

ARMERINGSKORROSION I KYLVATTENVÄGAR INOM KÄRNKRAFTEN – ETAPP I

RAPPORT 2017:343



 BETONGTEKNIK
KÄRNKRAFT



Armeringskorrosion i kylvattenvägarna i kärnkraftverken – Etapp I

Dolda korrosionsangrepp av oväntad omfattning

BROR SEDERHOLM & JOHAN AHLSTRÖM

ISBN 978-91-7673-343-1 | © Energiforsk juni 2018

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

Förord

I kylvattenvägarna vid Oskarshamns och Ringhals kärnkraftverk har mycket lokala korrosionsangrepp hittats på den ingjutna armeringen. Dessa skador har uppstått oväntat snabbt, och ett projekt initierades för att undersöka bakgrunden till skadorna. Målet med projektet är att undersöka orsaken till skadorna samt identifiera en eller flera lämpliga skyddsmetoder.

Projektet genomförs i två etapper, och i denna rapport redovisas resultaten från den första delen. Arbetet fortsätter sedan under 2017. Projektet har utförts av Bror Sederholm och Johan Ahlström, seniora forskare vid Swerea KIMAB.

Detta projekt ingår i Energiforsk Betongtekniskt program kärnkraft, som driver forskning kring betongkonstruktioner inom kärnkraftverk. Det övergripande målet med det betongtekniska programmet är att säkerställa avsedd livslängd och hög tillgänglighet för svenska kärnkraftverk med bibehållen säkerhet och för att kunna driva en effektiv förvaltning. Intressenterna bakom Betongtekniskt program kärnkraft är Vattenfall, Uniper, Fortum, Teollisuuden Voima Oy (TVO) i Finland, Skellefteå Kraft, Karlstads Energi samt Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM).

Monika Adsten, Energiforsk

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet och publiceringen innebär inte att Energiforsk har tagit ställning till innehållet.

Sammanfattning

Omfattande lokala korrosionsangrepp har påträffats vid nyligen utförda tillståndsbedömningar av betongytor i olika delar av kylvattenvägarna i Oskarshamn kärnkraftverk och Ringhals kärnkraftverk. Under de synliga rostutfällningarna var armeringen i vissa fall helt oskadad och i andra fall helt bortkorroderad.

Föreliggande undersökning visade att rostutfällningar på betongytor i kylkanaler beror på omfattande korrosionsangrepp på armeringsstålet. Under de synliga rostutfällningarna på betongytan var i vissa fall armeringen helt oskadad och i andra fall helt bortkorroderad. Anledning till att armeringen är helt oskadad under rostutfällningarna är att de bildade järnjoner vid den korroderande armeringen har fällts ut där den genomgående sprickan mynnar ut i vattnet. Sprickans mynning kan vara placerad långt ifrån armeringens angreppsställe.

Vid genomgående sprickor i betongen blir areaförhållandet mellan blottlagda armeringsytor (små anodytor) och de ädla metallerna såsom rostfritt stål och titan (stora katodytor) mycket gynnsam för galvanisk korrosion på stålarmeringen i de genomgående och vattenfyllda sprickorna. Den lokala korrosionshastigheten i blottlagda stålytor kommer sålunda vara mycket hög.

De höga korrosionshastigheterna som konstaterats lokalt på stålarmeringen i både in- och utloppsdelarna till kylkanalerna är inte enbart orsakade av kloridinditerad korrosion. Hittills utförda mätningar av armeringens elektrokemiska potential i kylvattenvägarna i Oskarshamn 3 visade att den ingjutna armeringen hade onormalt ädla potentialer. De ädla elektrokemiska potentialerna som kontinuerligt registrerats hos armeringen under ett år beror på att stålarmeringen har elektrisk kontakt (avsiktlig potentialutjämning) med rostfria pumpar/luckor/galler och titanrör i kondensorn.

Laboratorieundersökningar utförda av Swerea KIMAB visade att korrosionshastigheten hos ingjutet kolstål ökade med en faktor 10 vid i hopkoppling med titan jämfört med okopplad ingjutet kolstål i betong. Vid i hopkoppling av ingjutet kolstål med rostfritt stål ökade korrosionshastigheten hos ingjutet kolstål med en faktor 20 jämfört med okopplat kolstål i betong.

Från resultaten av de hittills registrerade armeringspotentialerna i kylvattenvägarnas kylkanaler går det inte att fastställa om armeringen är påverkad av läckströmmar. Däremot har stora potentialvariationer uppmätts (upp till 400 mV) i skyddsjord av koppar utanför Oskarshamn kärnkraftverk.

En provinstallation av katodiskt skydd med påtryckt ström för att skydda stålarmeringen mot framtida korrosionsangrepp i kylvattenkanalerna i Oskarshamn 3 har genomförts i projektet. Resultaten från inledande undersökningar visade armeringens elektrokemiska potential kan sänkas ned till skyddspotential och galvaniska påverkan från rostfria luckor och titanrör minskade kraftigt på armeringen.

Summary

Extensive local corrosive attack has been observed during recent inspection of concrete surfaces in various parts of the coolant water channels in the Oskarshamn and Ringhals nuclear power plants. Beneath the visible rust deposits the reinforcement was in some cases completely intact, while in other cases it was entirely corroded.

The cited study indicates that the rust deposits on concrete surfaces in coolant water channels are the result of corrosive attack on the steel reinforcement. Under the visible rust deposits on concrete surfaces the steel reinforcement was in some cases completely free of damage, while in other cases it was entirely corroded. That the reinforcement is completely undamaged under the rust deposits is explained by the fact that iron ions formed on the corroded steel reinforcement have been deposited where the crack opens out into the water. The crack opening may be located far from the point at which the corrosive attack occurs.

In the case of through cracks in concrete the surface area ratio between exposed reinforcement surfaces (small anode surfaces) and the noble metals such as stainless steel and titanium (large cathode surfaces) is very conducive to galvanic corrosion on steel reinforcement in the through cracks that are filled with water. The local corrosion rate in exposed steel surfaces is therefore very high.

The high rates of corrosion noted locally in steel reinforcement in both the intake and outlet sections of the coolant channels is not due solely to chloride-initiated corrosion. Measurements of the electrochemical potential of reinforcement in the walls of coolant water channels at Oskarshamn 3 taken thus far have shown that the embedded reinforcement had abnormally high noble potentials. The noble electrochemical potentials in the reinforcement that have been registered continuously over a period of one year are due to the fact that the steel reinforcement has electrical contact (intentional potential equalization) with stainless steel pumps/hatches/bar screens and titanium pipes in the condensor.

Laboratory studies conducted by Swerea KIMAB showed that the corrosion rate in embedded carbon steel increased by a factor of 10 when the steel was connected with titanium as compared to unconnected carbon steel embedded in concrete. When embedded carbon steel was connected with stainless steel the corrosion rate of the embedded steel increased by a factor of 20 compared with unconnected carbon steel in concrete.

From measurements recorded thus far of reinforcement potentials in the walls of coolant water channels it is not possible to determine if the reinforcement is influenced by stray current. However, large potential variations (up to 400 mV) have been measured in protective copper grounding conductors outside of the Oskarshamn nuclear power plant.

In the project, impressed current cathodic protection has been installed to protect steel reinforcement against future corrosive attack in coolant water channels at Oskarshamn 3. Results from initial studies show that the electrochemical potential of the reinforcement can be reduced to protective potential and galvanic corrosion on reinforcement, due to the presence of stainless steel hatches and titanium pipes, can be significantly reduced.

Innehåll

1	Syfte och mål	10
2	Bakgrund	11
3	Översikt av forskningsområdet	13
3.1	Armeringskorrosion i väl luftade betongkonstruktioner	13
3.2	Armeringskorrosion i betongkonstruktioner under vattenytan	14
3.3	Galvanisk korrosion på ingjuten armering i kylvattenvägar	15
3.4	Risk för läckströmskorrosion på armering i kylvattenvägar	18
3.5	Katodiskt skydd av vattenmättade betongkonstruktioner	20
3.6	Inverkan AV Armeringens ytegenskaper på korrosionshårdigheten	20
4	Metodik och utförande	23
4.1	Undersökningar utförda vid Oskarshamn 3 (O3)	23
4.1.1	Mätningar av armeringens elektrokemiska potential vid	23
4.1.2	Undersökning av förekomst av läckströmmar	24
4.1.3	Potentialkartering av kylvattenväg i O3	25
4.1.4	Katodiskt skydd av stålarmering i utlopp i kylkanal	26
4.1.5	Undersökning av ytegenskaperna hos oskadat armeringsjärn från hjälpkylkanal L8 i O3	27
4.2	Undersökningar utförda vid Ringhals 3	27
4.3	Undersökningar utförda vid Forsmark	27
4.4	Laboratorieundersökning av rostfritt stål och titans galvaniska inverkan på ingjutet kolstål i kloridhaltigt vatten	27
4.4.1	Experimentell teknik	28
4.4.2	Provstänger ingjutna i betongcylindrar	29
4.4.3	Rostfria och titancylindrar	29
4.4.4	Betongcylindrarnas sammansättning	29
4.4.5	Utvärdering av elektrokemisk potential och galvanisk korrosionsström	30
4.4.6	Utvärdering av korrosionshastighet	30
5	Resultat och diskussion	31
5.1	Undersökningar utförda vid O3	31
5.1.1	Mätningar av armeringens elektrokemiska potential	31
5.1.2	Mätning av förekomst av läckströmmar vid Oskarshamn kärnkraftverk	33
5.1.3	Potentialkartering i utloppsidan i O3	34
5.1.4	Katodiskt skydd med påtryckt ström i O3	34
5.1.5	Metallografisk undersökning av oskadat armeringsjärn från kylkanal L8 i O3	36
5.2	Laboratorieundersökning av rostfritt stål och titans galvaniska inverkan på ingjutet kolstål i kloridhaltigt vatten	40

5.2.1	Utvärdering av utseende hos betongcylindrar och ingjutna provstänger av kolstål	40
5.2.2	Utvärdering av korrosionshastighet hos ingjutna provstänger av kolstål ihopkopplade med cylindrar av rostfritt stål och titan	43
5.2.3	Utvärdering av galvanisk korrosionsström hos ingjutna provstänger av kolstål ihopkopplade med cylindrar av rostfritt stål och titan	44
5.3	Fortsatta undersökningar i etapp II	45
6	Slutsatser	46
7	Referenser	48

1 Syfte och mål

Syftet med projektet är att fastställa orsaken till de omfattande lokala korrosionsangrepp som påträffats vid nyligen utförda tillståndsbedömningar av betongytor i olika delar av kylvattenvägarna i Oskarshamn kärnkraftverk och Ringhals kärnkraftverk. Projektets mål är att ta fram en eller flera lämpliga skyddsmetoder för att sänka den lokalt höga korrosionshastigheten hos den ingjutna armeringen på befintliga betongytor i kärnkraftens kylvattenvägar.

2 Bakgrund

Från resultaten av tillståndsbedömningar utförda av CBI Betonginstitutet under åren 2011-15 av olika betongtytor till kylvattenvägarna i Oskarshamns kärnkraftverk framgick det att den ingjutna armeringen i vissa delar av kylvattenvägarna lokalt var delvis eller helt bortkorroderad, **Figur 1**. De omfattande korrosionsskadorna kunde i många fall först konstateras efter att armeringen frilagts genom frambilning. Under synliga rostutfällningar på betongytan var i vissa fall armeringen helt oskadad och i andra fall helt bortkorroderad.



Figur 1. Exempel på utseendet av korrosionsskador hos frambildad stålarmering i kylvattenvägarna hos Oskarshamn 3.

De korrosionsprodukter som hade fällts ut på betongytan hade både en svart och mörkbrun nyans, där den svarta korrosionsprodukten dominerade. När svartfärgade korrosionsprodukter bildas på armeringsytan innebär det i de flesta fall att syrehalten har varit låg vid armeringen, vilket oftast resulterat i en låg korrosionshastighet hos armeringen. Eftersom de undersökta betongtytorna i kylvattenvägarna har varit placerade under vattenytan torde betongen vara vattenmättad med en låg syrehalt vid armeringen. Den låga syrehalten vid armeringen borde innebära en låg korrosionshastighet även vid höga kloridhalter vid armeringen. Vid hög syrehalt (vid vattentömning av kylkanalerna) sker en omvandling av de svarta korrosionsprodukterna till rödrost (FeOOH).

Vid den kraftigt korroderade armeringen i vattenmättade betong i kylvattenvägarna i Oskarshamn 3 konstaterades höga klorider i betongen vid armeringen. I några fall var kloridhalten vid den korroderade armeringen betydligt högre än vad kloridhalten var i det omgivande vatten. Detta har även påträffats i andra skadefall, men ingen förklaring har kunnat ges (1).

Det är mycket ovanligt att vattenmättade betongkonstruktioner har höga korrosionshastigheter. I Sverige har det tidigare påträffats vid ett flertal bropelare under Ölandsbron och vid några betongpålar i Göteborgs hamn (2). Den helt bortkorroderade armeringen vattenmättad betong i kylvattenvägarna i kärnkraftverken i Oskarshamn och i Ringhals kan inte förklaras med enbart kloridinitierad armeringskorrosion.

Swerea KIMAB:s erfarenheter när det gäller mycket höga lokala korrosionshastigheter ($> 1\text{ mm/år}$) hos armerade betongkonstruktioner helt nedsänkta i vatten är att armeringen är eller har varit utsatt för läckströmmar (likström) eller galvanisk korrosion.

Laboratorieundersökningar utförda på Swerea KIMAB (11) visade att korrosionshastigheten hos ingjutet kolstål nedsänkt i ett kloridhaltigt vattenbad ökade med en faktor 10 när rostfritt stål kopplades ihop med ingjutet kolstålet. Kolstålets korrosionshastighet ökade sålunda från ca $20\text{ }\mu\text{m/år}$ (okopplad) till ca $200\text{ }\mu\text{m/år}$ (ihopkopplad). Denna korrosionshastighetsökning är dock betydligt lägre än vad som konstaterats i vissa delar i kylkanalerna i Oskarshamn och i Ringhals (20).

Det är mycket ovanligt att vattenmättade betongkonstruktioner har höga korrosions-hastigheter. I Sverige har det tidigare påträffats vid ett flertal bropelare under Ölandsbron och vid några betongpålar i Göteborgs hamn (2).

Den helt bortkorroderade armeringen i vattenmättad betong i kylvattenvägarna i OKG 3 kan inte förklaras med enbart kloridinitierad armeringskorrosion.

3 Översikt av forskningsområdet

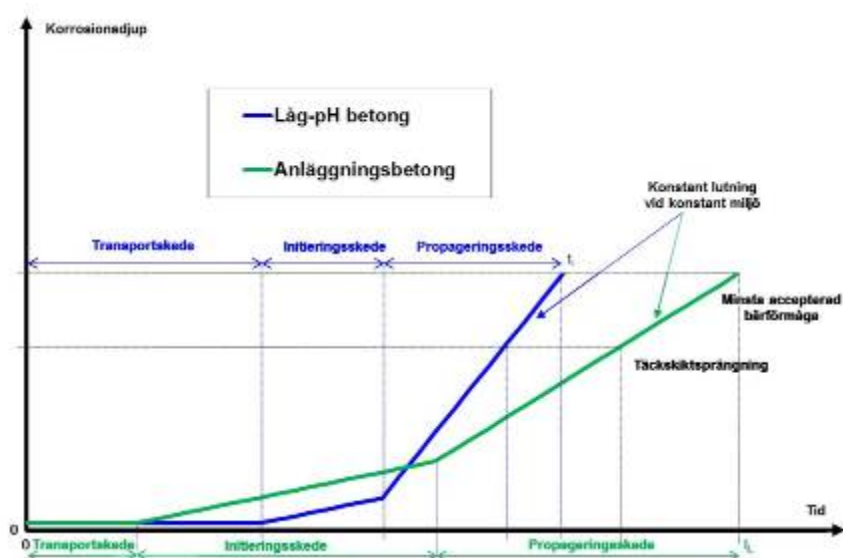
3.1 ARMERINGSKORROSION I VÄL LUFTADE BETONGKONSTRUKTIONER

Väl luftade betongkonstruktioner kan drabbas av omfattande skador på grund av att armeringen rostar, med stora reparationskostnader som följd. Att stålarmeringen rostar beror ofta av att klorider från tölsalter eller havsvatten/bräckt vatten tränger in konstruktion och ger lokala korrosionsangrepp.

Sedan decennier har forskningen inom området till stor del fokuserats på bestämning av kloridtröskelvärden, dock med stora variationer i framtagna tröskelvärden vilket medför stora svårigheter att förutsäga livslängden för en armerad betongkonstruktion(16). Vid bedömning av en konstruktions livslängd hänvisas oftast till Tuutti's (1982) livslängdsdiagram, där korrosionen presenteras som en funktion av en initiering- och propageringsperioden, och där initieringsperioden omfattar kloridernas transporttid i betongen fram till armeringen och den tid det tar för kloriderna att initiera lokala angrepp (3). Flera forskare föreslår en modifiering av Tuutti's livslängdsmodell vilket innebär en mer detaljerad utvärdering av olika perioders inverkan vid kloridinitierad korrosion, se **figur 1**. Detta synsätt medför att man lättare kan särskilja och mäta olika skeden i livslängdsförloppet. I **figur 1** visas en schematisk beskrivning av livslängden hos armering i två olika skilda cementkvaliteter. En betong med anläggningscement (kallad anläggningsbetong) och en betong med en hög silikahalt (kallad låg-pH betong) visas som exempel.

Konstruktionens livslängd kan indelas i tre olika skeden:

1. Transportskedet (tiden för kloridjoner att nå armeringsstålet).
2. Initieringsskedet (tiden för nedbrytning av passivskiktet hos armeringsstålet).
3. Propageringsskedet (tiden då korrosion sker på armeringsstålet).



Figur 1. Schematisk beskrivning av korrosionsförloppet hos armering i två olika cementkvaliteter.

Transportskedet, dvs kloridinträgningsperioden, varierar kraftigt beroende på betongens täthet, (vct, vbt, täcksikt, typ av bindemedel, etc.). Kloridtransport i betong beror till största delen av kapillärsugning och diffusionsstyrda mekanismer, där de senare dominerar. Forskning om kloridtransport i betong utgår därför ofta från diffusionsstyrda modeller (4). En sådan modell som visats sig stämma ganska väl med verkligheten är ClinConc (5).

Initieringsskedets början och fortsatta förlopp kan mätas genom att använda olika elektrokemiska mätmetoder (6). Initieringsskedets längd varierar kraftigt beroende på egenskaperna hos stålets passivskikt (tjocklek, porositet, hydroxidjonskoncentrationen i porlösningarna, glödskalets struktur hos armeringen, etc.) (7, 8).

Inledande undersökningar har visat att glödskalets mikrostruktur och hos armeringen varierar kraftigt mellan olika leverantörer (9). Det innebär att armeringens korrosionsskyddande egenskaperna också varierar kraftigt. Initieringsskedet startar när en tillräcklig hög halt av klorider fås vid armeringsytan så att passivskiktet och glödskalet börjar brytas ned. Hur snabbt detta sker är beroende av bindemedlets kemiska sammansättning vilket påverkar hydroxidkoncentrationen omkring armeringsstålet. Detta medför att den kritiska kloridjonskoncentrationen för korrosion och därmed initieringsskedets början varierar kraftigt för olika bindemedel. Det innebär svårigheter att använda kloridtröskelvärden som en utvärderingsparameter i olika provningsmetoder.

Propageringsskedet definieras som perioden när en kraftig korrosionsström har startat som inte avtar på grund av återpassivering av stålytan. Korrosionshastigheten (korrosionsströmmens styrka) varierar med yttre miljöfaktorer såsom relativ fuktighet (RF), temperatur, kloridkoncentrationen, ytförhållandet mellan anod- och katodytor (oädla och ädla stålytor), etc.

3.2 ARMERINGSKORROSION I BETONGKONSTRUKTIONER UNDER VATTENYTAN

Det är väl känt att betongkonstruktioner i vatten är skvalpzonen den del som löper störst risk att utsättas för armeringskorrosion. Här sker en anrikning av kloridjoner och tillgången på syre är god.

Under vattenlinjen är rapporterade korrosionsskador mer ovanliga (2). Tröskelvärdet för initiering med avseende kloridhalt är i de flesta passerat men propageringen sker med låg hastighet eftersom transporten av syre in till armeringen i vattenmättad betong är begränsad. I undersökningar utförda av Swerea KIMAB och Lunds Universitet har en kvalitativ bedömning av olika tänkbara mekanismer för armeringskorrosion i vattenmättad betong gjorts genom litteratursökning, modellering, teoretiska beräkningar samt experimentella undersökningar i fält och på laboratorium genomförts (1,2,10).

Resultaten från undersökningarna i vattenmättad betong, utan närvaro av makroceller, visade att armeringen i normala fall korroderar med en försumbar låg korrosionshastighet och korrosionshastigheten är i huvudsak beroende av vattnets syrehalt och i mindre grad av vattnets kloridhalt (2, 10).

Från okulära inspektionerna av kylvattenvägar framgick det att betongytor i skvalpzonen lokalt var rostfärgade med underliggande armeringskorrosion. Det konstaterades vidare att i kylvattenvägarnas betongtunnlar i inloppsdelen intill kondensorn finns pumpar av rostfritt stål som elektriskt är ihopkopplade med armeringen (2).

Kondensorn är i princip en stor värmeväxlare. Den kan innehålla upp till 60 000 titanrör som genomströmmas av havs- eller bräckt vatten. Syftet med titanrören är att kyla ned vattenången från reaktorn/turbinen så att ången kondenseras och kan åter transporteras tillbaka till reaktorn/turbinen.

Vattnet (havs- eller bräckt vatten) som transporteras i titanrören i kondensorn, vilket innebär att vattnet på utloppssidan är ca 7-10 °C högre än vid inloppssidan. En ökning av korrosionsmediets temperatur innebär oftast en ökad korrosion. En tumregel som ofta används är om temperaturen ökar med 10 grader innebär det att korrosionshastigheten ökar med en faktor två.

3.3 GALVANISK KORROSION PÅ INGJUTEN ARMERING I KYLVATTENVÄGAR

Om armeringen i betongkonstruktion som ligger helt under vattenytan och har elektrisk kontakt med en betydligt ädlare metall såsom rostfritt stål, titan eller koppar finns risk för galvanisk korrosion på armeringen. Risken för galvanisk korrosion på armeringen ökar om det finns genomgående sprickor eller andra defekter i betongen så att armeringen är i direkt kontakt med elektrolyten.

Hur stor den galvaniska påverkan på armeringen är beror framförallt på:

- Skillnaden i korrosionspotential mellan armering och den ädla metallen.
- Areaförhållandet mellan armering och den ädla metallens yta som är i kontakt med kylvattnet.
- Elektrolytens sammansättning och konduktivitet (elektrisk ledningsförmåga)
- Anodisk och katodisk polarisation hos de ihopkopplade metallerna.

Vid praktisk bedömning av galvanisk korrosion är det inte så lätt att ta hänsyn till polarisationen, dvs ändring av elektrodpotentialen i positiv riktning (anodisk polarisation) och vid katoden en ändring i negativ riktning, katodisk polarisation (11).

Vid byggandet av dagens svenska kärnkraftverk var det ett krav att kärnkraftverkets olika metallkonstruktioner skulle vara jordade och potentialutjämnade. Vid en potentialutjämnning mellan olika metalldelar görs en elektrisk ihopkoppling av metalldelarna. För jordning av de ihopkopplade metalldelar används kopparkablar som ansluts i ena änden till de olika ihopkopplade metalldelarna och den andra änden av kopparkabeln dras ned till jord.

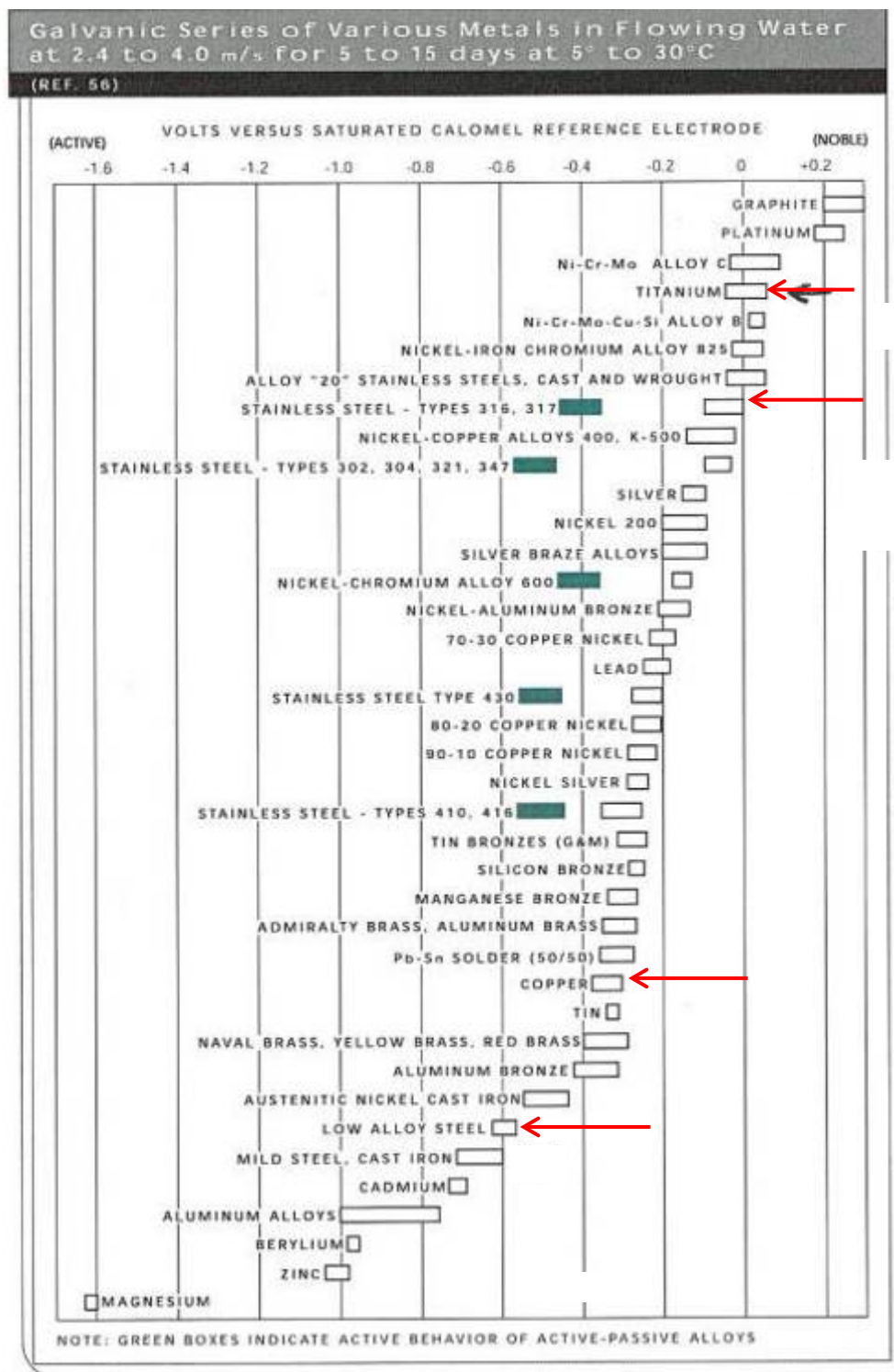
Vid ihopkoppling av olika metallkonstruktioner ökar risken för galvanisk korrosion om de ihopkopplade metallkonstruktionerna har en stor skillnad i korrosionspotential och samtidigt är utsatt för en elektrolyt med en god ledningsförmåga. En ytterligare viktig faktor som påverkar den galvaniska

strömmens storlek är ytförhållandet mellan den ädla och oädla metallytan. Ju större den ädlare ytan är i förhållande till den oädla ytan desto större galvanisk korrosionsström fås på den oädla ytan.

De pumpar som används för att transportera fram vatten till kondensorn består till stora delar av rostfritt stål. Pumparna är enligt uppgift i elektrisk kontakt med armeringen. Därav bedöms risken för galvanisk korrosion som stor på armeringen i närhet av pumparna. Denna risk ökar markant om det förekommer genomgående sprickor eller håligheter i betongen fram till armeringen så att vatten med god en ledningsförmåga kommer i direkt kontakt med armeringen. I detta fall blir den blottlagda armeringsytan anod och de rostfria pumparna katod i en korrosionscell. I kylvattenvägarna förekommer även luckor, galler etc som är av rostfritt stål och som är elektriskt i hopkopplade med den ingjutna armeringen.

När de gäller titanrören i kondensorn är dessa troligtvis i elektrisk kontakt med armeringen i både in- och utloppstunnlarna. Detta innebär att risken för galvanisk påverkan på t ex armeringen i närhet av titanrören kan vara förhöjd. Titanets och det rostfria stålets korrosionspotential i flödande havsvatten är ungefär lika, **tabell 1**.

Tabell 1. Exempel på en galvanisk spänningsserie för olika metaller i flödande vatten (12). De metaller som ingår i undersökningarna är markerade med pilar.



3.4 RISK FÖR LÄCKSTRÖMSKORROSION PÅ ARMERING I KYLVATTENVÄGAR

Långsträckta armerade betongkonstruktioner (betongtunnlar) som invändigt är helt fyllda med vatten kan påverkas av läckströmmar från närliggande högspänd likströmsöverföring (High Voltage Direct Current, HVDC) (10). Den största risken för läckströmspåverkan från en högspänd likströmsöverföring är om överföringen är monopolar, **figur 2**. En högspänd monopolar likströmskabel nedlagd i havsvatten innebär att strömmen går i en kabel i den ena riktningen och i den andra riktningen går strömmen i vattnet (13).

Idag används ofta en bipolär högspänd likströmsöverföring vilket innebär att likströmsöverföringen sker genom två likströmsledningarna, en med positiv potential och en med negativ potential till jord, **figur 2**.

När det gäller Gotlandsledningen så var den monopolar fram till 1983 (Gotland 1). 1983 blev Gotlandsledningen bipolär när Gotland 2 installerades mellan fastlandet och Gotland. 1986 togs Gotland 1 ur drift samtidigt som Gotland 3 installerades mellan fastlandet och Gotland. I dag är Gotlandsledningen bipolär (Gotland 2 och 3).

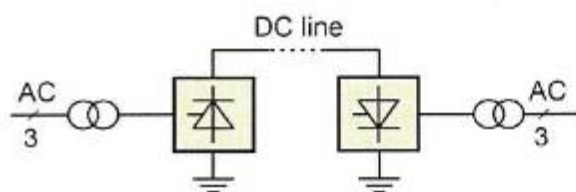


Figure 3-1. Monopolar HVDC system.

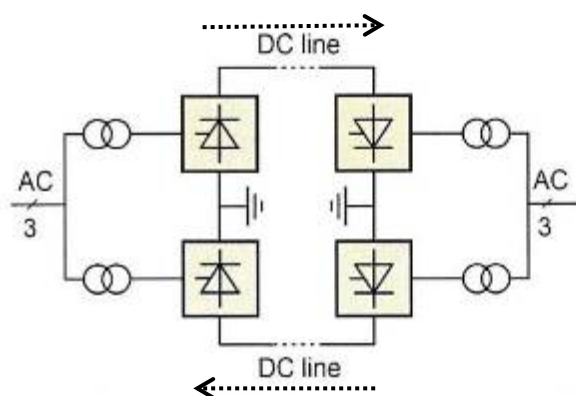


Figure 3-2. "Bipolar" HVDC system consisting of two combined monopolar systems.

Figur 2. Schematisk beskrivning av en mono- och bipolär HVDC överföring (14)

Typiska data på HVDC överföringar är idag spänningar på ± 400 -500kV och strömmen i en kabel kan vara 1000-1500 A. Effekten blir alltså i storleksordningen 800 till 1500 MW för en bipolär överföring, vilket motsvara effekten från en stor reaktor i ett kärnkraftverk (14).

Om det av någon anledning är en obalans i kablarna hos en bipolär likströmsöverföring kommer överskottsströmmen att läcka ut i vatten/jord via jordtag och kan ge upphov till eventuella potentialgradienter. Hur stor ström som läcker ut till omgivningen är beroende på hur stor obalansen är mellan kablarna. Den största obalansen uppstår när den ena kabeln inte är i drift. Hur stor denna obalans får vara utan att ge upphov till läckströmskorrosion på närliggande konstruktioner är för närvarande inte känt.

Från utförda läckströmsundersökningar (4) av Lillegrunds vindkraftpark framgick det att ingen större påverkan av läckströmmar från HVDC överföringarna "Kontek och Baltic" kunde konstateras (14). En trolig orsak till detta är att konstruktionen inte är speciellt lång vilket är en av flera förutsättningar för att skapa stora potentialgradienter, vilket skulle kunna ge upphov till läckströmskorrosion.

Avståndet mellan t ex Oskarshamn kärnkraftverk och Gotlandsledningens jordtag vid fastlandet (röd färgad cirkel) är ca 18,5 km, **figur 3**. De röda pilarna i figuren visar möjliga strömvägar för läckströmmar in till Oskarshamn kärnkraftverk. Vid SKB i Forsmark som ligger ca 25 km från HVDC-överföringen till Finland har man konstaterat en läckströmspåverkan från denna HVDC-ledning (14). Denna ledning är numera bipolär. När det gäller Ringhals kärnkraftverk finns inga närläggna HVDC-överföringar. Det bör dock nämnas att läckströmmar kan fås från andra likströmsdrivna källor som kan finnas inom kärnkraftverken.



Figur 3. Anger elektrodens placering vid fastlandet (rödmarkerad cirkel) för Gotlandsledningen. Röda pilar anger möjlig strömväg från HVDC-ledningens jordtag in till Oskarshamn kärnkraftverk.

3.5 KATODISKT SKYDD AV VATTENMÄTTADE BETONGKONSTRUKTIONER

Katodiskt skydd är en elektrokemisk skyddsmetod som bygger på att man gör metallytan, i detta fall ingjuten armering, som skall skyddas så elektriskt negativ att de elektrokemiska korrosionsreaktionerna hindras. Vad som sker är att armeringens korrosionspotential sänks ned till skyddspotential (-720 mV relativt Ag/AgCl/0,5 M KCl) i vattenmättad betong. I dag används inom kärnkraften både katodiskt skydd med offeranoder (zink eller aluminium-indium) eller med påtryckt ström.

Vid katodiskt skydd av vattenmättade betongkonstruktioner med påtryckt ström åstadkoms potentialsänkningen genom att koppla armeringsstålet som katod i en elektrokemisk cell, varvid det matas en svag elektrisk likström genom elektrolyten till stålytan. Likströmmen, den sk skyddsströmmen matas ut i elektrolyten via särskilda hjälpelektroder, sk anoder. Skyddsströmmen alstras genom elektrolytisk väg med hjälp av en yttre strömkälla.

I Forsmark används för närvarande offeranoder av zink för att hindra korrosionen hos armeringen i vissa delar av kylvattenvägarna. Anoderna är installerade i kylvattenvägarna i nära anslutning till in- och utloppssidan till kondensorn. De zinkanoder som används i Forsmark är placerade i golvet. Anodförbrukningen i Forsmark är betydligt högre på utloppssidan jämfört med anodförbrukningen på inloppssidan. I Ringhals används aluminium-indiumanoder som är placerade på väggen i närheten av rostfria pumpar i anslutning till inloppet till kondensorn (15). Det har konstaterats en hög anodförbrukning i närheten av de rostfria pumparna i anslutning av inloppet till kondensorn.

3.6 INVERKAN AV ARMERINGENS YTEGENSKAPER PÅ KORROSIONSHÄRDIGHETEN

Tidigare utförda undersökningar vid Swerea KIMAB har visat att armeringens ytegenskaper har stor inverkan på armeringens korrosionshärdighet i kloridhaltig och vattenmättad betong.

För slakarmerade betongkonstruktioner används alltid varmvalsad stålarmring, vilket betyder att stålet vid leverans alltid har ytterst ett oxidskikt (glödskalet) som varierar i tjocklek mellan 2 och 40 µm (9). Den stora variationen hos glödskalets tjocklek beror på hur armeringen har värmebehandlats och kylts ned efter slutvalsningen. Idag finns flera olika värmebehandlingsprocesser (Tempcore, Thermex, etc) för att ythärda stålarmringen. Armeringens mikrostruktur i kärnan består av ferrit och perlit med ett yttre skikt av anlöpt martensit närmast under glödskalet. Detta innebär att armeringens kärna har en lägre hårdhet och högre seghet jämfört med armeringens yttre skikt som är betydligt hårdare och sprödare. Beroende på vilken värmebehandlingsprocess som har använts för tillverkning av armering kommer framför allt glödskalets tjocklek, mikrostruktur och elektrokemiska egenskaper att variera.

Glödskalet, som är relativt sprött med varierande tjocklek och innehåller både sprickor och porer, består i huvudsak av tre olika järnoxider, närmast stålytan förekommer oftast, wustit, FeO och ytterst, magnetit, Fe₃O₄ och hematit, Fe₂O₃.

Beroende av vilken typ av värmebehandling som använts vid tillverkningen och på vilket sätt armeringen kylts ned efter slutvalsningen, kommer framför allt glödskalets tjocklek, kemiska sammansättning att variera. Detta kommer i sin tur påverka de elektrokemiska egenskaperna hos glödskalet. Vid utomhuslagring av armeringsstål ger glödskalet ett visst korrosionsskydd så länge glödskalet är intakt. Vid uppkomna defekter i glödskalet kommer det underliggande stålet att blottläggas och risken för lokala korrosionsangrepp öka i den blottlagda stálytan. Den blottlagda stálytan kommer att fungera som en anodyta och glödskalet (som oftast är mycket ädelt) kommer att fungera som en effektiv katodyta i en korrosionscell. Eftersom anodytan är betydligt mindre än katodytan (glödskalets yta) är risken stor för lokala korrosionsangrepp (frätgropar) i de blottlagda stálytorna. Risken för lokala korrosionsangrepp ökar dramatiskt om klorider finns närvarande i elektrolyten. Detta gäller även om stålet är ingjutet i betong som innehåller höga kloridhalter. Nedbrytning av stålets passivskikt kommer att ske enklast där det funnits defekter i glödskalet, dvs. i de blottlagda stálytorna. Om glödskalet har god ledningsförmåga (beror på tillverkningsmetod) kommer glödskalet att fungera som en mycket effektiv katodyta i en korrosionscell vilket kan ge upphov till kraftiga lokala korrosionsangrepp.

Från ännu ej publicerade undersökningar från ett doktorandarbete på Swerea KIMAB framgår det att elektrodpotentialen hos armeringens glödskalet är ca 400 mV mer positiv (ädlare) än en armering utan glödskalet i kloridhaltigt vatten.

Idag finns bristfälliga kunskaper om glödskalets kemiska sammansättning, uppbyggnad och hur glödskalet förändras i kontakt med den alkaliska betongen samt vilken betydelse glödskalet har för armeringens korrosionsegenskaper i betongkonstruktioner utsatta för klorider. Ytterst få undersökningar av glödskalets uppbyggnad före och efter ingjutning i betong finns publicerade. Även glödskalets skyddande förmåga för att hindra kloridiniterad korrosion på armeringsstål är okänt. Även glödskalets galvaniska inverkan på blottlagda stálytor hos armeringsstålet i defekter hos glödskalet är idag okänt. Det är svårt att undvika mekaniska skador på glödskalet. Skador i glödskalet syns tydligt om armeringsstålet lagras utomhus vilket ger upphov till lokala korrosionsangrepp (rödrost) i de blottlagda skadorna, **figur 4**.



Figur 4. Två kamstål med defekter, där det övre kamstålet har exponerats inomhus i rumstemperatur medan det nedre kamstålet har exponerats en kort tid utomhus, vilket gett lokala korrosionsangrepp i defekter i glödskalet (9)

4 Metodik och utförande

För att fastställa korrosionsorsaken till de omfattande korrosionsangreppen hos kylvattenvägarna utfördes korrosionsundersökningar i både Oskarshamn 3 (pågår) och Ringhals 3 (pågår) samt korrosionsprovningar på laboratorium i Swerea KIMAB (avslutade). De planerade undersökningarna vid Forsmark har ännu inte kunna utföras, men planeras att genomföras i en eventuell etapp II. Inga mätresultat har ännu inte erhållits från Ringhals 3, eftersom mätningarna påbörjades i september 2016.

4.1 UNDERSÖKNINGAR UTFÖRDA VID OSKARSHAMN 3 (O3)

4.1.1 Mätningar av armeringens elektrokemiska potential vid

För att fastställa om korrosionsorsaken till de omfattande korrosionsangreppen hos O3:s kylvattenvägar beror på galvanisk korrosion eller av läckströmskorrosion utfördes kontinuerliga mätningar av den ingjutna stålarmoringens elektrokemiska potential (korrosionspotential). Potentialmätningarna genomfördes under drift i inloppet mellan pumparna och kondensorn med fyra potentialloggrar med inbyggda referenselektroder av zink, **Figur 5**. Potentialmätningar har även utförts på utloppssidan (kylkanal utlopp 441.L18) med sju referenselektroder av zink monterade av 3C Corrosion Control Company). Referenselektroderna placerades på olika avstånd från kondensorn. De potentialvärden som uppmättes med de sju referenselektroder från 3C registrerades kontinuerligt (varannan timme) i en datalogger som är placerat på den torra sidan av kylvattenvägen. Fördelen med detta insamlingssystem är att potentialvärdena kan avläsas momentant. För potentialloggrarna avlästes de kontinuerligt registrerade potentialvärdena efter avslutad exponering. Mätperioden för potentialloggrarna var från 3 juni 2015 till den 3 juni 2016. För de sju referenselektroder av zink var mätperioden från 13 juni 2016 till 16 september 2016.

Den korta mätperioden berodde på att referenselektroder skulle användas till övervakning av det katodiska skyddet som installerats under sommaren.



Figur 5. Exempel på en monterad potentiallogger med inbyggd referenselektrod av zink (Potentialloggerarna är monterade på inloppssidan) i kylkanal 441.L12 i O3.

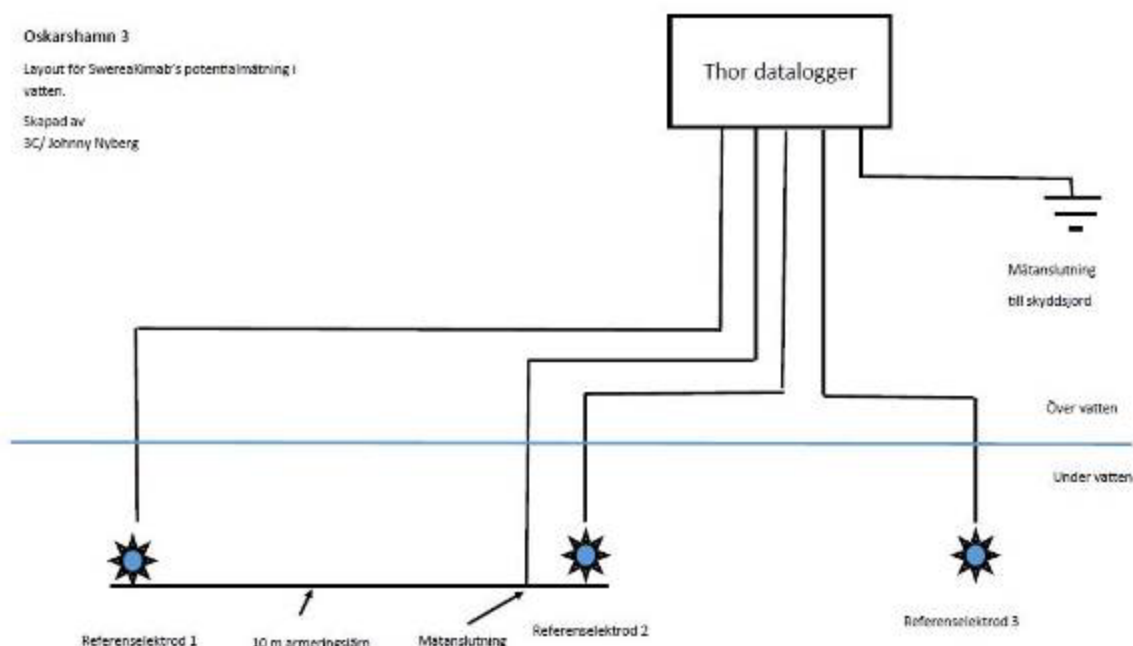
Vid revisionen under juni månad 2016 monterade i O3 ytterligare 8 st potentiallogger på utloppssidan i O3 i kylkanal utlopp 441.L13. Dessa kommer att tas in under 2017 för utvärdering av uppmätta potentialvärden i etapp II.

4.1.2 Undersökning av förekomst av läckströmmar

När det gäller att undersöka om en vattenmättad betongkonstruktion är utsatt för läckströmmar görs ofta kontinuerliga mätningar av armeringens elektrokemiska potential vid på och avstängning av likströmskällor. I detta fall är det inte möjligt att reglera den eventuella strömkällan.

Vid stora förändringar av armeringens elektrokemiska potential kan det innebära att konstruktionen är utsatt för läckströmmar. De största potentialförändringarna sker i in- och utläkningsområden (t ex defekter i betongen som blottlägger armeringsstålet).

Förutom att utföra kontinuerliga mätningar av armeringens elektrokemiska potential vid olika platser i kylvattenvägarna gjordes ett separat försök genom att kontinuerligt mäta den elektrokemiska potentialen på en 10 meters lång kamstång som sänktes ned utanför Oskarshamn kärnkraftverk. På armeringsstångens båda ändar monterades två referenselektroder (P1 och P2) av zink. Ytterligare en referenselektrod monterades direkt till skyddsjord (P3), **Figur 6**.



Figur 6. Schematisk skiss för placering av referenselektroder av zink vid mätning av förekomst av läckströmmar på en 10 meter lång kamstång (utförd av 3C).

4.1.3 Potentialkartering av kylvattenväg i O3

I juni 2016 tömdes en av kylvattenkanalerna på utloppssidan till O3 för revision. I samband med detta utförde Swerea KIMAB tillsammans med 3C Corrosion Control Company en potentialkartering av två kylkanaler (441.L13 och 441.L18) tillhörande utloppssidan. Vid potentialkarteringen mättes stålarmeringens korrosionspotential i ett stort antal punkter. Mätresultaten åskådliggjordes grafiskt så att man erhåller en karta över konstruktionen på vilken man kan se var stålarmeringen rostar.

Potentialkartering har på senare år accepterats i vida kretsar som den enda icke förstörande och lämpligaste metoden för bedömning av korrosionstillståndet hos armeringen där ännu inga synliga tecken på korrosion finns i form av rostfläckar eller sprickor i betongytan.

Metoden skall dock inte användas för vattenmättade betongkonstruktioner på grund av svårigheter att tolka mätresultaten. Tolkningen av mätvärden brukar göras enligt den amerikanska standarden ASTM G876. Med ledning av uppmätt potential kan man bedöma sannolikheten för om det pågår korrosion enligt **Tabell 2**.

Tabell 2. Bedömning av korrosionsrisken hos väl luftade betongkonstruktioner enligt den amerikanska standarden ASTM G876.

Potential, mV, Cu/CuSO ₄ eller (Ag/AgCl, 0,1 M KCl)	Korrosionsrisk
-200 och mer positiv (-170 och mer positiv)	10 %
-200 till -350 (-170 till -320)	osäker
-350 och mera negativ (-320 och mer negativ)	90 %

Det bör påpekas att värdena i tabellen baseras på statistisk analys av korrosionsförhållandena i brodäck i det amerikanska motorvägsnätet. Det är alltså viktigt att observera att riktvärdena endast gäller för betongkonstruktioner i luft. För delar av betongkonstruktioner under vatten kan kraftiga negativa potentialer, ned till -750 mV rel. Cu/CuSO₄, mätas utan att armeringen korroderar. Att potentialen kan anta så negativt värde utan pågående korrosion beror på den tröga syrediffusionen i vattenmättad betong. För att konstatera om en konstruktion är utsatt för läckströmmar kan detta göras enligt standarden SS-EN 50162 *Skydd mot korrosion förorsakad av läckströmmar från likströmsystem*. För att kunna använda standarden så måste kunna stänga av strömkällan, vilket inte är möjligt att göra.

4.1.4 Katodiskt skydd av stålarmering i utlopp i kylkanal

Eftersom det inte är möjligt att bryta den elektriska kontakten och därmed eliminera den galvaniska korrosionsströmmens väg från blottlagda stålytor i betongen in till kondensorns titanrör, rostfria pumparna/luckorna eller jordningslinor av koppar utfördes en provinstallation av katodiskt skydd med påtryckt ström. Installationen gjordes av 3 C Corrosion Control Company AB och är beskrivet i förstudierapport som lämnats till Oskarshamn kärnkraftverk i augusti 2016 (19).

Vid användning av katodiska skydd med påtryckt ström kan armeringens korrosionshastighet i de blottlagda stålytor avsevärt sänkas. Vid strömutmatningen sänks både armeringens elektrokemiska potential i blottlagda stålytor och potentialskillnaden mellan de ädla metallerna (rostfritt, titan, koppar) och de blottlagda stålytorna.

Som anodsystem för det katodiska skyddet används titanband belagda med MMO (mixed metal oxide) (19). Strömutmatningen från likriktarna är potentialstyrd, vilket innebär att strömutmatningen bestäms av armeringens skyddspotential som kontinuerligt mäts med hjälp av zinkreferenselektroder (19). En datalogger och två likriktare hade installerats i ett provskåp som är placerat på den torra sidan. För att övervaka det katodiska skyddets skyddsförmåga installerades sju referenselektroder. Fem av referenselektroderna placerades dels i närheten av anoderna och dels mellan anoderna. Två referenselektroder placerades i området utanför provområdet. Syftet med detta var att undersöka hur långt ifrån anoden som den utmatade skyddsströmmen kan nå till den ingjutna stålarmeringen.

Det är viktigt att skyddseffektiviteten hos det katodiska skyddet kontrolleras kontinuerligt så att ett fullgott katodiskt skydd kan uppnås. Vid för hög strömutmatning finns risk för vätegasutveckling som skulle kunna innebära en väteförspridning av armeringsstålet. Vi för låg strömutmatning fås inte ett fullständigt korrosionsskydd, vilket innebär att korrosionshastigheten hos armeringen fortfarande är hög. En utvärdering av det katodiska skyddet skyddsförmåga kommer kontinuerligt göras i etapp II.

4.1.5 Undersökning av ytegenskaperna hos oskadat armeringsjärn från hjälpkylkanal L8 i O3

Ett oskadat armeringsjärn har undersöktes med avseende på glödskal och mikrostruktur efter ca 30 års exponering i hjälpkylkanal L8 i O3.

Vid den okulära och metallografiska undersökningen uttogs en mindre provbit från armeringsjärnet som varit ingjuten i ca 30 år i hjälpkylvattenkanal L8 tillhörande Oskarshamn 3.

Provbitens mantelyta undersöktes okulärt med avseende på glödskal, korrosionsangrepp och eventuella korrosionsprodukter. Armeringsbitens mikrostruktur undersöktes genom att ta ut ett mindre prov från armeringsbiten som därefter göts in i en bakelitkuts. Kutsen med det ingjutna provet slipades och polerades så armeringens tvärsnittsyta blev helt fri från repor. Armeringsbitens tvärsnittsyta slipades med ett slippapper av kornstorleken grit 1000 och polerades därefter med en polerduk innehållande en diamantpasta kornstorleken 0,25 µm. Armeringens tvärsnittsyta (mikrostruktur) undersöktes med ett ljusoptiskt mikroskop (LOM) i hög förstoring (upp till 1000 ggr förstoring).

4.2 UNDERSÖKNINGAR UTFÖRDA VID RINGHALS 3

Två potentialloggrar har installerats med dykare under september månad 2016. Loggrarna registrerar kontinuerligt armeringens korrosionspotential varannan timme. Loggrarna är placerade i turbinbyggnaden i ett betongschakt i anslutning till utloppet till kondensorn. Det täckande betongskiktet är 50 mm och betongkvaliteten är K300 och platsgjuten. Armeringen är av stålqualiteten Ks40 (sprickarmering) och ingjuten i betong mot berg. Rostutfällningar (krustor) har konstaterats på betongytan och även höga kloridhalter förekommer i betongen. Armeringskorrosion har konstaterats i betongen utan att betongskiktet har sprängt loss.

Eftersom installationen av potentialloggrarna gjordes under september månad 2016 och mätningarna kommer att pågå i ca ett år och därefter kommer resultaten från potentialmätningarna att utvärderas i en eventuell etapp II.

4.3 UNDERSÖKNINGAR UTFÖRDA VID FORSMARK

Inga undersökningar har hittills genomförts vid Forsmark kärnkraftverk. Förhoppningsvis kan undersökningar i Forsmark kärnkraftverk påbörjas under 2017 i en eventuell etapp II.

4.4 LABORATORIEUNDERSÖKNING AV ROSTFRITT STÅLS OCH TITANS GALVANISKA INVERKAN PÅ INGJUTET KOLSTÅL I KLORIDHALTIGT VATTEN

I denna accelererade undersökning som genomförts på laboratorium simuleras faktiska förhållanden genom att exponera betongingjutna provstänger av kolstål som är elektriskt i hopkopplade med rostfritt stål eller titan nedsänkta i ett kloridhaltigt vatten.

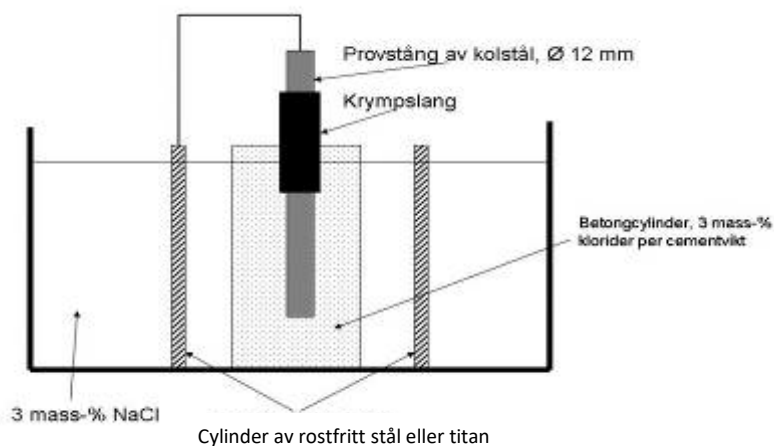
4.4.1 Experimentell teknik

Ingjutna provstänger av kolstål exponeras nedsänkta i en 3 % NaCl-lösning vid en temperatur av ca 20 °C. Sex av totalt nio delvis ingjutna provstänger är under exponeringen elektriskt ihopkopplade med tre rostfria och tre titancyllindrar, **figur 7**. De övriga tre delvis ingjutna provstängerna av kolstål är inte ihopkopplade med någon cylinder.



Figur 7. Försöksupställning på laboratorium

I **figur 8** visas en schematisk skiss på en ingjuten provstång av kolstål som är elektriskt ihopkopplad med en cylinder av antingen rostfritt (EN 1.4404) eller titan (grade 1).



Figur 8. Schematisk skiss för försöksupställning (17).

4.4.2 Provstänger ingjutna i betongcylindrar

Som provstänger användes rundstång av kolstål av stålqualiteten S235JR från Ståldepån AB. Provstängernas har en diameter av 12 mm och en längd av 280 mm. I **tabell 3** visas den kemiska sammansättningen hos provstängerna.

Tabell 3. Kemisk sammansättning av provstänger av kolstål (mass-%)

C	Mn	P	S	N	Cu
0,17	1,40	0,035	0,035	0,12	0,55

4.4.3 Rostfria och titancyindrar

I undersökningen ingår tre rostfria cylindrar av stålqualiteten EN 1.4404. Cylindrarna har en yttre diameter av 90 mm och en längd 200 mm. I **tabell 4** visas den kemiska sammansättningen hos de rostfria cylindrarna. När det gäller titancyindrarna som ingår i undersökningen så består de av 99,95 % titan av kvaliteten grade 1.

Tabell 4. Kemisk sammansättning av rostfria stålrör (mass-%)

EN-nummer	C	Cr	Ni	Mo	N	Mn	Mikrostruktur
1.4404	0,02	17,2	10,1	2,1	-	-	Austenitisk

4.4.4 Betongcylindrarnas sammansättning

Vid tillverkning av betongcylindrar med ingjutna provstänger av kolstål användes betong med anläggningscement från Weber Saint-Gobain. I **tabell 3** visas sammansättningen hos 10 kg betongblandning.

Tabell 5. Sammansättning av 10 kg betongblandning vid ett vct av 0,45 och 3 vikt-% klorider per cementvikt

Innehåll	Massa i kg
Anläggningscement OPC C45/55 (CEM I)	1,75
Ballast	
Sand 0-0,5 mm	2,5
Sand 0,5-1,0 mm	0,6
Sand 1,0-2,0 mm	1,125
Sand 2,0-4,0 mm	4,0
Blandvatten	0,7875
Natriumklorid (purum)	0,8654

För att erhålla en kontrollerad defekt i betongcylindrarna göts cylindern i två etapper. Tiden mellan gjutningarna var ca 1 dygn. Detta innebär att det bildades en kontrollerad spalt mellan den första och andra gjutningen, **figur 9**. Betongens täckande betongskikt hos betongcylindrarna är ca 15 mm.



Figur 9. Betongcylindrar med en kontrollerad spalt i betongen

4.4.5 Utvärdering av elektrokemisk potential och galvanisk korrosionsström

Den galvaniska korrosionsströmmen (makrocellström) mellan ihopkopplade rostfria/titan cylindrar och ingjutna provstänger av kolstål mättes med en nollresistansamperemeter. Den elektrokemiska potentialen hos de rostfria stålrören och de ingjutna provstängerna mättes med en mättad kalomelelektrod. Den elektrokemiska potentialen mättes både i ihopkopplat och i icke ihopkopplat tillstånd.

4.4.6 Utvärdering av korrosionshastighet

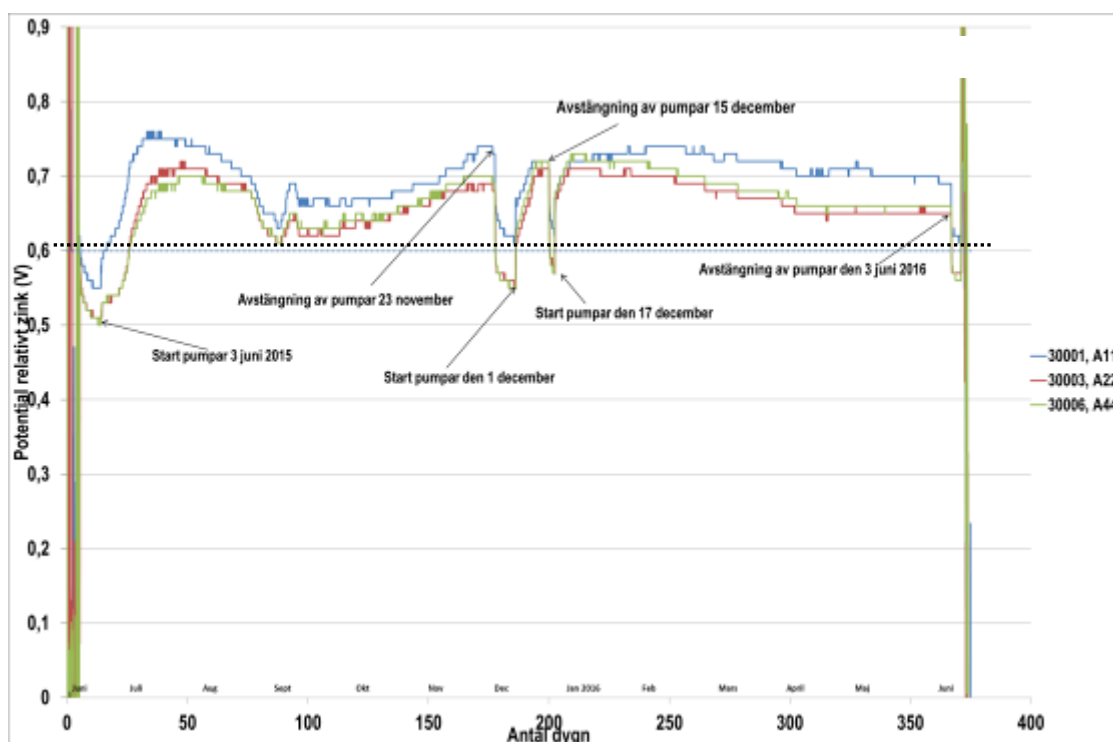
Efter ca två månaders exponering i 3 % NaCl på laboratorium slogs betongcylindrarna isär och provstängernas korrosionsutseende och korrosionshastighet utvärderades. Korrosionshastigheten utvärderades genom massförlustbestämning. Massminskningen (massförlusten) på grund av korrosionen bestämdes genom att provstängerna vägs före exponeringen och vid exponeringens slut, efter det att provstängerna rengjorts från korrosionsprodukter och betongrester. Detta görs genom en upprepad betning i Clarks lösning (20g/l Sb_2O_3 och 60 g/l $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ i koncentrerad HCl) vid rumstemperatur. Vid beräkning av kolstålstängernas korrosionshastighet användes densiteten 7800 kg/m³.

5 Resultat och diskussion

5.1 UNDERSÖKNINGAR UTFÖRDA VID O3

5.1.1 Mätningar av armeringens elektrokemiska potential

I **Figur 10** visas resultaten från de kontinuerliga mätningarna av armeringens elektrokemiska potential med tre potentialloggrar placerade på inloppssidan i en kylkanal 441.L12 i O3 som funktion av tiden.



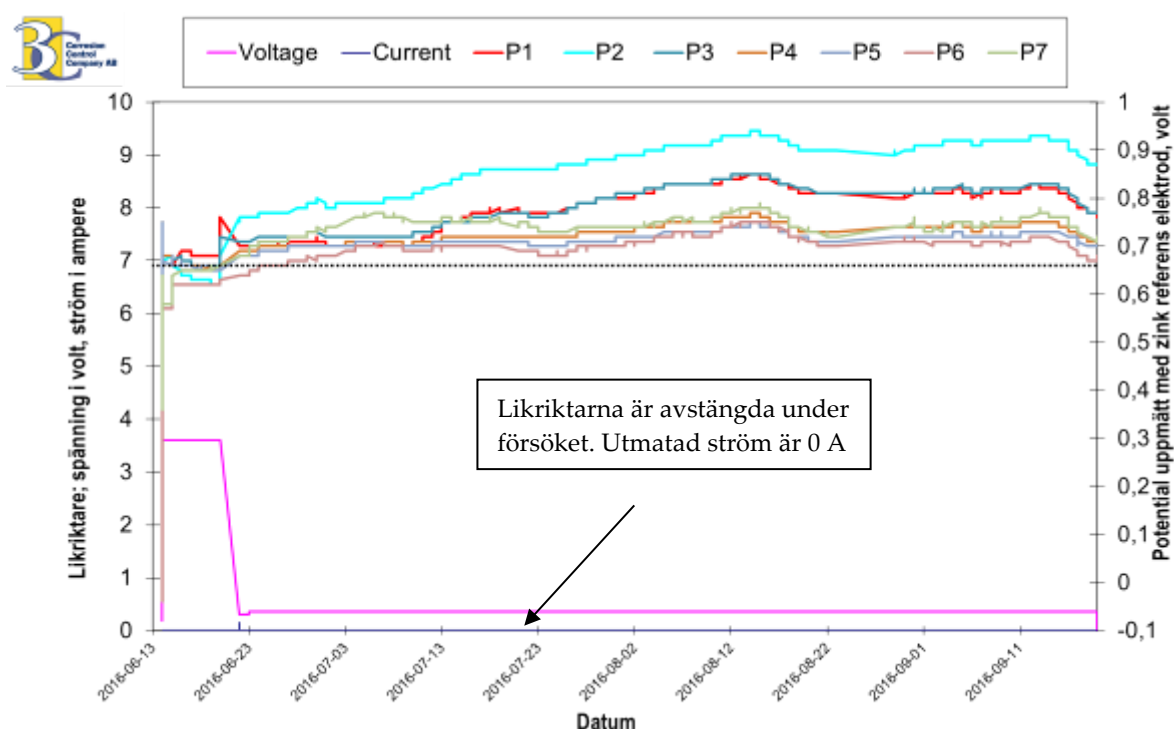
Figur 10. Kontinuerliga mätningar av den ingjutna stålarmringens elektrokemiska potential som funktion av tiden i utloppssidan i kylkanal 441.L12 i O3.

Det framgår av de kontinuerliga mätningarna av den ingjutna armeringens elektrokemiska potential att potentialerna varierade mellan 0,60 V och 0,75 V relativt zinkelektroden. I en vattenmättad betong varierar normalt den elektrokemiska potentialen för ingjutet stål från 0,35 upp till 0,6 V relativt zinkelektroden. De uppmätta potentialerna är betydligt ädlare än vad som normalt uppmäts för ingjuten armering i en vattenmättad betong. Detta innebär att den ingjutna armeringen är i elektrisk kontakt med titanrören i kondensorn och de rostfria pumparna i inloppsdelen. De potentialer som registreras är s.k. blandpotentialer mellan den ingjutna armeringen och de ädla metaller som är i elektrisk kontakt med armeringen och har elektrolytkontakt med både armeringen och de ädla metallerna.

Det framgår vidare att när pumparna stängs av sjunker den elektrokemiska potentialen hos den ingjutna stålarmingen. Anledningen till detta är att de vattenfyllda titanrören töms på vatten vilket innebär att elektrolytkontakten mellan titanrören och armeringen upphör. De rostfria pumparna med zinkanoder är fortfarande i kontakt med armeringen och är nedsänkta i vatten. Detta innebär att den galvaniska påverkan från de rostfria pumparna på den ingjutna armeringen har avsevärt minskat genom att använda zinkanoder på de rostfria pumparna.

I **Figur 11** visas resultaten från de kontinuerliga mätningarna i utloppsdelen i kylkanalen av stålarmingens elektrokemiska potential uppmätta med sju referenselektroder av zink (P1-P7). Referenselektroderna är placerade på kylkanalens betongvägg i utloppssidan hos O3. Den referenselektrod som är placerad närmast kondensorn har beteckningen P2 och den referenselektrod som placerats längst ifrån kondensorn har beteckningen P7. Mätningarna har pågått i ca tre månader från och med 13 juni 2016 till och med 19 september 2016.

Det framgår av resultaten från de kontinuerliga mätningarna av armeringens elektrokemiska potential är betydligt ädlare jämfört med en opåverkad stålarmering som är ingjuten i vattenmättad betong. Den ädla potentialen hos armeringen beror på att stålarmeringen är i elektrisk kontakt med rostfritt stål, titan eller koppar.

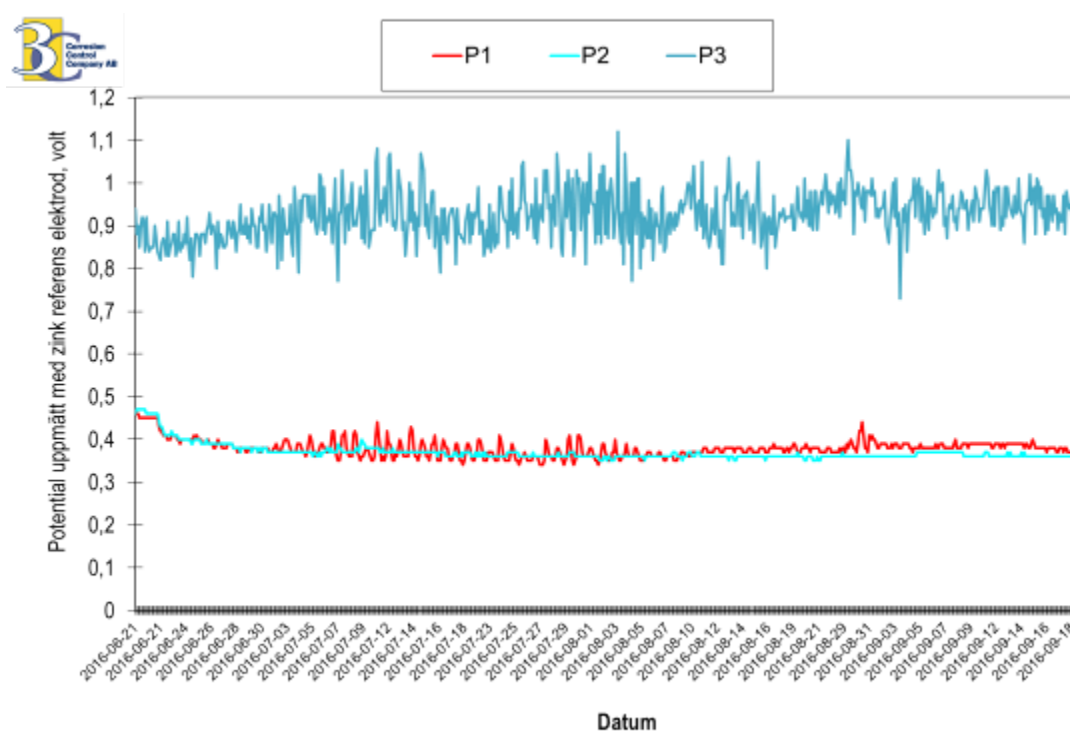


Figur 11. Resultat från kontinuerliga mätningar av stålarmingens elektrokemiska potential som funktion av tiden. P1-P7 är zinkreferenselektroder som är placerade utefter utloppstunneln. Referenselektrod P2 är placerad närmast kondensorn och därefter P1, P3, P4, P5 P6 och P7.

Ingen inverkan av läckströmmar har konstaterats från de kontinuerliga potentialmätningarna av den ingjutna stålarmeringen i Oskarshamn 3. För att säkert fastställa om kylvattenvägarna är utsatta för läckströmmar bör mätningar av potentialgradienter både utanför kärnkraftverken och i kylkanalerna genomföras. Detta planeras i en eventuell etapp II.

5.1.2 Mätning av förekomst av läckströmmar vid Oskarshamn kärnkraftverk

I **Figur 12** visas resultat från kontinuerliga potentialmätningar på en 10 meters armeringsstång nedsänkt i vatten samt potentialmätningar på skyddsjorden. Den nedsänkta kamstången är placerad strax utanför kärnkraftverket.



Figur 12. Kontinuerliga potentialmätningar av en nedsänkt armeringsstång (referenselektrod P1 och P2) och skyddsjord (referenselektrod P3).

Det framgår av resultaten från de kontinuerliga potentialmätningarna i **Figur 12** att stålarmeringens potentialvärden uppmätt med zinkreferenselektroden P1 är relativt konstant med exponeringstiden. Vid referenselektroden P2 uppmättes små potentialvariationer under juli månad och en kort period i augusti. De små potentialvariationer som uppmätts av P1 skulle möjligen kunna vara orsakade av läckströmmar. Den största potentialskillnaden (80 mV) mellan referenselektroden P1 och P2 uppmättes den 31 augusti 2016. Betydligt större potentialförändringar (potentialskillnad ca 400 mV) uppmättes hos skyddsjorden av koppar. Vad orsaken till potentialvariationerna hos skyddsjorden är för närvarande inte känt. Möjliga förklaringar skulle kunna var läckströmmar från HVDC-överföringen eller läckströmmar från likströmsdriven utrustning i själva kärnkraftverket. Mätnoggrannheten hos zinkreferenselektroden är ca ± 10 mV enligt leverantören.

5.1.3 Potentialkartering i utloppsiden i O3

I **Figur 13** visas en grafisk presentation av uppmätta elektrokemiska potentialer för stålarmeringen i tak, vägg och golv vid två kylkanaler i utloppet för O3.

Kylkanal utlopp 441.L18 för katodiskt skydd

Kylkanal utlopp 441.L13 med 8 st potentialloggrar

		Golv	Vägg: 0	Vägg: 0,5	Vägg: 2	Tak			Golv	Vägg: 0	Vägg: 0,5	Vägg: 2	Tak		
		0		-269	-300			0		-166	-100				
		4	-206	-241	-142	-254	-327		4	-160	-110	-70	-290	-300	
	-401--500	8	-135	-102	-147	-110	-87		8	-142	-165	-195	-285	-183	
	-301-400	12	-267	-208	-165	-91	-133		12	-216	-127	-113	-135	-157	
	-201---300	16	-201	-93	7	-58	-89		16	-155	-216	-125	-70	-116	
	-101--200	20	-161	-98	-26	-124	-113		20	-265	-200	-61	-191	-242	
	-100- 0	24	-156	-145	-71	-170	-185		24	-305	-368	-108	-126	-95	
	0-100	24	-155	-93	-8	-173	-130		28	-310	-295	-40	-100	-323	
		28	-202	-334	47	-21	-132		32	-432	-336	-240	-365	-289	
		34	-46	-36	20	-40	-18		32	-414	-373	-120	-230	-193	
		34	-52	-45	-4	-40	-30								
		Medel	-158	-140	-69	-126	-124		Medel	-267	-243	-124	-189	-211	
		TOT Medel	-123						TOT Medel	-207					

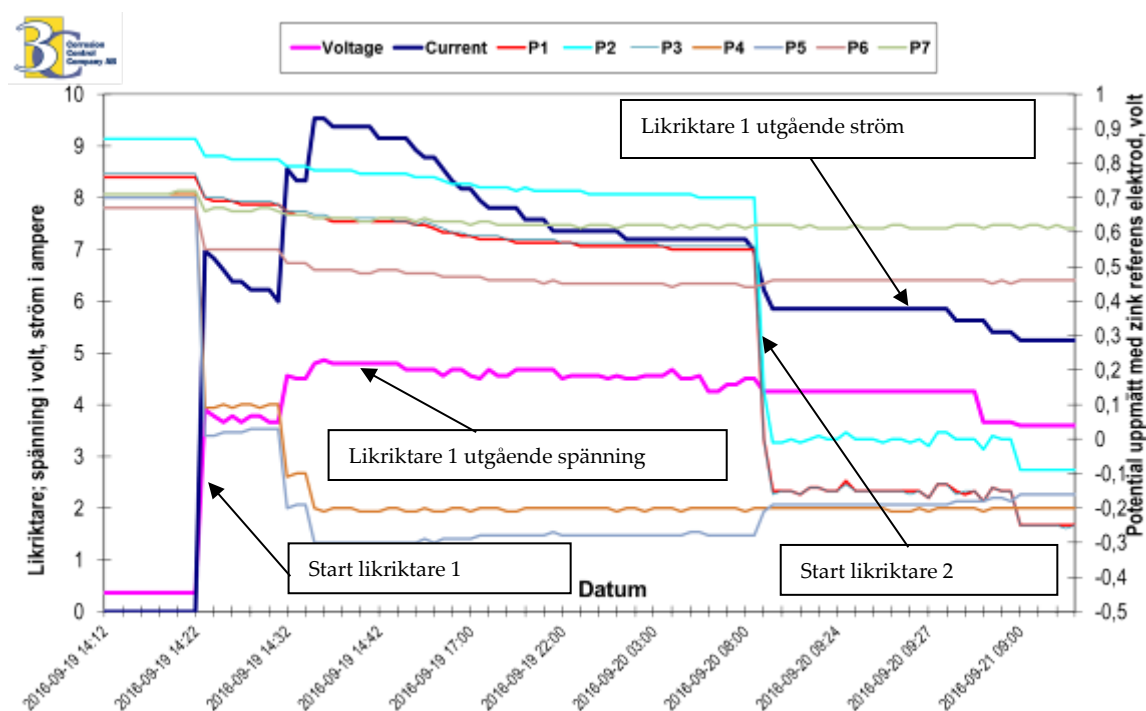
Avstånd från
kondensor (m)

Figur 13. Grafisk presentation av uppmätta potentialvärden i mV för ingjutet armeringsstål relativ en referenselektrod av Ag/AgCl (0,5 MKCl). Avståndet från kondensorn anges i de båda vänstra kolumnerna.

Det som kan konstateras är att potentialvärdena är mycket ädla trots att betongen varit vattenmättad. Att betongytorna i kylkanalerna skulle hinna torka upp och bli väl luftade på ett dygn är inte troligt. För den kylkanal som skulle installeras med katodiskt skydd framgick det att potentialerna blev mindre negativa ju längre bort vi kom från kondensorn. Detta beror troligtvis på att det finns en stor rostfri lucka på väggen ca 35-40 meter från kondensorn som drar upp potentialen. Detta gäller inte för kylkanalen där åtta potentialloggrar installerades. Potentialvärdena blir mer negativa ju längre bort ifrån kondensorn mätningarna sker. Inga rostfria luckor finns på denna väggtyta som kan påverka den elektrokemiska potentialen.

5.1.4 Katodiskt skydd med påtryckt ström i O3

I **figur 14** visas resultaten från de kontinuerligt mätningar av armeringens elektrokemiska potential i en kylkanals utloppsida i O3 före och efter att det katodiska skyddet togs i drift. Det framgår av potentialmätningarna att armeringens potential sjönk kraftigt (ned till skyddspotential) vid P4 och P5 vid start av likriktare 1 (start 2016-09-19 kl 14:22). Vid start (start 2016-09-20 kl. 08:12) av likriktare 2 sjönk potentialen för mätställe P1-P3. Ström- och spänningskurvan för likriktare 2 saknas i diagrammet. Vid två av mätställena (P6-P7) är potentialsänkningen marginell. Anledningen till detta är att referenselektroden P6 och P7 är placerade utanför anodens strömutbredningsområde.



Figur 14. Resultat från kontinuerliga mätningar av armeringens elektrokemiska potential före och efter att det katodiska skyddet togs i drift (start likriktare 1, 2016-09-19 kl 14:22 och start likriktare 2, 2016-09-20 kl. 08:12) som funktion av tiden. P1-P7 är armeringens elektrokemiska potential uppmätt med zinkreferenselektroder vid olika ställen utefter kylkanalens utlopp.

Sammanfattningsvis visade resultaten från de kontinuerliga mätningarna av armeringens elektrokemiska potential att vid strömutmätning från det katodiska skyddet sänks armeringens elektrokemiska potential kraftigt ned till skyddspotential. Denna sänkning av potentialen innebär att armeringens korrosionshastighet i de blottlagda och vattenfyllda armeringsytorna i betongen kommer att sjunka drastiskt, så att korrosionshastigheten blir försumbar.

Även potentialskillnaden mellan stålarmeringen och rostfria pumpar/luckor, titanrör vid kondensorn samt jordningslinor av koppar kommer att minska, vilket leder till en sänkning av den galvaniska korrosionsströmmen. Tidigare undersökningar utförda av Swerea KIMAB (18) visade att korrosionshastigheten hos korroderande armeringsstål i väl luftade betongkonstruktioner i ett väl fungerande katodiskt skydd kan korrosionshastigheten sänkas med över 95 %.

5.1.5 Metallografisk undersökning av oskadat armeringsjärn från kylkanal L8 i O3

Det framgår av den okulära undersökningen av armeringsbitens mantelyta att den till största del är fri från glödskalet. Det förekommer dock enstaka små områden med glödskalet och korrosionsprodukter, **figur 15**. Ett större område av glödskalet visas i **figur 16**, uppskattningsvis så består ca 10% av den totala armeringsytan av glödskalet.

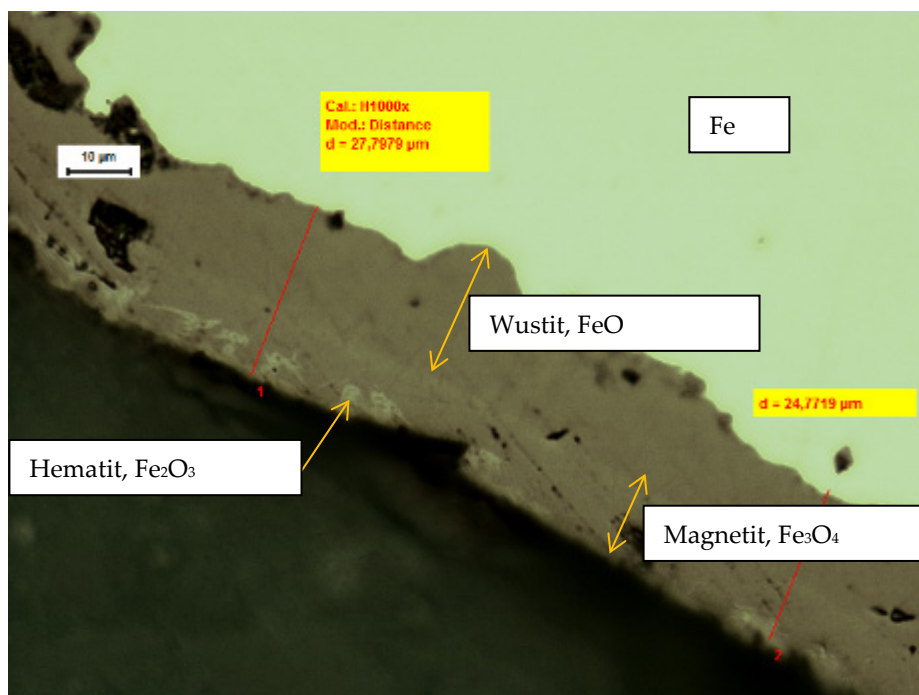


Figur 15: Armeringsyta med endast mindre områden med glödskalet.



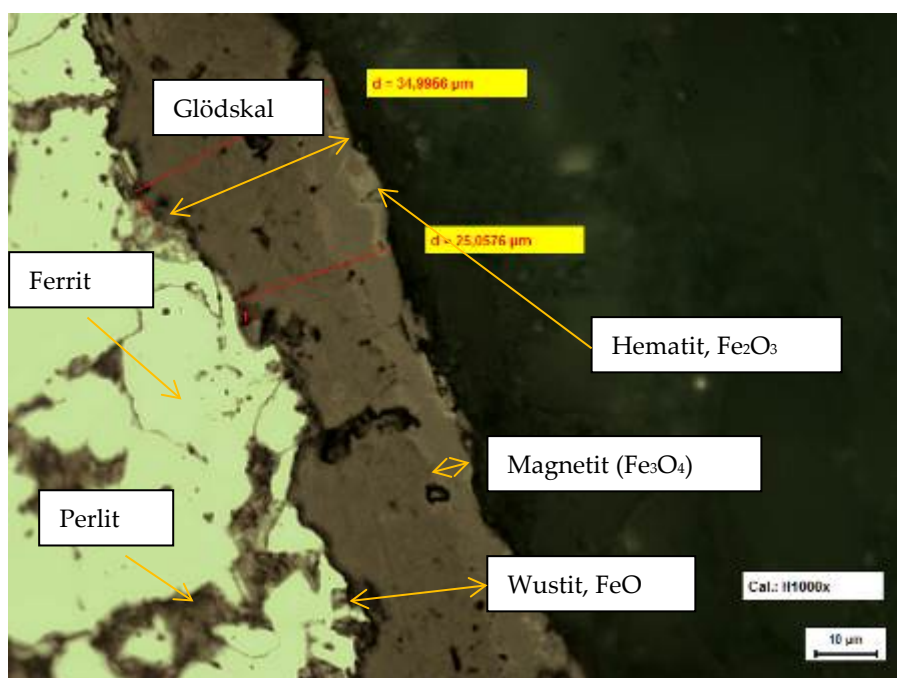
Figur 16: Andra sidan av armeringsytan där större områden av glödskalet är synliga.

Efter polering undersöktes glödskalet tvärsnittsyta i 1000 ggr förstoring med ett ljusoptiskt mikroskop, **figur 17**. Det stora vita området är stål (Fe) och det mörkare bandet är glödskalet bestående av wustit, magnetit och hematit, **figur 16**. Ytterst på glödskalet syns små ljusa områden vilket är hematit (Fe_2O_3). Glödskalets totala tjocklek mättes och det bedöms vara ca 20-35 μm tjockt.



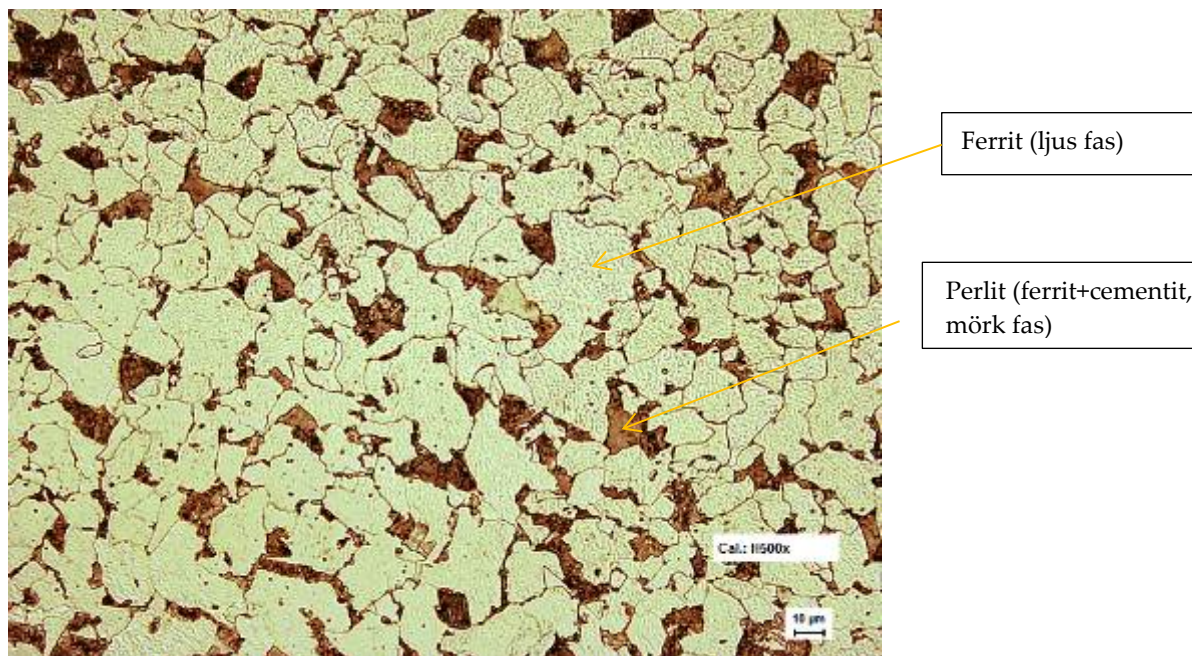
Figur 17. Glödskalets utseende i 1000 ggr förstoring med LOM.

För att få fram stålets mikrostruktur etsades tvärsnittsytan i 30 sekunder i en 1% Nital lösning och en ny bild togs på glödskalet i 1000 ggr förstoring, **figur 18**. Hematit (Fe_2O_3) syns ytterst i glödskalet som små ljusa områden (nålliknande). Runt hematit syns ett något mörkare band vilket troligen är magnetit. Närmare stålet syns ett relativt tjockt band som troligen är wustit.



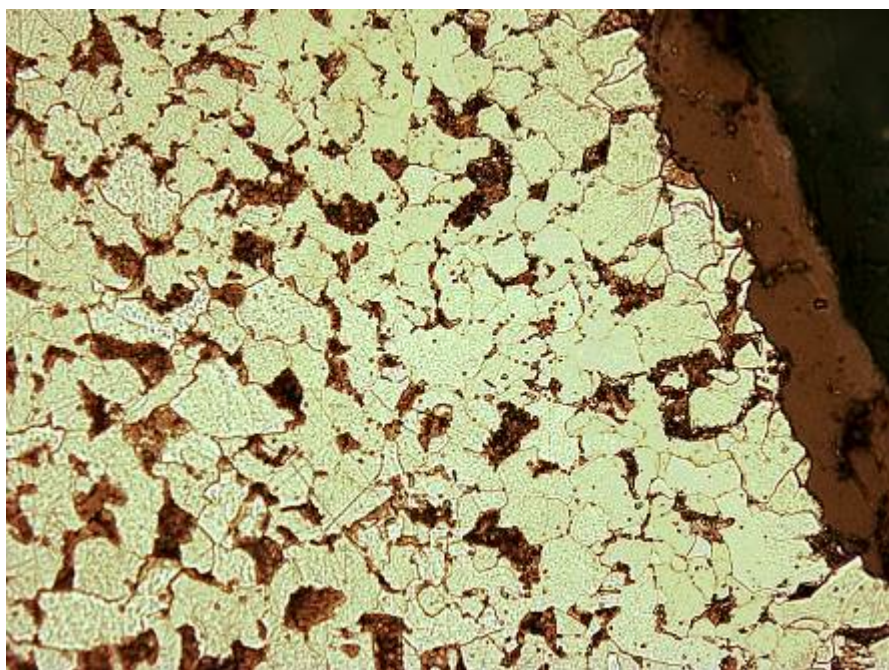
Figur 18. Bild på etsad yta där glödskalet syns som ett större band (1000X).

Mikrostrukturen i stångens kärna visas i **figur 19** i 500 ggr förstoring. De ljusa områdena är ferrit och det mörkare är perlit. Mikrostrukturen i stålets kärna är därför en s.k. ferrit-perlitisk struktur. Perlit består av ferrit och cementit.



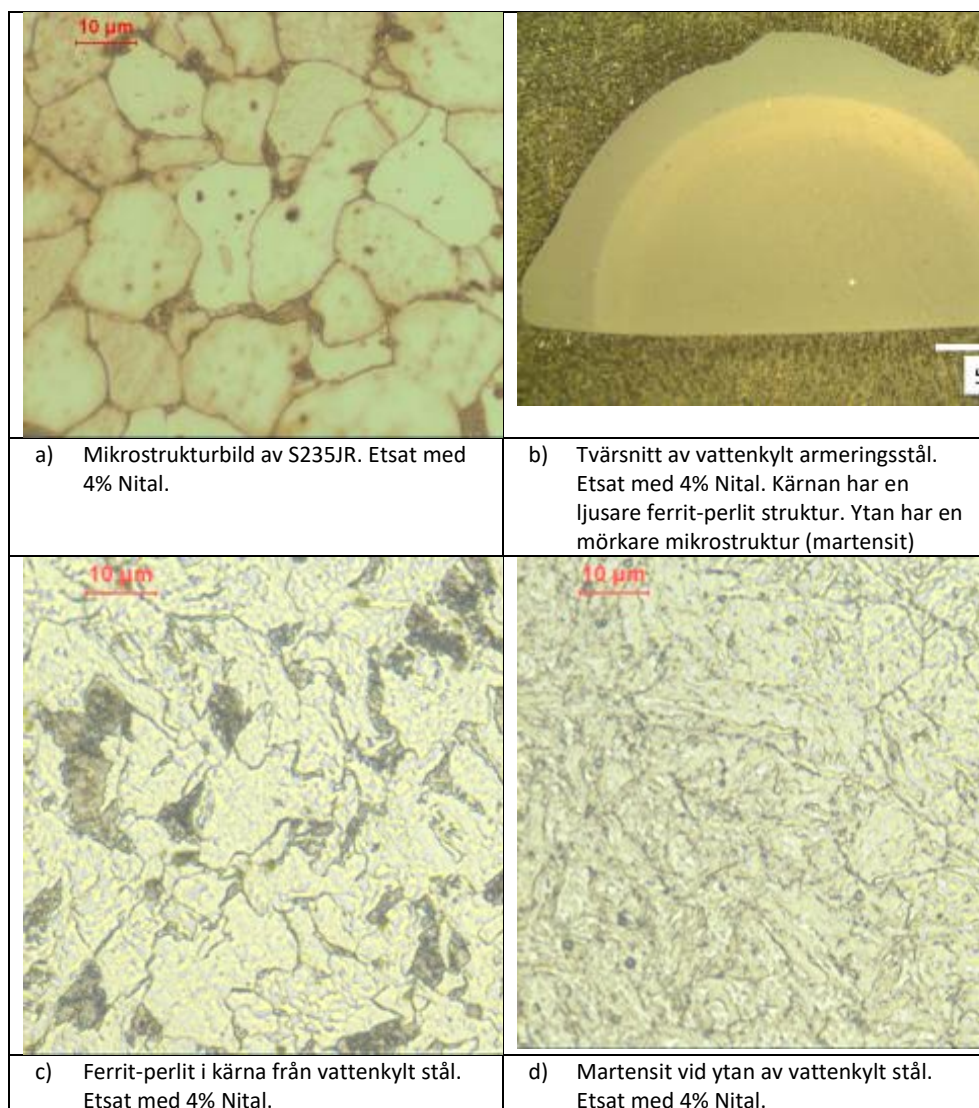
Figur 19. Mikrostruktur i stångens kärna där ljusa områden är ferrit och mörkare områden är perlit (ferrit och cementit) (500X).

Mikrostrukturen vid stålets yta med 500 ggr förstoring visas i **figur 20**. Vid ytan är det något glesare med perlit men strukturen vid ytan bedöms ändå vara en ferrit-perlitisk struktur. Ingen martensit har kunnat påträffas på armeringsytan.



Figur 20. Ferrit- och perlitisk mikrostruktur i hela armeringsbitens tvärsnittsyta (500X).

I dag används ofta armering som har en mycket hård yta. Ytan består av mikrostrukturen martensit. Denna mikrostruktur hos armeringsstålet fås genom snabbkylning (vattenkylning) vid tillverkning av armering. Armeringens kärna innehåller den betydligt mjukare mikrostrukturen ferrit (ljus fas) och perlit (mörk fas), **figur 21**.



Figur 21. Mikrostruktur hos snabbkyld stålarmring

5.2 LABORATORIEUNDERSÖKNING AV ROSTFRITT STÅLS OCH TITANS GALVANISKA INVERKAN PÅ INGJUTET KOLSTÅL I KLORIDHALTIGT VATTEN

5.2.1 Utvärdering av utseende hos betongcylindrar och ingjutna provstänger av kolstål

I **figur 22, 23** och **24** visas utseendet hos samtliga betongcylindrar med ingjutna provstänger av kolstål som varit ihopkopplade i ca tre månader med cylindrar av rostfritt stål och titan samt ej i hopkopplade ingjutna provstänger exponerade i ett vattenbad med 3 % NaCl vid rumstemperatur. I **figur 22** visas betongcylindrarna G, H och I där inte provstängerna av kolstål varit ihopkopplade. Ingen utfällning av korrosionsprodukter kunde konstatera på betongytan hos någon av betongcylinder G, H och I.



Figur 22. Ej i hopkopplade provstänger av kolstål ingjutna i betongcylindrar G, H och I exponerade i ca 10 veckor i ett vattenbad med 3 % NaCl.

I **figur 23** visas utseendet hos betongcylindrarna A, B och C där ingjutna provstänger av kolstål har varit i hopkopplade med rostfria cylindrar i ca 10 veckor i ett vattenbad av 3 % NaCl. Det framgår av **figur 23** att rödrost (FeOOH) har bildas på betongytan i närheten av den kontrollerade defekten. Under rödrosten förekommer svartrost.



Figur 23. Provtägar i betongcylindrar A, B och C har varit i hopkopplade med rostfria cylindrar i ca 10 veckor i ett vattenbad av 3 % NaCl.

I **figur 24** visas utseendet hos betongcylindrarna D, E och F där ingjutna provstänger av kolstål har varit i hopkopplade med cylindrar av titan i ca 10 veckor i ett vattenbad av 3 % NaCl. Det framgår av **figur 22** att rödrost (FeOOH) har bildas på betongytan för endast betongcylinder F i närheten av den kontrollerade defekten. Rostutfällningarna på betongytan är betydligt mindre på provstänger som varit i hopkopplade med titan än rostfritt stål.



Figur 24. Provtägar i betongcylindrar D, E och F har varit i hopkopplade med cylindrar av titan i ca 10 veckor i ett vattenbad av 3 % NaCl

I **figurerna 25** och **26** visas provstängernas utseende efter det att betongen har avlägsnats efter ca 10 veckors exponering i ett vattenbad av 3 % NaCl. I **figur 25** har proverna fotograferats direkt efter att betongen avlägsnats från provstängerna och i **figur 26** visas provstängernas utseende efter några timmars exponering i luft. Provstängerna A, B och C har varit i hopkopplade med rostfria cylindrar. Provstängerna D, E och F har varit i hopkopplade med cylindrar av titan och provstängerna G, H och I har varit okopplade under exponeringen. Det framgår tydligt att de okopplade provstängerna av kolstål är betydligt mindre angripna än de ihopkopplade provstängerna, **figur 26**.



Figur 25. Korrosionsutseendet hos provstänger efter ca 10 veckors exponering i ett vattenbad av 3 % NaCl. Svarta korrosionsprodukter har bildats på stålytan

I **figur 26** visas provstängerna efter att provstängerna exponerats några timmar i luft. Det framgår att svartrosten har på stålytan omvandlats till rödrost (FeOOH).

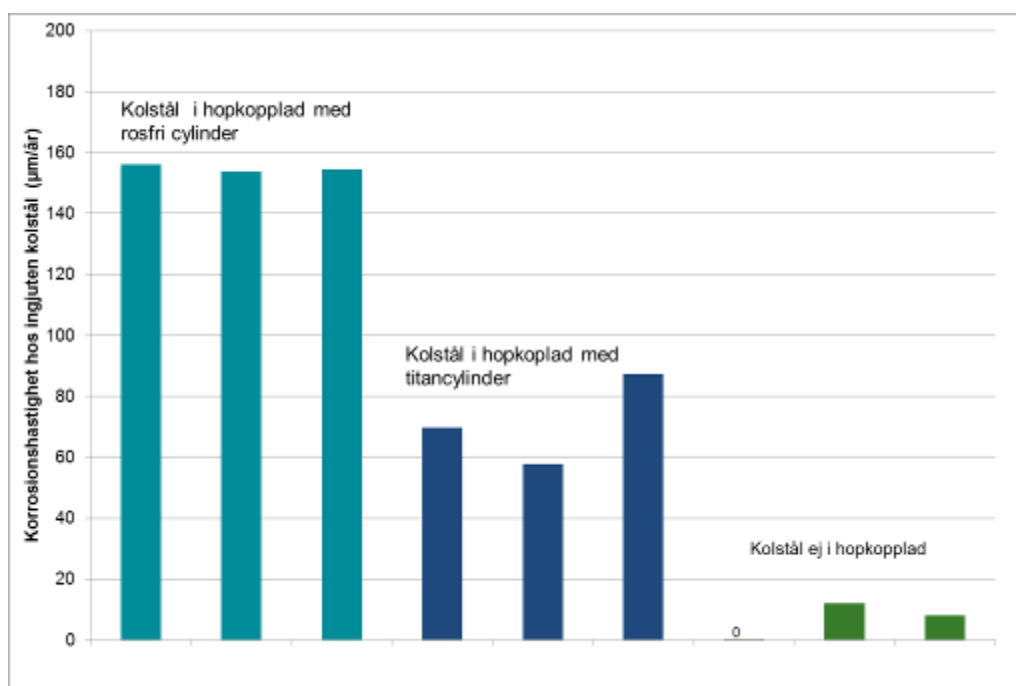


Figur 26. Korrosionsutseendet hos provstänger efter ca 10 veckors exponering i ett vattenbad av 3 % NaCl. Provstängerna har luft exponeras i några timmar på laboratoriet och de svarta korrosionsprodukterna har omvandlats till rödrost

Det framgår att provstängernas utseende och att den korroderade yta hos i hopkopplade provstänger är ca 30 % av exponerad yta.

5.2.2 Utvärdering av korrosionshastighet hos ingjutna provstänger av kolstål ihopkopplade med cylindrar av rostfritt stål och titan

I **figur 27** visas korrosionshastigheten uttryckt i $\mu\text{m}/\text{år}$ hos ingjutet kolstål som varit i hopkopplade med rostfritt stål eller titan i ca 10 veckor i ett vattenbad. Korrosionshastigheten (massminskningen) hos de ingjutna provstängerna av kolstål bestämdes genom att avlägsna samtliga korrosionsprodukter genom betning och därefter beräkna provstängernas massförlust efter exponering från provstängernas ursprungliga vikt. Korrosionshastigheten är beräknad utifrån exponerad yta.

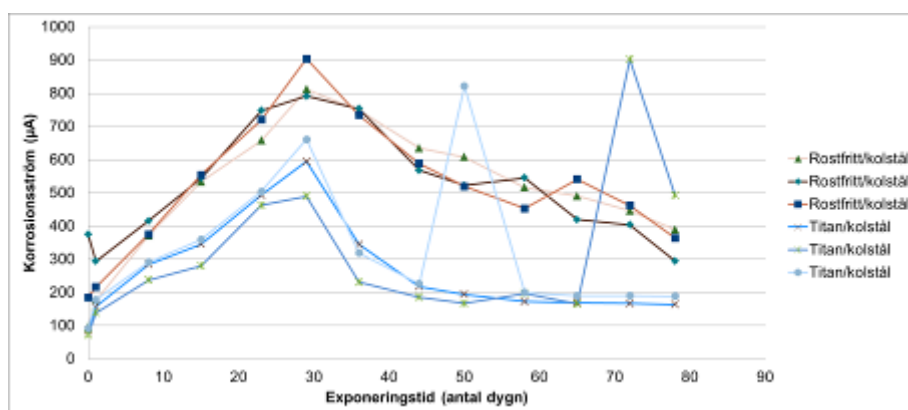


Figur 27. Korrosionshastigheten hos ingjutna provstänger av kolstål i hopkopplade med rostfria cylindrar och med titancylindrar och med ej i hopkopplade provstänger

Som framgår av resultaten i **figur 27** så ökar korrosionshastigheten kraftigt vid en ihopkoppling av de ingjutna provstängerna av kolstål med både rostfritt och titan. Provstängernas korrosionshastighet vid i hopkoppling med titancylindrar varierade från $59 \mu\text{m}/\text{år}$ upp till $84 \mu\text{m}/\text{år}$. För provstänger av kolstål ihopkopplade med rostfria cylindrar varierade korrosionshastigheten från 154 till $157 \mu\text{m}/\text{år}$. De okopplade provstängernas korrosionshastighet varierade mellan 0 och $11 \mu\text{m}/\text{år}$. Det framgår vidare att medelkorrosionshastigheten hos tre provstänger av kolstål i hopkopplade med rostfritt stål ökade med en faktor ca 20 och vid i hopkoppling av tre provstänger av kolstål med titan ökade medelkorrosionshastigheten hos provstänger av kolstål med en faktor ca 10.

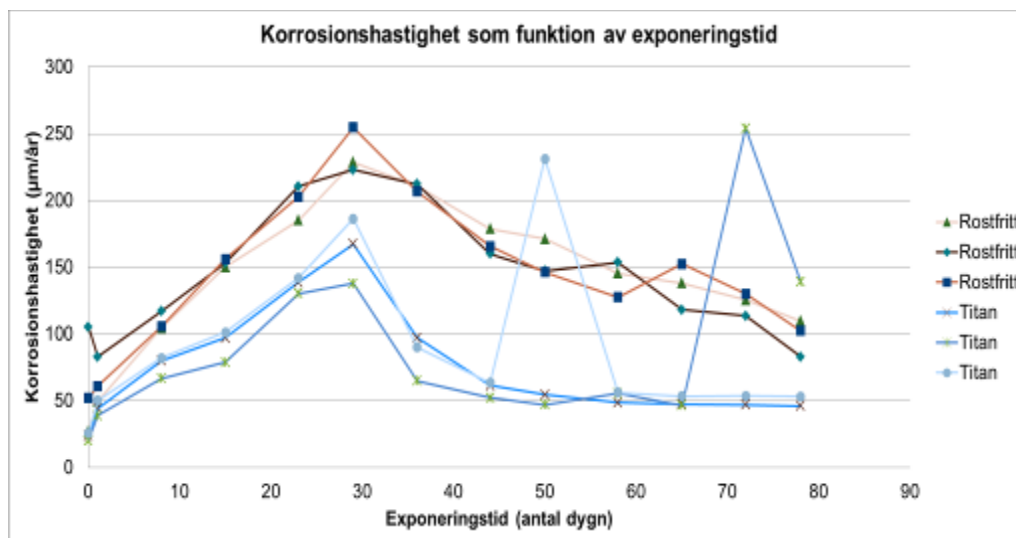
5.2.3 Utvärdering av galvanisk korrosionsström hos ingjutna provstänger av kolstål ihopkopplade med cylindrar av rostfritt stål och titan

I **figur 28** visas kontinuerligt uppmätt galvanisk korrosionsström som funktion av tiden. Mätningarna har utförts med en nollresistansamperemeter mellan i hopkopplade cylindrar av rostfritt stål eller titan med ingjutna provstänger av kolstål. Det framgår av **figur 28** att korrosionsströmmen mellan ihopkopplade ingjutna provstänger av kolstål och rostfria cylindrar är betydligt högre jämfört med i hopkopplade ingjutna provstänger av kolstål och titancylindrar. I **figur 29** har den galvaniska korrosionsströmmen från det ingjutna kolstålet till cylindrarna av rostfritt stål och titan omräknats till en galvanisk korrosionshastighet uttryckt i $\mu\text{m}/\text{år}$.



Figur 28. Kontinuerligt uppmätta galvaniska korrosionsströmmar mellan rostfria cylindrar och ingjutet kolstål samt mellan titancylindrar och ingjutet kolstål som funktion av exponeringstid.

I **figur 29** visas den galvaniska korrosionsströmmen från det ingjutna kolstålet till i hopkopplade cylindrar av rostfritt stål eller titan omräknad till en galvanisk korrosionshastighet uttryckt i $\mu\text{m}/\text{år}$.



Figur 30. Det ingjutna kolstålets korrosionshastighet vid i hopkoppling med antingen rostfritt stål eller med titan som funktion av exponeringstiden.

Som framgår att resultaten i **figur 30** så är den kontinuerliga uppmätta galvaniska korrosionshastigheten ca 1,5-3 gånger högre under exponeringen för ingjutet kolstål i hopkopplad med rostfritt stål jämfört med ingjutet kolstål i hopkopplad med titan. Det framgår vidare att vid två mättillfällen uppmättes dock mycket höga korrosionsströmmar mellan ingjutet kolstål och titan. Orsaken till detta är för närvarande inte känt. Mätfel kan dock inte uteslutas.

5.3 FORTSATTA UNDERSÖKNINGAR I ETAPP II

Oskarshamn 3

Läckströmsmätningar kommer att genomföras genom kontinuerliga mätningar av potentialgradient mellan två referenselektroder i en kylkanal i utloppsidan. Läckströmsmätningar kommer även att genomföras i mark i nära anslutning till Oskarshamn kärnkraftverk. Ett flertal mätningar av skyddsförmågan hos det katodiska skyddet som installerats under 2016 kommer att genomföras under 2017. Fortsatta utvärderingar av potentialmätningar med monterade potentialloggrar (8 st) kommer att genomföras under 2017

Ringhals 3

Utvärdering av kontinuerligt registrerade potentialer med potentialloggrar (2 st) görs under 2017.

Forsmark

Installation av potentialloggrar (3 st) i en kylkanal görs i början av 2017. Mätning av potentialgradienter i mark nära anslutning till kärnkraftverket görs under 2017.

Laboratorieundersökning

I denna undersökning som utförs på Swerea KIMAB kommer inverkan av luftningsceller mellan armering i väl luftad betong och armering i vattenmättad betong undersökas.

6 Slutsatser

Efter hittills utförda undersökningar i Oskarshamn 3 kylvattenvägar och från laboratorieundersökningar utförda på Swerea KIMAB kan följande slutsatser dras:

- De höga korrosionshastigheterna som konstaterats lokalt på stålarmeringen i både in- och utloppsdelarna till kylkanaler beror inte enbart av kloridinitierad korrosion.
- Under de synliga rostutfällningarna på betongytan var i vissa fall armeringen helt oskadad och i andra fall helt bortkorroderad. Anledning till att armeringen är helt oskadad under rostutfällningarna är att de bildade järnjoner vid armeringen har fällts ut där den genomgående sprickan mynnar ut i vattnet. Sprickans mynning kan vara placerad långt ifrån angreppsstället.
- Resultaten från de kontinuerliga mätningarna av armeringens elektrokemiska potential visade att armeringen har onormalt ädla potentialer i en vattenmättad betong.
- De ädla elektrokemiska potentialerna som kontinuerligt registreras hos armeringen under ett år beror på att stålarmeringen har elektrisk kontakt med rostfria pumpar/luckor och titanrör från kondensorn.
- Eftersom areaförhållandet mellan blottlagda armeringsytor (små anodytor) och de ädla metallerna såsom rostfritt stål, titan och koppar (stora katodytor) är mycket gynnsam för galvanisk korrosion på de blottlagda och vattenfyllda armeringsytorna kommer den lokala korrosionshastigheten vara mycket hög på blottlagda stålytor.
- Inledande undersökningar med katodiskt skydd med påtryckt ström visade att stålarmeringens elektrokemiska potential kan sänkas ned till skyddspotential. Även potentialskillnaden mellan stålarmeringen och rostfria pumpar/luckor, titanrör vid kondensorn samt jordningslinor av koppar kommer att minska, vilket leder till en kraftig sänkning av den galvaniska korrosionsströmmen.
- Från resultaten av de hittills registrerade armeringspotentialerna i kylvattenvägarnas kylkanaler går det inte att fastställa om armeringen är påverkad av läckströmmar. Däremot visade registrerade potentialvärden hos en helt nedsänkt 10 meters kamstång av stål som är placerad utanför Oskarshamn kärnkraftverk att potentialvärdena varierar med maximalt 80 mV.
- Stora potentialvariationer (upp till 400 mV) har konstaterats i skyddsjorden av koppar utanför Oskarshamn kärnkraftverk.

- Laboratorieundersökningarna visade att korrosionshastigheten hos ingjutet kolstål ökade med en faktor 10 vid i hopkoppling med titan jämfört med okopplad kolstål i betong. Vid i hopkoppling av ingjutet kolstål med rostfritt stål ökade korrosionshastigheten hos kolstål med en faktor 20 jämfört med okopplat kolstål i betong.
- Det rekommenderas att installera katodiskt skydd med påtryckt ström för att skydda stålarmeringen mot framtida korrosionsangrepp i kylvattenkanalerna i O3.
- Det rekommenderas vidare att fortsätta att registrera eventuella läckströmmar med potentialloggrar och med externa referenselektroder av zink. Mätningar av potentialgradienter i kylvattenvägarna bör utföras för att kontrollera eventuella läckströmmar. Även potentialgradienter i nära anslutning till kärnkraftverket bör mätas.

7 Referenser

1. Lindmark S & Sederholm B (2010). Korrosion på stål i betong i kylvattenvägar. Delrapport I – Litteraturgranskning, Elforsk rapport 10:82
2. Sandberg B., Ahlström J, Tidblad J., Sederholm B (2009). Korrosion på stål i betong i kylvattenvägar. Delrapport 3 – Korrosion på stål i vattenmättad betong. Elforsk rapport 10:82
3. Tuutti K (1982). Corrosion of Steel in Concrete, CBI Report 4:82, Swedish Cement and Concrete Institute, Stockholm.
4. Tang L., Nilsson L-O, Muhammed Basheer P.A (2012). Resistance of concrete to chloride ingress: testing and modelling. London Taylor & Francis 2012 xviii, 241 s. ISBN 978-0-415-48614-9.
5. Bobitsas D, Tang L, Utgenant P (2014). Chloride ingress in concrete exposed to marine environment – field data up to 20 years exposure. SBUF Report p 137.
6. Boubitsas D & Tang L (2014). The influence of reinforcement steel surfaces condition on initiation of chloride induced corrosion. Materials and Structures, Rilem 2014
7. Mohammed TU & Hamada H (2006). Corrosion of steel bars in concrete with various steel surface conditions. ACI Mater J 103(4) pp 233-242.
8. Treadaway KW, Cox RN, Brown BL (1989). Durability of corrosion resisting steels in concrete. ICE Proc 86(2) pp 305-331.
9. Ahlström J & Bror Sederholm (2013). Glödskalets inverkan på korrosionshårdigheten hos armeringsstål i betongkonstruktioner. Internal Report, Swerea KIMAB (in Swedish).
10. Sandberg B, Ahlström J, Sederholm, Nilsson L-O, Lindmark S (2010). Korrosion på stål i betong i kylvattenvägar. Delrapport 2 – Relativa fuktighetens inverkan på kloridinitierad armeringskorrosion. Elforsk rapport 10:83.
11. Vinka T-G (1984). Galvanisk korrosion – särskilt galvanisk atmosfärisk korrosion av aluminium. Rapport Plm 84150, Televerket.
12. Titanium Metals Corporation. Corrosion resistance of titanium. Report HQ-10/97-BG104-4M, 1997 USA.
13. Taxén C., Sandberg, B, Lilja C (2014). Possible influence from stray currents from high voltage DC power transmission on copper canister. SKB rapport TR-14-15
14. Sandberg B & Sederholm, (2009). Cathodic protection of foundations for wind power parks. Uppdragsrapport nr 737005 (konfidentiell), Korrosionsinstitutet
15. Ahlström J (2014). Corrosion of steel in concrete at various moisture and chloride levels. Licentiate thesis. Report TVB-3178 Lund 2014.
16. Angst U, Elsener B, Larsen C.K and Vennesland Ø (2009). Critical chloride content in reinforced concrete – a review. *Cement and Concrete Research* 39 (12) 1122-1138.
17. Sederholm B & Ahlström J (2013) Rostfria ståls korrosionshårdighet och galvaniska inverkan på kolstål i betong med hög fukt- och kloridhalt. KIMAB rapport 2013-116.

18. Sederholm B (2002). Utomhusprovning av enkelt installerade anodsystem för katodiskt skydd av räkesständer och kantbalksarmering på Ölandsbron. KI Rapport 2003:3, Korrosionsinstitutet.
19. Nyberg J (2016). Potentialmätningar och provpolarisering av O3 kylvattenvägar. Rapport nr. 803-46-RE-A26. 3C Corrosion Control Company AB.
20. Klasson, J (2014). Reparation av utloppskonstruktion. Föredrag vid Kraftindustrins betongdagar 2014.

ARMERINGSKORROSION I KYLVATTEN- VÄGAR INOM KÄRNKRAFTEN – ETAPP I

Omfattande lokala korrosionsangrepp har påträffats vid tillståndsbedömningar av betongytor i olika delar av kylvattenvägarna i kärnkraftverken Oskarshamn och Ringhals. Under de synliga rostutfällningarna var armeringen i vissa fall helt oskadad och i andra fall fullständigt bortkorroderad.

En av de viktigaste orsakerna till de kraftiga korrosionsangreppen är sannolikt galvanisk korrosion. Skadorna har nu reparerats, och en provinstallation av katodiskt skydd med påtryckt ström har installerats i Oskarshamn 3. Resultaten från de inledande undersökningarna visar kraftigt minskade korrosionsangrepp på armeringen. Arbetet fortsätter i en uppföljande etapp under 2017.

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