra. Man har kunnat basera framtida inspektioner och reparationer på erfarenheter från tidigare utförda inspektioner och reparationer. Detta betyder att man i förväg har kunnat ta fram

program för besiktning och kontroller samt reparationsåtgärder. I vissa fall har man kunnat inspektera och reparera konstruktionen på samma revisionsavställning.

Man kan sammanfatta de olika dokumenterade skadorna som betongkonstruktionerna har haft i kylvattenvägarna med höga klordihalter, eroderade betongytor, rostutfällningar, avspjälkad och delaminerad betong.

8.3.2 Krav

Kraven på kylvattenkanalernas resterande livslängd varierar från 10 år upp till 40 år enligt [34]. Man vill ha ett minimalt periodiskt underhåll där och reparationstiden begränsas av kärnkraftverkens revisionsavställningar vilka normalt kan variera från 15 till 30 dagar. De krav man har på reparationen av betongytorna är att återställa dessa till ursprungligt skick utan att minska kylvattenvägarnas tvärsnitt.

8.3.3 Tekniska lösningar

Val av tekniska lösningar för reparation av skador orsakade av kloridinitierad armeringskorrosion presenteras i Tabell 8.1. Tabellen är ett utdrag ur [10].

Tabell 8.1 Val av reparationsmetod enligt [10].

Kloridinitierad armeringskorrosion		
Typ av skada	Huvudsakliga rep. principer enl. SS-EN 1504-9 angivna inom parantes	Huvudsakliga reparationsmetoder enligt [10].
I.1.1 Korroderande armering. Spjälkning av täcksikt med eller utan sprickbildning.	Stoppa fortsatt korrosion genom att ersätta täcksikt och betong som är förorenad med klorid (Princip 7). Återställ bärförmåga och beständighet (Princip 3).	Metod 1: Gjuta om med betong eller bruk. Metod 2: Lokala lagningar med betong eller bruk.
I.1.2 Korroderande armering. Ingen spjälkning. Sprickor i täcksikt.	Stoppa fortsatt korrosion genom att återställa eller bevara passivitet (Princip 7), begränsa fukthalten (Princip 8), anbringa katodiskt skydd (Princip 10) eller inhibitorer (Princip 11). Återställ bärförmåga och beständighet (Princip 3 och 4).	Metod 1: Gjuta om med betong eller bruk. Metod 2: Lokala lagningar med betong eller bruk. Metod 5: Sprickreparation + Metod 4: Ytbehandling. Metod 9: Katodiskt skydd + Metod 5: Sprickreparation Metod 10: Inhibitorer + Metod 5: Sprickreparation Metod 11: Kloridutdrivning + Metod 5: Sprickreparation
I.1.3 Korroderande armering. Ingen spjälkning. Inga sprickor i täcksikt.	Stoppa fortsatt korrosion genom att återställa passivitet (Princip 7), öka resistiviteten genom att begränsa fukthalten (Princip 8), begränsa syretillgången (Princip 9), anbringa katodiskt skydd (Princip 10) eller inhibitorer (Princip 11).	Metod 1: Gjuta om med betong eller bruk. Metod 4: Ytbehandling Metod 9: Katodiskt skydd Metod 10: Inhibitorer Metod 11: Kloridutdrivning
I.1.4 Korrosion har ännu inte startat, men klorid-koncentrationen vid armeringen har nästan nått tröskelvärdet.	Förläng initieringstiden till dess att korrosion startar genom att bevara passiviteten (Princip 1 eller 7), anbringa katodiskt skydd (Princip 10) eller inhibitorer (Princip 11).	Metod 1: Gjuta om med betong eller bruk. Metod 3: Utökat cementbaserat täcksikt på det gamla. Metod 4: Ytbehandling Metod 9: Katodiskt skydd Metod 10: Inhibitorer Metod 11: Kloridutdrivning
I.1.5 Korrosion på förspänd eller efterspänd armering.	Stoppa fortsatt korrosion och återställ lastbärande (Princip 4).	Metod 6: Ny efterspänd armering Metod 11: Riv och ersätt

Enligt [58] gäller följande "tabellerna är ett hjälpmedel vid identifieringen, men efter det att metoder identifierats måste fakta och information om metoderna sökas på annan plats i Betongreparation.se. Att en metod identifierats som möjlig via tabellen betyder inte att den behöver vara lämplig i det aktuella fallet. I vissa fall kan det även finnas andra metoder som inte identifieras som kan vara möjliga."

Flertalet av de skador man funnit vid gjorda tillståndsbedömningar är korroderad armering med eller utan avspjälkning. De lämpliga reparations-metoderna blir då enligt Tabell 8.1, skadetyper 1.1 och 1.3:

- Metod 1: Gjuta om med betong eller bruk.
- Metod 2: Lokala lagningar med betong eller bruk.
- Metod 4: Ytbehandling
- Metod 9: Katodiskt skydd
- Metod 10: Inhibitorer
- Metod 11: Kloridutdrivning

8.3.4 Utvärdering

I [10] finns hjälpmedel i form av tabeller där en kort beskrivning av de olika metoderna finns. Där beskrivs kommentarer, egenskaper och risker för respektive reparationsmetod för

- Livslängd
- Bärförmåga
- Utförande
- Miljö och hälsoaspekter
- Ekonomi

I områden med synliga skador är det metod 1 eller metod 2 som kommer ifråga, dvs. avverkning av betong och ny pågjutning eller lagning enligt Tabell 8.1 för skadetyper 1.1.

För områden utan synliga skador faller metod 10 bort, pga. den osäkerhet som visats i resultat med pålagda inhibitorer, enligt [28]. Även metod 11 faller bort pga. dess begränsade tidigare användning enligt [10]. Återstående lämpliga reparationsmetoder blir då metod 1, 2, 4 och 9. För att metod 4 och 9, ytbehandling respektive katodiskt skydd, ska vara tillämpliga gäller att den kvarvarande armeringsarean är tillräckligt stor för att konstruktionen ska kunna uppfylla sin funktion. Detta kräver att man har gjort en tillståndsbedömning och en statisk analys av konstruktionen. Vid armeringskorrosion kan följande effekter uppstå som man måste ta hänsyn till enligt [14]:

- Minskat betongtvärsnitt och minskad armeringsarea.
- Minskad duktilitet i stålet.
- Vidhäftningsförlust mellan armering och betong.

8.3.5 Slutligt val och utförande

Slutligt val av metod bör baseras på ett beslutsunderlag och detta kan med fördel tas fram under detaljprojekteringen då en tät kontakt med projektör och beställare ofta förekommer som en iterativ process.

När valet av metod för reparationer är gjort så beskrivs själva utförandet av reparationsmetoderna i [10] och i [58] ges exempel på hur val av metod kan göras.

De metoder som använts vid tidigare reparationer av kylvattenvägarna är:

- Betongavverkning och pågjutning med ny betong.
- Katodiskt skydd av konstruktionerna.
- Ingen åtgärd, endast bevakning av konstruktionerna.

Att belägga med ytskikt är den metod som inte använts tidigare vid reparationer, enligt den dokumentation som författaren har gått igenom.

Det som inte kan återfinnas i dokumentationen av utförda reparationer är vilka kontroller som utförts efter reparationerna som exempelvis vidhäftnings-kontroll av utförd pågjutning. Förslagsvis kan ett program tas fram för olika kontroller som kan utföras vid framtida betongreparationer.

9 Diskussioner och slutsatser

9.1 SAMMANFATTNING AV INSPEKTIONER OCH REPARATIONER

Kärnkraftverken konstruerades och uppfördes med en antagen drifttid på 40 år, enligt [69]. Tillståndshavarna för kärnkraftverken har aviserat att driva dem i 50 till 60 år. Man har under de senare åren således lagt ner resurser på att kontrollera och reparera kylvattenvägarna på de olika kärnkraftverken för att kunna ha kärnkraftverken i långtidsdrift.

Ringhals och Forsmark har gjort ett antal tillståndsundersökningar och reparationer på respektive kärnkraftverks kylvattenvägar. Tillstånds-bedömningarna har generellt gjorts från år 2005 och framåt. Man har även gjort reparationer av skadade betongkonstruktioner och åtgärder för att skydda armeringen mot korrosion genom katodiskt skydd.

Ringhals och Forsmark har inarbetat besiktningsrutiner i sina underhålls-program för anläggningarna. Besiktningsrutinerna visar vilka kontroller som ska utföras och hur de ska utföras. Därefter skapas program eller planer för hur besiktningsanmärkningarna ska åtgärdas. Många av de upptäckta skadorna återfinns vid vattenlinjen där det råder gynnsamma förhållanden för armeringskorrosion. Skador återfinns även i mindre omfattning under normal vattennivå.

Oskarshamn har gjort tillståndsbedömningar och reparationer av in- och utloppskulvertar omkring år 1997 till 1999. Därefter har man haft vattenvägarna i drift för att från år 2010 och framåt återigen börja utföra tillståndsbedömningar. I de senaste tillståndsbedömningarna har åtgärds-förslag eller återkommande tillsynsintervall föreslagits för de undersökta konstruktionerna.

Reparationsmetoderna för skadade betongkonstruktioner är likadana för alla tre kärnkraftverken.

- Vattenbilning av skadad och kloridhaltig betong
- Ersättning och/eller komplettering av skadad armering
- Pågjutning av ny betong eller applicering av sprutbetong med god kvalitet och med ett lågt vct
- Täckande betongskikt för vald exponeringsklass enligt standard.
- Katodiskt skydd

Endast egenkontroller ifyllda av respektive utförare och dokument på material- och betongkvaliteter har hittats. Ingen annan dokumentation av kontroller har hittats som exempelvis vidhållningskontroll av pågjutning.

9.2 SLUTSATSER

Rapporten innehåller information, citat och figurer från genomgångna rapporter och tillståndsbedömningar. Författaren har inte medvetet vid beskrivningarna av inspektionerna och reparationerna och inte heller dragit egna slutsatser utan endast återgett intressanta avsnitt och citat ur respektive rapport och tillståndsbedömning.

Vattentemperaturen är förhöjd i kylvattenavloppssystemet vilket gäller för samtliga kärnkraftverk. I [48] ger man en trolig orsak till förekomsten av svartrost i konstruktionerna vilket kan bero på förhöjda vattentemperaturer. I [15] nämns att en ökad temperatur är gynnsam för armeringskorrosion.

Noterbart är att OKG har ett större antal dokumenterade fall av svartrost i kylvattenvägarna än både Ringhals och Forsmark, med utgångspunkt från det material som författaren har tagit del av. Författaren har valt ut tillståndsbedömningar och reparationer för kylvattenutloppen från Ringhals 3 och Oskarshamn 2 på grund av att deras funktion är liknande och därmed jämförbara. För Forsmark har författaren fått ta del av tillståndsbedömningar och reparationer av hjälpkylvattenvägar för Forsmark 3.

Kloridtröskelvärden för att initiera armeringskorrosion har beräknats fram i enlighet med [16] för Forsmarksmiljö i [15]. Tröskelvärdena, vilka presenteras som kloridjoner/cementvikt-%, blir olika i en betong med högt pH-värde jämfört med en betong med sänkt pH-värde, en urlakad betong. Det totala kloridtröskelvärdet för en betongkonstruktion ovanför vattnet blir 1,4 % vid pH 13,5 och 0,5 % vid pH 12,5. För konstruktioner under vattnet blir det totala kloridtröskelvärdet 1,9 % vid pH 13,5 och 0,7 % vid pH 12,5, enligt [15]. Betongkonstruktionen antas ha ett vct på 0,5, hydrationsgraden 0,85 och vattnets temperatur är satt till 10°C. Man konstaterar att vid skvalpzonen kan kloridtröskelvärdet gå ner så lågt som till 0,2 %.

Olika former av katodisk skydd har visat sig fungera. Man har kunnat konstatera vid mätningar på armeringen för en konstruktion med ett påsprutat zinklager att förutsättningar för korrosion finns men armeringen har ingen pågående korrosion. Därav kan man dra slutsatsen att det påsprutade zinksiktet skyddar armeringen, enligt [56].

Efter montage av offeranoder intill huvudkylpumpar har man upptäckt att dessa har en högre åtgång än normalt. Resultatet av detta är troligtvis att armeringen har fått agera som offeranoder till pumparna, innan installation av offeranoder. Detta kan medföra att armeringskorrosion kan ha varit hög innan installationen av offeranoderna gjordes, enligt [20].

Vid reparationer ställs det krav på utförandet för att reparationerna ska bli lyckade. Exempelvis kan man utifrån Figur 6.7, i avsnitt 6.3, se att vattenbilningen inte har utförts tillräckligt djupt bakom armeringen vilket är en förutsättning för att reparationen ska bli bra. Vid tillståndsbedömningar efter utförda reparationer har man sett delamineringar bl.a. i tidigare lagningar, se avsnitt 6.4.

Generellt är en god kvalitet och en tät betong av största vikt. Man kan eventuellt förbättra resultaten med olika tillsatser i den färska betongen, men vissa tillsatser t.ex. korrosionsinhibitorer kräver ändå initialt en tät betong för att ge ett gott resultat, enligt [29].

10 Referensförteckning

- [1] Svenska Betongföreningen (1991): "Beständiga betongkonstruktioner". Betongrapport 1, utgåva 1, Stockholm.
- [2] Fagerlund G (2010): "Betongens beständighet under 85 år". Betong, nr 5/2010, s. 37-41.
- [3] Svenska Betongföreningen (2002): "Vägledning för val av exponeringsklass enligt SS-EN 206-1". Betongrapport 11, utgåva 1, Stockholm.
- [4] Silfwerbrand J (1987): "Theoretical and Experimental Study of Strength and Behaviour of Repaired Concrete Bridge Decks Summary". Bulletin No. 149, Dept. of Structural Mechanics and Engrg., Royal Institute of Technology, Stockholm, 16 pp.
- [5] Silfwerbrand J (1990): "Improving Concrete Bond in Repaired Bridge Decks". Concrete International, V. 12, No. 9, September 1990, pp. 61-66.
- [6] Silfwerbrand J (1997): "Pågjutningar av betong". Rapport nr 10, utgåva 3, byggnadsstatik, institutionen för byggkonstruktion, KTH, Stockholm, 67 s.
- [7] Silfwerbrand J (2009): "Bonded Concrete Overlays for Repairing Concrete Structures". Chapter 8, "Failure, Distress and Repair of Concrete Structures" (Edited by N. Delatte), Woodhead Publishing Limited, Oxford, Cambridge & New Delhi, pp. 208-243
- [8] Silfwerbrand J (1988): "Lagning av betongskador med sprutbetong. Försök med balkar under statisk och utmattande last". Meddelande nr 153, institutionen för byggnadsstatik, KTH, Stockholm, 77 s.
- [9] Janz M & Hassanzadeh M (2006): "Ny standardserie för betongreparationer, SS-EN 1504", Tidskriften Bygg & Teknik, nr 7/06, s. 20-22.
- [10] www.betongreparation.se, 2013. IT-baserad handbok för betongreparationer. Utgivare - Rebet.
- [11] Fagerlund G (2011): "Ytreparationer av betongkonstruktioner, metoder, beständighet". TVBM-3160, Avd. Byggnadsmaterial, LTH, Lund.
- [12] Svensk standard SS-EN 1992-1-1:2005: "Eurokod 2: Dimensionering av betongkonstruktioner - Del 1-1: Allmänna regler och regler för byggnader". Utgåva 1, 2008.
- [13] Svensk standard SS-EN 206:2013: "Betong – Fordringar, egenskaper, tillverkning och överensstämmelse". Utgåva 1, 2013.
- [14] Camitz, G (2011): "Korrosionsskydd av stål i betongkonstruktioner, Handbok". SWEREA/KIMAB.
- [15] Hassanzadeh M & Tang L (2009): "Tillståndsbedömning med avseende på armeringskorrosion i hjälpkylvattenvägar L3 och L4". U 09:136, Sveriges Tekniska Forskningsinstitut och Vattenfall Research & Development AB.
- [16] Svenska Betongföreningen (2007): "Vägledning för livslängd-dimensionering av betongkonstruktioner". Betongrapport nr 12.
- [17] Betonghandboken Reparation, upplaga 2 (1998). AB Svensk Byggtjänst, Cement och Betong Institutet, Cementa AB och Stabilisator AB. ISBN 91-7332-327-6.
- [18] Sandberg P (1998): "Chloride initiated reinforcement corrosion in marine concrete". Report TVBM-1015, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology
- [19] Sandberg B, Ahlström J, Sederholm B, Nilsson L-O och Lindmark S (2010): "Korrosion på stål i betong i kylvattenvägar, Delrapport 2 – Relativa fuktighetens inverkan på kloridinitierad armeringskorrosion". Elforsk rapport 10:83.

- [20] Sandberg B, Ahlström J, Tidblad J och Sederholm B (2009): "Korrosion på stål i betong i kylvattenvägar, Delprojekt 3 – Korrosion på stål i vattenmättad betong". Elforsk rapport 10:84.
- [21] Bolin J-O (1993): "Ölandsbron i nya kläder". Tidskriften Betong 1/93, s. 10-11.
- [22] ASTM C876-09 (2009): "Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete". ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- [23] Brousseau, R (1992): "Factors affecting adhesion on concrete of arc-sprayed zinc". Corrosion Engineering, vol 48, No 11.
- [24] Holcomb, G R & Bullard, S J & Covino, Jr, B S & Cramer, S D & Cryer, C B & McGill, B G (1996): "Electrochemical Aging of Thermal-Sprayed Zinc Anodes on Concrete", Proceedings in Thermal Spray Conference, pp. 185-192.
- [25] Sederholm, B (1996): "Utomhusprovning av galvaniska anodsystem för katodiskt skydd av armerade betongkonstruktioner". KI Rapport 1999:6. Korrosionsinstitutet.
- [26] Sederholm, B & Selander, A (2011): "Katodiskt skydd av betongkonstruktioner med termiskt sprutade offeranoder av zink. Erfarenhetsinsamling och fältundersökning med fokus på långtidsegenskaper – Etapp I". Elforsk rapport 11:55.
- [27] Uhlig H.H och Revie R.W, (2008): "Corrosion and corrosion control. An Introduction to Corrosion Science and Engineering". 4th edition.
- [28] Byfors K, Fratesi R, Grønvold F, Gudmundsson G, Janz M, Klinghoffer O, Mattila J, Miller J.B och Poulsen E (2004): "Repair and Maintenance of Concrete Structures. NORECON Task T2: Repair Methods - A Review". ISBN 82-91228-31-0
- [29] ACI 212.R-10 (2010) "Report on Chemical Admixtures for Concrete." American Concrete Institute. ISBN 978-0-87031-402-5
- [30] "Så fungerar en Tryckvattenreaktor". Informationsbroshyr, Kärnkraftsäkerhet och Utbildning AB, www.ksu.se.
- [31] "Ringhals 1 - 4 Underhållsprogram för intagskanaler och kylvattentunnlar". (2013), Darwin ID 1892991/3.0
- [32] "R1-R4 Hjälpkylvattentunnlar - Underhållsinstruktion 17.1, 10/20-185, 30/40-170 Kylvattenanläggning". (2013), Darwin ID: 920121039/10.0
- [33] "Guide till Strategiska Underhållsplaner, Bygg. Slakarmerad Betong". (2010), Darwin ID: 2077438/2.0
- [34] "Strategisk Underhållsplan Byggnad, 10-, 20-185 Kylvattenanläggningar R1, R2, 30-, 40-170 Kylvattentillopp R3, R4, 30-, 40-171 Intagsbyggnad R3, R4, 30-, 40-172 Kylvattenavlopp R3, R4. SUP nummer: 17". (2010), Darwin ID: 2060539/2.0
- [35] "Underhållsspecifikation R3/R4 Renovering av kylvattenavlopp, U.00531 - 30-151 & 40-151 Turbin, U.00532 - 30-172 & 40-172 Kylvattenavlopp". (2012), Darwin ID: 2158014/2.0
- [36] "Införandebeskrivning – Bygg, Dränering, besiktning och åtgärdsprogram av kylvattenavlopp 3- & 4-172L1 och turbin 30- & 40-151, U.00531 & U.00532". (2013), Darwin ID: 2204179/2.0
- [37] "Besiktningsprogram för betongkonstruktioner i utloppstunnlar, R2, R3 och R4. Med start RA13". (2013), Darwin ID: 2230515/4.0
- [38] Svensk standard SS-EN 12504-1:2009: "Provning av betong i färdiga konstruktioner – Del 1: Borrkärnor – Uttag, undersökning och tryckprovning". Utgåva 2, 2009.
- [39] Svensk standard SS-EN 12390-3:2009: "Provning av hårdnad betong – Del 3: Tryckhållfasthet hos provkroppar". Utgåva 2, 2009.
- [40] Svensk standard SS 137242: "Betongprovning – Hårdnad betong – Karbonatiseringsdjup". Utgåva 1, 1988.

- [41] "Ringhals 3, Tillståndsbedömning av dränageschakt, utloppsstudsar och kylvattenavloppstunnel 3-172L1 till svallbassäng 172T1, 2013". (2014), Darwin ID: 2253846/2.0
- [42] "Oskarshamn 2 - Kylvattensystem - Kontroll av betongkonstruktioner, ärendenr Ä114183". OKG ID 5270029/0.0. Sveriges Tekniska Kontrollinstitut Inter Test AB, Augusti 1997.
- [43] ASTM C876-91 (1999): "Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete". (Withdrawn 2008), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009, www.astm.org.
- [44] Svensk standard SS-EN 1991-1-1: "Eurokod 1: Laster på Bärverk – Del 1-1: Allmänna laster – Tunghet, egentygnd, nyttig last för byggnader". Utgåva 1, 2011.
- [45] "O2 Betongundersökning Force". (2010) OKG ID 2010-10085/0.0. Ingående rapporter: "Betong- och armeringsprovning, kontrollen avser in- och utloppstunnlar samt rensverksbyggnaden, O2". (1998) Force Institut och "Oskarshamnverket 2 – Kylvattenvägar, utlopp. Kontroll av betongkonstruktioner". (1988) VBB Anläggning.
- [46] Inspektionsrapport 3.25. OKG ID 2000-01354 "Inspektion av betongytor i Rensverk O2 samt kontroll av zinksprutningsarbeten." (2000) Force Institut
- [47] "O2 – Reparation av kylvattenutlopp". (2010) OKG ID 2010-10081/0.0.
- [48] "Oskarshamn 2 - System 150 - Tillståndsbedömning av kylvattenvägar – 434 utlopp, kondensor till tapprogge". (2013) OKG ID 3P00482/1. CBI Betonginstitutet AB, (2013) Uppdragsrapport 3P00482.
- [49] "Forsmark 1 2 och 3 - Besiktningsrutiner för driftsatta byggnadssystem". (2011) Arken ID FM-I-090/4.
- [50] "Provprogram för vattenvägar 30112L3 och 30112L4 under revision 2007". (2011) Arken ID FMI-2007-0028/0.
- [51] Svensk standard SS 137207:2005: "Betongprovning – Hårdnad betong – Tryckhållfasthet – Omräkningsfaktorer". Utgåva 4, 2005.
- [52] Svensk standard SS 137214: "Betongprovning – Hårdnad betong – Vattentäthet". Upphävd 2004. Utgåva 1, 1978.
- [53] Svensk standard SS-EN 12390-8:2009: "Provning av hårdnad betong - Del 8: Vatteninträngning under tryck". Utgåva 2, 2009.
- [54] "Resultat från besiktning och underhållsåtgärder av hjälpkylvattenvägar 30112 L3 och L4 Forsmark 3". (2011) Arken ID FM-2007-0626/0.
- [55] "Inspektion av betongkonstruktionerna i kylvattenvägarna L3 och L4 Forsmark 3 vid Revision 2007". (2007) Arken ID FT-2007-1063/0.
- [56] Tang L (2007): "Mätningar av armeringskorrosion på betongkonstruktioner i Forsmark". SP Rapport P702642A. Arken ID EXT-2010-7119
- [57] REHABCON Manual (2004): "Strategy for maintenance and rehabilitation in concrete structures". ED DG ENTR-C-2, Innovation and SME Programme, IPS-2000-0063.
- [58] Janz M, Hejl A & Hassanzadeh M (2010): "Tillämpning av REHABCON, Utvärdering av reparationsmetod för erosionsskador vid vattenlinjen i Porsi kraftverk". Elforsk rapport 10:70.
- [59] Svensk standard, SS-EN 1504-1:2005: "Betongkonstruktioner – Produkter och system för skydd och reparation – Del 1: Definitioner" Utgåva 2, 2006.
- [60] Svensk standard, SS-EN 1504-2:2008: "Betongkonstruktioner – Produkter och system för skydd och reparation – Del 2: Ytskyddsprodukter för betong". Utgåva 1, 2004.
- [61] Svensk standard, SS-EN 1504-3:2005: "Betongkonstruktioner – Produkter och system för skydd och reparation – Del 3: Reparation". Utgåva 1, 2006.

- [62] Svensk standard, SS-EN 1504-4:2004: "Betongkonstruktioner – Produkter och system för skydd och reparation – Del 4: Produkter för vidhäftning mot betong". Utgåva 1, 2005.
- [63] Svensk standard, SS-EN 1504-5:2005: "Betongkonstruktioner – Produkter och system för skydd och reparation – Del 5: Injektering av betong". Utgåva 1, 2005.
- [64] Svensk standard, SS-EN 1504-6:2006: "Betongkonstruktioner – Produkter och system för skydd och reparation – Del 6: Material för förankring av armering". Utgåva 1, 2006.
- [65] Svensk standard, SS-EN 1504-7:2006: "Betongkonstruktioner – Produkter och system för skydd och reparation – Del 7: Material för skydd mot armeringskorrosion". Utgåva 1, 2006.
- [66] Svensk standard, SS-EN 1504-8:2008: "Betongkonstruktioner – Produkter och system för skydd och reparation – Del 8: Kvalitetsstyrning och utvärdering av överensstämmelse". Utgåva 1, 2005.
- [67] Svensk standard, SS-EN 1504-9:2008: "Betongkonstruktioner – Produkter och system för skydd och reparation – Del 9: Underlag för val av åtgärd". Utgåva 1, 2010.
- [68] Svensk standard, SS-EN 1504-10:2004: "Betongkonstruktioner – Produkter och system för skydd och reparation – Del 10: Utförande". Utgåva 1, 2006.
- [69] SSM 2010/1557-10, (2013) Utredningsrapport: "Utredning avseende den långsiktiga säkerhetsutvecklingen i den svenska kärnkraften och åtgärder med anledning av olyckan i Fukushima".

Reparationsmetoder för kärnkraftsindustrin

I och med att drifttiderna för våra befintliga kärnkraftverk har förlängts, har stora resurser lagts ned på att tillståndsbedöma och reparera kraftverkens kylvattenvägar. I dessa studie har kärnkraftverkens rutiner och strategier för betongreparationer studerats. Resultaten visar på att strategierna skiljer sig något, men de fysiska reparationsmetoderna är desamma.

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



Energiforsk