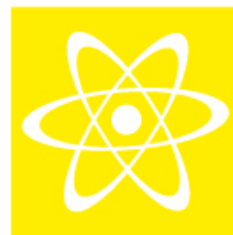
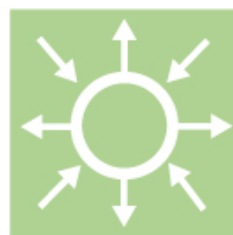




Galvanisk korrosion på armering i nära anslutning till huvudkylvattenpumpar

BET 013

Elforsk rapport 12:57



Johan Ahlström, Bertil Sandberg

Oktober 2012

ELFORSK

Galvanisk korrosion på armering i nära anslutning till huvudkylvattenpumpar

Elforsk rapport 12:57

Förord

Sedan 2007 pågår inom 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 kärnkraftindustrin. 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, av kärnkraftverken i Forsmark, Ringhals samt OKG i Oskarshamn, av Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) samt av Teollisuuden Voima Oy (TVO) i Finland. Inom ramen för detta forskningsprogram har föreliggande projekt "Galvanisk korrosion på armering i nära anslutning till huvudkylvattenpumpar" beställts.

Projektet har utförts av Swerea/KIMAB med Bertil Sandberg som projektledare.

Projektet har följts av Betongprogrammets styrgrupp bestående av Jonas Bergfors EON OKG, Jan Gustavsson, Johan Klasson och Johanna Spåls Vattenfall Ringhals, Jan-Erik Lindbäck, Patrik Gatter och Manouchehr Hassanzadeh Vattenfall, Kostas Xanthopoulos och Sofia Lillhök SSM, Lars-Erik Berglund, Marcus Edin, Anders Bergkvist och Henrik Bäckström Vattenfall Forsmark samt Juha Riihimäki TVO. Elforsk tackar styrgruppen för värdefulla synpunkter och kommentarer.

Elforsk i oktober 2012
Monika Adsten
Programområde Kärnkraft

Sammanfattning

I ett tidigare projekt finansierat av Elforsk, "Korrosion på stål i betong i kylvattenvägar", studerades risken för armeringskorrosion i vattenmättad betong. Det konstaterades att risk föreligger i skvalpzonen och på väggar som utvändigt är i kontakt med luft. Vidare kan galvanisk korrosion uppstå om armeringen är i metallisk kontakt med konstruktioner av ädlare material. I kylvattenvägarna är det främst huvudkylvattenpumparna som består av rostfria komponenter som i kombination med höga flödeshastigheter kan orsaka galvanisk korrosion på närliggande armering.

Syftet med projektet har varit att utreda om armeringen påverkas galvaniskt av pumparna och till vilken grad detta i så fall har ökat armeringskorrosionen samt om nuvarande anoder ger tillräckligt skydd åt armeringen.

I undersökningen, där mätningar utfördes i kylvattenvägarna på Ringhals 4, framkom följande resultat. Utan anoder förorsakar pumparna en förändring av armeringens potential från -650/-700 mV till ca -550 mV. Med offeranoder motverkas denna potentialförskjutning och armeringen erhåller en potential mellan -650 och -750 mV. Något fullständigt katodiskt skydd (negativare potential än -750 mV) uppnås dock inte.

Kloridhalten i betongen på armeringsdjup, nära pumparna, ligger i intervallet 0,2 till 0,7 %, vilket är lägre än i många andra delar av kylsystemet. Med 1 % klorid i betongen krävs en positivare potential än -100/-200 mV för att en tydlig förhöjning av korrosionshastigheten pga galvanisk korrosion ska ske. Med 2 % klorid är motsvarande värde -400/-500 mV.

Resultaten kan således inte påvisa att armeringen tagit skada av att vara i elektrisk kontakt med pumparna. Av försiktighetsskäl rekommenderas dock provtagning i pumparnas direkta närhet.

Orsaken till den höga anodförbrukningen bedöms vara den högre drivande spänningen mellan anodens potential och den blandpotential som uppstår mellan rostfria ytor på pumpen och närliggande armering.

Summary

In an earlier project financed by Elforsk, "Corrosion on steel in concrete in cooling water systems", the risk for reinforcement corrosion in water saturated concrete was studied. It was concluded that risk is anticipated in the splash zone and on walls being externally exposed to air. Also galvanic corrosion can take place if the reinforcement is in metallic contact with more noble construction materials. In cooling water systems it is mainly the head cooling water pumps which consists of stainless steel. In combination with high flow rates these can cause galvanic corrosion on closely located reinforcement.

The aim with the project was to investigate if the reinforcement is galvanically influenced by the pumps and to what degree this may increase the corrosion rate of the reinforcement as well as to what degree the existing sacrificial anodes gives satisfactory protection,

The investigation, where measurements were performed in the cooling water system of Ringhals 4, gave the following results. Without anodes causes the pumps a potential shift of the reinforcement from -650/-700 mV to approximately -550 mV. With anodes this shift was counteracted and the reinforcement received a potential in the interval -650 to -750 mV. Complete cathodic protection was however not accomplice.

The chloride content in the concrete, on the depth of the outer reinforcement, close to the pumps lies in the interval 0,2 to 0,7 %, which is lower than in many other parts of the cooling system. With a chloride content of 1 % in the concrete, a potential more positive than -100/-200 mV is needed for getting an increased corrosion rate due to galvanic corrosion. With 2 % chloride the responding values are -400/-500 mV.

The results do not show that the reinforcement has taken any damage of being in metallic contact with the pumps. As a precaution it is however recommended to take samples in the direct vicinity of the pumps.

The cause of the high consumption rate of the anodes are presumed to be the high driving voltage between the potential of the anode and the mixed potential between stainless steel and closely located reinforcement.

Innehåll

1	Bakgrund	1
2	Syfte	2
3	Utförande	3
3.1	Potentialmätningar	3
3.2	Provtagning	8
3.3	Laboratorieförsök	9
4	Resultat	14
4.1	Potentialmätningar	14
4.2	Provtagning	17
4.3	Laboratorieförsök	19
5	Diskussion	25
6	Slutsatser och rekommendationer	27

1 Bakgrund

I flera av de svenska kärnkraftverken har offeranoder installerats i kylvattenvägarna, för skydd av armeringen. I Ringhals har man konstaterat att anoderna monterade närmast huvudkylvattenpumparna förbrukas mycket snabbare än i övriga delar av systemet. Detta beror troligen på att pumparna tar upp en stor del av den skyddsström som var tänkt för armeringen.

Innan offeranoderna installerades kan mycket väl en galvanisk inverkan ha förekommit på armeringen (armeringen offerar sig för ädla ytor i pumparna). Inspektioner har också påvisat armeringskorrosion i dessa delar av kulvertsystemet, i vissa fall flera 10-tals meter från pumparna. Trots stor utmatning av skyddsström från anoderna (hög förbrukning) är det inte självklart att den galvaniska korrosionen på armeringen helt har upphört.

Genom att mäta armeringens potential under drift i olika punkter erhålls ett värde på den potentialförändring som närheten till pumparna ger upphov till. Potentialmätningar med vattentäta och batteridrivna loggrar har utförts i detta projekt. 6 st har varit monterade i vattenvägen på Ringhals 4 under en driftsäsong.

I laboratorieförsök har fastställts vilken effekt uppmätta potentialer har på armeringens korrosionsstatus.

2 Syfte

I ett tidigare projekt finansierat av Elforsk, "Korrosion på stål i betong i kylvattenvägar", studerades risken för armeringskorrosion i vattenmättad betong. Det konstaterades att risk föreligger i skvalpzonen och på väggar som utvändigt är i kontakt med luft. Vidare kan galvanisk korrosion uppstå om armeringen är i metallisk kontakt med konstruktioner av ädlare material. I kylvattenvägarna är det främst huvudkylvattenpumparna som består av rostfria komponenter som i kombination med höga flödeshastigheter kan orsaka galvanisk korrosion på närliggande armering.

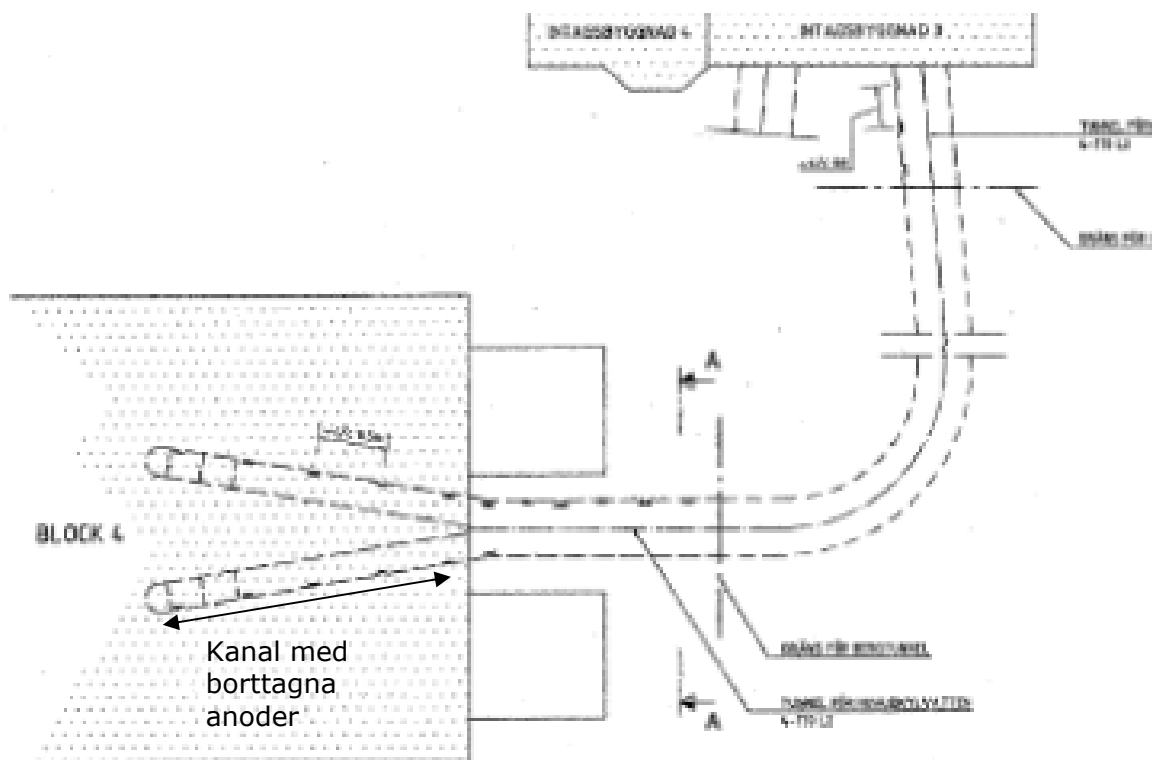
Syftet med projektet har varit att utreda om armeringen påverkas galvaniskt av pumparna och till vilken grad detta i så fall har ökat armeringskorrosionen samt om nuvarande anoder ger tillräckligt skydd åt armeringen.

3 Utförande

3.1 Potentialmätningar

I vattenmättad betong förändras armeringens opåverkade potential långsamt efter det att omkringliggande vatten avlägsnats. Detta beror på att korrosionen är diffusionsstyrd och syretransporten är långsam i vattenmättad betong. Det samma gäller om armeringen i betongen varit katodiskt skyddad. Skyddseffekten ligger kvar och kontrollmätning av skyddsnivån kan ske på ett tillförlitligt sätt många timmar efter tömning. Vid anodisk polarisering (förhöjd korrosion) uppstår dock inte en så kallad koncentrationspolarisation som ligger kvar efter det att vattnet tömts. Mätning måste därför ske under drift.

Av denna anledning utfördes kontinuerliga mätningar under en driftsperiod från den 16 juli 2010 till den 8 juni 2011. i Ringhals 4, se figur 1.



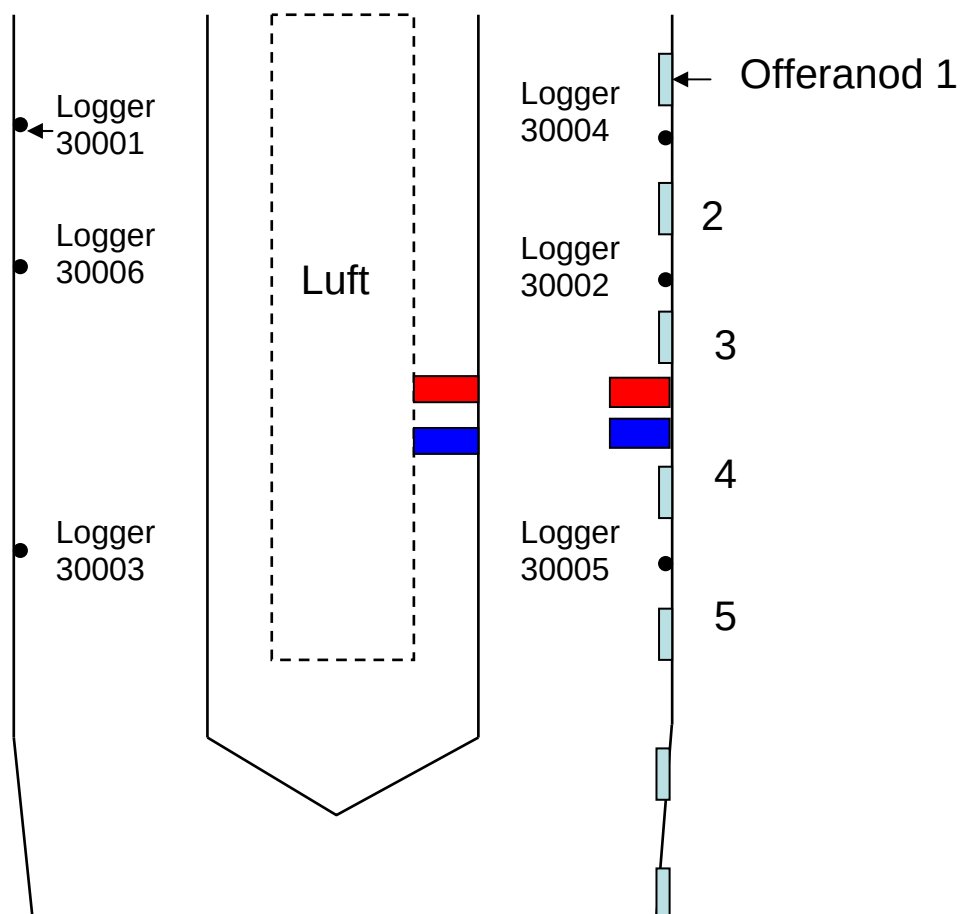
Figur 1. Kulvert i Ringhals 4 där potentialmätning utfördes.

Mätning utfördes i de två kanalerna närmast pumparna. I varje kanal monterades tre referenselektroder med inbyggda loggrar. I den ena kanalen byttes befintliga offeranoder ut mot nya och i den andra togs anoderna helt bort, se figur 2. Genom detta förfarande hoppades man få information om storleken på den galvaniska korrosion som förelegat innan anoderna

monterades och hur väl de installerade anoderna lyckats häva denna påverkan.

Vänstra kanalen

Högra kanalen



Figur 2. Loggrarnas placering. Röda och blå rutor markerar var betongborrkärnor togs ut.

Kanalernas utformning framgår av figur 3-5.



Figur 3. De båda kanalerna sedda från inloppskulverten.



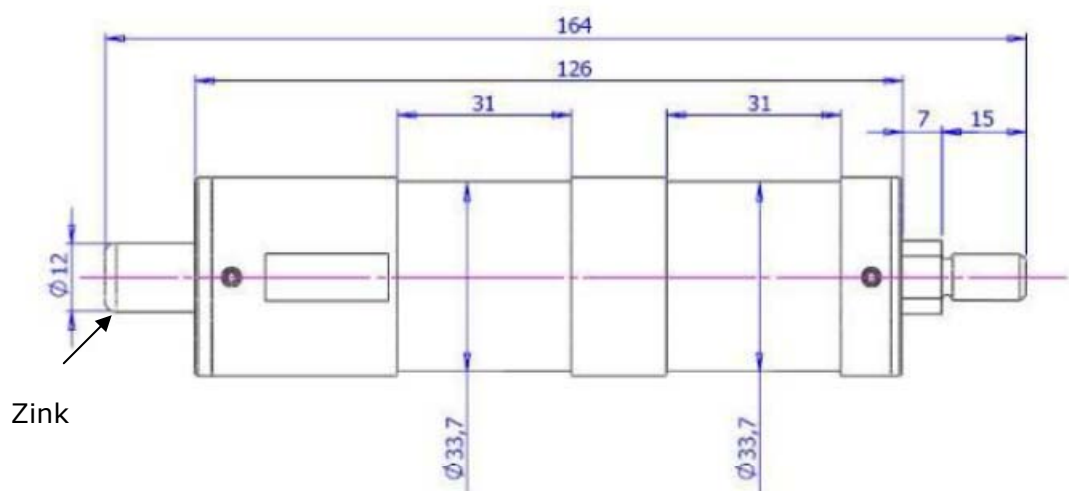
Figur 4. Den högra kanalen med offeranoder sedd ut mot inloppskulverten.



Figur 5. Den vänstra kanalen med borttagna offeranoder sedd från inloppskulverten.

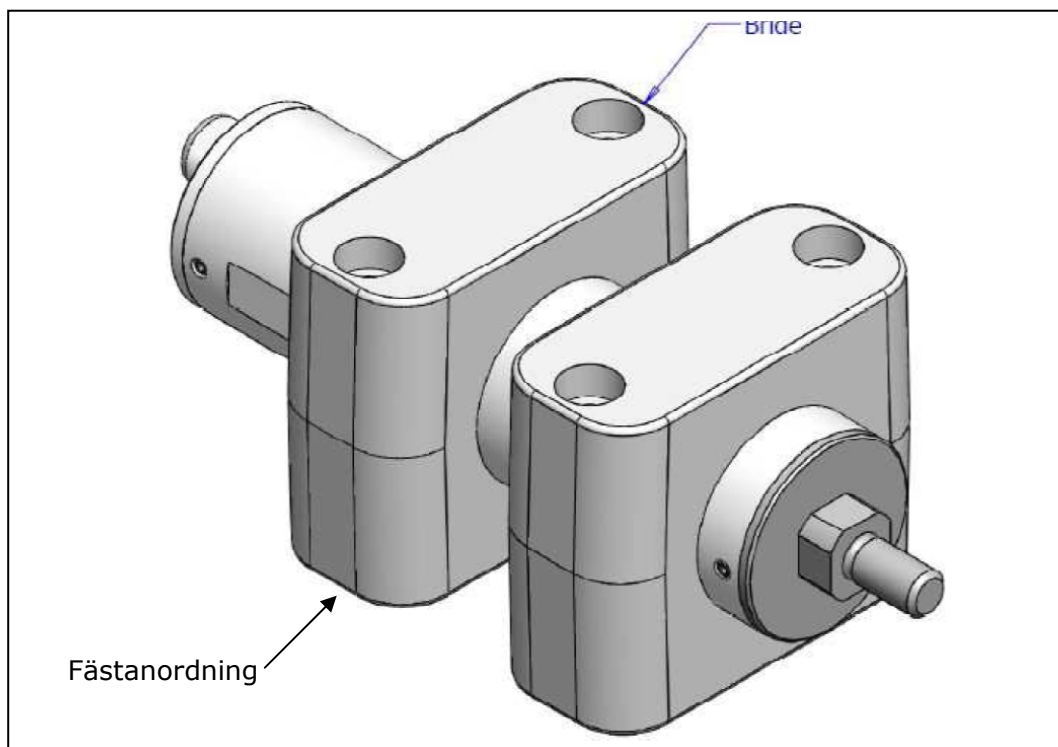
De vattentäta och batteridrivna loggrarna har tagits fram av det franska havsvattenlaboratoriet Ifremer och använts på stora djup. Potentialmätningen utförs med en zinkreferenselektrod monterad på loggern. Zink har en mycket stabil potential i havsvatten och kan därför utnyttjas som referenselektrod. Fördelen är dess robusthet jämfört med andra typer av elektroder. Mätvärden registrerades med 10 minuters intervall.

Loggrarnas dimension framgår av figur 6.



Figur 6. Loggrar med inbyggd referenselektrod av zink. Mått enhet i [mm].

Loggrarna monterades på väggen med hjälp av förankringsklämmor i polypropylen, och syrafasta expandrar M10x120.



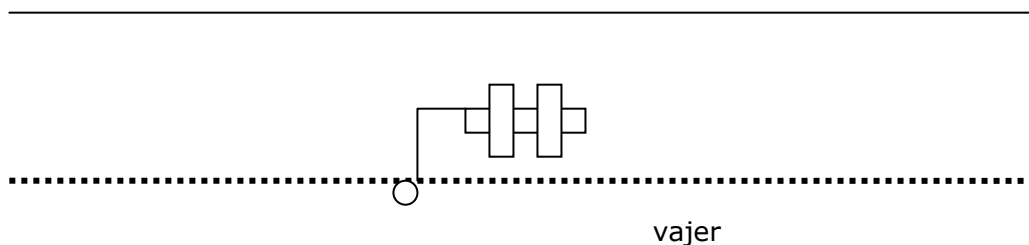
Figur 7. Infästning av logger.

Från loggern drogs en kabel (10 mm^2) ner till den längsgående vajern som förbinder de på väggen monterade offeranoderna. Vajern är i sin tur ansluten till armeringen. Kabeln anslöts till vajern med ett linlås, se figur 8.



Figur 8. Linlås.

En översikt av installationen ses i figur 9 och ett foto efter ett års drift i figur 10.



Figur 9. Schematisk bild av montage.



Figur 10. Logger efter ett års exponering.

3.2 Provtagning

Det är känt att armeringskorrosion kan uppstå i "vattenmättad" betong om betongväggens utsida är exponerad för luft. Någonstans i väggen uppstår optimala betingelser för korrosion, hög kloridhalt och samtidig lämplig luftning. I Ringhals är ena väggen i respektive kanal exponerad mot luft. För att få information om korrosionsbetingelserna i respektive vägg togs

borrprover som därefter analyserades med avseende på fukt- och kloridhalt. Platserna för provtagning framgår av figur 2 i kapitel 3.1. På respektive vägg togs två borrkärnor, ett på nivån 1,5 m över golvet ett på nivån 4 m.

De uttagna borrkärnorna delades i två halvor och sveptes in i plast. Den ena halvan skickades till LTH för bestämning av fukthalt/kapillärmättnadsgrad och den andra till CBI för analys av kloridhalt.

Kloridhalten i betongen bestämdes enligt CBI: metoden 5. 1995, Total kloridhalt i hårdnad betong. Provet krossas, löses upp i syra och halten bestäms med en jonselektiv elektrod. Cementhaltsbestämningen utfördes genom titrering med EDTA och fotometrisk mätning av färgomslaget med murexidindikator. Kloridhalten redovisas som kloridjonhalt i procent av cementets vikt.

Kapillärmättnadsgraden beräknades enligt:

$$S_{Cap} = \frac{m_1 - m_2}{m_{Cap} - m_2}$$

Där m_1 är initialvikten, m_2 är vikten efter torkning vid 105 °C, m_{cap} är den vattenmättade vikten.

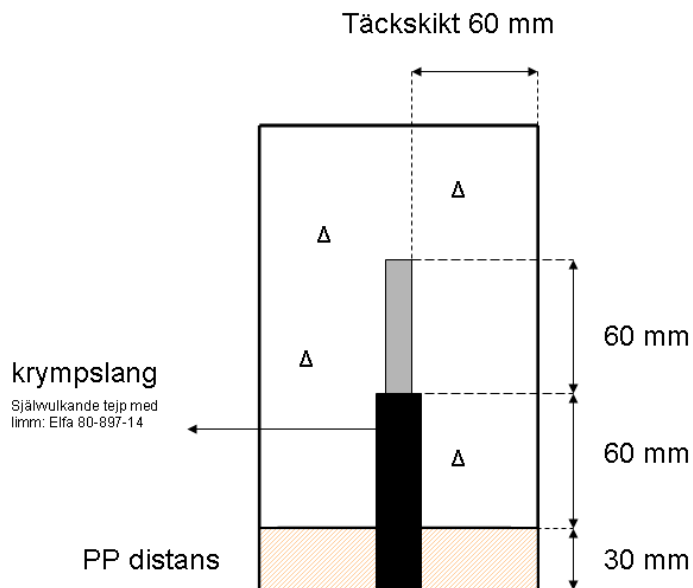
3.3 Laboratorieförsök

För att få en uppfattning om vilka korrosionshastigheter som är att förvänta vid en galvanisk koppling mellan armering i vattenmättad betong och ädlare metallytor exponerade direkt för vatten genomfördes nedanstående försök.

20 st stänger av varmvalsat kolstål med en diameter av 12 mm avfettades i trikloretylen (30 sekunder ånga + 5 minuter i ultraljudsbad, 4 upprepade behandlingar) och vägdes därefter. En mätsladd anslöts till varje stång varefter kontakten täcktes med krympslang. Exponerad längd stång var 60 mm motsvarande en yta av 23,74 cm².

För gjutningen användes betongen Nonset 400 och ett vct på 0,60. 10 st stänger göts in i betongen som tillsatts 1 % klorider per cementvikt och 10 stänger i betong med 2 % klorider. Resterande 2 stänger sparades som referensobjekt.

Vid gjutningen användes ett pvc-rör med innerdiametern 132 mm. Stängerna fixerades så att ett täcksikt på 60 mm erhöles, även till under och överkant, se figur 11.

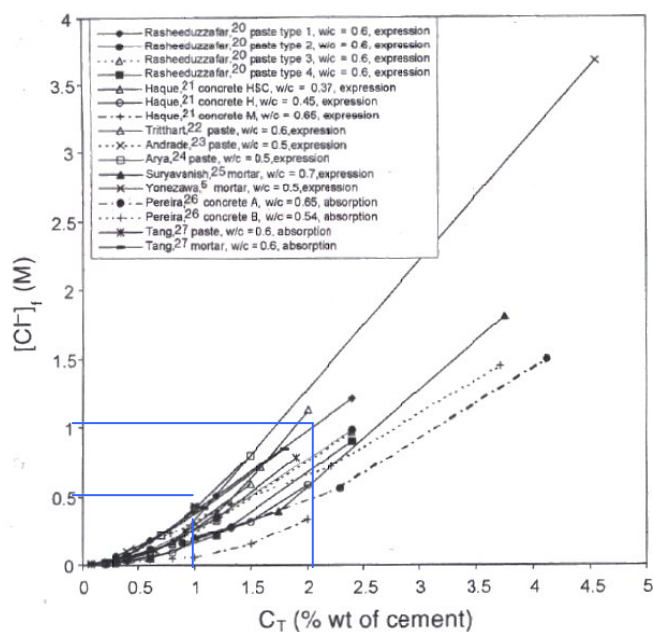


Figur 11. Gjutform.

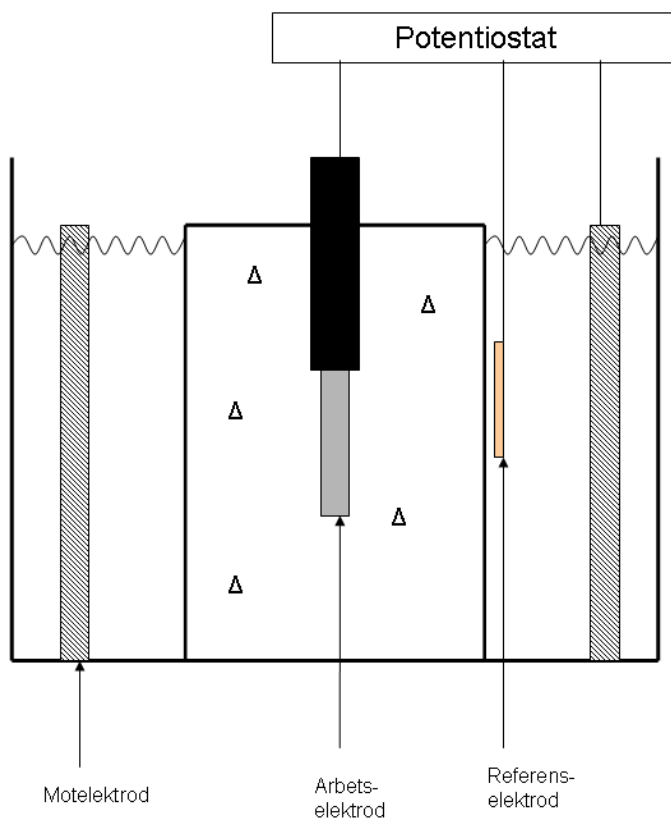
Proverna härdades under 28 dygn vid 20 °C och i 100 % relativ fuktighet. Efter härdning sänktes proverna ner i vattenbad med 3 % NaCl för prover med 1 % klorid i betongen och 6 % NaCl för de med 2 %. Kloridkoncentrationen i vattenbadet hade valts så att de skulle motsvara förmodad kloridhalt i betongens porlösning. Av figur 12 framgår att 1 % Cl/cementvikt ger ca 0,5 mol/L i porlösning, och 2 % Cl/cementvikt ger ca 1 mol/L i porlösning. Detta ger 29g NaCl per L respektive 58g NaCl per L. Efter ett dygn anslöts varje prov till var sin potentiostat, se figur 13.

Dock så har olika betongtyper varierad kloridkoncentration i porlösningen och därmed är det svårt att välja rätt kloridkoncentration för det omkringliggande vattnet för elektrokemiska försök. Kurvorna i figur 12 är relativt spridda men eftersom ett värde valdes i intervallet bör inte proverna torkas ut p.g.a. osmos.

Vanligtvis får en betong med klorider en lägre relativ fuktighet jämfört med en betong utan klorider. Men om RF hålls konstant för ett prov med klorider och ett utan klorider så får provet med klorider en högre fuktkvot. Därför bör inte korrosion påverkas mycket med en RF sänkning om fuktkvoten är konstant.



Figur 12. Samband mellan mängden fria kloridjoner och den totala mängden klorider.



Figur 13. Försöksupställning vid polariseringsförsök.

Med hjälp av en cylindrisk motelektrod och en referenselektrod av typen "Ag/AgCl/mättad KCl" polariserades proverna till olika potentialer i intervallet -100 till -800 mV, se tabell 1. Att vi valt detta intervall beror på att armeringen vid en sammankoppling med rostfritt stål aldrig kan få ett positivare värde än potentialen hos det rostfria stålet som ligger på ca 0 mV. Vid negativare värden än -750 mV är armeringen fullständigt katodiskt skyddad och korrosionen försumbar. Av tabellen framgår även vilka tider respektive prov exponerades. Som referens exponerades även 2 prover utan att polariseras. (Samtliga potentialer i denna rapport anges relativt Ag/AgCl/mättad KCl).

Tabell 1 Pålagda potentialer och exponeringstider.

Kloridhalt i betong, %	Potential, mV	Exponeringstid, dygn	Prov, nr
1	-100	88	1
1	-200	88	2
1	-300	83	3
1	-400	105	7
1	-500	105	8
1	-600	105	9
1	-700	66	10
1	-800	66	11
1	opolariserad	238	16
2	-100	18	6
2	-200	19	5
2	-300	74	4
2	-400	102	12
2	-500	105	13
2	-600	105	14
2	-700	105	15
2	-800	105	17
2	opolariserad	238	18

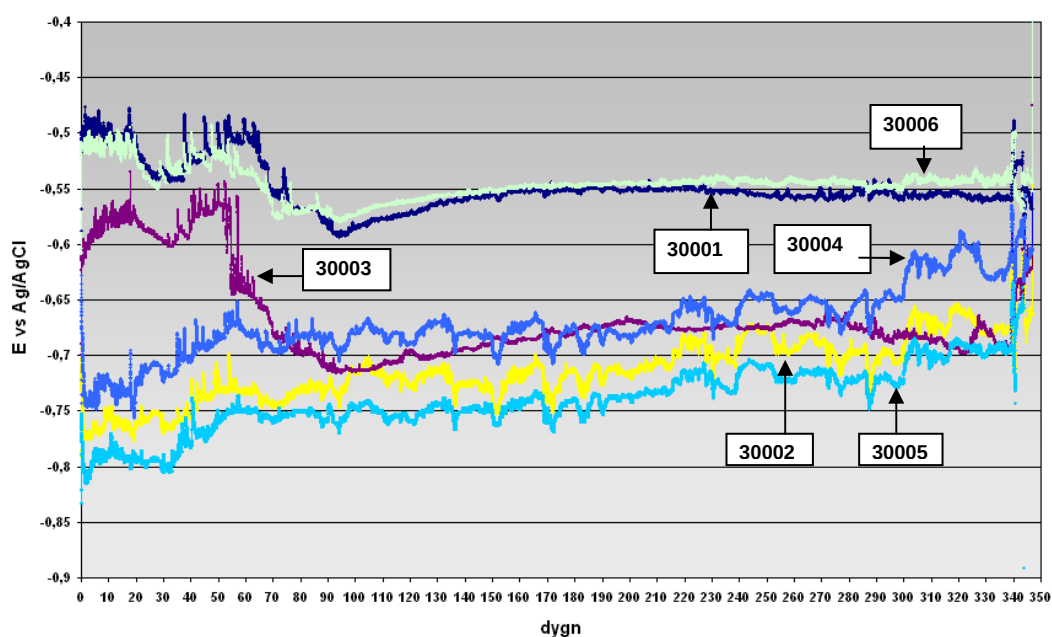
Som framgår av tabellen varierade exponeringstiderna. För proven med 2 % klorid i betongen och potentialer i intervallet -100 till -300 avbröts försöken då sprickor uppstod i betongen pga av inre tryck från korrosionsprodukter. Prov 9,10 och 11 stoppades efter 63-66 dygn pga utrustningsproblem. För proven med 1 % klorid i betongen och potentialer mellan -100 och -300 mV ansågs 83-88 dygn tillräckligt för att få representativa resultat. Övriga prov exponerades i 102-105 dygn.

Provstängerna rengjordes från betong och viktsförlusten utvärderades genom upprepad betning i Clarkes lösning.

4 Resultat

4.1 Potentialmätningar

De i kylvattenvägarna uppmätta potentialerna har sammanställts i figur 14.



Figur 14. Uppmätta potentialer i kylvattenkanaler Ringhals 4.

Sämst korrosionsskydd dvs minst negativa potentialer registrerades med loggrarna 30001 och 30006. Dessa var placerade i kanalen utan offeranoder och längst in, närmast pumparna. Den tredje loggern i denna kanal, 30003, hade också ett sämre skydd men endast inledningsvis. Efter ca 60 dygn förbättrades skyddet. I den andra kanalen, med offeranoder var skyddsnivån bättre och de tre loggrarna följde varandra i tiden med det sämsta skyddet längst in närmast pumparna, logger 30004, och det bästa skyddet på det största avståndet från pumparna, logger 30005.

För att kunna tolka de tidsmässiga variationerna måste man beakta dels vattnets temperatur dels dess flödeshastighet.

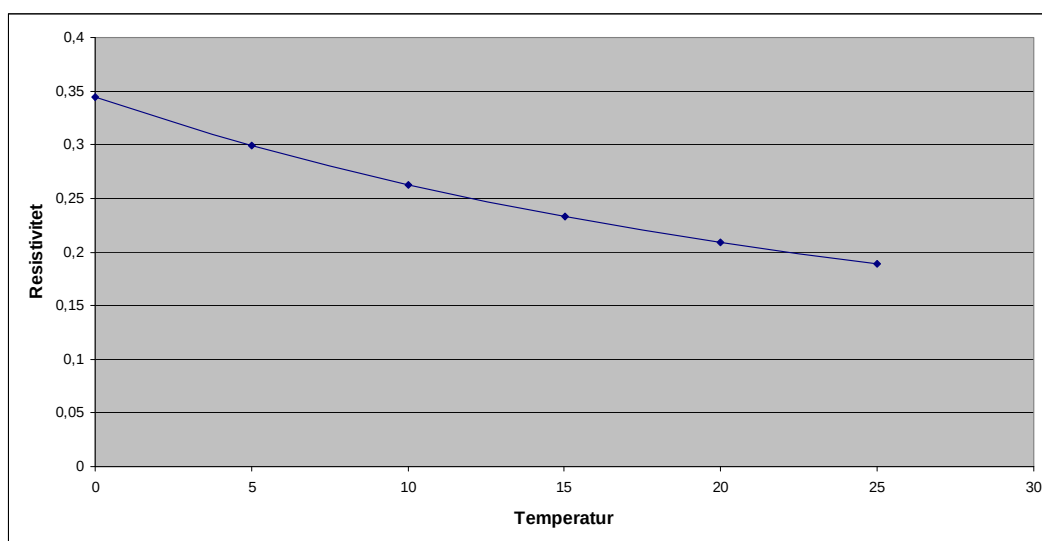
Vid en och samma flödeshastighet har en sjunkande vattentemperatur följande inverkan:

- Vattnets löslighet av syre ökar vilket ökar strömbehovet för de rostfria ytorna i pumpen (försämrar skyddsnivån).
- Vattnets resistivitet sjunker vilket minskar strömavgivningen från offeranoderna (försämrar skyddsnivån).

Enligt uppgift varierar inte flödes hastigheten dvs pumparnas varvtal hålls konstant. Ju bättre kylning desto gynnsammare produktion. Vi kan således bortse från flödes hastighetens inverkan, förutom vid stopp och start av pumpar.

Lösligheten av syre ökar från 7 mg/l vid 20 °C till 10 mg/l vid 0 °C. Strömbehovet för att polarisera de rostfria ytorna är direkt proportionellt mot syrehalten varför detta innebär en 40 %-ig ökning.

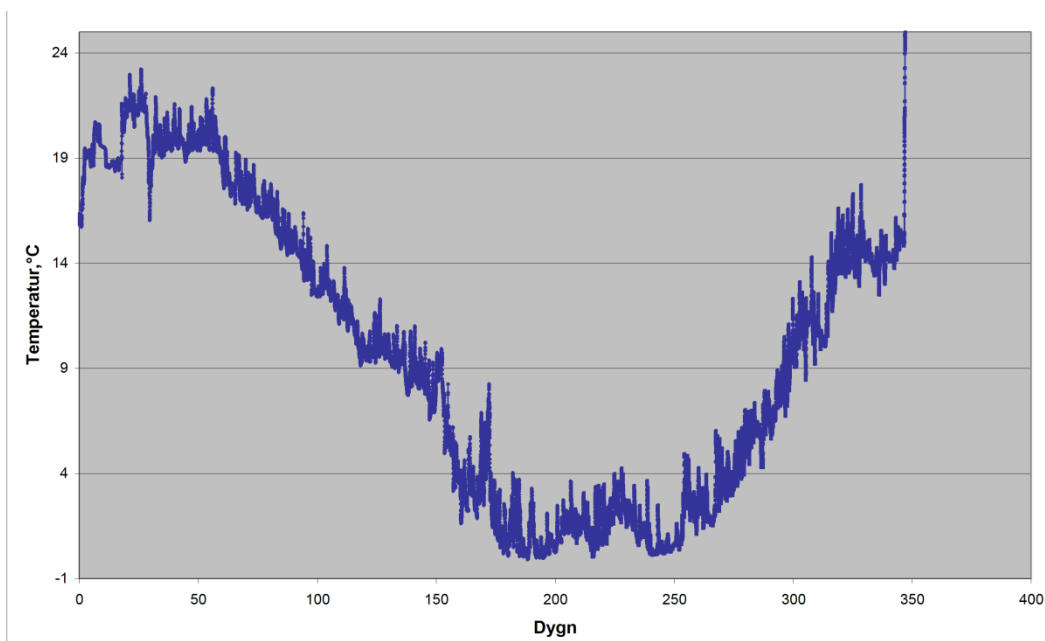
Vid samma temperatursänkning ökar havsvattnets resistivitet från 0,21 till 0,34 Ωm , se figur 15. Anodernas strömgivning är omvänt proportionell mot resistiviteten varför temperatursänkningen minskar skyddströmmen med ca 38 %.



Figur 15. Samband mellan havsvattens temperatur (°C) och dess resistivitet (Ωm).

Att direkt översätta detta i ändrad potential hos armeringen är inte enkelt. Minskar t.ex. anodernas strömgivning pga sänkt temperatur så innebär detta en större potentialdifferens mellan de rostfria ytorna och aluminiumanoderna som i sin tur resulterar i en högre strömutmatning. Vidare är förhållandet mellan potential och ström inte linjärt. Vi kan därför endast göra kvalitativa bedömningar hur vattentemperaturen inverkar på skyddsnivån.

Hur vattentemperaturen har varierat under försöksperioden visas i figur 16. Den har i princip varierat från 20 till 0 °C.



Figur 16. Kylvattnets temperatur under mätperioden.

Under perioden 50-150 dygn sjönk vattnets temperatur successivt. Detta borde ha resulterat i positivare potentialer (sämre skydd) för armeringen i kanalen med anoder (30002, 30004 och 30005) till följd av högre strömbehov för rostfria ytor och samtidigt lägre strömgivning från anoderna. Någon entydig förändring kunde dock inte observeras.

I kanalen utan anoder förbättrades skyddsnivån, under samma period, för att sen marginellt försämrades. Den högre lösligheten av syre i kallare vatten borde ha medfört en successiv försämring av skyddsnivån, vilket således inte kunde registreras.

Inverkan av flödes hastigheten syns tydligast i den skyddade kanalen (loggrar 30002, 30004 och 30005). Dygn 20 startades pumparna. Innan dess hade systemet varit vattenfyllt men utan flöde och potentialerna relativt stabila. I och med att pumparna startades försämrades skyddsnivån successivt fram till dygn 55 då nivåerna stabiliserades i intervallet -650 till -750 mV.

Korta stopp och återstarter av pumparna inträffade dygnen 325 och 327. Detta syns inte i kurvorna i figur 14 vilket indikerar att armeringens potential inte påverkas av kortvariga förändringar av de yttre förhållandena.

Från och med dygn 55 förbättras skyddsnivån för logger 30003 dvs den yttersta av loggrarna i en oskyddade kanalen. Även de längre in sittande loggrarna uppvisar samma tendens. Detta tror vi beror på att strömspridningen förbättras med tiden dvs skyddsström från anoderna monterade i kulverten når med tiden in i den oskyddade kanalen. Troligen har denna effekt överskuggat vattentemperaturens inverkan, se ovan.

Att pumparna har en galvanisk påverkan är tydligt påvisat genom den utförda mätningen. I vattenmättad betong ligger armeringens potential i intervallet -650 till -700 mV. Med aluminiumanoder flyttas potentialen till intervallet -800

till -900 mV. I kanalen med anoder hamnade dock potentialen i intervallet -650 till -750 dvs inte fullständigt katodiskt skydd (negativare än -750 mV). I kanalen utan anoder stabiliserade sig potentialen för de inre mätpunkterna på -550 mV, vilket är ett markant positivare värde än förväntat i vattenmättad betong.

Som framgår av figur 14 försämrades skyddsnivån för 30004 mot slutet. Någon logisk förklaring till detta har vi inte. Som framgår av figur 17 var den sista anoden rejält angripen dock inte så mycket att strömgivningen bör ha påverkats mer än marginellt.

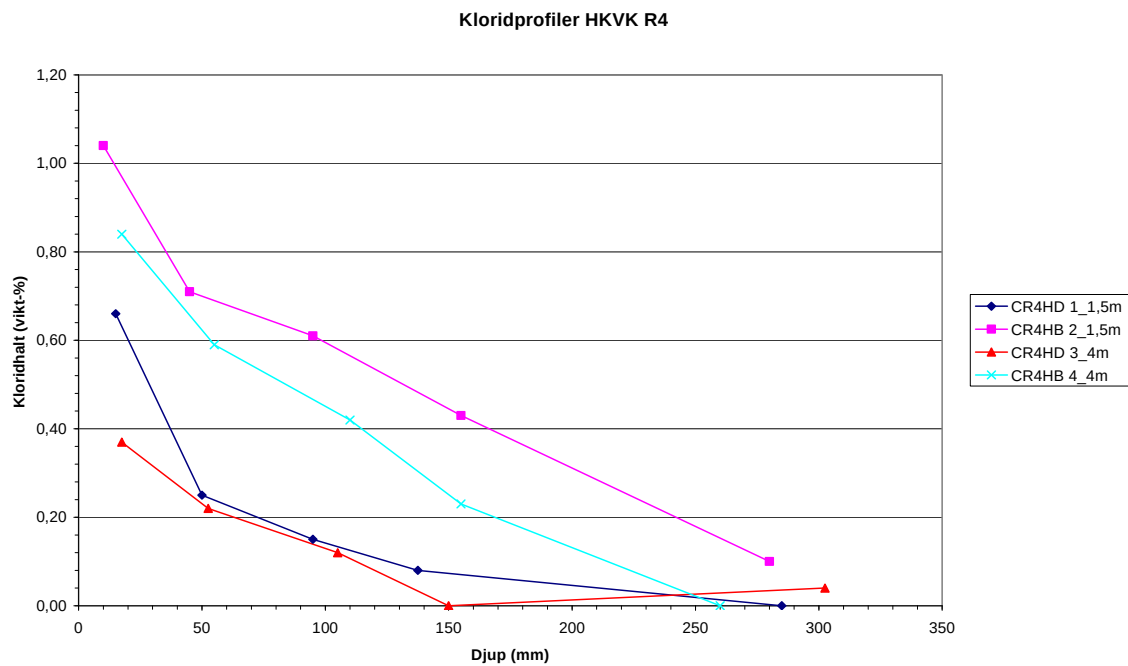


Figur 17. Anod närmast pumpar efter ett års drift.

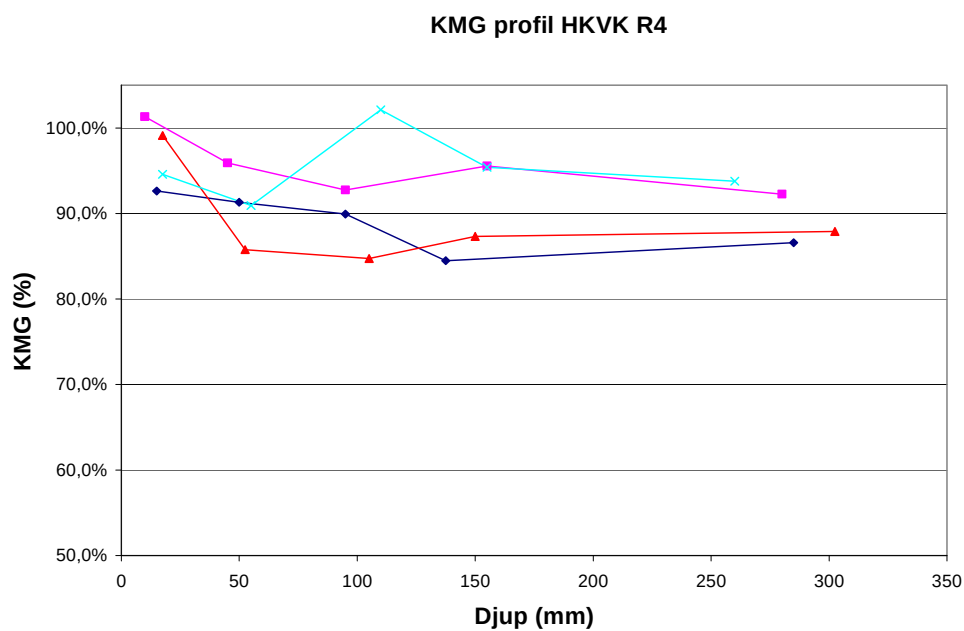
4.2 Provtagning

I figur 18 och 19 återges resultaten från analysen av uttagna borrkärnor. Beteckningen CR4HD avser prover tagna i väggen mot driftrum (luftad) och CR4HB avser prover tagna mot ytterväggen (berg).

På armeringsdjupet 50 mm är kloridhalten betydligt högre i ytterväggen än i väggen mot driftrum. Detta var inte förväntat. Kappilärmätnadsgraden är visserligen högre i ytterväggen vilket borde resultera i högre kloridhalter men inte en faktor 3 högre.



Figur 18. Kloridprofiler i uttagna borrkärnor.



Figur 19. Uppmätt kapillärmättnadsgrad i uttagna borrkärnor.

4.3 Laboratorieförsök

Stål i vattenmättad betong har en negativ potential. En förskjutning av potentialen i positiv riktning medför i de flesta fall en ökad korrosion. Korrosionshastigheten bestäms av den anodiska strömtäthet som potentialförskjutningen resulterar i, som i sin tur beror av den drivande spänningen i den galvaniska cellen, areaförhållandet armering/ädlare konstruktion och vattnets respektive betongens resistivitet.

I vattenmättad betong ligger normalt armeringens potential i intervallet -650 till -700 mV. Vid katodiskt skydd flyttas potentialen i negativ riktning. Vid värden mer negativa än -750 mV betraktas skyddet som fullständigt och korrosionshastigheten är försumbar. Det behövs således endast en svag potentialförändring för att åstadkomma katodiskt skydd av armering i vattenmättad betong. Detta avspeglar sig också i ett lågt strömbehov 1-2 mA/m², jämfört med icke ingjutet stål där strömbehovet är cirka 100 mA/m² i stillastående vatten och mångfalt större vid högre flödeshastigheter. Negativare värden än -1000 mV uppstår inte eftersom detta är aluminiumanodens egenpotential.

Om armeringen är i kontakt med ädlare metaller, som rostfritt stål, flyttas potentialen i positiv riktning och armeringens korrosionshastighet ökar. Rostfritt stål har en korrosionspotential på ca 0 mV varför armeringens potential inte kan bli positivare än detta värde även om areaförhållandet är mycket ogynnsamt.

Resultaten från försöken har sammanställts i tabell 2. Provernans utseende efter exponering och borttagning av korrosionsprodukter (betning) återges i bilaga 1. Vid rensningen från betong uppstod i vissa fall mekaniska skador på stålstångerna. Detta påverkar inte massförlusten men har också dokumenterats i bilaga 1.

Tabell 2 Vid försöken uppmätta massförluster och av dessa framräknade korrosionshastigheter.

Prov ID	Ingjutna klorider	Polarisering	Massförlust			
	Cl% per cementvikt	mV (SCE)	G	g/m ²	g/m ² ,år*	µm/år*
1	1%	-100	1,94	329,8	1367,9	173,7
2	1%	-200	0,79	133,9	555,3	70,5
3	1%	-300	0,84	142,4	626,1	79,5
7	1%	-400	0,91	154,0	535,4	68,0
8	1%	-500	0,88	150,0	521,3	66,2
9	1%	-600	0,93	157,6	547,9	69,6
10	1%	-700	0,88	150,0	829,3	105,3
11	1%	-800	0,83	140,4	776,7	98,6
16	1%	-	0,81	137,3	477,3	60,6
6	2%	-100	2,61	444,3	9010,1	1144,3
5	2%	-200	1,88	319,0	6128,4	778,3
4	2%	-300	2,53	430,2	2122,0	269,5
12	2%	-400	0,92	157,3	563,0	71,5
13	2%	-500	0,86	145,9	507,3	64,4
14	2%	-600	0,81	138,7	482,0	61,2
15	2%	-700	0,84	143,3	498,0	63,3
17	2%	-800	0,78	132,0	458,9	58,3
18	2%	-	0,94	159,1	553,1	70,2

(*) Korrosionshastigheterna är beräknade med exponeringstiderna i Tabell 1

Som framgår av tabellen visad utvärderingen på höga massförluster även vid negativa potentialer. Detta beror på att proverna var av varmvalsat stål, vilket valdes för att efterlikna så verkliga förhållanden som möjligt. Vid betningen avlägsnas dock stålet glödskalet vilket ger en massförlust. Genom att beta varmvalsade prover tagna från samma stång har vi kunnat fastställa att glödskalet har en massa på 131 g/m². Om vi kompenserar för detta erhålls nedanstående resultat:

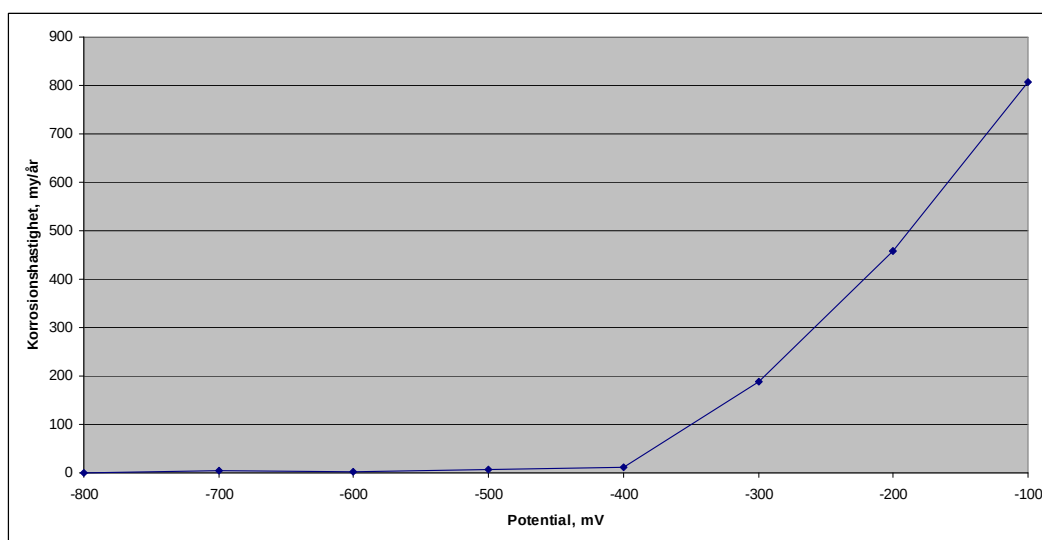
Tabell 3 Vid försöken uppmätta massförluster, kompenserade för massan hos glödskalet och av dessa framräknade korrosionshastigheter.

Prov ID	Ingjutna klorider per cementvikt	Polarisering mV (SCE)			
			g/m ²	g/m ² ,år*	µm/år*
1	1%	-100	198,8	824,6	104,7
2	1%	-200	2,9	12,0	1,5
3	1%	-300	11,4	50,0	6,4
7	1%	-400	23,0	80,2	10,2
8	1%	-500	19,0	65,9	8,4
9	1%	-600	26,6	92,6	11,8
10	1%	-700	19,0	104,9	13,3
11	1%	-800	9,5	52,3	6,6
16	1%	-	6,3	9,6	1,2
6	2%	-100	313,3	6353,8	806,9
5	2%	-200	188,0	3612,0	458,7
4	2%	-300	299,2	1475,9	187,4
12	2%	-400	26,3	94,2	12,0
13	2%	-500	15,0	52,0	6,6
14	2%	-600	7,7	26,6	3,4
15	2%	-700	12,3	42,7	5,4
17	2%	-800	1,0	3,5	0,4
18	2%	-	28,1	43,1	5,5

(*) Korrosionshastigheterna är beräknade med exponeringstiderna i Tabell 1

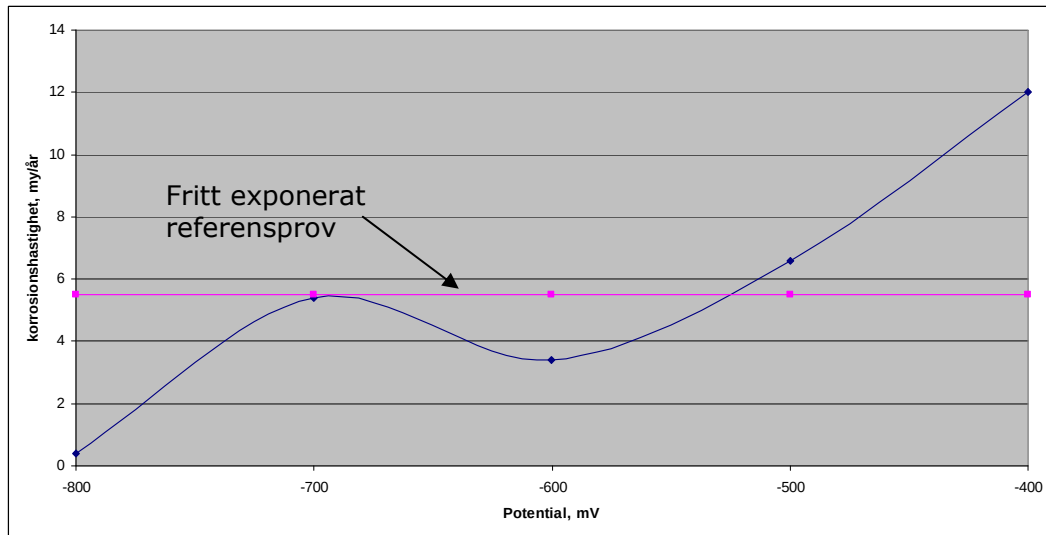
Med en kloridhalt på 1 % krävs en stor förändring av armeringens potential, ca 500 mV till -100 mV för att en tydlig förhöjning av korrosionshastigheten ska ske.

Med 2 % klorider i betongen sker detta redan vid -400 mV, se figur 20.



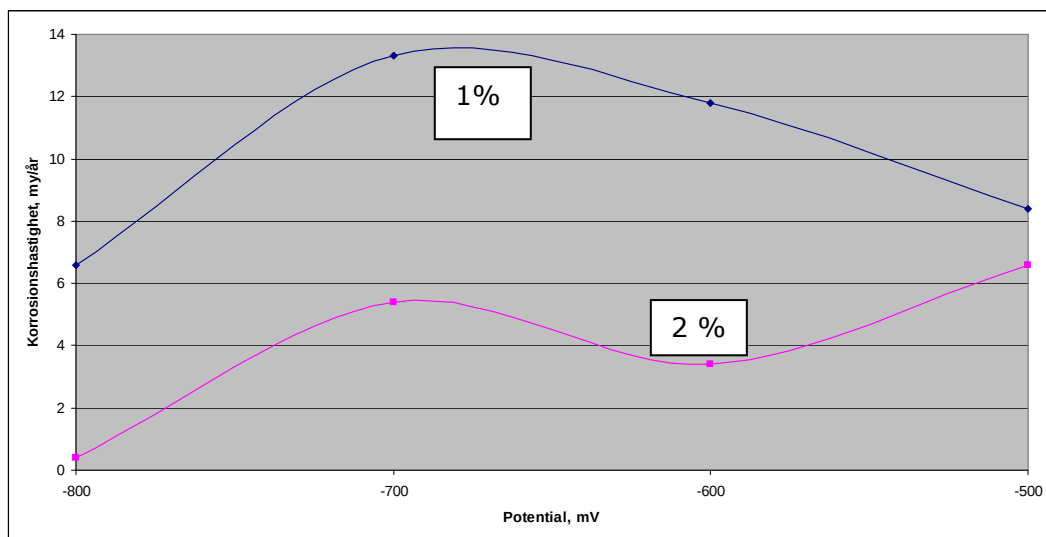
Figur 20. Korrosionshastigheter vid olika potentialer i betong med 2 % klorid.

Om vi jämför med det opolariserade provet så finns en indikation på att gränsen eventuellt ligger ännu lägre, se figur 21.



Figur 21. Korrosionshastigheter i potentialintervallet -400 till -800 mV i betong med 2 % klorid.

Lite mer svårförklarat är varför prover polariserade till mer negativa värden uppvisar högre korrosionshastigheter då kloridhalten är 1 % jämfört med motsvarande prover med 2 % klorid, se figur 22.



Figur 22. Korrosionshastigheter i potentintervallet -500 till -800 mV i betong med 1 respektive 2 % klorid.

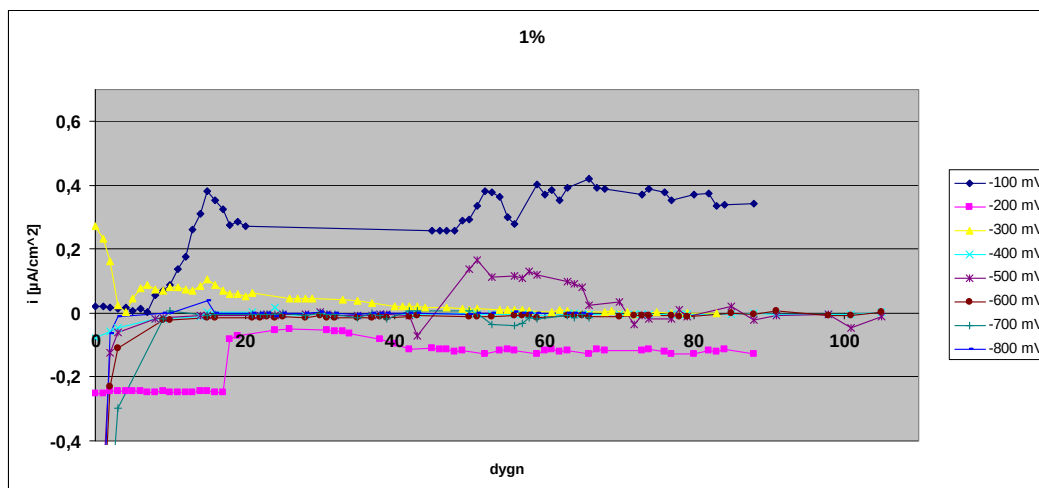
Av bilaga 1 framgår att detta överensstämmer med verkligheten. Flera av de ståltytor som exponerats för den lägre kloridhalten uppvisar frätgropar, något som inte observerades på motsvarande prov med 2 % klorid. Eventuellt har

någon skillnad uppstått vid gjutningen eller så har angrepp initierats redan under härdningen på prover med 1% klorid, dvs före polariseringen. Vad som talar för det senare är att korrosionshastigheten inte är noll vid fullständigt skydd dvs -800 mV.

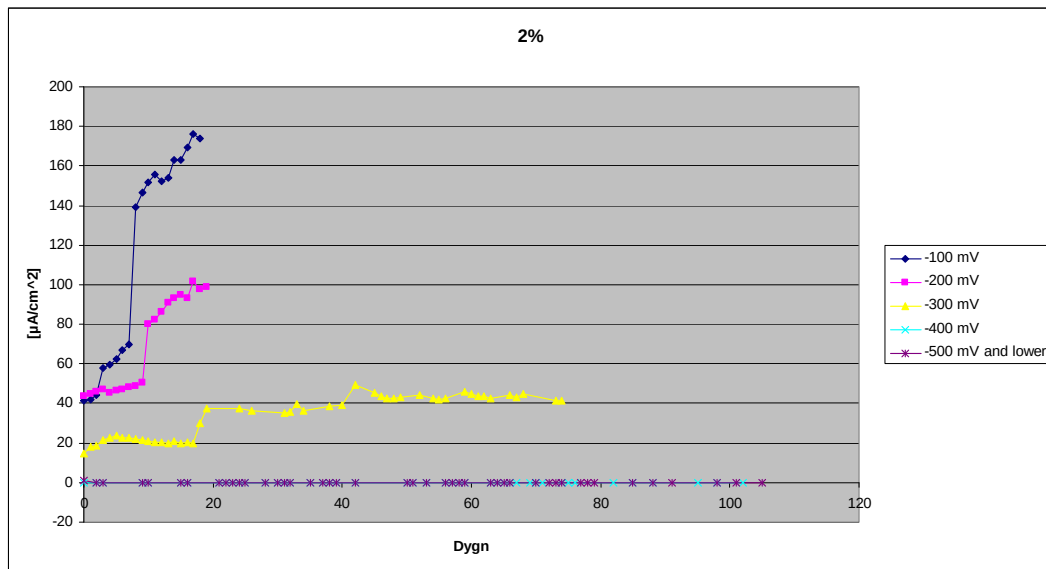
De uppmätta massförlusterna korrelerar förhållandevis bra med de under försöken registrerade strömtätheterna, se figur 23 och 24.

I prov med 1 % klorid uppmättes mycket låga strömtätheter, delar av $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. En anodisk strömtäthet på $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ motsvarar teoretiskt en korrosionshastighet på $10 \mu\text{m}/\text{år}$. Även detta är en indikation på att angreppen på prov med 1 % klorid initierades före polariseringen.

I prov med 2 % klorid noterades höga strömtätheter på de tre prov som också uppvisade hög korrosionshastighet. Detta visar med stor tydlighet att en yttre galvanisk påverkan i kombination med hög kloridhalt kan orsaka kraftig galvanisk korrosion.



Figur 23. På proverna med 1 % klorid registrerade strömtätheter. (Positivt värde representerar en anodisk ström).



Figur 24. På proverna med 2 % klorid registrerade strömtätheter. (Positivt värde representerar en anodisk ström).

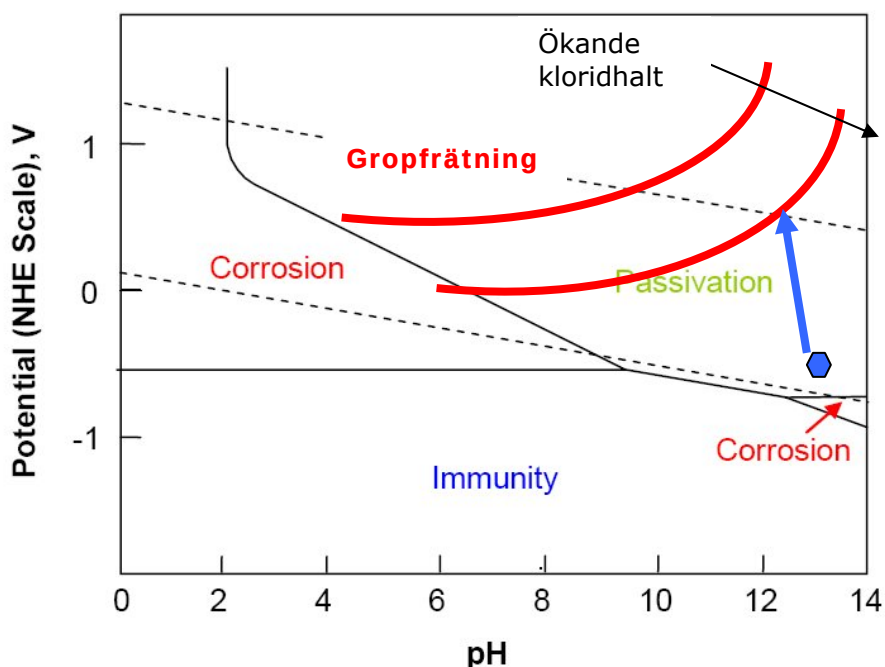
5 Diskussion

Jämfört med andra betongtytor i Ringhals kylsystem så uppmättes inte så höga kloridhalter i väggarna nära huvudkylvattenpumparna. Trots att halterna var lägre i väggen mot driftrummet än i väggen mot berg så konstaterades, enligt uppgift, armeringskorrosion först i väggen mot driftrummet. Detta är sannolikt en effekt av den utvändiga luftningen.

De utförda mätningarna har kunnat verifiera att pumparna påverkar armeringen galvaniskt. Utan anoder flyttas armeringens korrosionspotential 150-200 mV i positiv riktning och med anoder erhålls inte fullständigt katodiskt skydd vilket är fallet på större avstånd från pumparna.

Laboratorieförsöken som utfördes med betydligt högre kloridhalter i betongen visade att med 1 % klorid uppstår mätbar galvanisk korrosion vid potentialer mer positiva än -100 till -200 mV. Motsvarande gränsvärde i betong med 2 % klorid ligger i intervallet -400 till -500. Våra resultat indikerar att armeringens potential i kylkanalen inte blir positivare än -550 mV, vilket således inte borde ge någon förhöjd korrosion pga galvanisk korrosion. Den galvaniska effekt kan dock vara större i pumparnas direkta närhet varför det rekommenderas att man tar borrhov som inkluderar armering i pumparnas direkta närhet.

Att en galvanisk påverkan inte ger upphov till förhöjd korrosion kan förklaras med ett så kallat Potential-pH diagram, se figur 25.

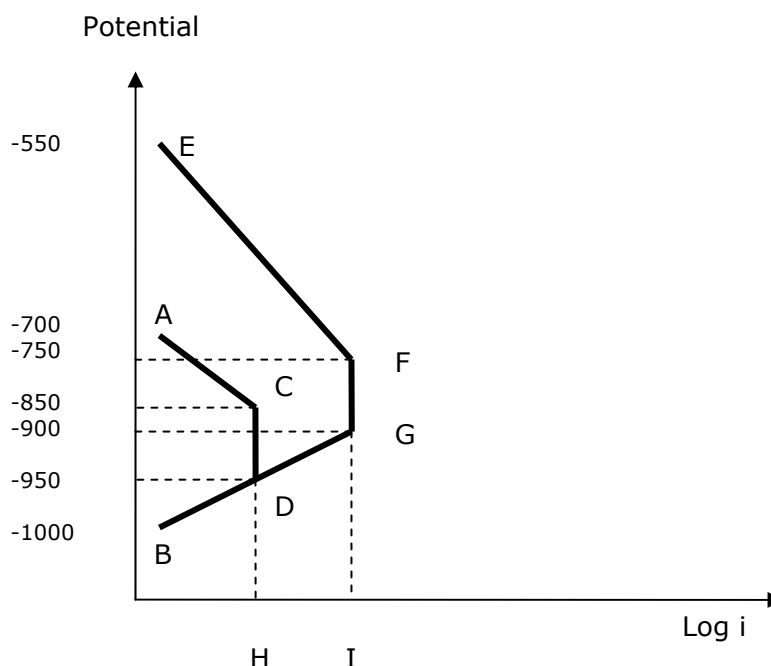


Figur 25. Potential-pH diagram för järn anpassat för förhållanden i betong. (Potentialer angivna relativt normalvätgaselektroden).

Stål i betong befinner sig i ett passivt tillstånd. Då klorider tränger in i betongen uppstår ett gropfrättningsområde inom det passiva. Ju högre kloridhalt desto större blir detta gropfrättningsområde. Om stålet polariseras i positiv riktning inom passivområdet sker ingen ökad korrosion. Om däremot betongen innehåller klorider kan en positivare potential innebära att stålet hamnar i gropfrättningsområdet och angrepp uppstår.

Våra resultat indikerar således inte att armeringen nära pumparna i Ringhals varit utsatta för accelererande galvanisk korrosion.

Orsaken till den höga anodförbrukningen kan förklaras med stöd av figur 26.



Figur 26. Samband mellan Potential och strömtäthet (korrosionshastighet).

Mellan potential och ström råder ett logaritmiskt samband. En anodisk (utläckande) ström är vidare direkt proportionell mot korrosionshastigheten. Punkten B svarar mot aluminiumanodens opåverkade potential (ca -1000 mV) och punkten A mot potentialen hos opåverkad armering i vattenmättad betong (ca -700 mV). Då anod och armering kopplas ihop polariseras armeringen i negativ riktning till punkten C (ca -850 mV) och anoden i positiv riktning till punkten D (ca -950 mV). Potentialdifferensen mellan C och D är det spänningsfall som uppstår i elektrolyten, i detta fall havsvatten/betong. I detta läge belastas anoden med en utläckande ström som motsvaras av punkten H.

I vårt fall ska anoden skydda armering som är i kontakt med en rostfri pump. En blandpotential mellan armering och rostfritt inställer sig, punkt E (ca -550 mV). Mätningarna visade att anoderna endast lyckades åstadkomma en skyddsnivå på ca -750 mV, punkten F. Detta svarar mot en avsevärt högre utläckande ström från anoden och därmed kraftigt högre förbrukning, punkt I.

6 Slutsatser och rekommendationer

De genomförda undersökningarna medger följande slutsatser och rekommendationer:

- Utan anoder förorsakar pumparna en förändring av armeringens potential från -650/-700 mV till -550 mV.
- Med offeranoder motverkas denna potentialförskjutning och armeringen erhåller en potential mellan -650 och -750 mV. Något fullständigt katodiskt skydd (negativare potential än -750 mV) uppnås dock inte.
- Kloridhalten i betongen på armeringsdjup ligger i intervallet 0,2 till 0,7 %, vilket är lägre än i många andra delar av kylsystemet.
- Med 1 % klorid i betongen krävs en positivare potential än -100/-200 mV för att en tydlig förhöjning av korrosionshastigheten pga galvanisk korrosion ska ske.
- Med 2 % klorid är motsvarande värde -400/-500 mV.
- Resultaten kan således inte påvisa att armeringen tagit skada av att vara i elektrisk kontakt med pumparna. Av försiktighetsskäl rekommenderas dock provtagning i pumparnas direkta närhet.
- Orsaken till den höga anodförbrukningen är den högre drivande spänningen mellan anodens potential och den blandpotential som uppstår mellan rostfria ytor på pumpen och närliggande armering.

Bilaga 1

Bilder på prover efter betning**Prov 1: Polarisering till -100 mV , 1 % Cl. Utbredd gropfrätning.****Prov 2: Polarisering till -200 mV, 1 % Cl.****Prov 3: Polarisering till -300 mV, 1 % Cl.**



Prov 4: Polarisering till -300 mV, 2 % Cl. Utbredd gropfrätning.



Prov 5: Polarisering till -200 mV, 2 % Cl. Utbredd gropfrätning.



Prov 6: Polarisering till -100 mV, 2 % Cl. Utbredd gropfrätning.



Prov 7: Polarisering till -400 mV, 1 % Cl. Små korrosionsangrepp vid kanten (kortsidan).



Prov 7: Skada på Prov ID 7 från borttagningen av täckskikt.



Prov 8: Polarisering till -500 mV, 1 % Cl. Små korrosionsangrepp.



Prov 9: Polarisering till -600 mV, 1 % Cl. Små korrosionsangrepp.



Prov 10: Polarisering till -700 mV, 1 % Cl. Små korrosionsangrepp.



Prov 11: Polarisering till -800 mV, 1 % Cl. Skador från borttagningen av täcksikt.



Prov 12: Polarisering till -400 mV, 2 % Cl.



Prov 12: Polarisering till -400 mV, 2 % Cl. Skador från borttagningen av täcksikt.



Prov 13: Polarisering till -500 mV, 2 % Cl. Små korrosionsangrepp.



Prov 14: Polarisering till -600 mV, 2 % Cl.



Prov 14: Skada på Prov ID 14 från borttagningen av täckskikt.



Prov 15: Polarisering till -700 mV, 2 % Cl. Små korrosionsangrepp.



Prov 16: Referensprov med 1 % Cl



Prov 17: Polarisering till -800 mV, 2 % Cl



Prov 18: Referensprov med 2 % Cl



Prov 18: Skada på Prov ID 18 från borttagningen av täckskikt.

ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS - ELFORSK - AB

Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31
Telefon: 08-677 25 30, Telefax: 08-677 25 35
www.elforsk.se