



Korrosion på stål i betong i kylvattenvägar

Delprojekt 3 – Korrosion på stål i
vattenmättad betong



Elforsk rapport 10:84

Bertil Sandberg, Johan Ahlström, Johan Tidblad, Bror Sederholm

November 2009

Korrosion på stål i betong i kylvattenvägar

**Delprojekt 3 – Korrosion på stål i
vattenmättad betong**

Elforsk rapport 10:84

Bertil Sandberg, Johan Ahlström, Johan Tidblad, Bror Sederholm

November 2009

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 "Korrosion på stål i betong i kylvattenvägar Delprojekt 3 – Korrosion på stål i vattenmättad betong" beställts. Projektet är avrapporterat i tre delrapporter, utöver föreliggande rapport;

- Elforsk rapport 10:82 Delrapport 1 – Litteraturgranskning
- Elforsk rapport 10:83 Delrapport 2 - Relativa fuktighetens inverkan på kloridinitierad armeringskorrosion.

Projektet har utförts av Swerea KIMAB med Bertil Sandberg som projektledare och i samarbete med Lunds Universitet där professor Lars-Olof Nilsson, avdelningen för Byggnadsmaterial varit ansvarig.

Projektet har följts av Betongprogrammets styrgrupp bestående av Jonas Bergfors EON OKG, Jan Gustavsson Vattenfall Ringhals, Daniel Eklund och Manouchehr Hassanzadeh Vattenfall Research and Development, Kostas Xanthopoulos SSM, Lars-Erik Berglund, Marcus Edin och Philip Persson Vattenfall Forsmark samt Juha Riihimäki TVO. Elforsk tackar styrgruppen för värdefulla synpunkter och kommentarer.

Elforsk i september 2010
Lars Wrangensten
Programområde Kärnkraft

Sammanfattning

Det är väl känt att för 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. Tröskelvärde för initiering med avseende på kloridhalt är i de flesta fall passerat men propageringen sker med låg hastighet eftersom transporten av syre in till armeringen i vattenmättad betong är begränsad. Trots detta har pågående armeringskorrosion konstaterats vid inspektioner i kylvattenvägarna på svenska kärnkraftverk.

Syftet med föreliggande projekt har varit att identifiera och kvalitativt bedöma betydelsen av olika tänkbara mekanismer för armeringskorrosion i vattenmättad betong. Detta har skett genom erfarenhetsinsamling, litteratursökning, modellering, teoretiska beräkningar, experimentell undersökning och mätningar i fält.

Undersökningarna har resulterat i en rad nya rön. Således har följande konstaterats.

I vattenmättad betong, utan närvaro av makroceller, korroderar armeringen aktivt dock med en försumbart låg hastighet. Detta aktiva tillstånd föreligger oberoende av betongens kloridhalt. Korrosionshastigheten är låg även vid tunna täckskikt och med stor sannolikhet även i urlakad betong. Inte heller höga vattenflöden ger upphov till allvarliga angrepp.

Inspektioner har påvisat angrepp i skvalpzonen, på väggar som utvändigt är luftade och i närheten av pumpar. I skvalpzonen sker korrosionen ovanför vattenlinjen. En makrocell som resulterar i förhöjd korrosion under vattenlinjen är av underordnad betydelse och bedöms vara utan praktisk betydelse. Korrosionen sker där de yttre betingelserna för korrosionen är optimala. Det samma gäller för väggar som är utvändigt luftade. Makrocellen är av underordnad betydelse. I närheten av pumpar orsakas sannolikt armeringskorrosionen av galvanisk korrosion till följd av att rostfria ytor i pumparna inte är fullständigt katodiskt skyddade.

Enskilda armeringsjärn som inte har kontakt med övrig armering kan läckströmspåverkas om de befinner sig nära konstruktioner som kräver hög skyddsströmtäthet och eventuellt om de är nära anoder för system med påtryckt ström. Långsträckta betongkonstruktioner kan läckströmspåverkas från befintliga system för högspänd likström. Framtida installationer av katodiskt skydd bör ej innebära att armeringen i långa kulvertar, typ utloppstunnlar, görs kontinuerlig. Risken för växelströmskorrosion bedöms som minimal.

Om det inte vore för angreppen på Ölandsbron och i Göteborgs hamn, som ännu inte har kunnat förklaras, skulle man kunna utesluta risken för armeringskorrosion i andra positioner än i skvalpzonen, på väggar som utvändigt är luftade och i närheten till oskyddade rostfria konstruktioner.

Summary

It is a well known fact that for concrete structures exposed to water the splash zone exhibit the greatest risk for corrosion on the reinforcement. Chloride ions are enriched and the supply of oxygen is good. Below the water table reported corrosion damages are few. The threshold for chloride content is in most cases exceeded but the propagation rate is low due to slow diffusion rate of oxygen in water saturated concrete. Despite this, ongoing corrosion of reinforcement has been observed in cooling water systems at the Swedish nuclear power plants.

The aim of this project has been to identify and qualitatively quantify the importance of different possible mechanisms involved in corrosion of reinforcement in water saturated concrete. This has been achieved by collecting experiences, literature survey, modelling, theoretical calculations, experimental investigations as well as field measurements.

The investigations have resulted in several new findings. The following have been concluded:

In water saturated concrete, without the existence of macro cells, the reinforcement corrodes in an active state but with a very low rate. This active corrosion proceeds independently of the chloride content of the concrete. The corrosion rate is low even with thin concrete cover and most probably even if the concrete is URLAKAD. Nor does high velocity of the cooling water create serious attacks.

Inspections have unveiled attacks of reinforcement corrosion in the splash zone, in walls externally exposed to air and in the vicinity to pumps. In the splash zone the attacks occur above the water level. The absence of a macro cell resulting in increased corrosion on parts below the water line is of subordinate importance and is judged being without practical influence. The corrosion takes place where the environmental conditions are optimal. The same is valid for walls externally exposed to air. The macro cell is of subordinate importance. In the vicinity of pumps, observed corrosion, is probably caused by galvanic corrosion as a consequence of incomplete cathodic protection of stainless steel surfaces within the pumps.

Single rebar's being isolated from the rest of the reinforcement can be exposed to stray current corrosion if they are located close to a cathodically protected structure having a high demand for protective current. Concrete structures of greater extent can be exposed to stray current interference caused by high voltage direct current transmission lines located in the neighbourhood. Future installations of cathodic protection in extended culverts should not imply connection of separate parts to each other. The risk of alternating current corrosion is judged to be minimal.

If it was not for the corrosion observed on reinforcement on the Öland Bridge and in Gothenburg harbour, which until now has not been explained, corrosion should be possible to exclude in other positions than the splash zone, walls externally exposed to air and in the vicinity to unprotected structures of stainless steel.

Innehåll

1	Bakgrund	1
2	Syfte	2
3	Litteraturstudie	3
3.1	Inledning	3
3.2	Korrosionsteori	3
3.2.1	Passivitet (luftad betong).....	13
3.2.2	Gropfrätning (luftad betong)	13
3.2.3	Allmän korrosion (luftad betong)	14
3.2.4	Aktiv korrosion vid låg potential (vattenmättad betong)	14
3.3	Korrosionsmekanismer	15
3.3.1	Tunna täcksikt som ger högre syretransport till stålytan	17
3.3.2	Urlakad betong som ger högre syretransport till stålytan	17
3.3.3	Luftningscell mellan betong i vattenlinjen och djupare liggande vattenmättad betong	17
3.3.4	Syretillförsel från utsida av tunnel som går i luft eller lagts i jord ovanför grundvattenytan.....	18
3.3.5	Galvanisk korrosion pga ihopkoppling med metallytor i vattnet..	19
3.3.6	Sekundärverkan dvs läckström från närliggande katodiskt skydd med påtryckt ström	21
3.3.7	Läckströmskorrosion pga likströmsgradienter i vattnet	22
3.3.8	Läckström orsakad av växelström	22
3.4	Inverkan av betongens fukthalt	23
3.4.1	Torr betong.....	23
3.4.2	Kortvarig fuktning.....	23
3.4.3	Långvarig fuktning	24
3.4.4	Permanent vattenmättnad	24
3.5	Experimentella undersökningar av korrosion på armering i vattenmättad betong	25
4	Erfarenhetsinsamling	26
4.1	Ölandsbron	26
4.2	Göteborgs hamn	28
5	Modellering av korrosionsmekanismer med COMSOL	32
5.1	Indata	32
5.1.1	Fukttransport	32
5.1.2	Syrgasdiffusion.....	33
5.1.3	Resistivitet.....	35
5.1.4	Elektrokemiska parametrar	36
5.2	Tunna täcksikt	38
5.2.1	Förenklad modell i en dimension.....	38
5.2.2	Tvådimensionell modell	40
5.2.3	Jämförande av resultat och diskussion	41
5.2.4	Vattenhastighet.....	42
5.2.5	Slutsatser	42
5.3	Urlakad betong	43
5.4	Luftningscell i vattenlinjen.....	44
5.4.1	Geometri	45
5.4.2	Randvillkor	46
5.4.3	Resultat och diskussion	46
5.5	Fuktgradient i betong	50

5.6	Slutsatser	53
6	Beräkning av korrosionsrisker pga sekundärverkan från katodiska skydd	56
6.1	Anodiskt gradientfält	56
6.2	Katodiskt gradientfält	59
7	Experimentell undersökning av risken för galvanisk korrosion	66
7.1	Utförande.....	66
7.2	Resultat	69
7.3	Diskussion.....	78
8	Mätningar i fält	80
8.1	Utförande.....	80
8.2	Resultat	80
9	Undersökningar/inspektioner kylvattenvägar	86
10	Diskussion	87
11	Slutsatser	90
12	Referenser	91

1 Bakgrund

Kylvattenvägarna på kärnkraftverken består av gjutna betongkonstruktioner och bergförstärkta delar (bergbult med och utan utanpåliggande armerad sprutbetong) förutom rena bergtunnlar. Både armering och bergbultar är exponerade för betong/bruk som har hög halt kloridjoner.

Det är väl känt att för 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. Tröskelvärde för initiering med avseende på kloridhalt är i de flesta fall passerat men propageringen sker med låg hastighet eftersom transporten av syre in till armeringen i vattenmättad betong är begränsad. Vidare bildar de frigjorda järnjonerna ofta inte voluminös rost, som spjälkar av täcksikt, på samma sätt som i betongkonstruktioner ovanför vattenlinjen.

Det faktum att skador förekommit på armering i vattenmättad betong och att mängden information om problemet i litteraturen är begränsad motiverar att frågan studeras närmare.

Projektet är ett av tre delprojekt inom projektet – Korrosion på stål i betong i kylvattenvägar. Projektet drivs inom Elforsk programområde El- och värmeproduktion och är ett samarbetsprojekt mellan Swerea/KIMAB (Johan Ahlström, Bertil Sandberg, Bror Sederholm och Johan Tidblad) och Lunds Tekniska Högskola, avdelning byggnadsmaterial (Sture Lindmark och Lars-Olof Nilsson).

2 Syfte

Syftet med föreliggande projekt har varit att identifiera och kvalitativt bedöma betydelsen av olika tänkbara mekanismer för armeringskorrosion i vattenmättad betong. Detta har skett genom erfarenhetsinsamling, en kompletterande litteratursökning och teoretisk modellering av olika mekanismer. För att studera inverkan av galvanisk korrosion på armering i vattenmättad betong har dessutom en experimentell undersökning genomförts. Genom detta arbete har de troligaste orsakerna till inträffade skadefall identifierats. Slutligen har de teoretiska och laborativa resultaten jämförts med observationer gjorda under pågående undersökningar/inspektioner i kylvattenvägarna på de svenska kärnkraftverken.

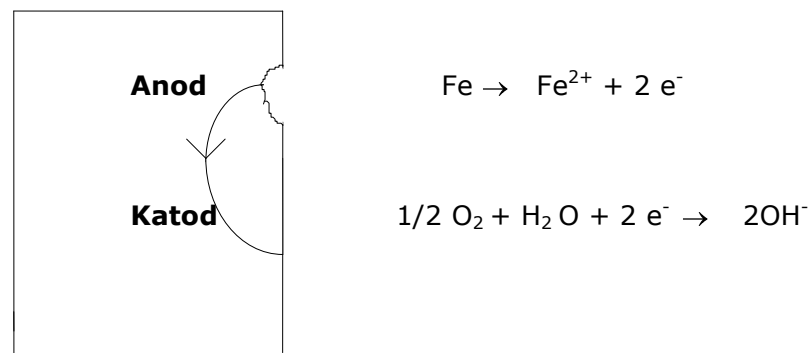
3 Litteraturstudie

3.1 Inledning

En litteratursökning avseende korrosion på stål i vattenmättad betong har genomförts. Relevanta artiklar (1-7) har studerats och tillsammans med egna erfarenheter har nedanstående betraktelse över korrosionsförhållandena i vattenmättad betong utförts.

3.2 Korrosionsteori

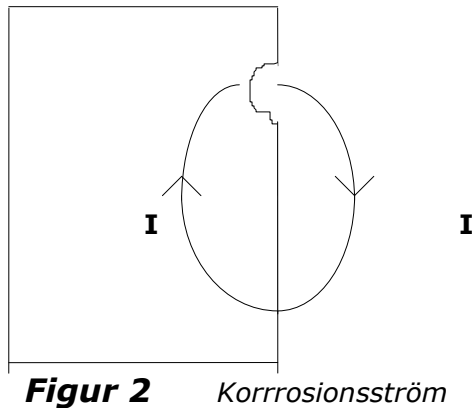
Vid korrosion på stål i vattenlösningar är oftast syrgas löst i vattnet det oxidationsmedel som är nödvändigt för processen. Vid pH-värden lägre än ca 4 kan även vätejoner ge ett bidrag som oxidationsmedel. Oxidationsmedlet reduceras på katodytor medan metallen oxideras på anodytor och går i lösning, se Figur 1.



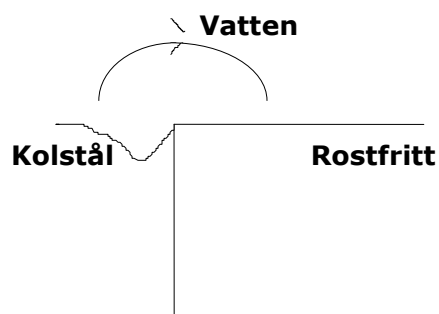
Figur 1 Korrosionscell.

Anod- och katodprocessen balanserar alltid varandra så att lika många elektroner frigörs på anodytor som det förbrukas på katodytor. Om den ena processen stoppas stannas också den andra i samma ögonblick.

I metallen transporteras elektroner från anod till katod. Detta innebär att det går en svag likström i motsatt riktning. En strömkrets måste vara sluten. Detta sker genom jonvandring i vattnet, se nedanstående figur (Figur 2).



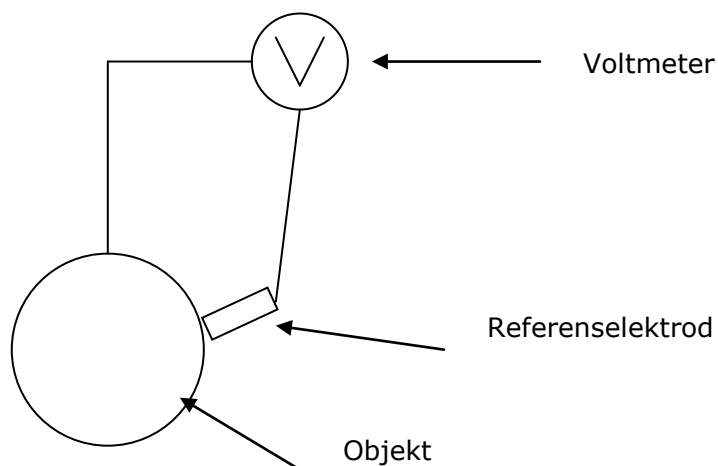
På jämnt rostande stål är anod- och katodytor jämnt fördelade över ytan. Anod- och katodytor kan emellertid också vara makroskopiskt skilda från varandra. Detta gäller t.ex. vid galvanisk korrosion, där två olika ädla metaller - exempelvis rostfritt stål och kolstål - har kontakt med varandra och befinner sig i en gemensam elektrolyt. Katodprocessen sker då på den ädla metallen och anodprocessen på den oädla, se Figur 3.



Figur 3 *Galvanisk korrosion.*

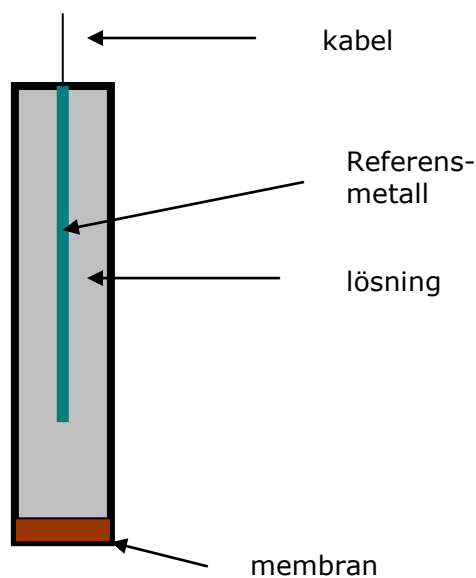
Liknande makroskopiska korrosionsceller kan också uppstå på en och samma metall. Exempel på detta är s.k. aktiv- passivceller på stål ingjutet i betong.

Inom korrosionsområdet används begreppet potential flitigt. Med potential avses en metalls elektrokemiska potential som mäts relativt en referenselektrod, se Figur 4.



Figur 4 Potentialmätning

En äkta referenselektrod har en mycket stabil potential som är oberoende av den miljö som metallen befinner sig i. Detta åstadkoms genom att "referensmetallen" omges av en väldefinierad lösning, se Figur 5.



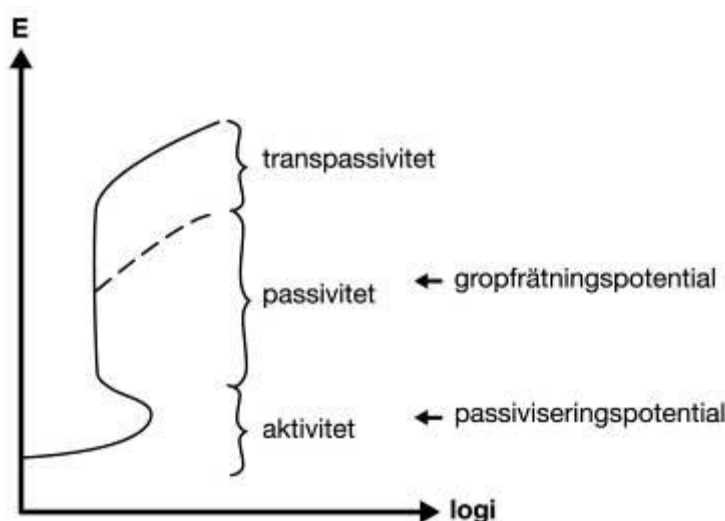
Figur 5 Referenselektrod

De vanligaste referenselektroderna finns listade i Tabell 1. I denna rapport kommer samtliga potentialvärden att refereras till elektroden Ag/AgCl/mättad KCl.

Tabell 1 Potentialen hos vanliga referenselektroder relativt vätgaselektroden

Referenselektrod	E, relativt NHE
Ag/AgCl/mättad KCl	
Ag/AgCl/havsvatten	
Standard kalomel	

Stål i betong är passivt dvs skyddas av ett oxidskikt. Passivitet uppstår för vissa metaller under vissa yttre förhållanden. Förutsättningarna för passivering kan visas av stålets anodiska polarisationskurva, som schematiskt visas i Figur 6.



Figur 6 Anodisk polarisationskurva.

På y-axeln anges potentialen och på x-axeln logaritmen för den anodiska strömtätheten som är direkt proportionell mot korrosionshastigheten. Höjs potentialen stiger strömtätheten till ett maximum och metallen, i aktivt tillstånd, korroderar. Vid en viss potential, passiveringspotentialen, minskar strömtätheten drastiskt, metallytan passiveras. Passiviteten innebär inte noll korrosion. För att upprätthålla det passiverande oxidskiktet sker alltid en viss men låg korrosion. Ökas potentialen ytterligare till mycket höga värden, ökar dock strömtätheten åter, det sker då så kallad transpassiv korrosion. Denna kan vi i praktiken bortse från.

Vid närvaro av kloridjoner finns risk för gropfrätning. Polarisationens utseende förändras. Den streckade linjen representerar gropfrättningspotentialen. Om potentialen höjs till ett värde över denna initieras gropfrätning. Gropfrättningspotentialen ligger alltid lägre än den transpassiva potentialen.

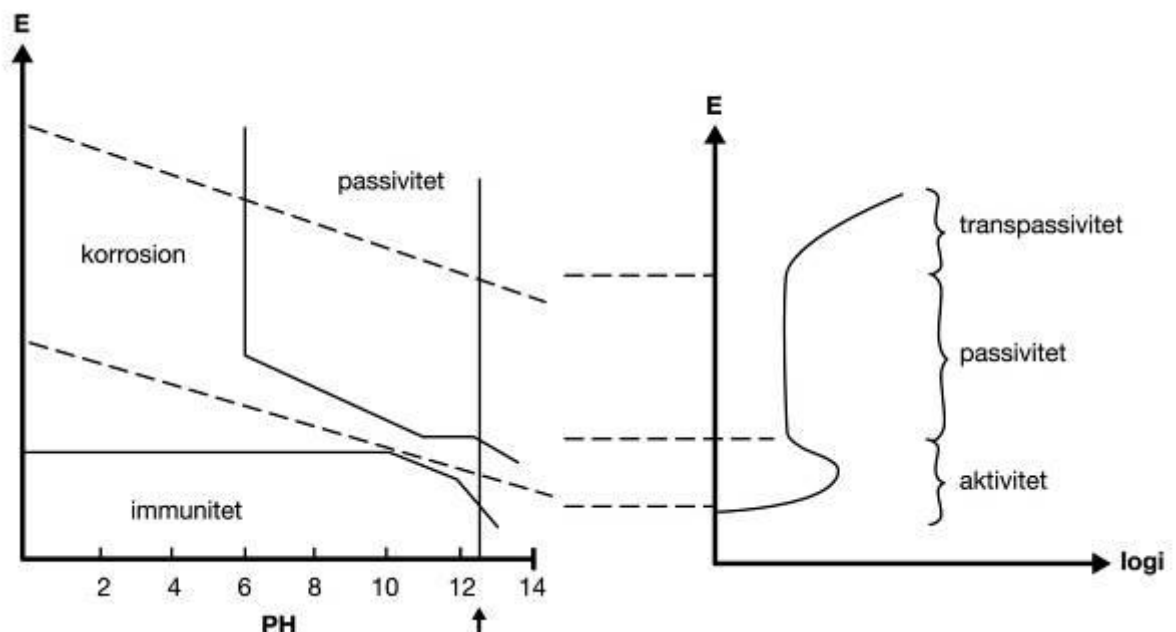
En jämförelse kan göras med rostfritt stål som är passivt i vatten om inte kloridhalten är för hög. Beroende på stålets kemiska sammansättning,

elektrolytens kloridhalt och dess temperatur erhålls olika gropfrätningspotentialer. När övriga yttre förhållanden är konstanta är således gropfrätningspotentialen en funktion av kloridhalten.

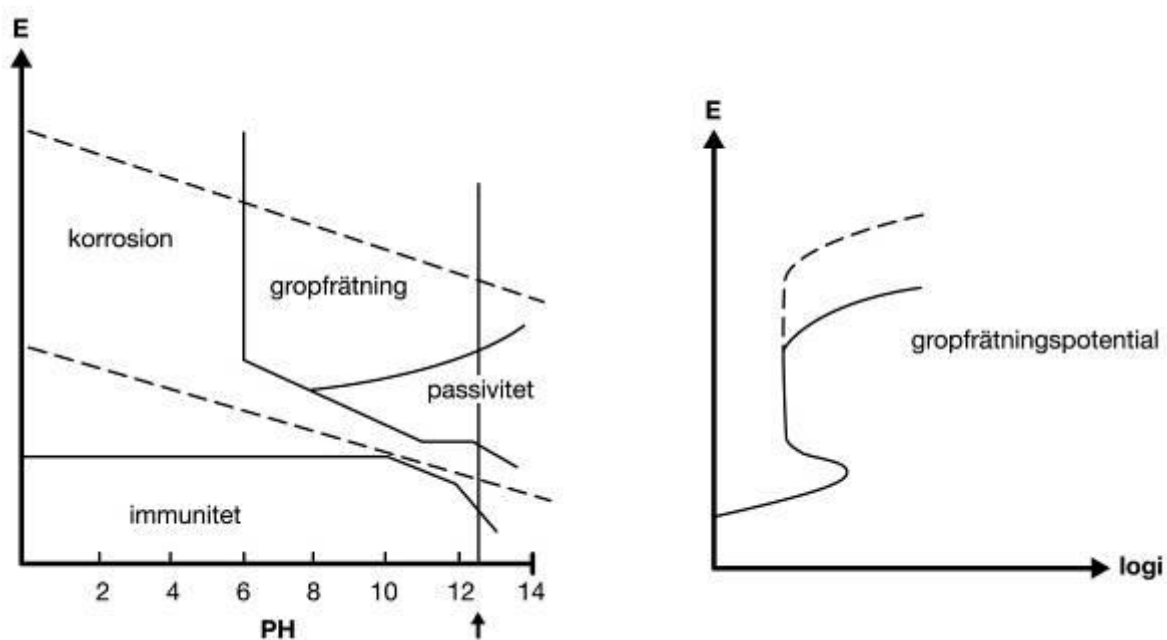
Det rostfria stålets passivitet hänger samman med att stålet överdrar sig med en tunn, skyddande beläggning som till stor del består av kromhaltig oxid och hydroxid, så kallad kemisk passivitet. Stål i betong får också en skyddande beläggning, i detta fall av järnhydroxid, mekanisk passivitet. Den kemiska passiviteten är ett generellt fenomen som för ifrågavarande metall uppträder i ett stort antal miljöer. Den mekaniska passiviteten är helt beroende av kombinationen metall/miljö. För stål i betong har hydroxidhalten en avgörande betydelse. Det är därför sannolikt att gropfrätningspotentialen för stål i betong bestäms av hydroxid/klorid förhållandet.

Kloridtröskelvärdet (CTL) är inte en materialkonstant på samma sätt som gropfrätningspotentialen. CTL påverkas förutom av kloridhalten också av stålets potential som i sin tur påverkas av betongens fukthalt (syretillgång), galvaniska kontakter osv.

Korrosionsförhållandena i betong kan också åskådliggöras i ett så kallat potential-pH diagram. Parallellt visas korresponderande anodiska polarisationskurva. Figur 7 visar förhållandena i en god betong och Figur 8 i en kloridrik betong. I den kloridrika betongen har passivområdet minskat dvs vid för positiva potentialer uppstår gropfrätning.

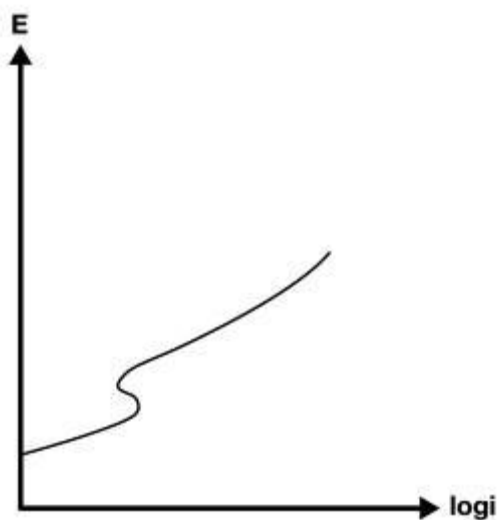


Figur 7 Potential-pH diagram och anodisk polarisationskurva i god betong



Figur 8 Potential-pH diagram och anodisk polarisationskurva i kloridrik betong

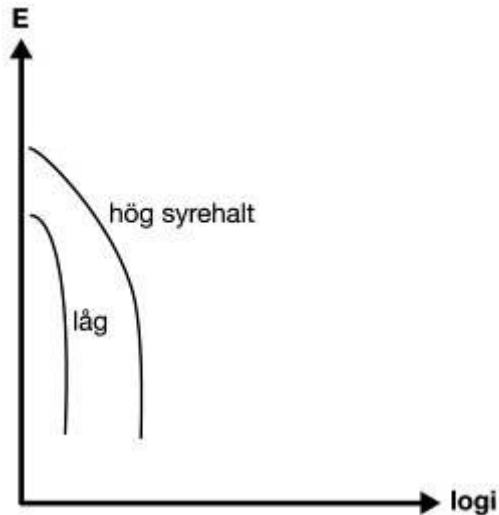
Det finns rapporterade resultat på att passivområdet mer eller mindre kan försvinna vid höga kloridhalter, se Figur 9.



Figur 9 Anodisk polarisationskurva i betong med mycket höga kloridhalter.

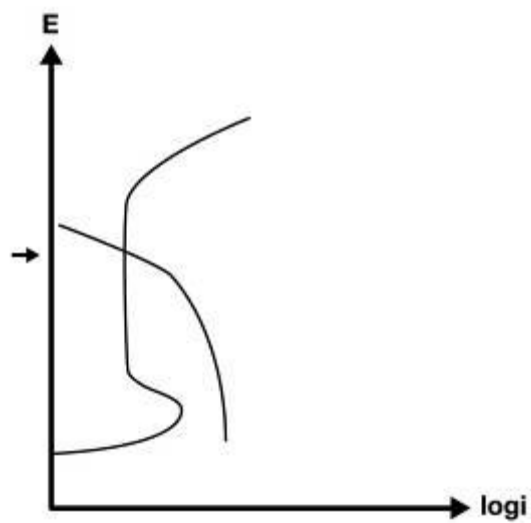
Viktigt att känna till är dock att stålets potential, korrosionspotentialen, är en blandpotential som bestäms av två samtidigt och elektriskt kopplade

elektroreaktioner dvs anod- och katodreaktionerna. Vid syrgasförbrukande korrosion, vilket är fallet för stål i betong, bestäms den katodiska polarisationskurvan av syrehalten i elektrolyten, se Figur 10.

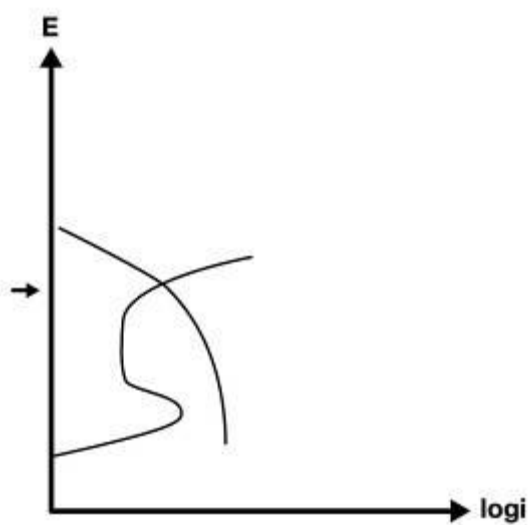


Figur 10 Katodisk polarisationskurva.

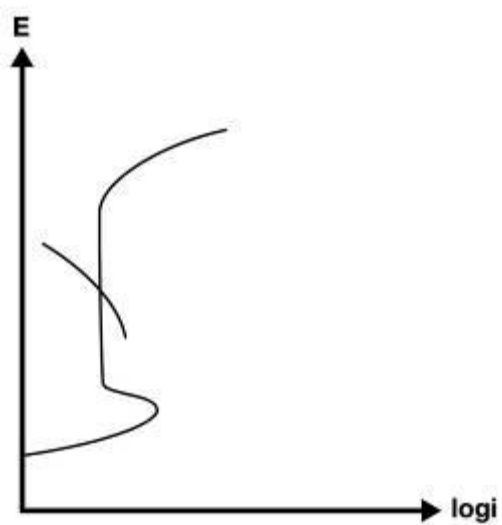
Genom att lägga in både den anodiska och katodiska polarisationskurvan i samma diagram kan korrosionspotentialen fås fram. Exempel ges i Figur 11 - Figur 15. I Figur 11 har vi en positiv potential som är typisk för passivt stål i god betong vid atmosfärisk exponering. I Figur 12 har betongen hög kloridhalt, korrosionsströmmen ökar och potentialen blir mer negativ. Samma potential kan dock uppstå om en kloridfri betong har en något förhöjd fukthalt och därmed lägre permeabilitet för syre, se Figur 13. Om syrehalten är mycket låg i betongen blir korrosionspotentialen kraftigt negativ och korrosionshastigheten låg oberoende av om kloridhalten är låg eller hög, se Figur 14 och Figur 15. Den aktiva korrosionen vid låg syrehalt kan ofta ske vid en lägre korrosionsström än den vid passivitet. Det kan därför misstolkas som att korrosion inte har initierats dvs att stålet fortfarande är passivt.



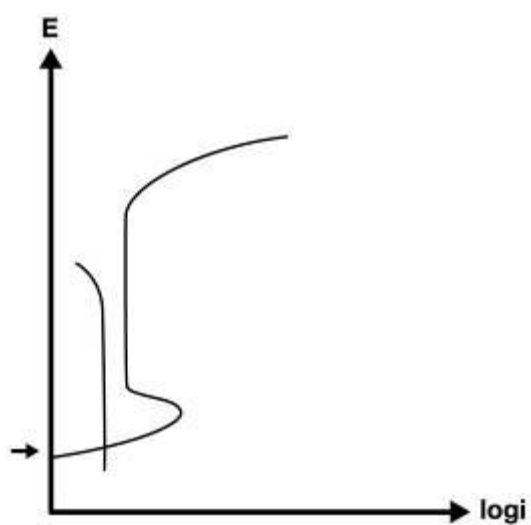
Figur 11 Figur 9. Korrosionspotential i god betong och hög syrehalt.



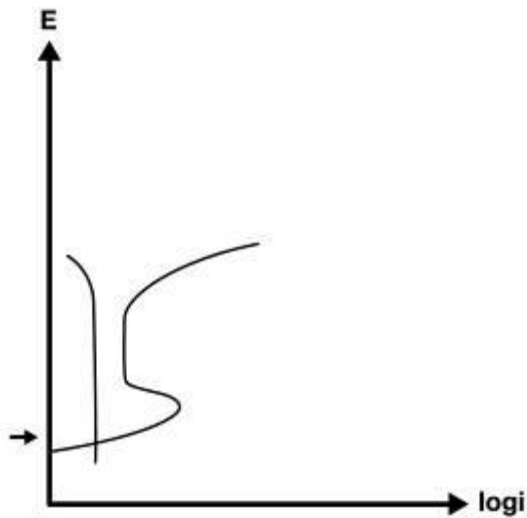
Figur 12 Korrosionspotential i kloridrik betong med hög syrehalt.



Figur 13 Figur 11. Korrosionspotential i god betong vid lägre syrehalt.

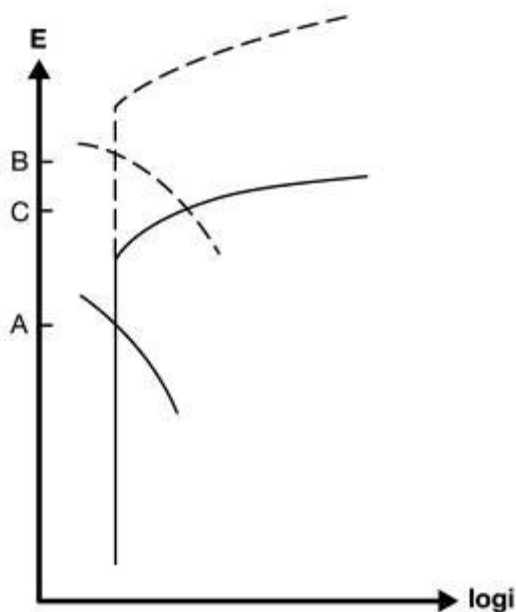


Figur 14 Korrosionspotential i god betong vid låg syrehalt.



Figur 15 Korrosionspotential i kloridrik betong vid låg syrehalt.

Låt oss med detta som bakgrund tydliggöra varför CTL värdet inte är en materialkonstant. Initiering kan nämligen ske vid olika kloridhalt i betongen beroende om makroceller existerar eller inte. Låt oss anta att en del av en betongkonstruktion har fått en förhöjd kloridhalt. Korrosionsförhållandena i den delen svarar mot den anodiska respektive katodiska polarisationskurvan som återges med heldragna linjer i Figur 16. En korrosionspotential A inställer sig. Den kloridrika betongen omges av välluftad kloridfri betong med representerade av de streckade kurvorna i figuren och en korrosionspotential B. Eftersom armeringen hänger ihop bildas en makrocell med anod i kloridrik betong och katod i omgivande betong. En blandpotential mellan A och B uppstår, punkt C och gropfrätning initieras i den kloridrika betongen. (Detta är en förenklad bild. I praktiken har anod- och katodytorna olika stora areor och därmed strömtätheter. Vidare är en del av polariseringen ett ohmskt spenningsfall). Om inte den kloridrika betongen gränsat till välluftad betong hade inte potentialen i den kloridrika betongen ändrats i positiv led till en nivå över gropfrätningspotentialen.



Figur 16 En makrocells inverkan på när gropfrätning initieras i en betong med ett visst kloridinnehåll.

Som framgått av diskussionen kring anodiska polarisationskurvor kan således stål i betong finna sig i 4 olika korrosionstillstånd:

- Passivitet
- Gropfrätning
- Allmän korrosion
- Aktiv korrosion vid låg potential

3.2.1 Passivitet (luftad betong)

I frånvaro av klorider är passivområdet stort, från +200 mV till -700 mV rel. SCE. I luftad betong inställer sig dock potentialen mellan +100 och -200 mV.

3.2.2 Gropfrätning (luftad betong)

Vid gropfrätning uppmäts oftast potentialer i intervallet -200 till -500 mV i luftad betong. Vidare är det känt att gropfrätning främst uppstår i betong med hög alkalitet (ej karbonatiserad) och om kloridhalten varierar vilket gynnar uppkomsten av separerade anod- och katodområden. Tillväxten av en initierad frätgrop gynnas av att syra bildas vid anoden och att kloridjoner migrerar mot anoden. I den surare miljön vid anoden är korrosionsprodukterna lösliga varför mängden bortkorroderat stål kan bli betydande utan att täcksiktet spjälkas av.

3.2.3 Allmän korrosion (luftad betong)

Typiska potentialvärden vid allmän korrosion är -350 till -600 mV. Ett stort antal närliggande frätgropar bildas. Anod- och katodreaktionerna sker således över hela ytan och pH-förändringarna tar ut varandra. Anodreaktionerna sker pga detta i en neutral/alkalisk miljö varför fasta olösliga korrosionsprodukter bildas vilket i sin tur medför risk för spjälkning redan på ett tidigt stadium.

Den allmänna korrosion som sker i karbonatiserad respektive kloridrik betong har olika karaktär. Karbonatisering sker i atmosfären och korrosionen begränsas inte av syretillförseln utan snarare av motståndet i korrosionscellen dvs betongens resistivitet, se ekvivalenta schemat längre fram i texten. Det är därför sannolikt att en ökad fuktighet medför en ökad korrosionshastighet. Detta gäller dock bara upp till en viss gräns, nämligen då fuktigheten blir så stor att porerna blir vattenfyllda, vilket motverkar syrediffusionen.

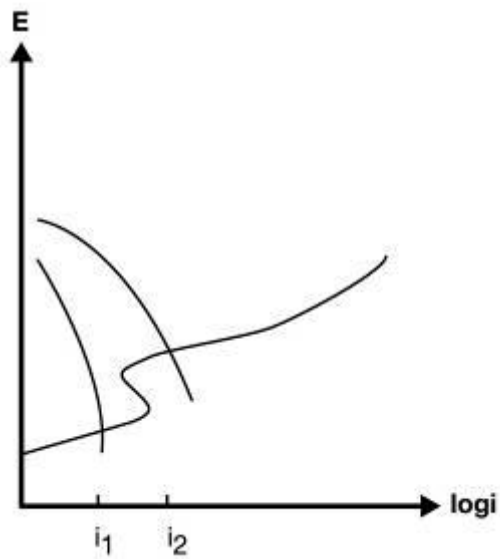
I kloridrik betong är resistiviteten låg varför diffusionshastigheten för syre i de vattenfyllda porerna bestämmer korrosionshastigheten.

3.2.4 Aktiv korrosion vid låg potential (vattenmättad betong)

Vid låg tillgång på syre t.ex. i vattenmättad betong erhålls en mycket negativ potential, ner mot -800 mV. Stålet korroderar aktivt, oberoende om kloridhalten är hög eller inte. Korrosionshastigheten är dock mycket låg, ofta lägre än i passivt tillstånd.

Den mycket negativa potentialen på det ingjutna stålet gör att mindre stålytor exponerade för vatten erhåller katodiskt skydd från det ingjutna stålet. Sprickor i den vattenmättade betongen är därför mindre kritiska.

Om däremot de "främmande" katodytorna blir mycket stora förändras det ingjutna stålets potential i positiv riktning och därmed korrosionsströmmen. Om samtidigt kloridhalten är mycket hög i betongen medförande en anodisk polarisationskurva i enlighet med figur 7 kan en betydande korrosion inte uteslutas, se Figur 17. Av stort intresse i detta fall är att fastställa om korrosionsprodukterna är lösliga och migrerar bort från anodytan och därmed inte har en sprängande verkan.



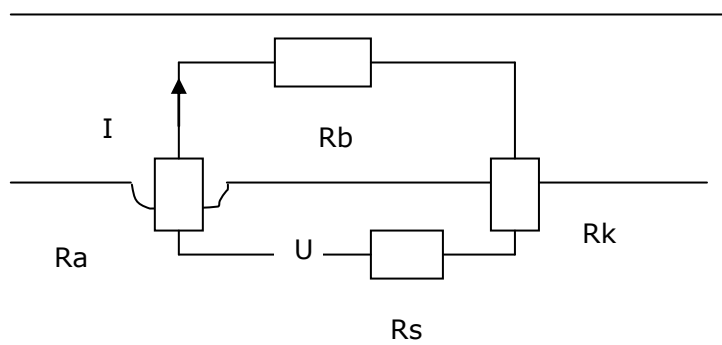
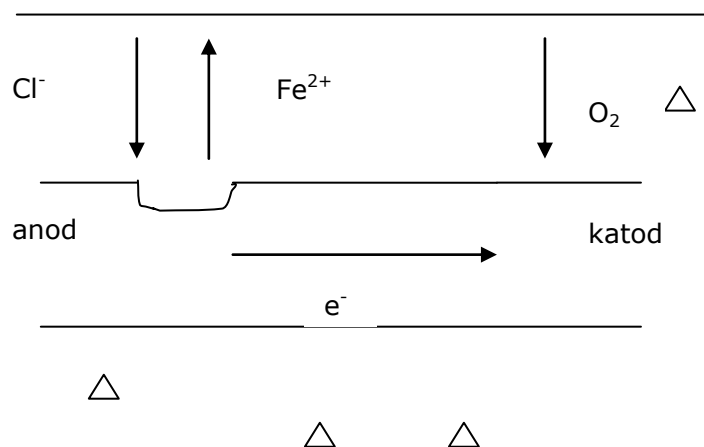
Figur 17 Förhöjd korrosion på stål i vattenmättad betong till följd av främmande katodytor.

3.3 Korrosionsmekanismer

I följande fall kan man misstänka en högre korrosion på stål i vattenmättad betong:

- tunna täcksikt som ger högre syretransport till stålytan.
- urlakad betong som ger högre syretransport till stålytan.
- luftningscell mellan betong i vattenlinjen och djupare liggande vattenmättad betong.
- syretillförsel från utsida av tunnel som går i luft eller lagts i jord ovanför grundvattenytan.
- galvanisk korrosion pga ihopkoppling med ädla metaller i vattnet.
- sekundärverkan dvs läckström från närliggande katodiskt skydd med påtryckt ström.
- läckströmskorrosion pga likströmsgradienter i vattnet.
- läckström orsakad av växelström.

För att kunna bedöma de olika fallen är det till hjälp att beskriva korrosionscellen med ett ekvivalent elektriskt schema, se Figur 18.



Figur 18 Ekvivalent schema för en korrosionscell i betong.

R_a = anodytans övergångsmotstånd
 R_k = katodytans övergångsmotstånd
 R_s = resistansen i stålet = 0
 R_b = betongens resistans
 U = potentialskillnad mellan katod och anod

Med denna enkla modell kan överslagsberäkningar göras som möjliggör en grov bedömning av korrosionsrisken för ovanstående redovisade fall.

3.3.1 Tunna täckskikt som ger högre syretransport till stålytan

I den vattenmättade betongen är R_a och R_b låga och kretsens resistans domineras av R_k som styrs av syrets diffusionshastighet. Följande bör tas hänsyn till:

- Lösligheten av syre i vattnet (sjunker vid ökande temperatur).
- Vattenhastigheten (tveksam inverkan eftersom syrets diffusionshastighet är högre i vattnet än i betongen).
- Diffusionshastigheten för syre i betongen.
- Tjocklek täckskikt.
- Betongens porositet.

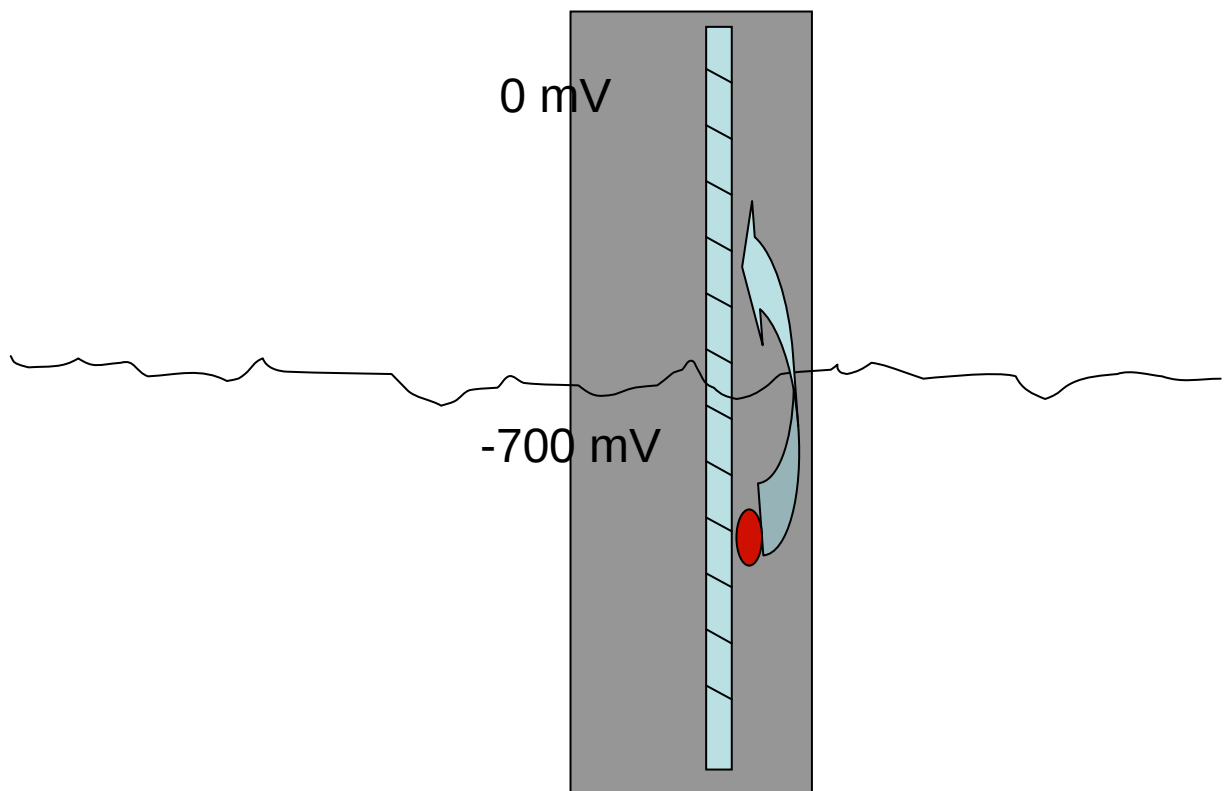
3.3.2 Urlakad betong som ger högre syretransport till stålytan

Förändringar av betongtäckskiktet till följd av urlakning eller liknande processer kan öka diffusionshastigheten för syrgas. Även i detta fall dominerar R_k och samma faktorer som i det föregående fallet inverkar.

3.3.3 Luftningscell mellan betong i vattenlinjen och djupare liggande vattenmättad betong

I vattenlinjen/skvalpzonen sker en anrikning av kloridjoner och därmed en tidigare initiering än på övriga delar av betongkonstruktionen. Vid hög kloridhalt i betongen styrs korrosionen under "torra perioder" av betongens resistans, R_b . Det samma gäller under kortvarig fuktning. Vid långvarig fuktning får R_k större inverkan pga trög syrediffusion.

I detta område kan en så kallad luftningscell bildas där armeringen ovanför vattenytan blir katod och delen under vattenytan anod, se Figur 19.



Figur 19 Luftningscell i vattenlinjen.

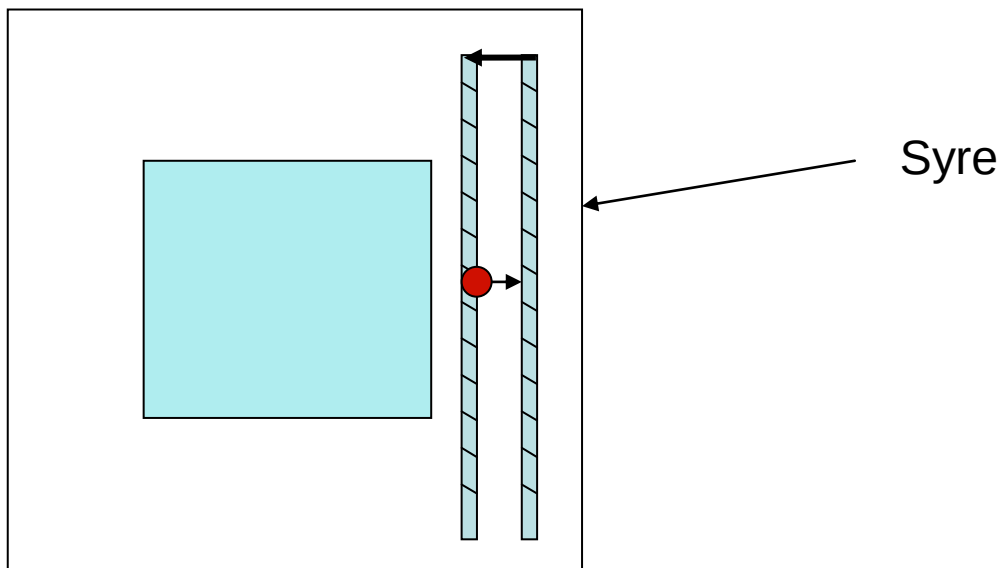
I denna cell kommer areaförhållandet mellan stål i vattenmättad betong under vattenlinjen och stålet i betong ovanför vattenlinjen att vara viktig. Troligen kommer R_k i betongen ovanför vattenlinjen vara kontrollerande.

Följande faktorer bör beaktas:

- Diffusionskonstanten för syre ovanför vattenlinjen.
- Tjocklek täcksikt.
- Porositet.
- Potentialskillnader ovan/under vattenlinjen.
- Betongens resistivitet ovan/under vattenlinjen.
- Betongens vattenhalt.
- Areaförhållanden.
- Vattenhalt.

3.3.4 Syretillförsel från utsida av tunnel som går i luft eller lagts i jord ovanför grundvattenytan

En liknande luftningscell som i vattenlinjen kan uppstå om syretillförseln är högre på t.ex. en tunnels utsida. Kloridjonerna från vattnet leder till initiering på den inre armeringen och korrosionsprocessen underhålls genom att för katodprocessen erforderligt syre tillförs till den yttre armeringen, se Figur 20.



Figur 20 *Luftningscell i vattenfylld tunnel med utsidan exponerad mot luft.*

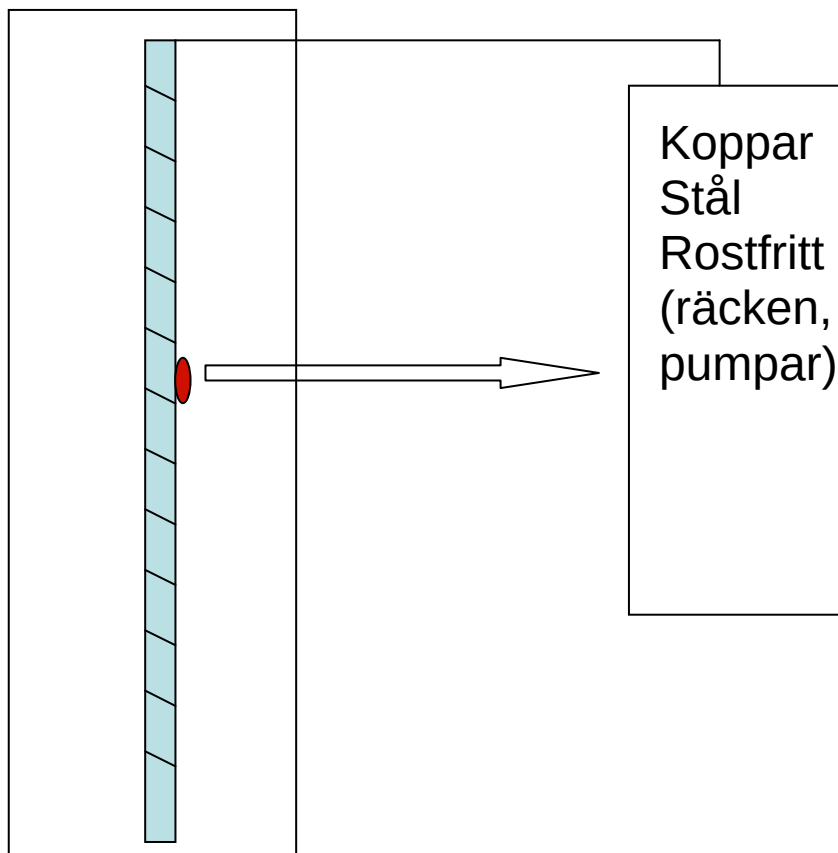
Kraften i denna korrosionscell är sannolikt större än i den föregående eftersom areaförhållandet katod/anod är mycket mindre vid vattenlinjen (endast en begränsad yta ovanför vattenlinjen deltar som katod). Med en luftad utsida kan i princip hela det yttre armeringslagret fungera som katod och hela det inre som anod dvs ett areaförhållande på 1:1. Samtidigt kan samtliga resistanser vara små. Om fuktigheten är hög från det yttre armeringslagret och inåt blir både R_a och R_b låga. Är vidare fuktigheten låg i det yttre täckskiktet blir R_a inte heller begränsande.

Följande faktorer bör beaktas:

- Potentialskillnaden
- Diffusionskonstanten för syre i det yttre täckskiktet
- Tjocklek yttre täckskikt och i hela väggen
- Porositet
- Vattenhalter i olika delar av väggen
- Resistivitet i betong
- Areaförhållanden

3.3.5 Galvanisk korrosion pga ihopkoppling med metallytor i vattnet

Stål i vattenmättad betong har en jämförelsevis negativ potential. Detta innebär att armeringen kommer att fungera som anod vid sammankoppling med andra metalliska konstruktioner exponerade för samma vattenvolym. Dessa konstruktioner kan vara av ädelt material eller katodiskt skyddat stål men där skyddet är ofullständigt. Till denna senare kategori hör bland annat pumpar med höga flöden där det är mycket svårt att åstadkomma ett fullständigt skydd (högt strömbehov), se Figur 21.



Figur 21 Galvanisk korrosion mellan armering och metallytor i vattnet.

Detta fall påminner om fallet med en betongkonstruktion där ena sidan är exponerad för vatten och den andra för luft. I detta fall uppstår också en makrocell men som katod fungerar metallytorna exponerade direkt i vatten som i de allra flesta fall (kolstål, rostfritt, koppar dock ej zink) har en betydligt positivare potential än stålet i den vattenmättade betongen. Metallytorna i kontakt med vatten är dessutom mycket effektivare katodytor än stål i luftad betong (lägre R_k). Avgörande för korrosionens omfattning är dels areaförhållandet anod/katod dels vattnets flödes hastighet.

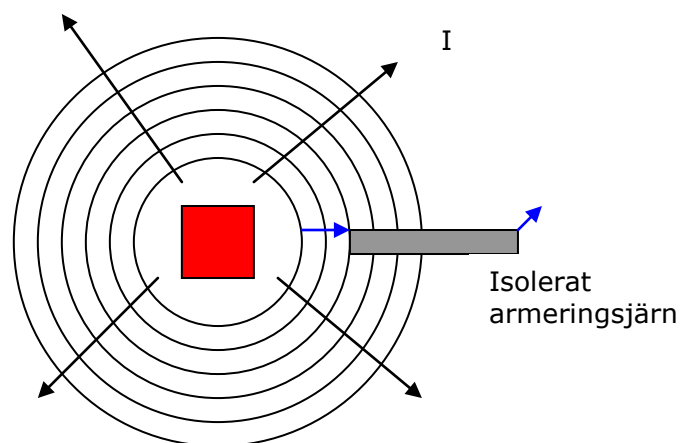
Följande faktorer bör beaktas:

- Potentialskillnaden
- Resistiviteten i vattnet
- Resistiviteten i betongen
- Tjocklek täcksikt
- Vattnets flödes hastighet
- Syrehalten i vattnet
- Temperaturen i vattnet
- Areaförhållandet

3.3.6 Sekundärverkan dvs läckström från närliggande katodiskt skydd med påtryckt ström

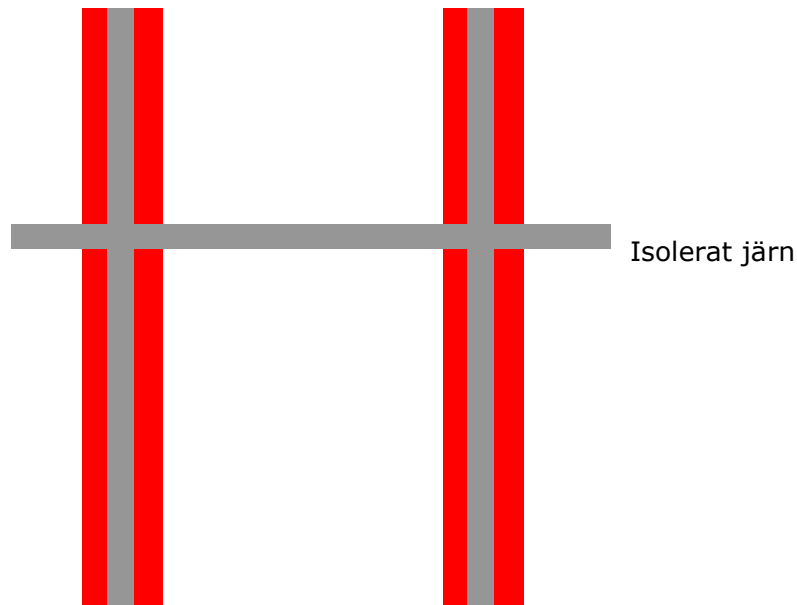
Galler, luckor och korgbandsilar samt i vissa fall pumpar i intag och kylvattenvägar skyddas med katodiskt skydd av typen påtryckt ström (Passavant). Kontroller i Barsebäck har visat att armeringen i betongen i princip alltid är i kontakt med dessa skyddade konstruktioner. I och med detta erhålls även ett skydd på armeringen i de till skydden närliggande delarna av armeringen.

Om någon del av armeringen är isolerad från övrig armering kan emellertid så kallad sekundärverkan uppstå dvs förhöjd korrosion. Två olika typer kan särskiljas dels inverkan från anoden dels pga närhet till en skyddad konstruktion. I båda fallen orsakas påverkan av de gradientfält som bildas i vattnet/betongen runt anoden/det skyddade järnet, se Figur 22 och Figur 23.



Figur 22 Läckströmspåverkan på isolerat armeringsjärn pga närhet till anoden. Spänningsfältet i vattnet gör att den del av järnet som ligger nära anoden tar upp ström som sedan lämnar järnet i andra änden (utläckande ström = korrosion).

Skyddade järn med katodiska spänningsfält



Figur 23 Läckströmspåverkan på isolerat armeringsjärn pga närhet till katodiskt skyddade järn.

3.3.7 Läckströmskorrosion pga likströmsgradienter i vattnet

Likströmmar och därmed likströmsgradienter existerar normalt endast i anslutning till likströmsdrivna tåg och spårvagnar i städer. I kärnkraftsverkens närområden finns dock anläggningar för högsämd likström, Fenoskan vid Forsmark, Kontiskan vid Ringhals och Gotlandsöverföringen vid Oskarshamn. Både Kontiskan och Gotlandsöverföringen är så kallade bipolära överföringar dvs under normal drift överförs endast mindre strömmar via vattnet. Vid fel kan dock större obalansströmmar förekomma. Fenoskan är dock monopolär vilket innebär att all strömöverföring från Sverige till Finland sker via vattnet och skapar ett permanent och förhållandevis stort gradientfält i Norra Uppland.

3.3.8 Läckström orsakad av växelström

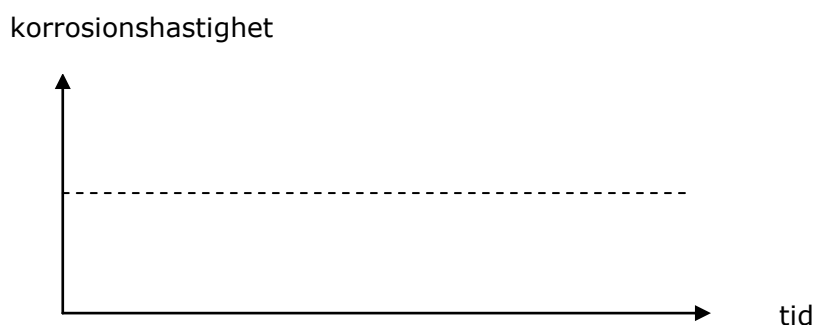
Frågan om växelströmskorrosion har varit uppe för diskussion. Denna risk kan dock försummas. Erfarenhetsmässigt vet man att i andra korrosionsmedier krävs strömtätheter på ca 30 A/m^2 för att korrosion ska uppstå. Vattenmättad betong har uppskattningsvis en resistivitet på $100 \Omega\text{m}$ vilket ger ett övergångsmotstånd på ca 30Ω för en kvadratmeter stål i betong. Detta medför att stålets växelströmspotential måste upp i 900 V för uppnå erforderlig strömtäthet. Denna typ av spänningssättning av armeringen kan uteslutas.

3.4 Inverkan av betongens fukthalt

Det ekvivalenta schemat i Figur 18 kan också användas för att beskriva de förväntade korrosionsförloppen i kloridrik betong med olika fukthalt. Inga makroceller beaktas.

3.4.1 Torr betong

Med detta avses en betong exponerad för en relativ fuktighet lägre än 100 %. Korrosionshastigheten kommer att kontrolleras av betongens resistans, R_b . Vid konstant fuktighet erhålls en konstant korrosionshastighet.

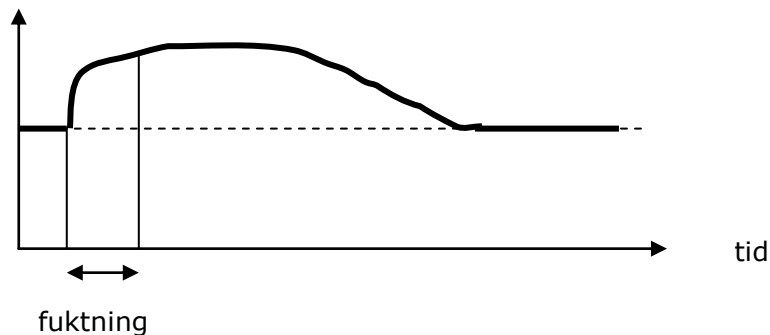


Figur 24 Korrosionshastigheten i torr betong vid konstant fuktighet.

3.4.2 Kortvarig fuktning

Fuktningen sänker betongens resistivitet men inverkar inte på tillgången på syre. Detta minskar betongens resistans. Allt eftersom betongen torkar ut återgår korrosionshastigheten till nivån före fuktningen. R_b kontrollerar korrosionen.

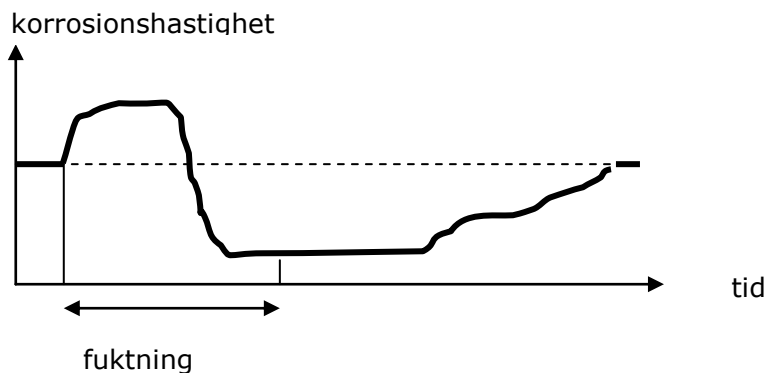
korrosionshastighet



Figur 25 Korrosionshastigheten vid kortvarig fuktning.

3.4.3 Långvarig fuktning

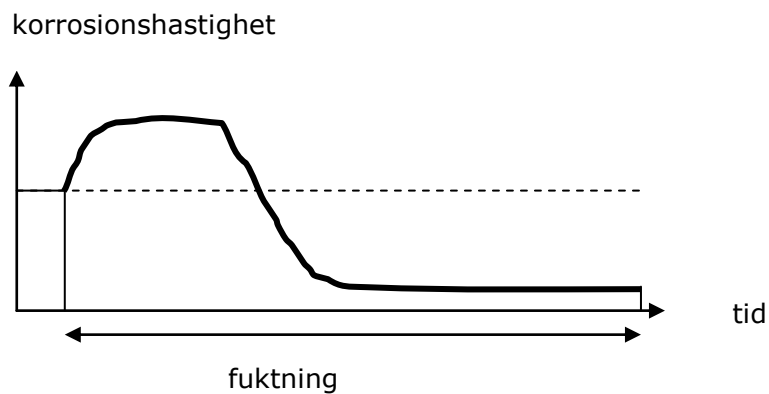
Med långvarig fuktning menas att vattenhalten i betongen närmast stålytan är så hög att kvarvarande syret i betongen konsumeras av korrosionsprocessen. Inledningsvis ökar korrosion pga att betongresistansen minskar. Efter en tid ökar dock katodresistansen till följd av syrebristen. Då betongen börjar torka ut återgår korrosionshastigheten till den före fuktningen.



Figur 26 Korrosionshastigheten vid långvarig fuktning.

3.4.4 Permanent vattenmättnad

När syret är förbrukat bestäms korrosionshastigheten av syre diffusionen genom täcksiktet och i omgivande vatten dvs Rk dominerar. Enligt uppgift inverkar täcksiktets tjocklek endast marginellt.



Figur 27 Korrosionshastigheten vid permanent vattenmättnad.

3.5 Experimentella undersökningar av korrosion på armering i vattenmättad betong

Genomförda laboratorieförsök (2,4) visar att korrosionshastigheten på armering i vattenmättad betong blir försumbar. Det samma gäller för långtidsexponeringar, upp till 16 år, i havsvatten (5,6).

4 Erfarenhetsinsamling

När det gäller korrosionsskador på stålarmering i vattenmättad betong så framgår det vid kontakter med Vägverket, Banverket och tekniskt ansvariga för olika kommunala hamnar i Sverige att det är högst ovanligt med korrosionsskador på armeringen i vattenmättade betong. Det finns två kända fall där korrosionsskador har inträffat på armeringen i vattenmättade betong. En av dessa konstruktioner är bropelarna under Ölandsbron och den andra är betongpålar till däckskajer i Göteborgs hamn.

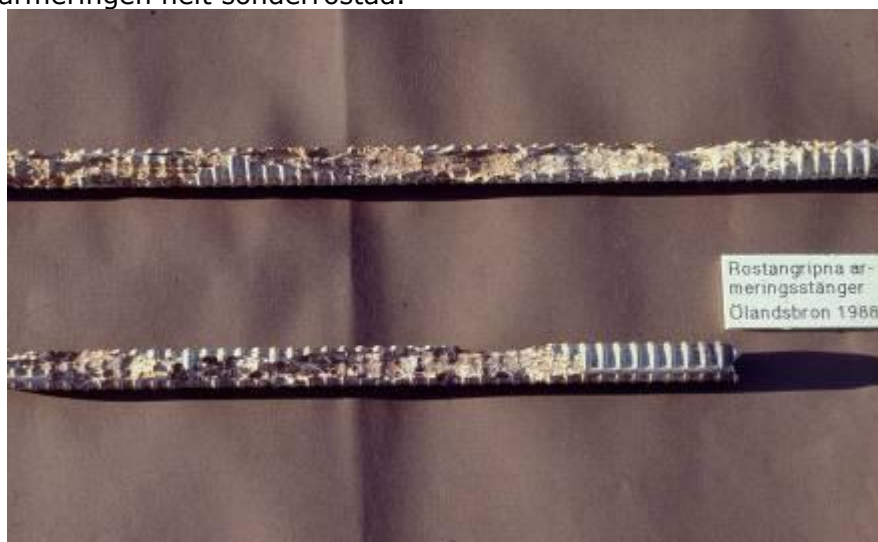
4.1 Ölandsbron

Ölandsbron, som byggdes 1968-72 är en av Europas längsta broar med sin längd av 6072 meter. Den korsar Kalmarsund och förbinder Öland vid Färjestaden med fastlandet i Kalmar. Ölandsbron är en betongbalkbro som består av en högbrodel, med 8 spann om 130 meter spännvidd, över Kalmarsunds djupränna samt på ömse sidor om denna en lågbrodel med sammanlagt 147 spann om 35 meter spännvidd. Högbrodelarnas konsolutbyggnad, lådformade spännbetongöverbyggnad är fast inspänd i de glidformsgjutna pelarna. Lågbrodelarnas kontinuerliga slakarmerade överbyggnad byggdes med hjälp av lanseringsbara formställningvagnar. I broöverbyggnaderna och i de större pelarna användes betong av hög kvalitet. Underbyggnaden till lågbrodelarna består av platsgjutna pelare, placerade på undergjutna bottenplattor, se Figur 28. Dessa pelare drabbades av beständighetsproblem, bland annat genom korrosion på armeringen såväl ovan som under vattenlinjen. Betonghållfasthetsklassen K30 användes med ett vattencementtal som varierade mellan 0,6 och 0,7. Vid tidpunkten för bronns byggande ansåg ledande betongexperter att den låga salthalten i det bräckta vattnet Kalmarsund (ca 0,4 % klorider) inte innebar någon risk för framtida beständighetsproblem. Huvudsakligen användes därför det bräckta vattnet till blandningen av betongen för dessa pelare.



Figur 28 Ölandsbrons lågbrodel

Vid okulära inspektioner med dykare av lågbrodelens bropelare konstaterade att det förekom slumpvis kraftiga rostutfällningar på betongpelarnas ytor långt under vattenytan. Vid upphuggning av de rostfärgade betongytorna konstaterades kraftigt korroderade kamstänger, Figur 29. I en del fall var armeringen helt sönderrostad.



Figur 29 Korrosionsskadade kamstänger från Ölandsbron.

Upptäckten av pågående armeringskorrosion flera meter under vattenytan kom som en överraskning för betongexpertisen, vars tidigare åsikt var att armeringen inte korroderar i betong under vattenytan på grund av brist på

syrgas. Orsaken till de omfattande korrosionsskadorna under vattenytan är för närvarande inte känd.

4.2 Göteborgs hamn

Göteborgs hamn är Skandinaviens och Sveriges största hamn med en handelsvolym på 39,9 miljoner ton (2006). Hamnen är en kombinerad flod- och kusthamn, med en total kajlängd av ca 13 km, Figur 30.



Figur 30 En mindre del av Älvsborgshamnen som är en del av Göteborgs hamn.

För närvarande pågår stora renoveringsarbeten av flera kajer i Göteborgs hamn på grund av bland annat korrosionsproblem. Kraftiga korrosionsangrepp har konstateras på både armeringen till kajdäck och på armeringen till armerade betongpålar utsatta för havsvatten. Kraftiga korrosionsskador har framför allt påträffas på betongpålar och undersida kajdäck, se Figur 31 och Figur 32.



Figur 31 Korrosionsskador på armering till betongpåle över vattenytan (foto Göteborgs hamn).



Figur 32 Kraftiga korrosionsskador på armering till undersida kajdäck. (foto Göteborgs hamn).

Av resultaten från inspektioner under vattenytan av korrosionstillståndet hos bland annat armerade betongpålar till kajerna i Göteborgs hamn framgick det att många armerade betongpålar hade slumpvis kraftiga korrosionsskador långt under vattenytan, Figur 33.

Vid upphuggning av de rostfärgade betongytorna på pålarna framgick det att armeringen var kraftigt korroderad och i vissa fall var armeringen helt sönderrostad. Det förekom även omfattande korrosionsskador på armeringen under icke rostfärgade betongytor. Dessa korrosionsskador var lokaliserade i håligheter i betongen som troligtvis uppkommit vid tillverkningen av betongpålen.



Figur 33 Rostutfällning på betongyta till armerad betongpåle under vattenytan (foto Göteborgs hamn)

Orsaken till korrosionsskadorna på armerade betongpålar lokaliserade långt under vattenytan är ännu inte klarlagd.

Det bör dock noteras att många av betongpålarna är idag försedda med ett mekaniskt nötningsskydd (sk. isskydd). Isskyddet består av en tunn plåt av syrafast rostfritt stål som är monterad runt pålen, se Figur 34. Om den rostfria stålplåten vid monteringen till pålen oavsiktligen kommer i kontakt med pålens armering finns en stor risk att armeringen, i blottlagda skador, under vattenytan kommer att utsättas för galvanisk korrosion. Samtidigt som den rostfria plåten påverkar armeringen galvaniskt kommer den rostfria plåten att skyddas katodiskt av stålarmeringen (fungerar som offeranod) under vattenytan.



Figur 34 Betongpålar med isskydd av syrafast rostfritt stål i Göteborgs Hamn. Isskydden är kraftigt korroderade på plåtkanten ovasida.

5 Modellering av korrosionsmekanismer med COMSOL

COMSOL är ett multifysikprogram som kan användas för att göra modellberäkningar på en mängd olika system. Det har här använts i de fall då en enkel teoretisk överläggning inte har räckt till för att avgöra om korrosionsmekanismen i fråga kan ha betydelse. Följande fall har undersökts med COMSOL-modellering:

- Tunna täckskikt och urlakad betong
- Luftningscell i en vattenlinje
- Fuktgradient i betong (fuktig insida / torr utsida)

För att kunna göra beräkningarna krävs indata, dvs fysikaliska och elektrokemiska parametrar. Följande fenomen har beaktats:

- Fukttransport i betong (vattenmättnadsgrad)
- Diffusion av syrgas i torr, torr/fuktig och fuktig betong
- Resistivitet för torr, torr/fuktig och fuktig betong
- Elektrokemiska parametrar för järnupplösning och syrgasreduktion i betong

I det följande går vi först igenom de olika typerna av indata innan de olika typfallen behandlas.

Viktigt att beakta är att syftet med modelleringarna inte har varit att få fram absoluta värden på korrosionshastigheter. Avsikten har istället varit att få fram kvalitativt jämförbara storleksordningar för olika korrosionsmekanismer.

5.1 Indata

5.1.1 Fukttransport

Vattenmättnadsgraden (S) är den parameter som används i modellen för att beskriva betongens fukthalt. $S = 0$ betyder att betongen är helt uttorkad och $S = 1$ betyder att alla porer är vattenfyllda. Vattentransporten kan i princip beskrivas med Fick's lag där den effektiva "diffusionskoefficienten" beskriver både ren diffusion i ångfas och kapillärsugning i vätskefas. Gradienten kan antingen uttryckas som ånghalt eller fukthalt. Det har antagits att jämviktsfukthalten, som bestäms av materialets förhistoria och absorptions- och desorptionsisotermerna, är linjär, dvs att

$$S = Rh/100$$

där Rh är den relativa fuktigheten. I fallen för luftningscell i vattenlinje och fuktgradient i betong har förenklade linjära stationära uttryck för S som en

funktion av geometrin antagits, inga beräkningar för fördelningen av S har således gjorts även om detta i princip skulle vara möjligt. Dessa antaganden diskuteras mer under respektive fall.

5.1.2 Syrgasdiffusion

I luft är diffusionskonstanten för syrgas (D_{O_2}) $1.78 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. I torr betong ($S=0$) behöver D_{O_2} i luft multipliceras med betongens porositet (P), vilken har antagits vara 0.08. Detta ger att D_{O_2} i torr betong är $1.42 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. I vattenmättad betong beror D_{O_2} på flera parametrar, till exempel vattencementtalet (vct). Ngala (8) anger D_{O_2} i vattenmättad betong för $vct = 0.5$ till $1.04 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, vilket är det värde som använts i beräkningarna. När betongen vare sig är helt torr eller vattenmättad utan någonstans där emellan behövs en ekvation för hur D_{O_2} beror av S . För att kunna ta fram en sådan ekvation behövs en förenklad porbeskrivning. Figur 35 visar en beskrivning av två extremfall.



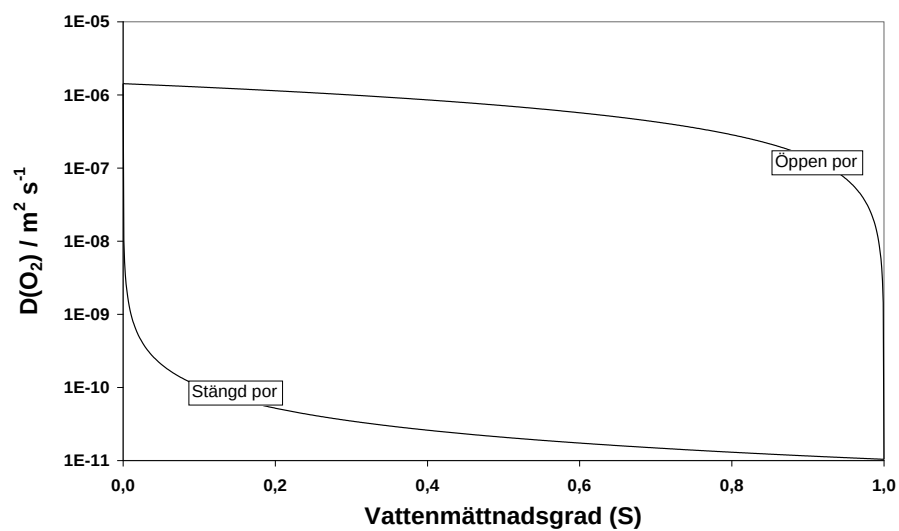
Figur 35 Två pormodeller för syrgasdiffusion visande helt öppen (vänster) och stängd (höger) por.

Fick's lag ger för dessa fall att (härledning redovisas ej)

$$D_{O_2}(S) = D_{O_2,S=1}S + D_{O_2,S=0}(1-S), \text{ öppen por}$$

$$D_{O_2}^{-1}(S) = D_{O_2,S=1}^{-1}S + D_{O_2,S=0}^{-1}(1-S), \text{ stängd por}$$

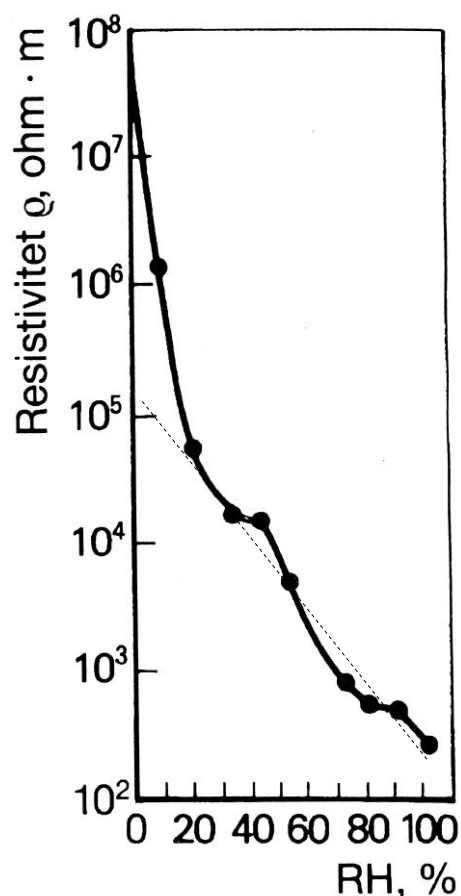
Dessa uttryck kan närmast jämföras med parallell- och seriekoppling av resistanser. De redovisas grafiskt i Figur 36. Som figuren visar ger fallet öppen por den högsta diffusionskoefficienten och det är detta uttryck som använts i modellberäkningarna.



Figur 36 Diffusionskonstant för syrgas som funktion av vattenmättnadsgrad.

5.1.3 Resistivitet

Resistiviteten för betong, ρ , beror också av vattenmättnadsgraden. Figur 37 visar resistiviteten som en funktion av den relativa fuktigheten.



Figur 37 Resistivitet som funktion av fuktighet (betonghandbok, sida 658). Den streckade linjen visar den förenklade modell som använts i COMSOL-beräkningarna.

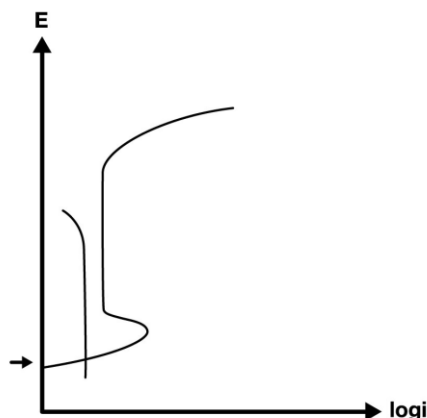
Enligt ovan har det antagits att $S = Rh/100$ vilket betyder att Figur 37 kan användas för att ta fram ett enkelt samband mellan resistivitet och vattenmättnadsgrad

$$\rho(S) = \rho_{S=0}^{1-S} \rho_{S=1}^S$$

Där $\rho_{S=0} = 1.7 \times 10^5 \Omega\text{m}$ och $\rho_{S=1} = 2.1 \times 10^2 \Omega\text{m}$. Eftersom värdet på $\rho_{S=1}$ är relativt högt har också en känslighetsanalys genomförts med ett alternativt värde $\rho_{S=1} = 1.0 \times 10^1 \Omega\text{m}$.

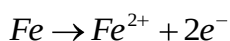
5.1.4 Elektrokemiska parametrar

Elektrokemiska parametrar har använts i fallet vattenlinje och fuktgradient. I fallet tunna täckskikt och urlakad betong har det antagits att syrgasdiffusionen är helt begränsande och i detta fall behövs inga elektrokemiska parametrar, se Figur 38, som är en upprepad version av en av figurerna i inledningen.



Figur 38 Korrosionspotential vid låg syrehalt.

Hänsyn tas till två reaktioner, järnupplösning (oxidation) och syrgasreduktion.



anodreaktion



katodreaktion

Hastigheten för dessa reaktioner uttrycks som en strömtäthet, i , i A m^{-2} . Strömtätheten för dessa båda reaktioner kan beskrivas med tafelsambanden

$$i_{\text{Fe}} = i_{0,\text{Fe}} 10^{\frac{E - E_{\text{Fe}}^0}{\beta_{a,\text{Fe}}}}$$

$$i_{\text{O}_2} = -i_{0,\text{O}_2} \frac{c_{\text{O}_2}}{c_{\text{O}_2}^0} 10^{-\frac{E - E_{\text{O}_2}^0}{\beta_{c,\text{O}_2}}}$$

där $c_{\text{O}_2}^0 = 0.25 \text{ mol m}^{-3}$ är syrgaskoncentrationen i luftat vatten

(standardtillståndet för syrgaskoncentrationen). När c_{O_2} är liten, och

följaktligen $E \ll E_{\text{O}_2}^0$, närmar sig i_{O_2} gränsströmtätheten $i_{\text{O}_2,\text{lim}}$ (den vertikala delen av den katodiska kurvan i Figur 38. Kranc and Sagüés (9) har angett värden enligt följande, vilka är de som använts

$$i_{0,\text{Fe}} = 3 \times 10^{-4} \text{ A m}^{-2}$$

$$i_{0,O_2} = 1 \times 10^{-6} \text{ A m}^{-2}$$

$$E_{Fe}^0 = -0.78 \text{ V}$$

$$E_{O_2}^0 = 0.16 \text{ V}$$

$$\beta_{a,Fe} = 0.06 \text{ V}$$

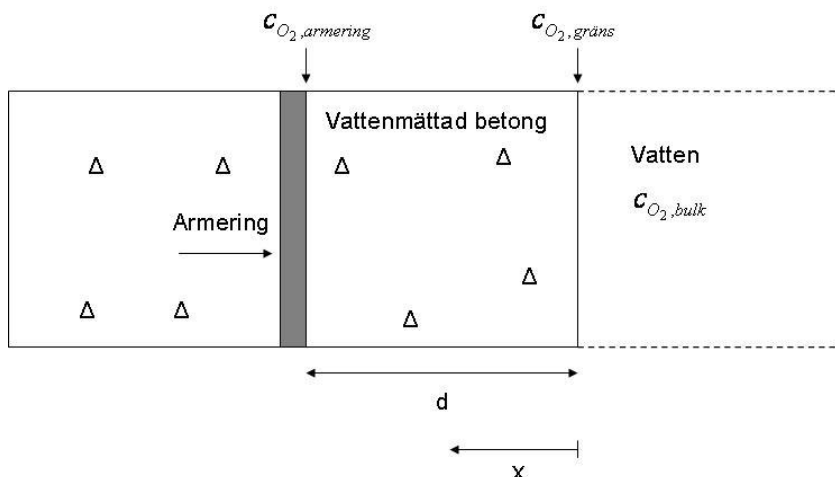
$$\beta_{c,O_2} = 0.10 \text{ V}$$

5.2 Tunna täckskikt

Diffusionskonstanten för syrgas (se 5.1.2) är extremt låg när betongen är vattenmättad ($1.04 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$). Detta betyder att syrgasdiffusionen är helt begränsande. Om stålets passivitet har brutits på grund av höga kloridhalter i betongen bestäms korrosionshastigheten på armeringen av diffusionshastigheten för syrgas fram till armeringen. Om täckskiktet är tunt, det vill säga diffusionsvägen kort, skulle möjligtvis ändå signifikanta korrosionshastigheter kunna uppnås. Syftet med fallet tunna täckskikt är att utreda om de förhöjda korrosionshastigheter som uppnås vid tunna täckskikt i vattenmättad betong är försumbara eller inte. Innan de tvådimensionella COMSOL-beräkningarna redovisas beskrivs en förenklad modell i en dimension för att på så sätt gå igenom de gjorda antagandena.

5.2.1 Förenklad modell i en dimension

Figur 39 visar en bild av syrgasens väg fram till armering i en dimension (x-led)



Figur 39 Diffusion av syrgas i en dimension. Täckskiktets tjocklek är d .

Vattnet utanför betongen har en syrgaskoncentration lika med den i luftat vatten.

$$c_{O_2, bulk} = c_{O_2}^0 = 0.25 \text{ mol m}^{-3}$$

Betongen antas vara helt vattenmättad och syrgaskoncentrationen vid gränsen betong/vatten antas vara lika med porlösningens syrgaskoncentration vid gränsen ($x = 0$). Vid armeringen konsumeras syrgas i korrosionsprocessen och syrgaskoncentrationen är därför lägre än den vid

gränsen. När det uppstår koncentrationsgradienter bildas det ett flöde av syrgas mot armeringen.

Flödet av syrgas beräknas med Fick's första lag:

$$N_{O_2,x} = -D_{O_2} \frac{dc_{O_2}}{dx}$$

Där $N_{O_2,x}$ ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) är molflödet av syrgas längs x-axeln. Minustecknet beskriver att diffusion alltid sker från en region med hög koncentration till en region med lägre koncentration. Med användande av symboler från Figur 39, och om vi antar att koncentrationsgradienterna är linjära,

$$\frac{dc_{O_2}}{dx} = \frac{\Delta c_{O_2}}{\Delta x}$$

blir

$$N_{O_2,x} = -D_{O_2} \frac{c_{O_2,armering} - c_{O_2,gräns}}{d}$$

Om vi antar att allt syre som når armeringen förbrukas direkt och vidare att vattenhastigheten är så stor så att syrgastransporten i den rena vattenfasen inte är begränsande fås

$$c_{O_2,armering} = 0$$

$$c_{O_2,gräns} = c_{O_2,bulk}$$

$$N_{O_2,x} = D_{O_2} \frac{c_{O_2,bulk}}{d} = D_{O_2} \frac{c_{O_2}^0}{d}$$

Som nämndes i inledningen är diffusionskonstanten lika med $1.04 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$. Om vi vidare antar att systemet är i "steady-state", dvs att den anodiska strömmen är lika stor som den katodiska fås



anodreaktion



katodreaktion



total reaktion

Den totala reaktionen ger att molflödet av järn måste då vara dubbelt så stor som molflödet av syrgas, nämligen:

$$N_{\text{Fe}} = 2N_{O_2,x}$$

När flödet av järn är bestämt kan en korrosionshastighet, r , beräknas enligt:

$$r = N_{Fe,x} \frac{M_{Fe}}{\delta_{Fe}} = 2D_{O_2} \frac{c_{O_2}^0}{d} \frac{M_{Fe}}{\delta_{Fe}}$$

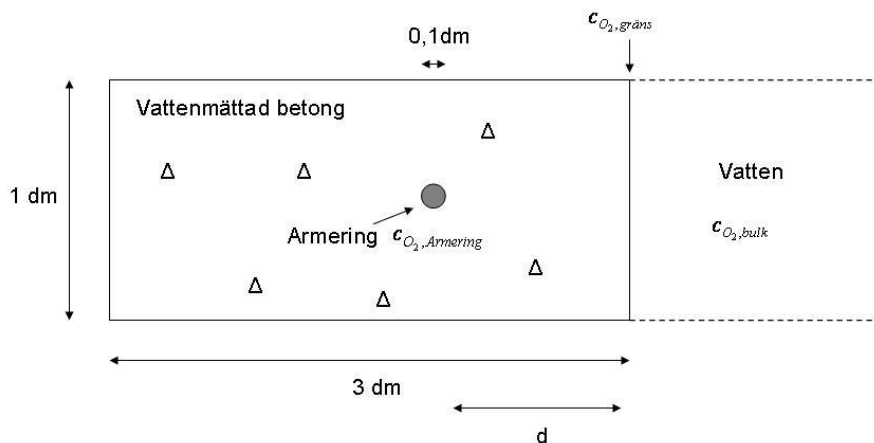
där M_{Fe} är järns molmassa, 55.9 g mol^{-1} och δ_{Fe} är järns densitet, 7.9 g cm^{-3} . Detta ger

$$r = 2 \cdot 1.04 \cdot 10^{-11} \frac{0.25}{(d/m)} \frac{55.9}{7.9 \times 10^6} \text{ m s}^{-1} = \frac{3.7 \times 10^{-17} \text{ m s}^{-1}}{(d/m)} = \frac{0.12 \mu\text{m a}^{-1}}{(d/cm)}$$

Detta betyder att i det endimensionella fallet korrosionshastigheten är $0.12 \mu\text{m a}^{-1}$ om täcksiktets tjocklek är 1 cm (eller $1.2 \mu\text{m a}^{-1}$ om täcksiktets tjocklek är 1 mm).

5.2.2 Tvådimensionell modell

Modellens geometri visas i Figur 40 och är en rektangel med kortsidorna $0,1 \text{ m}$ och långsidorna $0,3 \text{ m}$. I rektangeln finns en cirkel som motsvarar armeringen som har en diameter 1 cm . Modellen beaktar molflödet av syre i två dimensioner, där sträckan d varierar mellan 2 och 12 cm . Syrgasflödet till armeringen sker från hela gränssytan och dessa areaförhållanden gör att diffusionen av syrgas blir större än i det endimensionella fallet. Förutom geometrin är alla andra antaganden desamma som i det endimensionella fallet.



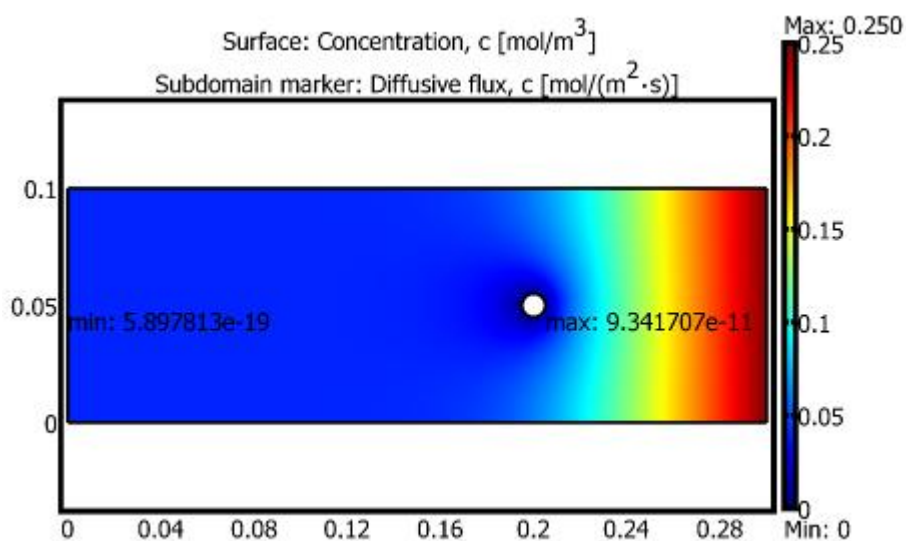
Figur 40 Tvådimensionell geometri för fallet tunna täcksikt.

5.2.2.1 Randvillkor

Geometrins sidor (Figur 40) har olika randvillkor. Alla sidorna utom den som gränsar mot vattnet är isolerade, dvs inget syre kan diffundera igenom dessa gränser. På cirkelns yta är koncentrationen av syre lika med noll. På sidan som utgör gränsen mellan betong och vatten är koncentrationen av syre lika med $c_{O_2}^0$ på samma sätt som i det endimensionella fallet.

5.2.2.2 Resultat

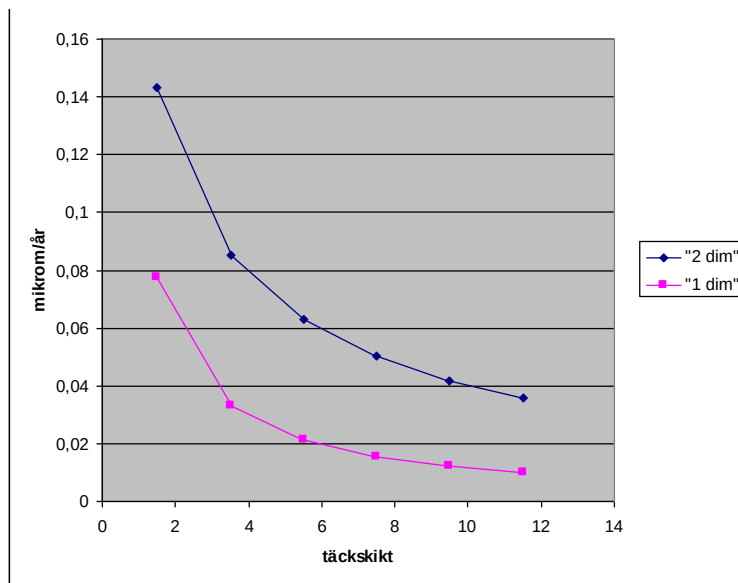
Figur 41 visar ett exempel på resultat från en tvådimensionell beräkning. Det högsta flödet uppträder vid armeringens yta som ligger närmast gränsen betong/vatten.



Figur 41 Koncentrationen av syre i betongen samt det högsta och lägsta flödet av syrgas

5.2.3 Jämförande av resultat och diskussion

För att undersöka korrosionshastigheter med olika täckskikt, har olika geometrier konstruerats där armeringen flyttats längre från vattengränsen. Korrosionshastigheten plottas med olika täckskikt i två respektive en dimension i Figur 42. Korrosionshastigheten i två dimensioner är högre än den i en dimension pga av att anodytan är relativt sett mindre än i det endimensionella fallet. Båda korrosionshastigheterna är dock mycket låga vilket överensstämmer med vad som är förväntat.



Figur 42 Korrosionshastigheten i μm per år mot täcksiktets tjocklek i cm.

5.2.4 Vattenhastighet

Vattenhastigheten påverkar syrgaskoncentrationen vid gränsytan betong/vatten. Nära betongytan avtar vattenhastigheten pga vattnets viskösa egenskaper. Dessutom minskar koncentrationen av syre ($C_{O2\text{bulk}} > C_{O2\text{gräns}}$). I denna modell antas att koncentrationen av syre vid betongytan är lika stor som bulkkoncentrationen, vilket i praktiken betyder att vi antagit en väldigt hög vattenhastighet. Bulkkoncentrationen är lika stor som syrekoncentrationen i luftat vatten. En lägre vattenhastighet skulle medföra en lägre syrgaskoncentration vid gränsytan betong/vatten och följaktligen en lägre korrosionshastighet, vilken redan i det förra fallet var försumbar.

5.2.5 Slutsatser

Modellering har visat att korrosionshastigheter är låga på armering i vattenmättad betong, även vid tunna täcksikt, vilket överensstämmer med litteratur. Korrosionshastigheten är högre vid modellering i två dimensioner än en dimension pga bidraget från en större yta, men är ändå försumbar, ungefär $0.1 \mu\text{m} \text{ år}^{-1}$ vid ett täcksikt på 2 cm.

Vid ett lägre vattenflöde utanför betongen så sjunker vattnets flödes hastighet och syrgaskoncentration närmast betongen. Därför skulle korrosionshastigheten vid ett realistiskt vattenflöde vara ännu mindre och innebär ingen risk.

5.3 Urlakad betong

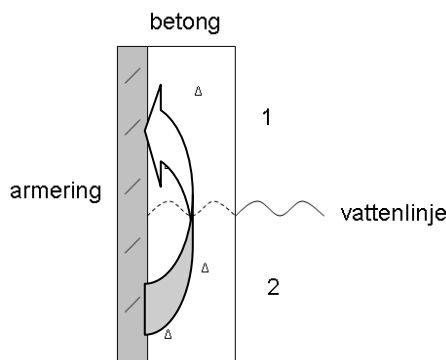
Fallet urlakad betong liknar det för tunna täckskikt i så måtto att betongen anses vattenmättad och diffusionen är begränsande. Skillnaden är att diffusionskonstanten för syrgas i urlakad betong kan vara högre. I detta fall är korrosionshastigheten direkt proportionell mot diffusionskonstanten vilket betyder att, om ett värde på diffusionskonstanten i urlakad betong specificeras kan, den diffusionsbegränsande korrosionshastigheten uppskattas enligt

$$r_{urlakad} = r_{täckskikt} \frac{D_{O_2,urlakad}}{D_{O_2,täckskikt}}$$

där $r_{täckskikt}$ är enligt Figur 42 och $D_{O_2,täckskikt} = 1.04 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

5.4 Luftningscell i vattenlinjen

I vattenlinjen sker en anrikning av kloridjoner och därmed en tidigare initiering än på övriga delar av betongkonstruktionen. Den goda tillgången på syre ovanför vattenlinjen medför en hög propageringshastighet. Primärt medför detta angrepp i den utsatta delen men kan eventuellt även påskynda angrepp på djupare liggande delar av konstruktionen genom att en så kallad luftningscell bildas (katodprocess ovanför vattenlinjen och anodprocess under vattenlinjen), se Figur 43



Figur 43 Fallet luftningscell i vattenlinje.

Under vattenlinjen, (2), är tillgången till syre låg. Vattnet utanför betongen antas som tidigare ha en syrekonzentration på 0.25 mol m^{-3} som motsvaras av syrekonzentrationen i luftat vatten. Diffusionen av syre fram till armeringen går här långsamt eftersom diffusionskonstanten för syre i vattenmättad betong är låg. Betongens resistivitet är däremot låg under vattenlinjen.

Ovanför vattenlinjen, (1), så sugas en del vatten upp i betongen kapillärt. I denna modell antas vattenmättnadsgraden avta linjärt från total vattenmättnad ($S=1$) i vattenlinjen till torr betong ($S=0$) på ett avstånd av 0.1 m ovanför vattenlinjen. Diffusionskonstanten för syre i luft är högre än i vatten (se 5.1.2). Därför är tillgången på syre god ovanför vattenlinjen. Betongens resistivitet ökar å andra sidan ju torrare betongen blir.

Reaktionerna som sker på armeringsytan antas vara järnupplösning och reduktion av syrgas enligt 5.1.4. Eftersom det bara kan ske en elektrokemisk reaktion om vi har tillgång till vatten måste vattenmättnadsgraden tas i beaktande för de elektrokemiska uttrycken (jämför 5.1.4).

$$i_{Fe} = i_{0,Fe} S 10^{\frac{E - E_{Fe}^0}{\beta_{a,Fe}}}$$

$$i_{O_2} = -i_{0,O_2} S \frac{c_{O_2}}{c_{O_2}^0} 10^{-\frac{E-E_{O_2}^0}{\beta_{c,O_2}}}$$

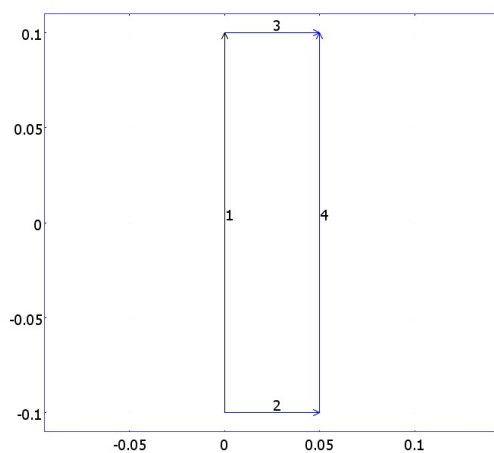
$$i = i_{Fe} + i_{O_2}$$

Modellen består av två moduler i COMSOL, en diffusionsmodul som räknar ut syrgaskoncentrationen och en modul ("conductive media") som räknar ut strömmar och spänningar. Mängden syrgas som konsumeras vid armeringen, N_{O_2} (mol m⁻² s⁻¹), är direkt proportionell mot den katodiska strömmen

$$N_{O_2} = \frac{i_{O_2}}{4F}$$

5.4.1 Geometri

Modellens geometri visas i Figur 44. Den utgörs av en rektangel med kortsidorna 0,05 m och långsidorna 0,2 m. Vattenlinjen går vid $y = 0$. Sidan 1 motsvarar gränsen mellan armering/betong och sidan 4 gränsen mellan betong och vatten. Geometrin avgränsas mellan sidorna 2 och 3 som har randvillkoren isolering.



Figur 44 Geometri med numrering av sidor för fallet vattenlinje

Som nämnts tidigare har ett uttryck för vattenmättnadsgraden antagits ($y_0 = 0.1$ m)

$$S = \begin{cases} 1 & ; y \leq 0 \\ 1 - \frac{y}{y_0} & ; y > 0 \end{cases}$$

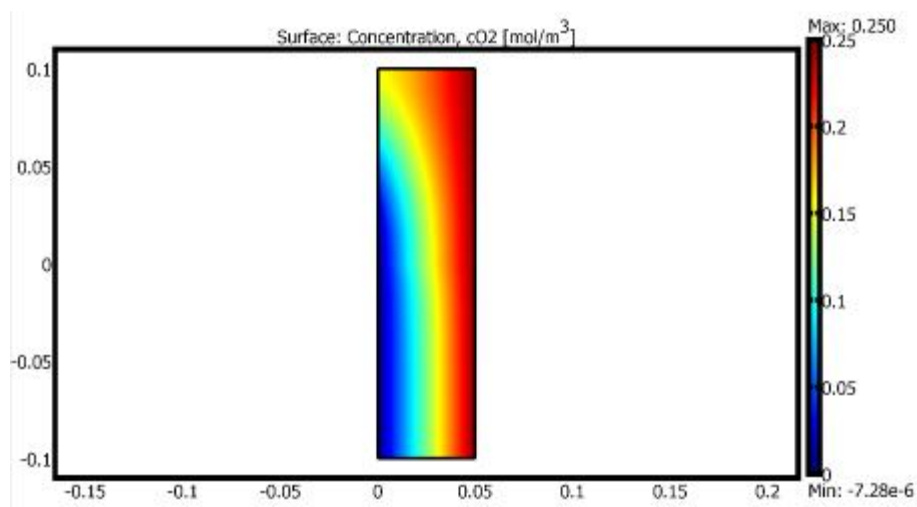
Uttrycket för S blir 1 för alla negativa y (under vattenlinjen) och avtar linjärt från 1 till 0 längs den positiva y -axeln. Uttrycket för diffusionskonstanten för syrgas är enligt 5.1.2 (öppen por). Uttrycket för resistiviteten är enligt 5.1.3 med två olika värden på den fuktiga betongens resistivitet ($\rho_{S=1}$) på $2.1 \times 10^2 \Omega m$ och $1.0 \times 10^1 \Omega m$.

5.4.2 Randvillkor

För modulen "conductive media" är sidorna 2-4 isolerade och sidan 1 beskrivs av den totala strömmen (i) enligt ovan. För diffusionsmodulen är sidorna 2 och 3 isolerade. Sida 1 har randvillkoret att flödet av syrgas in till armeringen beskrivs av N_{O_2} enligt ovan. Vid sidan 4 är syrgaskoncentration lika med $c_{O_2}^0$ (0.25 mol m^{-3}).

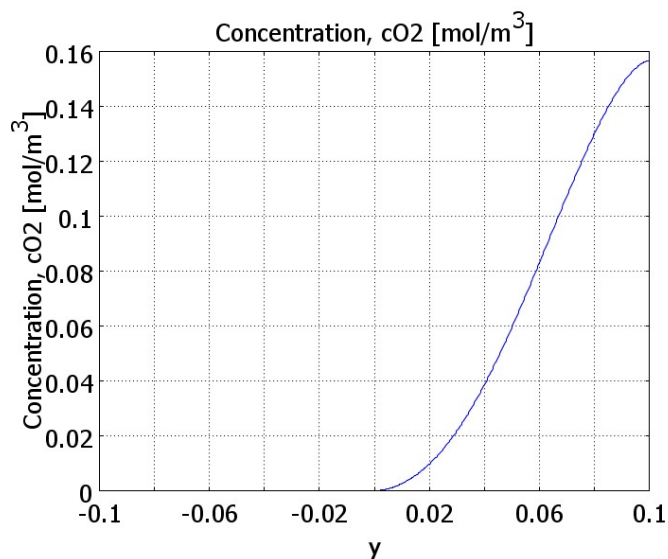
5.4.3 Resultat och diskussion

Koncentrationen av syrgas i betongen visas i Figur 45.



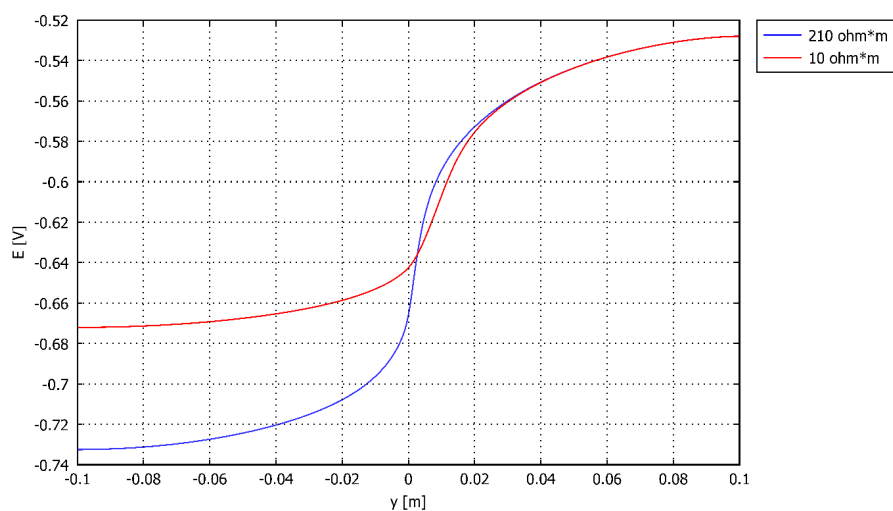
Figur 45 Koncentration av syrgas ($\rho_{S=1} = 2.1 \times 10^2 \Omega m$)

Vid gränsytan mot luft/vatten är koncentrationen 0.25 mol m^{-3} . Vid gränsytan mot armeringen är den i princip försumbar under vattenlinjen (all syrgas konsumeras) och ovanför vattenlinjen är den en funktion av avståndet från vattenlinjen. Ovanför vattenlinjen ökar koncentrationen pga snabbare diffusion och all syrgas hinner inte reduceras. Figur 46 visar endast syrgaskoncentrationen vid gränsytan mot armeringen. I fortsättningen visas endast endimensionella grafer för gränsytan mot armeringen.



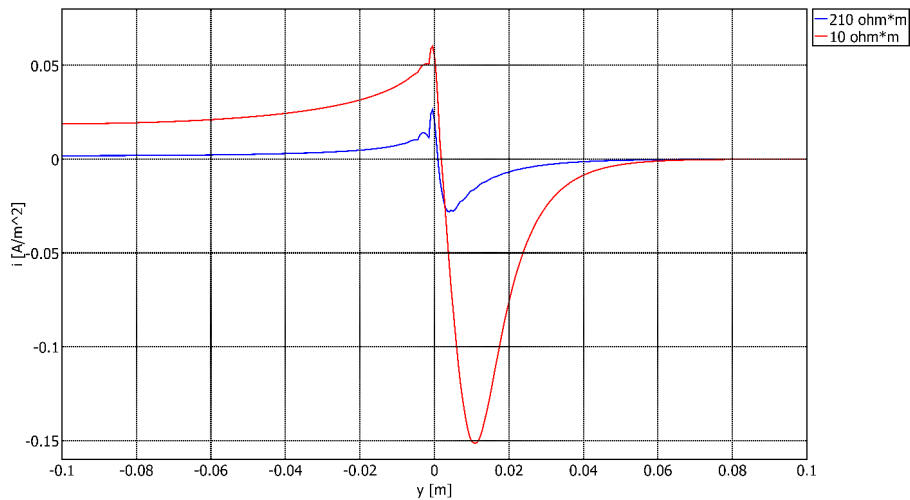
Figur 46 Syrgaskoncentrationen vid gränsytan mot armeringen.

Figur 47 visar elektrodpotentialen, E , över armeringsytan. Under vattenlinjen är potentialen lägre än över vattenlinjen. Två olika fall har visats, ($\rho_{S=1} = 2.1 \times 10^2 \Omega\text{m}$ och $\rho_{S=1} = 1.0 \times 10^1 \Omega\text{m}$) och dessa fall återkommer i de följande diagrammen. Vid en lägre resistivitet i betongen ökar potentialen under vattenlinjen pga en högre makroström.



Figur 47 Elektrodpotential (E vs SCE) som funktion av y vid armeringen.

Den totala strömdensiteten över armeringsytan visas i Figur 48. Under vattenlinjen är totalströmmen positiv (anodisk) och över negativ (katodisk).

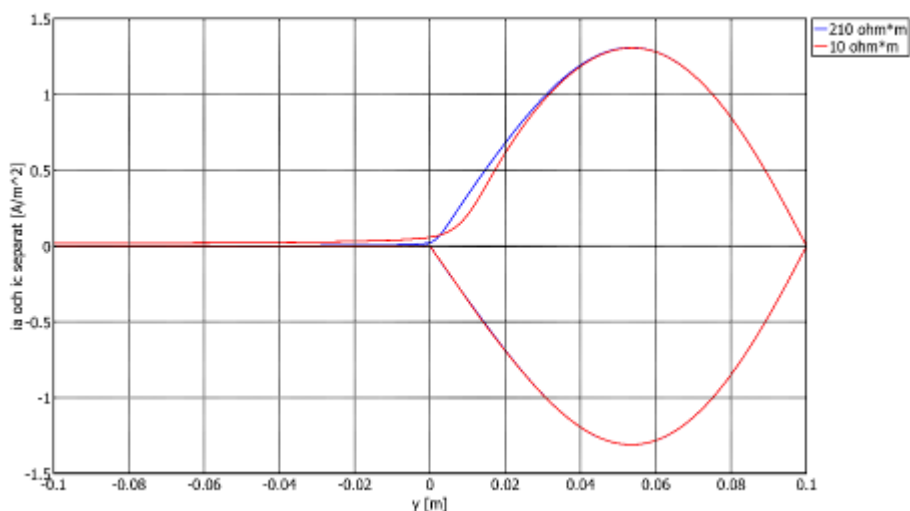


Figur 48 Totalström (i) som funktion av y vid armeringen.

En anodisk ström på 1 A m^{-2} ($i_{\text{Fe}} = 1 \text{ A m}^{-2}$) kan räknas om till en korrosionshastighet för järn enligt

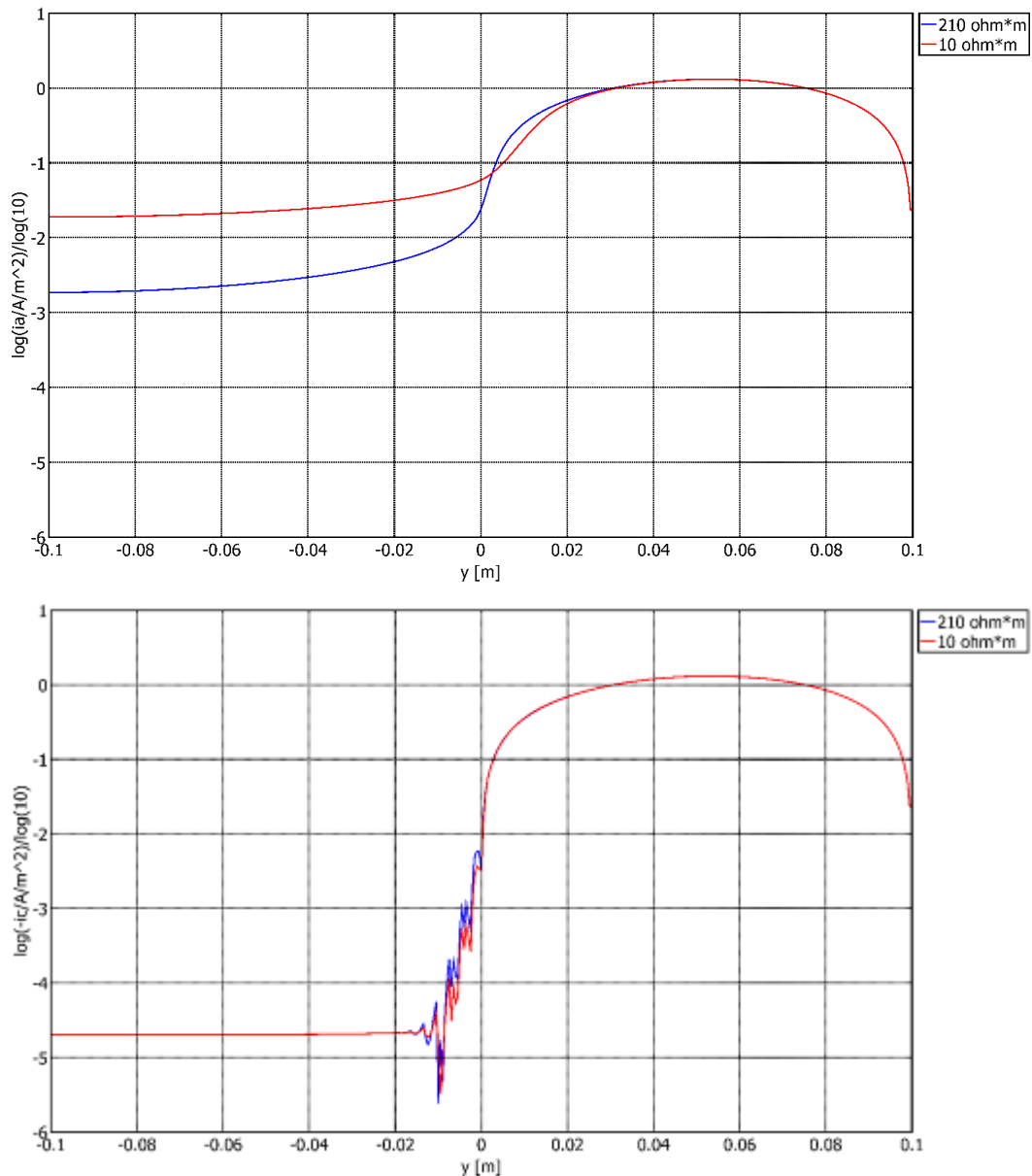
$$r_{\text{Fe}} = N_{\text{Fe}} \frac{M_{\text{Fe}}}{\delta_{\text{Fe}}} = \frac{i_{\text{Fe}}}{2F} \frac{M_{\text{Fe}}}{\delta_{\text{Fe}}} = 1.16 \text{ mm år}^{-1}.$$

Med andra ord, 1 A m^{-2} motsvarar ungefär 1 mm år^{-1} . Mer intressant än den totala strömmen är att undersöka de anodiska och katodiska delströmmarna separat (Figur 49).



Figur 49 Anodisk (positiv) och katodisk (negativ) delström som funktion av y vid armeringen.

Både den anodiska och katodiska strömmen är kraftigt högre över vattenlinjen. Den högsta anodiska strömmen uppnås vid ca $y = 0.055$ och är 1.3 A m^{-2} eller 1.5 mm per år . Detta tyder på att den största korrosionsrisken är ovanför vattenlinjen där förhållandet är optimalt med tillräcklig vattenmättnadsgrad och tillgång på syre. I Figur 49 är det dock svårt att se vad som händer under vattenlinjen vid de olika fallen. Därför har delströmmarna också plottats på en logaritmisk skala i Figur 50.

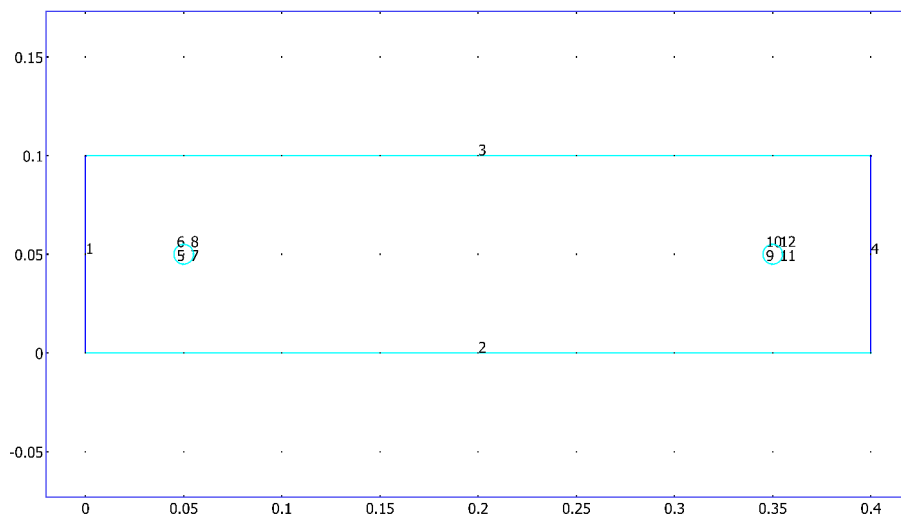


Figur 50 Anodisk (övre) och katodisk (undre) delström (logaritmisk skala) som funktion av y vid armeringen.

Den katodiska delströmmen är oberoende av resistiviteten i betongen och beror bara av syrgastransporten. Den katodiska gränsströmtätheten (i_{lim}) under vattenlinjen är $2.0 \times 10^{-5} \text{ A m}^{-2}$ vilket är 20 gånger högre än utbytesströmtätheten (i_0) som är $1.0 \times 10^{-6} \text{ A m}^{-2}$. Att den anodiska delströmmen är högre än detta värde under vattenlinjen beror på makroströmmen (0.002 och 0.02 A m^{-2} motsvarande 2 och $20 \mu\text{m}$ per år för fallen 210 och $10 \Omega\text{m}$).

5.5 Fuktgradient i betong

Fuktgradient i betong kan uppstå vid en tunnel med vatten där betongens ena sida är våt och den andra är torr. Figur 51 visar geometrin.



Figur 51 Geometri för fallet fuktgradient i betong (avstånd i m).

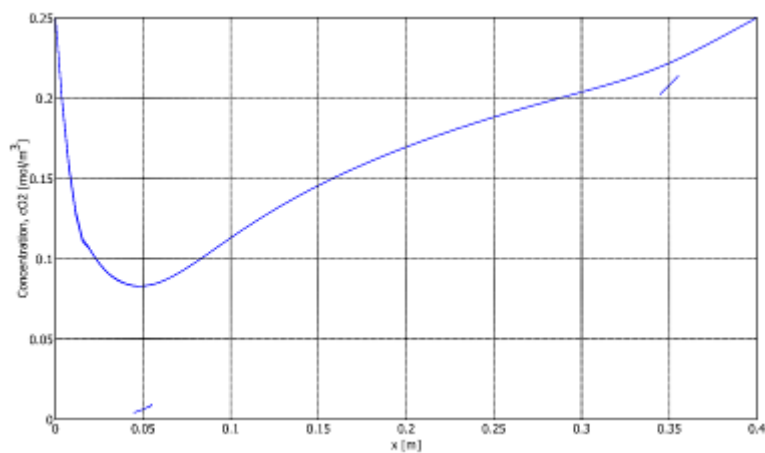
Sidan 1 är fuktig och sidan 4 är torr. Uttrycket för vattenmättnad som använts är ($x_0 = 0.4\text{m}$)

$$S = 1 - \frac{x}{x_0}$$

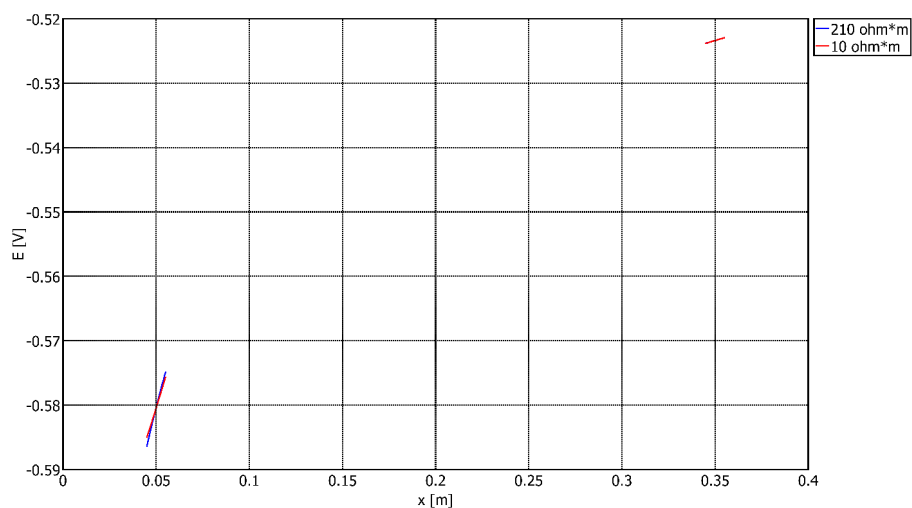
Annars är ekvationerna lika med de för fallet vattenlinje.

För modulen "conductive media" är sidorna 1-4 isolerade och sidorna 5-12 beskrivs av den totala strömmen (i) enligt ovan. För diffusionsmodulen är sidorna 2 och 3 isolerade. Sidorna 5-12 har randvillkoret att flödet av syrgas in till armeringen beskrivs av N_{O_2} enligt ovan. Vid sidorna 1 och 4 är syrgaskoncentration lika med $c_{O_2}^0$ (0.25 mol m^{-3}).

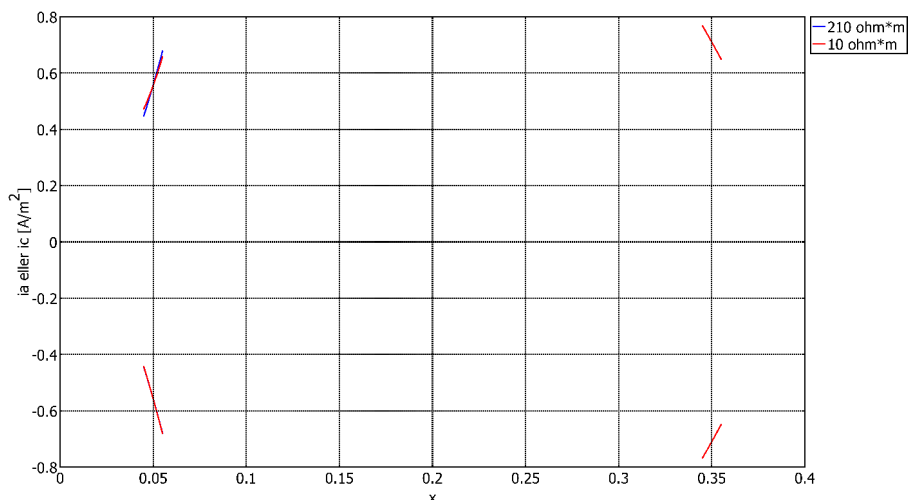
Koncentrationen av syrgas i betongen visas i Figur 52, potentialen i Figur 53 och delströmmarna i Figur 54. En jämförelse med fallet vattenlinje ger att kurvorna är väldigt lika om man jämför med den delen som ligger ovanför vattenlinjen. I Figur 49 ser man strömmarna som funktion av vattenmättnad medan i Figur 54 bara de segment där armeringen ligger kan visas. Den maximala korrosionshastigheten borde också i detta fall vara ungefär 1 mm per år som motsvarar en position på armeringen som ligger någonstans mellan de två som visas i Figur 51.



Figur 52 Syrgaskoncentrationen som funktion av x . Den heldragna linjen motsvarar sidorna 2 och 3 och de två segmenten motsvarar sidorna 5-12 (armeringen).



Figur 53 Potential som funktion av x på sidorna 5-12 (armeringen)



Figur 54 Anodiska och katodiska delströmmar som funktion av x på sidorna 5-12 (armeringen).

5.6 Slutsatser

Modelleringen av de olika fallen resulterade i följande korrosionshastigheter. Som påtalats tidigare ska beräknade värden inte tolkas absolut utan endast för jämförande ändamål.

Tunna täckskikt	0.1 μm per år
Vattenlinje	1 mm per år
Fuktgradient i betong	1 mm per år

Korrosionshastigheterna är låga på armering i vattenmättad betong, även vid tunna täckskikt. Korrosionshastigheten är högre vid modellering i två dimensioner än en dimension pga bidraget från en större yta, men är ändå försumbar. Vid ett lägre vattenflöde utanför betongen så sjunker vattnets flödes hastighet och syrgaskoncentration närmast betongen. Därför skulle korrosionshastigheten vid ett realistiskt vattenflöde vara ännu mindre och innebär ingen risk.

Inga beräkningar har gjorts på fallet urlakad betong men om ett värde på diffusionskonstanten i urlakad betong specificeras kan den diffusionsbegränsande korrosionshastigheten enkelt uppskattas baserat på resultaten för tunna täckskikt.

Korrosionshastigheterna ovanför vattenlinjen kan vara höga på grund av optimala förhållanden vad gäller syre- och vattentillgång. Makroströmmen är dock låg, motsvarande en korrosionshastighet mellan 2-20 μm per år beroende på resistiviteten i betongen. Fallet fuktgradient i betong liknar fallet vattenlinje och höga korrosionshastigheter kan fås både på inre och yttre järn. Makroströmmarna är också här låga och i samma storleksordning som i

fallet vattenlinje och det är i stället syre- och vattentillgång som avgör beroende på placering av järnet.

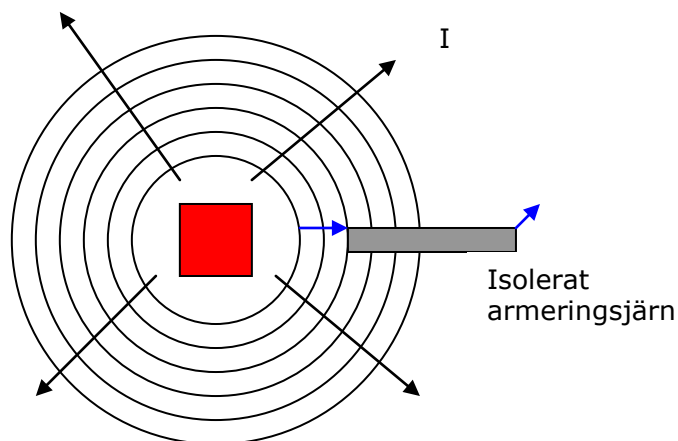
6 Beräkning av korrosionsrisker pga sekundärverkan från katodiska skydd

Galler, luckor och korgbandsilar samt i vissa fall pumpar i intag och kylvattenvägar skyddas med katodiskt skydd av typen påtryckt ström (Passavant). Kontroller i Barsebäck har visat att armeringen i betongen i princip alltid är i kontakt med dessa skyddade konstruktioner. I och med detta erhålls även ett skydd på armeringen i de till skydden närliggande delarna av betongväggarna.

Om någon del av armeringen är isolerad från övrig armering kan emellertid så kallad sekundärverkan uppstå dvs förhöjd korrosion pga läckström. Två olika typer av sekundärverkan kan särskiljas dels inverkan från anoden dels inverkan pga närhet till ett skyddat järn. I båda fallen orsakas påverkan av de gradientfält som bildas i vattnet/betongen runt anoden/det skyddade järnet.

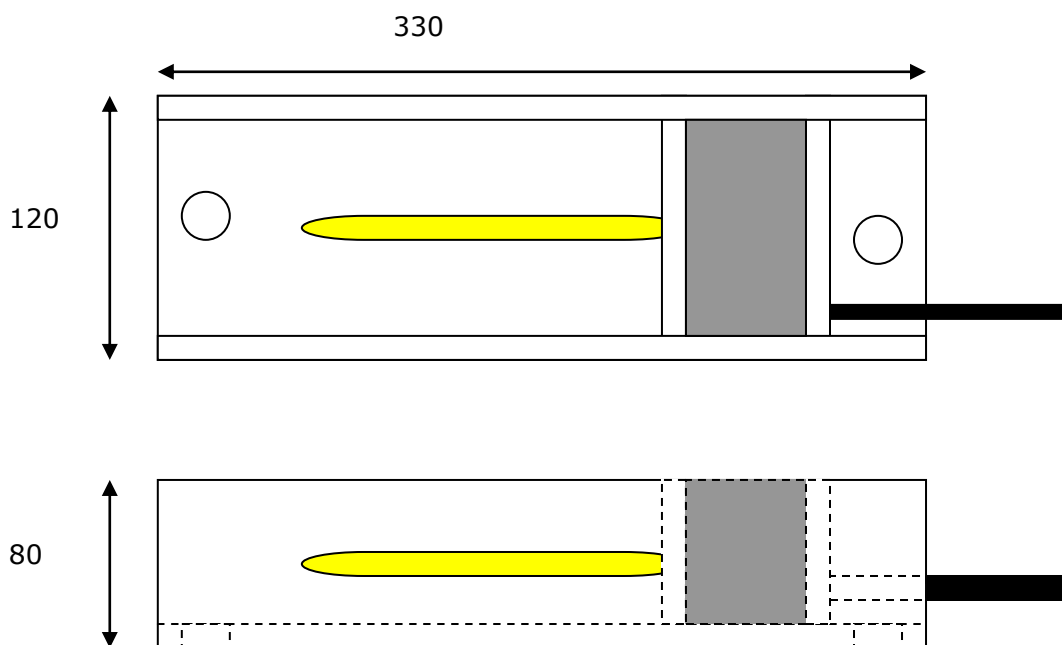
6.1 Anodiskt gradientfält

I närheten av anoderna uppkommer ett förhållandevis kraftigt elektriskt fält.



Figur 55 Isolerat armeringsjärn i gradientfält nära en anod

Anoderna sitter i de flesta fall monterade på betongväggarna i kylvattenvägarna. För att inte överskydda närliggande armering monteras anoderna, som vanligen är av platinerat titan eller niob, på en plastskärm, se figur på nästa sida.



Figur 56 Anod för påtryckt ström ingående i system levererade av Passavant

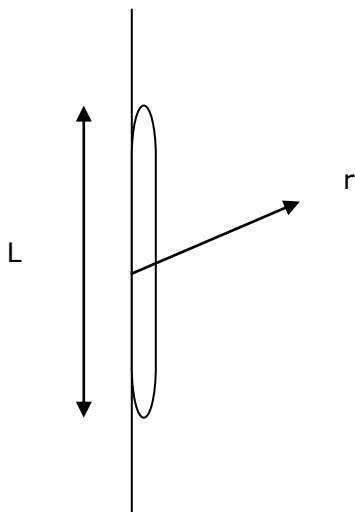
Oftast ligger strömutmatningen på ca 100-200 mA per anod. Vi antar en högsta ström av 500 mA. Det elektriska fältet runt "anodlådan" blir komplext varför vi ansatt ett minsta avstånd anod till betong till ca 120 mm och ett fält som svarar mot en stavformig anod monterad på väggen. Störst gradientfält uppstår vid högst vattenresistivitet. Vid Forsmark ligger resistiviteten på 1 Ωm . Fältet beräknas med följande formel:

$$U = \frac{I \cdot \rho}{\pi \cdot L} \ln \left(\frac{L}{2 \cdot r} + \sqrt{1 + \left(\frac{L}{2 \cdot r} \right)^2} \right)$$

I = utmatad ström från anod, A

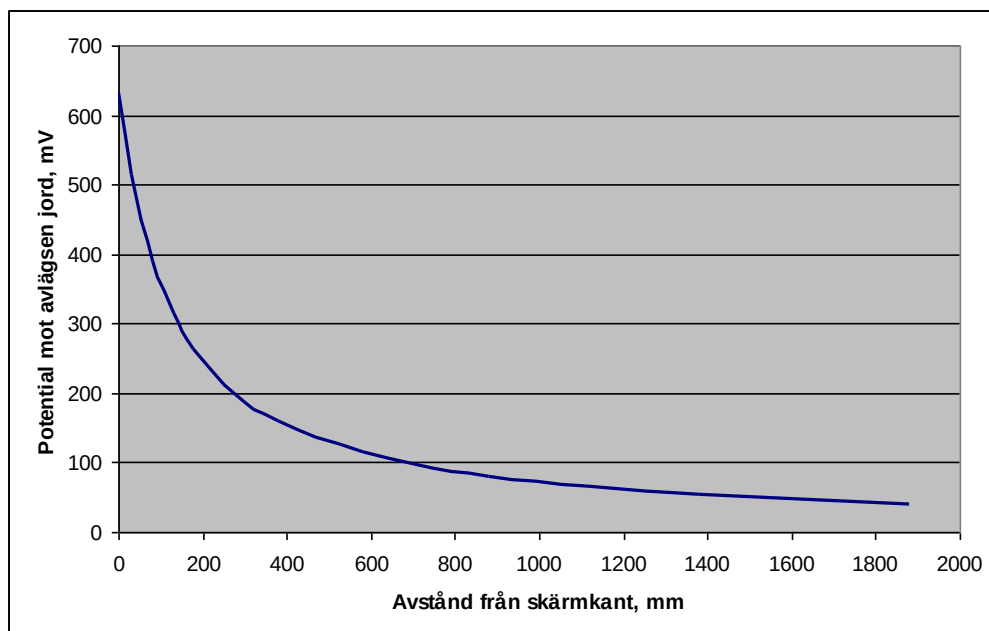
ρ = vattnets resistivitet, Ωm

Som svarar mot nedanstående geometri:



Figur 57 Geometri för beräkning av gradientfält kring en anod

Från anodskärmens kant och radiellt utåt uppstår följande potentialfall i vattnet.



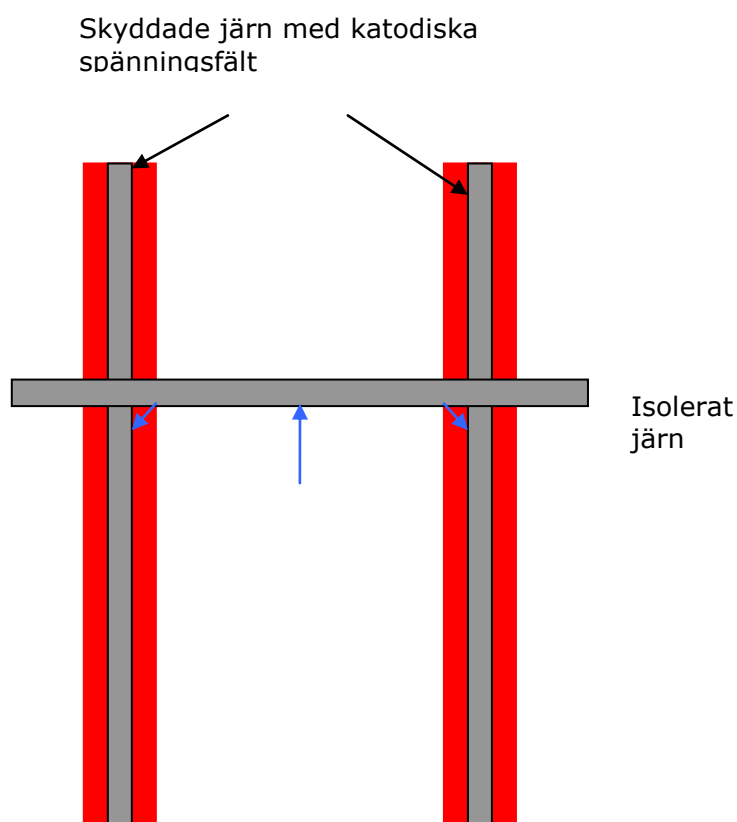
Figur 58 Potential relativt avlägsen jord som funktion av avståndet från anoden vid en strömutmatning på 500 mA i vatten med resistiviteten 1 Ωm

Potentialfallet i betongen torde vara av samma storleksordning som det i vattnet. Ett isolerat armeringsjärn vars ena ände ligger nära anoden kan i värsta fall bli exponerad för en potentialskillnad överstigande 500 mV. Normalt blir den katodiska polarisationen större än den anodiska men

konserverativt räknat skulle anodisk polarisering i positiv riktning på 250 mV kunna ske. Enligt den europeiska standarden EN 50162 anses skadlig påverkan föreligga på stål i betong om den anodiska potentialförändringen överstiger 200 mV.

6.2 Katodiskt gradientfält

Runt den skyddade armeringen uppstår ett katodiskt gradientfält till följd av att skyddsströmtätheten i betongen blir förhöjd nära den skyddade armeringen, se Figur 59 nedan.



Figur 59 Läckströmspåverkan på isolerat armeringsjärn pga närhet till katodiskt skyddade järn

Fältet kan beräknas med nedanstående formel:

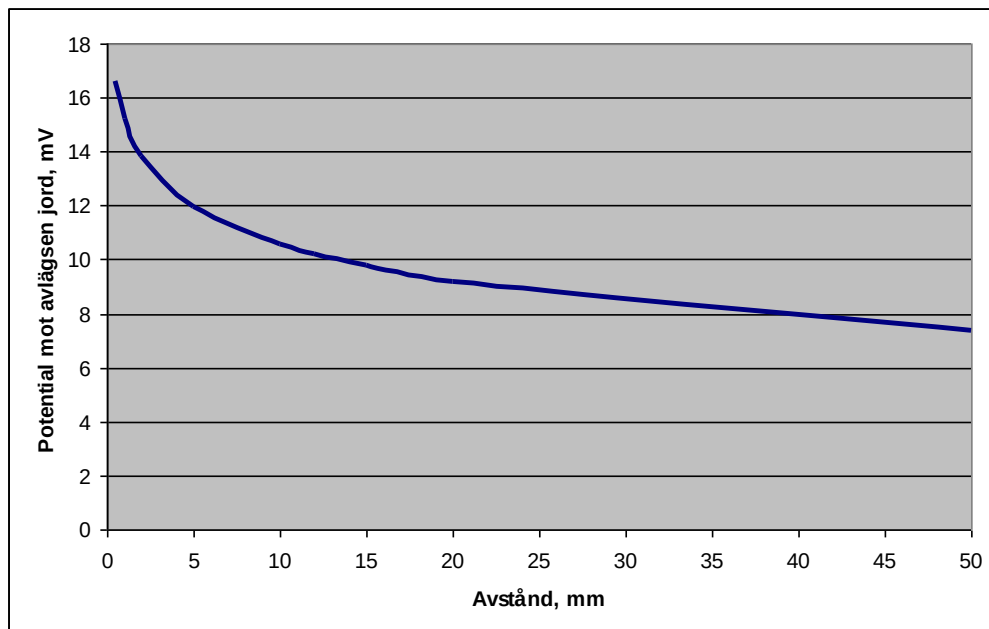
$$U = \frac{I \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \ln \left(\frac{L + \sqrt{L^2 + r^2}}{r} \right)$$

U = potentialen i en given punkt relativt avlägsen jord, V

I = ström, A
 ρ = betongens resistivitet, Ωm
 L = armeringsjärnets längd, m
 r = armeringsjärnets radie, m

Normalt projekteras katodiskt skydd av armering i vattenmättad betong utgående från ett strömbehov av 1 mA/m^2 (DNV-RP-B401). Låt oss anta en förhöjd strömtäthet på 5 mA/m^2 (konservativt). Resistiviteten i vattenmättad betong kan sättas till $100 \Omega\text{m}$.

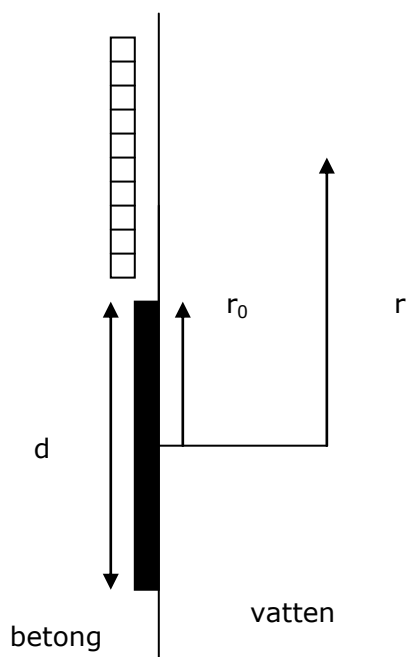
Vi räknar på ett armeringsjärn med längden 1m och radien 8 mm. Täcksiktet sätts till 50 mm. Gradienten är störst i betongen och blir försumbar i vattnet utanför betongytan. Från den skyddade armeringsytan och utåt erhålls nedanstående elektriska fält (Figur 60).



Figur 60 Potential mot avlägsen jord vid olika avstånd från ett katodiskt skyddat armeringsjärn i vattenmättad betong

Om vi antar att det isolerade järnet ligger mycket nära det skyddade järnet så exponeras detta för ett gradientfält som är mindre än 20 mV. Om detta fördelar sig som 10 mV katodisk polarisering där strömmen går in i det påverkade järnet och 10 mV anodisk polarisering där strömmen går ut så är detta en marginell påverkan.

Kraftigare gradientfält kan tänkas uppstå i närområdet till skyddade stålkonstruktioner som är direkt exponerade för vatten. Anta att vi har en cirkulär lucka av omålat kolstål med diametern 1,0 m, se Figur 61 nedan. Ett isolerat armeringsjärn ligger med ena änden i direkt anslutning till luckan.



Figur 61 Geometri för beräkning av gradientfält kring en cirkulär lucka

Fältet kan beräknas med nedanstående formel:

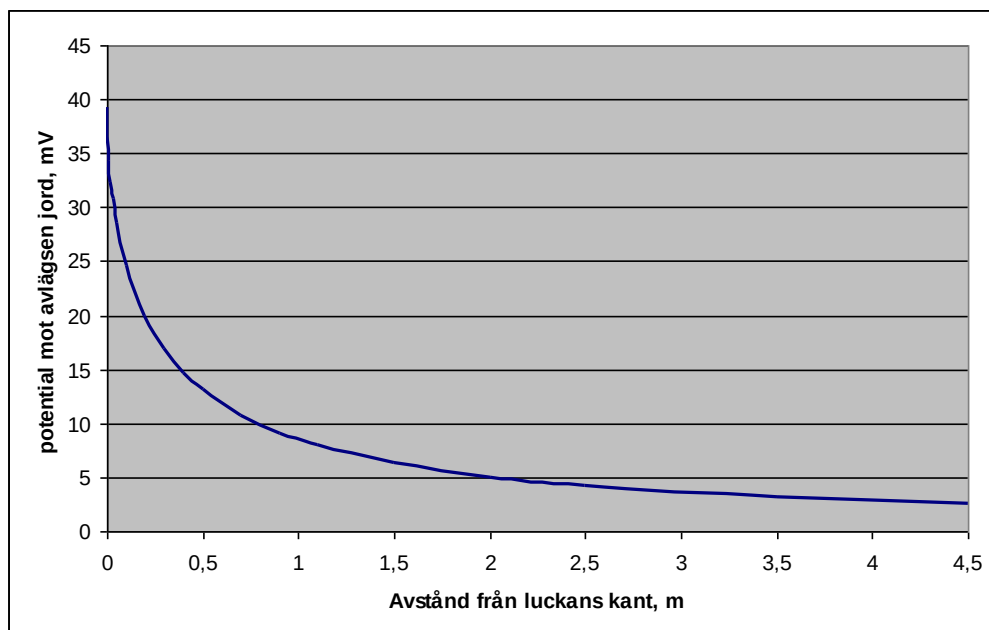
$$U = \frac{2}{\pi} U_0 \cdot \arcsin\left(\frac{r_0}{r}\right)$$

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot d}$$

$$U_0 = R \cdot I$$

Resistiviteten antas vara 1 Ωm . Strömbehovet kan sättas till 100mA/m² vilket ger en total skyddsström till luckan på 78,5 mA. $R = 0,5 \Omega$ och $U_0 = 39,25$ mV.

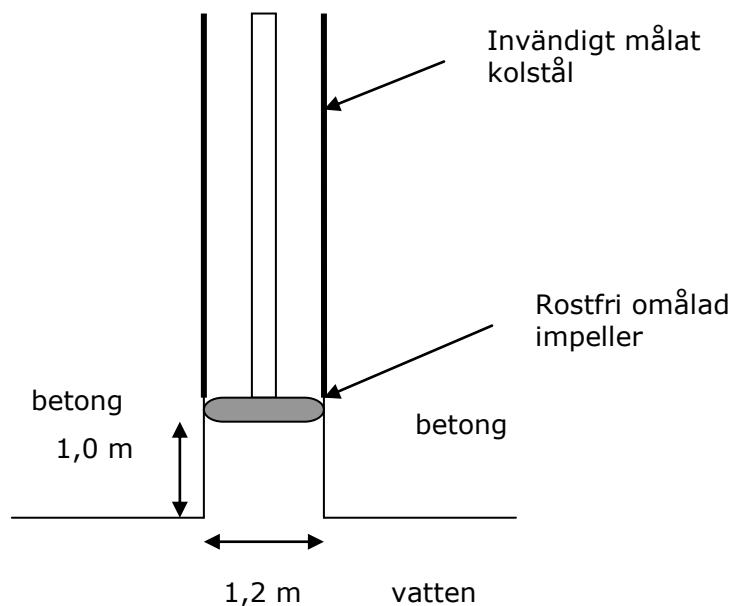
Fältet från luckans kant och utåt åskådliggörs av nedanstående diagram:



Figur 62 Potential mot avlägsen jord som funktion av avståndet från luckans kant

Inte heller detta fält torde skapa någon sekundärverkan av betydelse. Dessutom är i princip alltid luckor, galler mm målade vilket kraftigt reducerar strömbehovet och därmed det elektriska fältet.

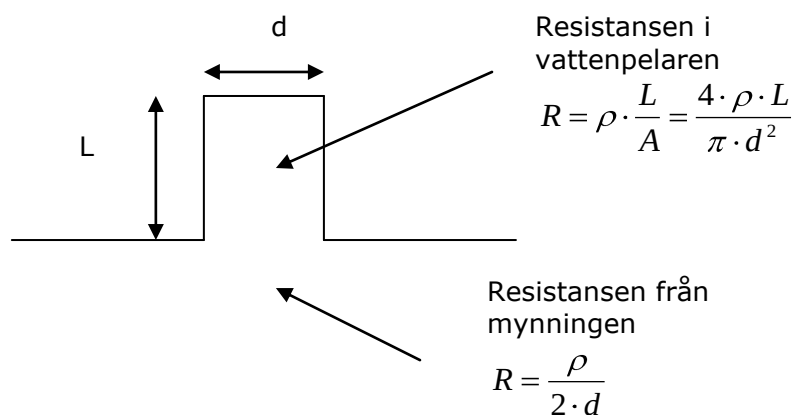
Högst strömtäthet erfordras vid hög flödeshastighet. Därför borde risken vara förhöjd vid t.ex. huvudkylvattenpumpar. Pumphuset är av kolstål och epoximålat. Impellern är dock av rostfritt stål och saknar troligen ytbeläggning. Pumparnas utformning varierar mellan de olika anläggningarna. I Forsmark 2 ser de i princip ut som i nedanstående figur (Figur 63).



Figur 63 Geometri för beräkning av gradientfält kring en pump

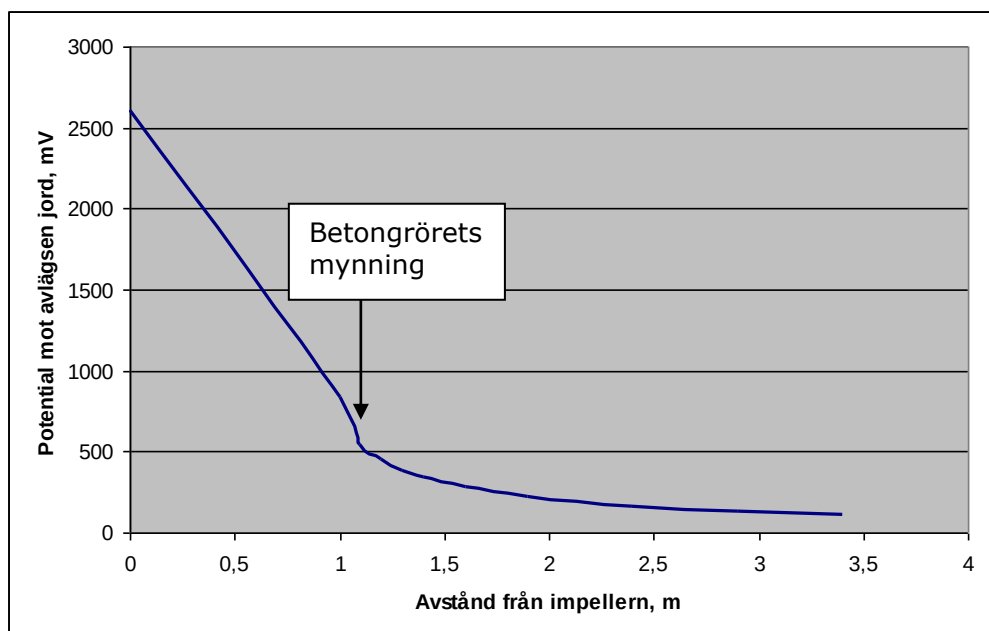
De anoder som sitter i kylvattenvägen närmast pumparna levererar den största delen av utmatad skyddström till de omålade impellrarna. En normal flödes hastighet är ca 5 m/s. Vid detta flöde krävs i storleksordningen 1 A/m^2 för att polarisera det rostfria ner till skyddspotentialen för kolstål, -800 mV rel. SCE, vilket krävs för att inte galvanisk korrosion ska uppstå på angränsande kolstålsytor. Vi har uppskattat impellerns rostfria yta exponerad mot vatten till ca 2 m^2 vilket ger ett totalt strömbehov på 2 A.

Impellerns övergångsmotstånd kan beräknas enligt nedan.



Figur 64 Delresistanser för beräkning av övergångsmotstånd från skyddad impeller

Resistansen i vattenpelaren blir 0,89 Ω och resistansen från mynningen och bortåt blir ca 0,42 Ω . Med avståndet från impellerns yta erhålls följande elektriska fält (vid 2A ström), Figur 65.



Figur 65 Potential mot avlägsen jord kring skyddad impeller i pump

Om ett isolerat armeringsjärn befinner sig betongrörets vägg blir det negativt påverkat.

Utgående från de gjorda beräkningarna kan vi således konstatera att det, vid närvaro av armeringsjärn som är isolerade från övrig armering, finns viss risk för sekundärverkan i närheten av anoder för påtryckt ström. Nära skyddade pumpar med omålade rostfria impellrar blir isolerade järn med stor säkerhet utsatta för läckströmspåverkan. Isolerade järn i övriga delar av kylvattenvägarna blir ej negativt påverkade av befintliga system med påtryckt ström. Isolerade järn erhåller dock inget eget katodiskt skydd.

7 Experimentell undersökning av risken för galvanisk korrosion

Stål i vattenmättad betong har en negativ potential. Varje förskjutning av potentialen i positiv riktning medför 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.

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.

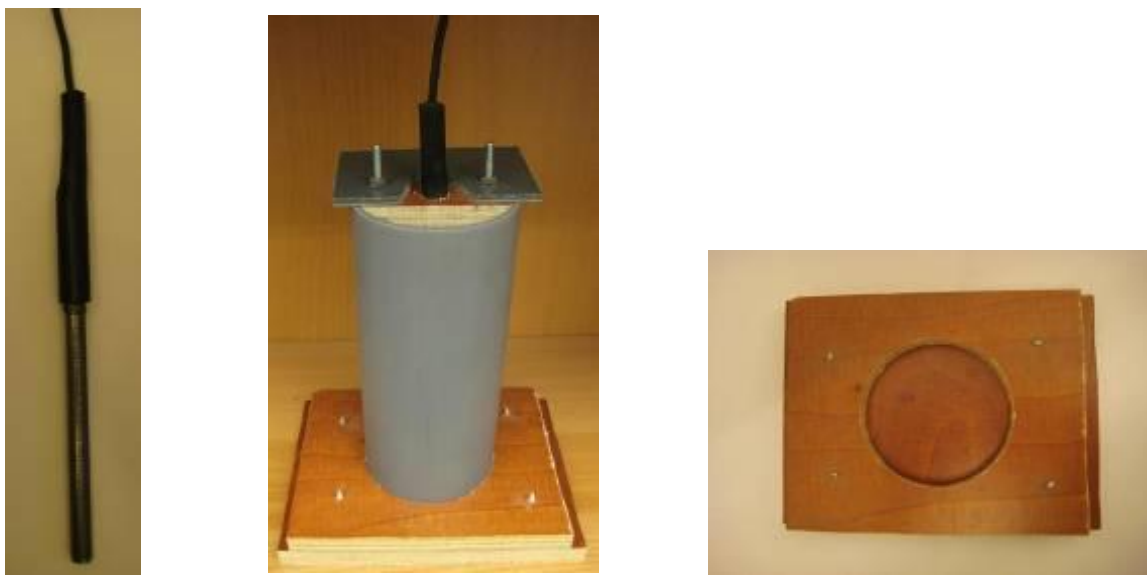
Vid armeringskorrosion i luftad betong ansamlas de voluminösa korrosionsprodukterna på armeringens yta vilket gör att täcksiktet spjälkas av redan efter ett begränsat angrepp. I vattenmättad betong har eventuellt järnjonerna större möjlighet att diffundera iväg från armeringen. Denna vandring av järnjoner borde dessutom öka om en yttre spänning ligger på. Genom att analysera halten järnjoner på olika avstånd från armeringen förväntades en indikation på detta fenomen kunna visas.

7.1 Utförande

9 st kolstålsstänger med en diameter av 8 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 10 cm motsvarande en yta av 26,52 cm².

Eftersom ett av syftena med undersökningen var att studera om järnjoner, frigjorda från korrosionsprocessen, vandrar i betongen valdes vit cement (låg halt järn i cementen). Torrbetongen hade en cementshalt på 25 % och en ballast 0-8 Dolomit från Sala. Enligt uppgift innehåller ballasten 0,5-0,7 % Fe₂O₃ bundet i silikatmineral. Betongen tillsattes 3 % klorider per cementvikt vid gjutningen och vct var 0,48.

Vid gjutningen användes ett pvc-rör med diametern 68 mm. Stången fixerades så att ett täcksikt på 30 mm erhöles, även till under och överkant, se Figur 66.



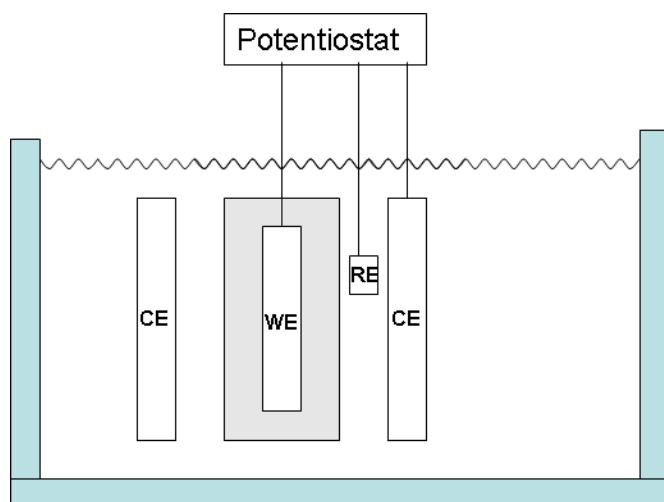
Figur 66 *Provstänger och gjutform.*

Proverna härdades under 28 dygn vid 20 °C och i 98 % relativ fuktighet.

Tre av proverna exponerades därefter i ett fuktskåp vid 85 % relativ fuktighet under 238 dygn.

Tre prover exponerades helt nedsänkta i ett vattenbad med 3 % NaCl under 238 dygn.

De resterande tre proverna exponerades även de i vattenbad med 3 % NaCl. Under de första 103 dygna lämnades de opåverkade. Efter uppmätning av stängernas korrosionspotentialer polariserades proven till tre olika potentialer nämligen -100, -300 respektive -500 mV relativt Ag/AgCl/sat.KCl, se Figur 67.



Figur 67 Försökuppställning vid polariseringsförsök.

Dessa polariseringar pågick under 81 dygn och strömutmatningen registrerades dagligen. Efter avslutad polarisering fick proven stå kvar i vattenbadet ytterligare 54 dygn.

Försöken har sammanfattats i nedanstående tabell (Tabell 2).

Tabell 2 Utförda försök och provernas märkning.

Betong ID	Stål ID	Exponering
9	1	238 dygn 85 % relativ fuktighet
8	2	238 dygn 85 % relativ fuktighet
11	8	238 dygn 85 % relativ fuktighet
1	3	238 dygn i 3 % NaCl
6	4	238 dygn i 3 % NaCl
10	10	238 dygn i 3 % NaCl
2	12	81 dygn i 3 % NaCl vid -100 mV (före och efter opolariserade i 3 % NaCl)
5	6	81 dygn i 3 % NaCl vid -300 mV (före och efter opolariserade i 3 % NaCl)
4	11	81 dygn i 3 % NaCl vid -500 mV (före och efter opolariserade i 3 % NaCl)

Efter 238 dygn avslutades således samtliga exponeringar. Prov på betongen, för analys av järninnehåll på olika djup, gjordes genom att hål borrades i täcksiktet till djupen 7, 14, 21 och 28 mm. Pulvret samlades in. Från varje borrhål togs 1 g pulver som lakades i 3 g ultrarent vatten under 5 timmar med intermitterent ultraljud. Lösningen filtrerades och analyserades med avseende på järn i atomadsorption.

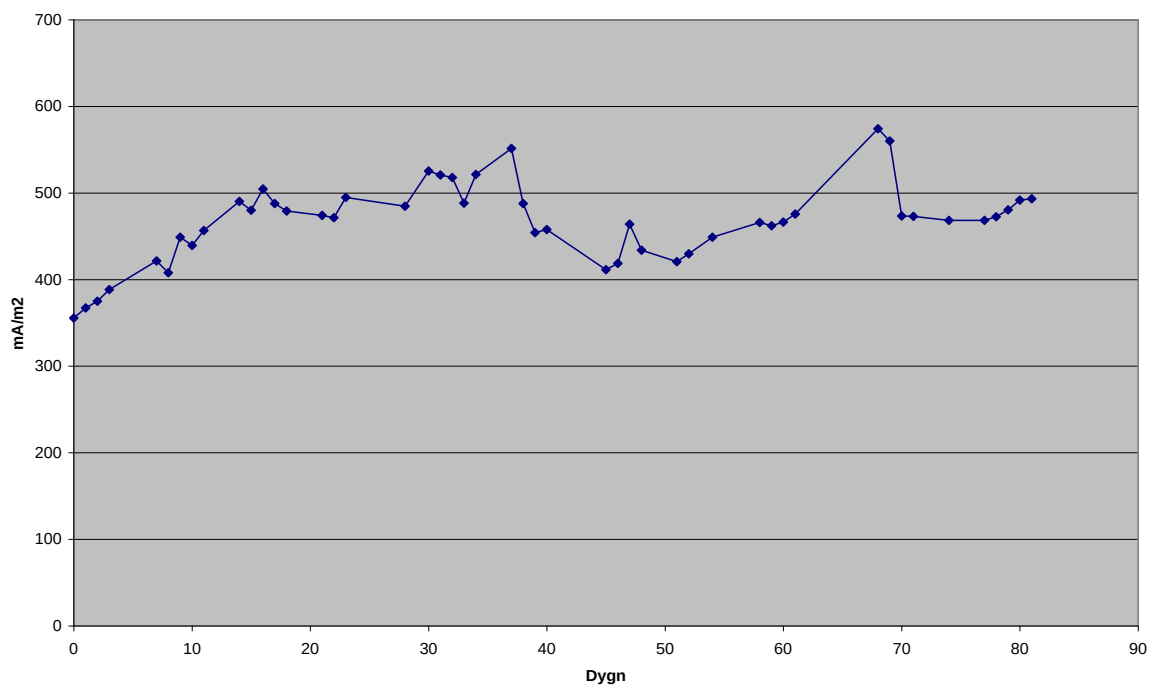
Provstängerna rengjordes från betong och viktsförlusten utvärderades genom upprepad betning i Clarkes lösning.

7.2 Resultat

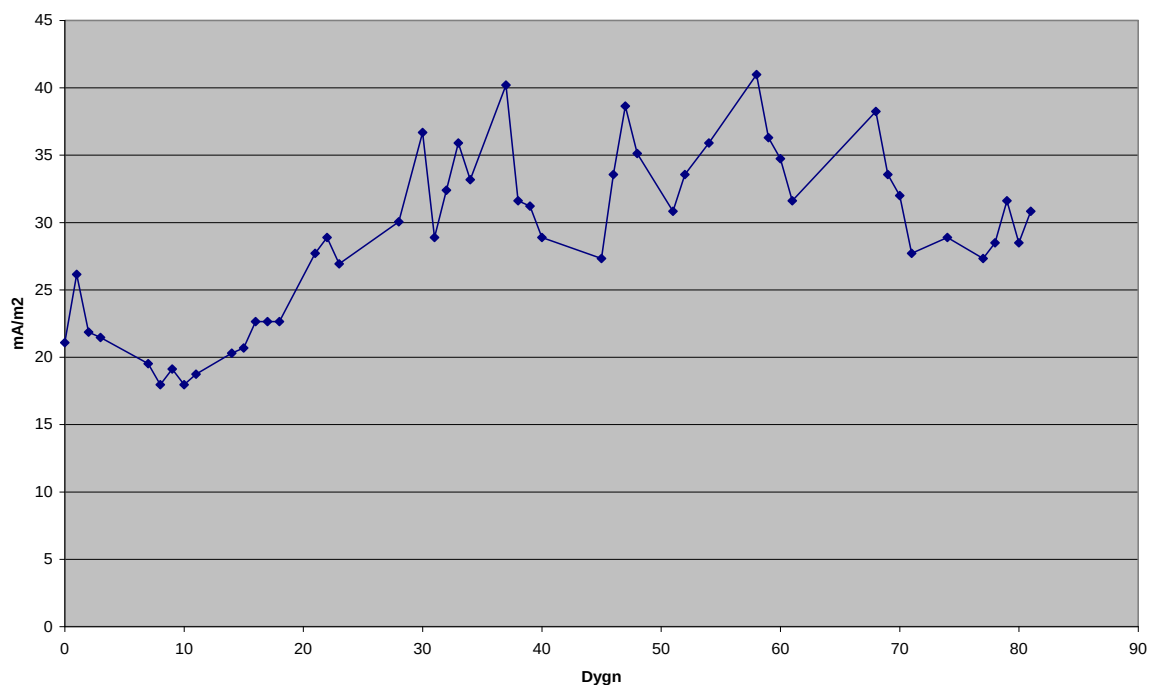
Efter 103 dygn uppmättes följande korrosionspotentialer

Prov för polarisering till -100 mV (stål ID 12)	-710 mV
Prov för polarisering till -300 mV (stål ID 11)	-631 mV
Prov för polarisering till -500 mV (stål ID 6)	-676 mV

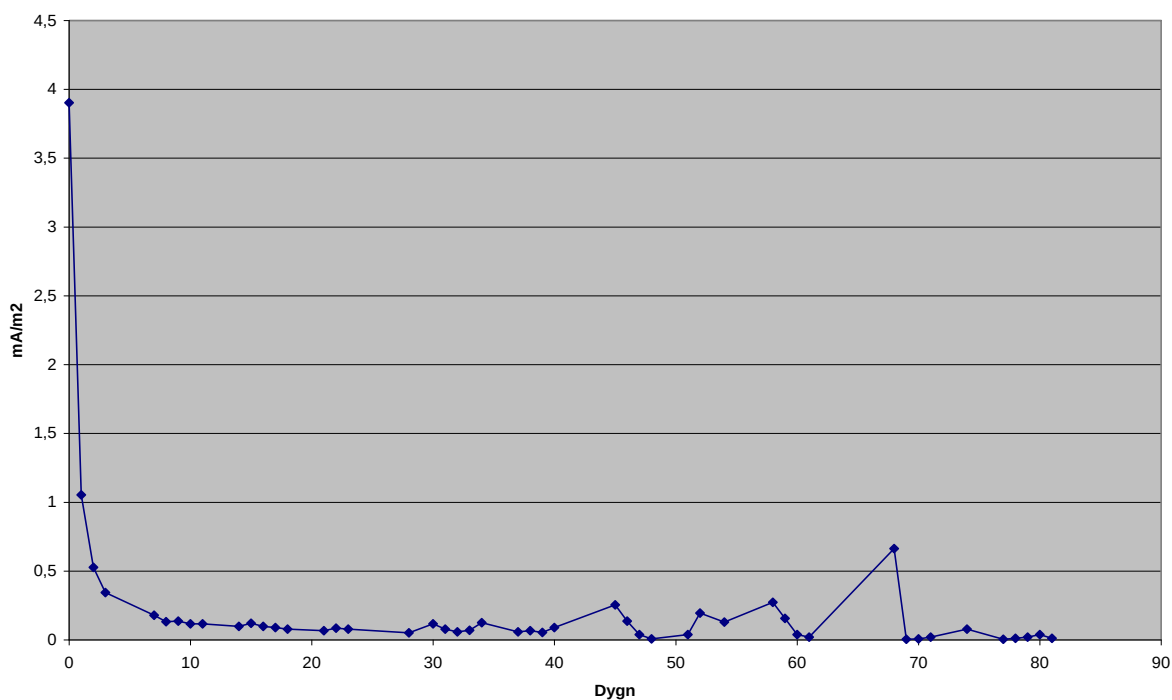
De uppmätta strömmarna under polariseringsförsöken finns återgivna i Figur 68 - Figur 70.



Figur 68 Anodisk strömtäthet för betongprov polariserat till -100 mV relativt Ag/AgCl/sat.KCl



Figur 69 Anodisk strömtäthet för betongprov polariserat till -300 mV relativt Ag/AgCl/sat.KCl



Figur 70 Anodisk strömtäthet för betongprov polariserat till -500 mV relativt Ag/AgCl/sat.KCl

Följande medelströmtätheter har beräknats, se Tabell 3.

Tabell 3 Vid polariseringarna uppmätta medelströmtätheter.

Prov, nr	Potential, mV	Medelströmtäthet, mA/m ²
12	-100	467
6	-300	29
11	-500	0,21

Betongprovernas utseende efter exponering återges i Figur 71-Figur 75.



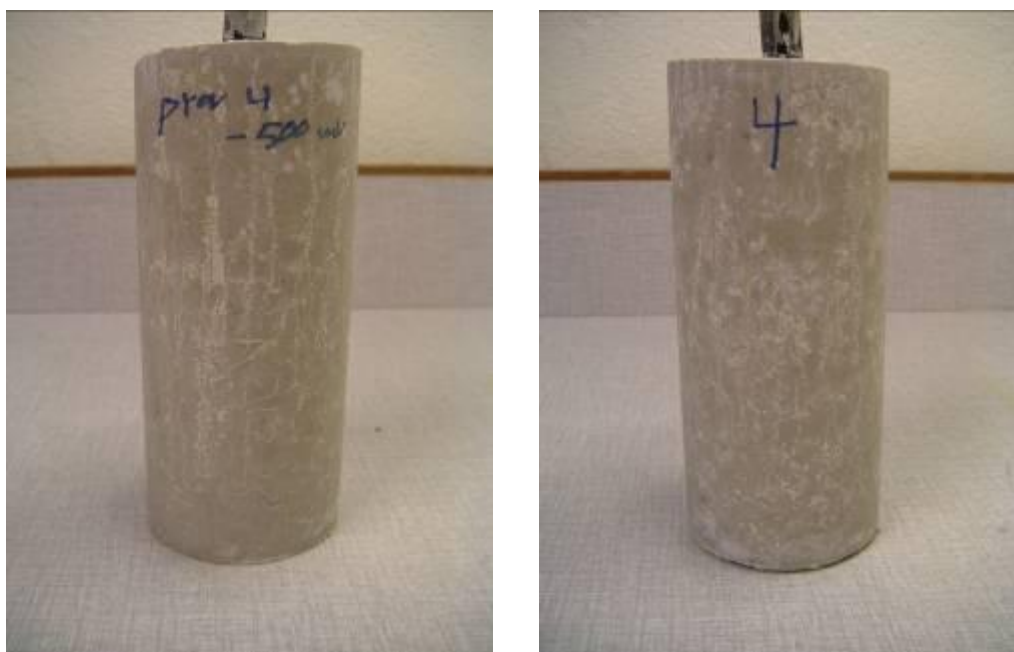
Figur 71 Betongprov 9 efter 238 dygn vid 85 % relativ fuktighet



Figur 72 Betongprov 1 efter 238 dygn i 3 % NaCl.



Figur 73 Betongprov 2 efter 81 dygns polarisering till -100 mV. Sprickan uppstod efter ca 40 dygn.



Figur 74 Betongprov 4 efter 81 dygns polarisering till -300 mV.



Figur 75 Betongprov 5 efter 81 dygns polarisering vid -500 mV.

Som framgår av Figur 73 hade betongprov 2 dvs det som polariserats till -100 mV spruckit efter halva exponeringstiden och rost trängt fram i sprickan.

Resultaten från utvärderingen av viktsförlust omräknat till jämn korrosionshastighet återfinns i Tabell 4.

Tabell 4 Uppmätta viktsförluster och beräknade korrosionshastigheter.

Stål ID	Miljö	Polari-sering	Massför-lust, g	Tid, år*	g/m ²	g/m ² ,år	µm/år
Ref.			0,0018		0,686		
1	85% RF		0,1181	0,6520	46,107	70,71	8,98
2	85% RF		0,1847	0,6520	72,109	110,59	14,04
8	85% RF		0,1685	0,6520	65,754	100,84	12,81
3	3% NaCl		0,1525	0,6520	59,533	91,30	11,60
4	3% NaCl		0,0956	0,6520	37,300	57,20	7,27
10	3% NaCl		0,1037	0,6520	40,479	62,08	7,88
12	3% NaCl	-100 mV	2,6864	0,2247	1048,559	4667,37	592,76
11	3% NaCl	-300 mV	0,2754	0,2247	107,514	478,57	60,78
6	3% NaCl	-500 mV	0,7077	0,2247	276,215	1229,49	156,15

*Korrosionshastigheten för de polariserade proven har beräknats på den tid de var strömbelastade dvs 81 dygn eftersom den dominerande delen av korrosionen inträffade under denna period.

Det konstaterades att för prov nr 3 och 6 hade borrningen givit upphov till märken i stålet, se Figur 76. Uppmätta viktsförluster är därför för höga och dessa resultat kan inte användas.



Prov 3 (ID stål)



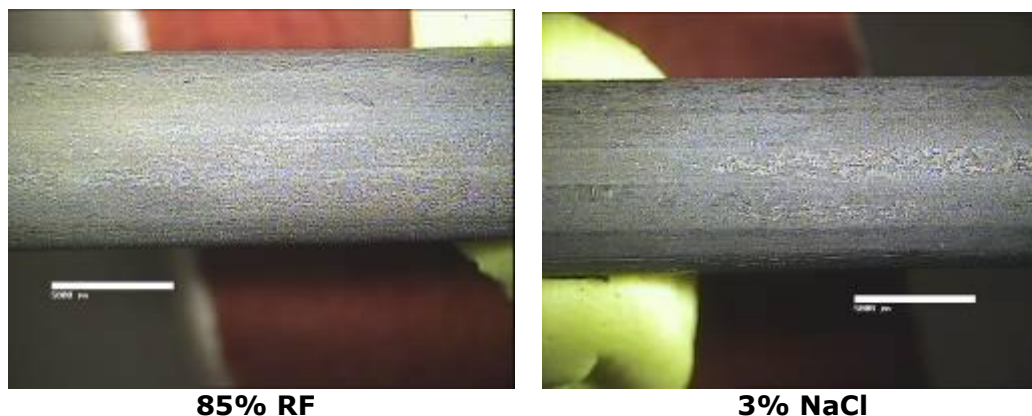
Prov 6 (ID stål)

Figur 76 *Borrmärken i prov 3 och 6.*

Angreppen på prov 6 var mycket snarlika de på prover exponerade vid 85 % RF respektive i 3 % NaCl utan polarisering, (Figur 78). Detta indikerar en korrosionshastighet i samma storleksordning eller marginellt högre. Vår bedömning är att den ligger i intervallet 10-15 $\mu\text{m}/\text{år}$.



Figur 77 *Angripna ytan hos prov 6 (-500 mV)*



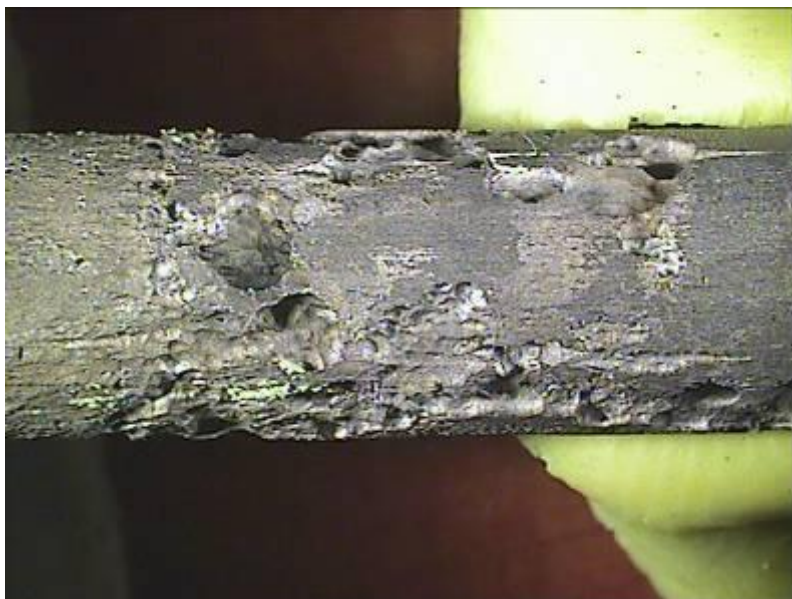
Figur 78 Angrepp på prover exponerade för 85 % RF respektive 3 % NaCl.

Utgående från detta kan vi således ansätta följande korrosionshastigheter uttryckta som jämn korrosion, se Tabell 5.

Tabell 5 Korrosionshastighet beräknad som jämn avfrätning.

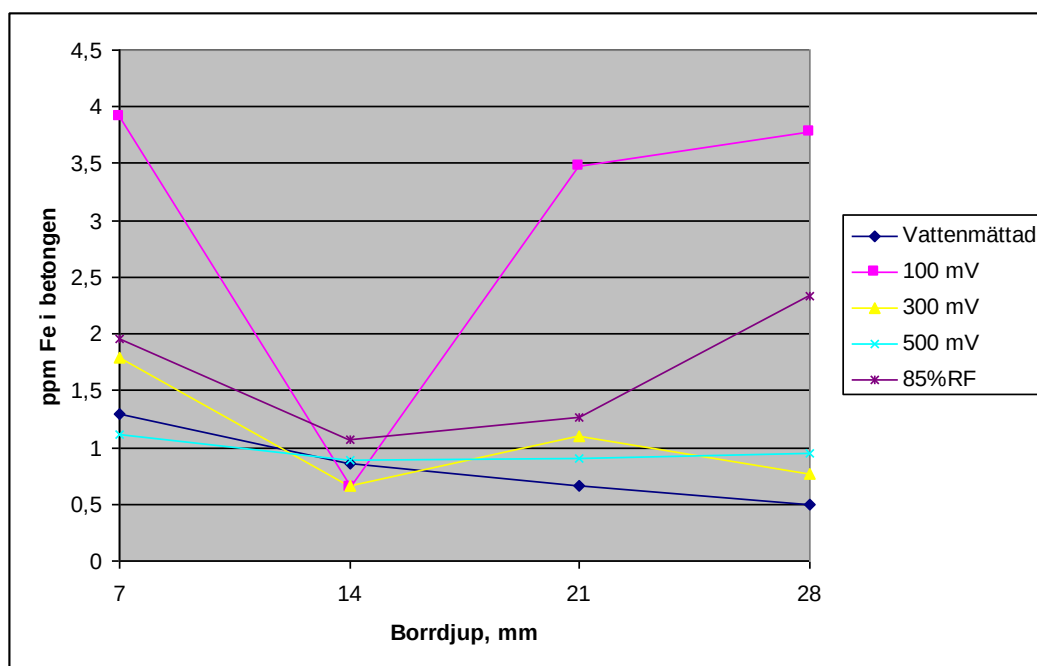
Exponeringsmiljö	Korrosionshastighet, $\mu\text{m}/\text{år}$
85 % relativ fuktighet	11,9
3 % NaCl	7,6
-100 mV	592,8
-300 mV	60,8
-500 mV	10-15

För merparten av proverna konstaterades en viss spaltkorrosion i anslutningen till krympslangen. Detta påverkar uppskattningen av storleken på den allmän korrosionen mest på prover med låg massförlust. Således är ovan angivna korrosionshastigheter något överskattade för prover exponerade vid 85 % RF och i 3% NaCl. Det enda provet som uppvisade lokal korrosion på övriga ytor var provet polariserat till -100 mV. Sidan exponerad mot sprickan var kraftigt angripen och lokala gropdjup uppmättes till 0,8-1,0 mm, se Figur 79.



Figur 79 Lokala angrepp på provet polariserat till -100 mV.

Resultaten från analysen av järnhalten i betongproverna återfinns i Figur 80.



Figur 80 Halten järn i borrhax från betongprover. Djupet 7 mm motsvarar kax från betongytan och 7 mm in. Djupet 14 mm motsvarar kax från 7 till 14 mm osv.

Mängden järn som frigjorts vid korrosionen (låg korrosionshastighet) var liten för följande prov:

- Vattenmättad
- 500 mV polarisering
- 85 % relativ fuktighet

Det är därför troligt att halter lägre än 1,5 ppm ligger inom mätmetodens noggrannhet.

Av resultaten kan vi konstatera att halten järn i det mest korroderade provet (polarisering till -100 mV) är hög och ligger på en jämn nivå genom hela provet om vi bortser från kax taget från 7-14 mm. Det faktum att proven lämnades i vattenbadet 54 dygn efter avslutad polarisering har säkert medverkat till koncentrationsutjämningen. Vidare är järnhalten förhöjd närmast stålytan i det atmosfäriskt exponerade provet (85% RF). Detta indikerar att vi i vattenmättad betong får en jonvandring som minskar risken för uppbyggnad av sprängande korrosionsprodukter. Motsvarande sker inte i atmosfäriskt exponerad betong.

7.3 Diskussion

Kraftig korrosion konstaterades på provet polariserat till -100 mV. Korrosionshastigheten beräknad som jämn avfrätning var nästan 600 $\mu\text{m}/\text{år}$. Detta motsvarar ett frätdjup på 135 μm efter 81 dygn. Sprickning uppstod dock redan efter halva exponeringstiden då frätdjupet borde ha varit i trakten av 60-70 μm . För atmosfäriskt exponerad betong har undersökningar visat att vid en korrosion på motsvarande 150 μm uppstår så stora spänningar i täckskiktet pga de voluminösa korrosionsprodukterna att täckskiktet spjälkar. I vårt försök borde således inte sprickor ha uppstått så tidigt. Det faktum att angreppen inte var jämnt fördelade gör dock att ansamlingen av korrosionsprodukter lokalt har varit stor. Uppmätta frätdjup på 1,0 mm motsvarar en lokal avfrätning på 0,5 mm vid tidpunkten för sprickbildningen.

-100 mV motsvarar den potential som rostfritt stål har i vatten. Om armeringen i en vattenmättad betongkonstruktion ska kunna få en potential i närheten av -100 mV måste den galvaniska kopplingen utgöras av en rostfri konstruktion med många gånger större yta än armeringens. Detta förekommer inte i de idag befintliga kylvattenvägarna.

Korrosionshastigheten vid polarisering till -500 mV har endast bedömts subjektivt då inget resultat från mätningen av viktsförlust erhöles. De uppmätta strömtätheterna kan dock ge en vägledning. Med hjälp av Faradays lag kan en teoretisk korrosionshastighet bestämmas baserat på den uppmätta anodiska strömtätheten. Detta har gjorts i Tabell 6. I samma tabell redovisas de uppmätta korrosionshastigheterna.

Tabell 6 Teoretiskt beräknade respektive uppmätta korrosionshastigheter för polariserade prover

Prov, nr	Potential, mV	Teoretisk korrosionshastighet, $\mu\text{m}/\text{år}$	Uppmätt korrosionshastighet, $\mu\text{m}/\text{år}$
12	-100	541	592,8
6	-300	32,9	60,8
11	-500	0,25	

Som framgår av tabellen (Tabell 6) är överensstämmelsen förhållandevis god för proven polariserade till -100 respektive -300 mV. Av tabellen framgår också att den teoretiska korrosionshastigheten vid -500 mV pga den yttre pålagda strömmen endast är 0,25 $\mu\text{m}/\text{år}$. Detta stämmer väl med iakttagelsen att provet inte ser ut att blivit utsatt för en ökad korrosion. Detta indikerar att en galvanisk koppling till andra konstruktioner i vattnet som inte ger upphov till en förskjutning av armeringens potential till mer positiva värden än -500 mV skulle vara ofarlig.

Värdet - 500 mV motsvarar potentialen hos kolstål som inte är katodiskt skyddat. Om ytan hos kolstålskonstruktionen är stor kan armeringens potential förskjutas till någonstans kring -600 mV, vilket torde vara ofarligt.

En förskjutning av armeringens potential till -300 mV ger en påtaglig ökning av korrosionshastigheten. För att åstadkomma en dylik förändring krävs kontakt med rostfritt stål. Antingen måste ytan hos denna främmande konstruktion vara stor eller så måste flödeshastigheten på vattnet vara högt. En hög flödeshastighet försvårar nämligen polariseringen av den rostfria ytan och därmed bibehålls en hög drivande spänning.

8 Mätningar i fält

I samband med förprojektering av en planerad naturgasledning från Kalkugnen till Stockholmen utfördes mätningar av gradientfältet runt Fenoskans elektrod vid Fågelsundet (10). Dessa visade att på ett avstånd från elektroden som motsvarar det till Forsmark ligger markens potential relativt avlägsen jord på ca 10 V vid full effekt på Fenoskan. Spänningsfallet i marken har uppskattats till ca 0,4 V/km. Det finns därför en risk för att långsträckta konstruktioner inom kärnkraftsområdet kan bli läckströmspåverkade. För att kunna bedöma de praktiska konsekvenserna genomfördes mätningar längs utloppstunnlarna för Forsmark 1 och 2 respektive Forsmark 3.

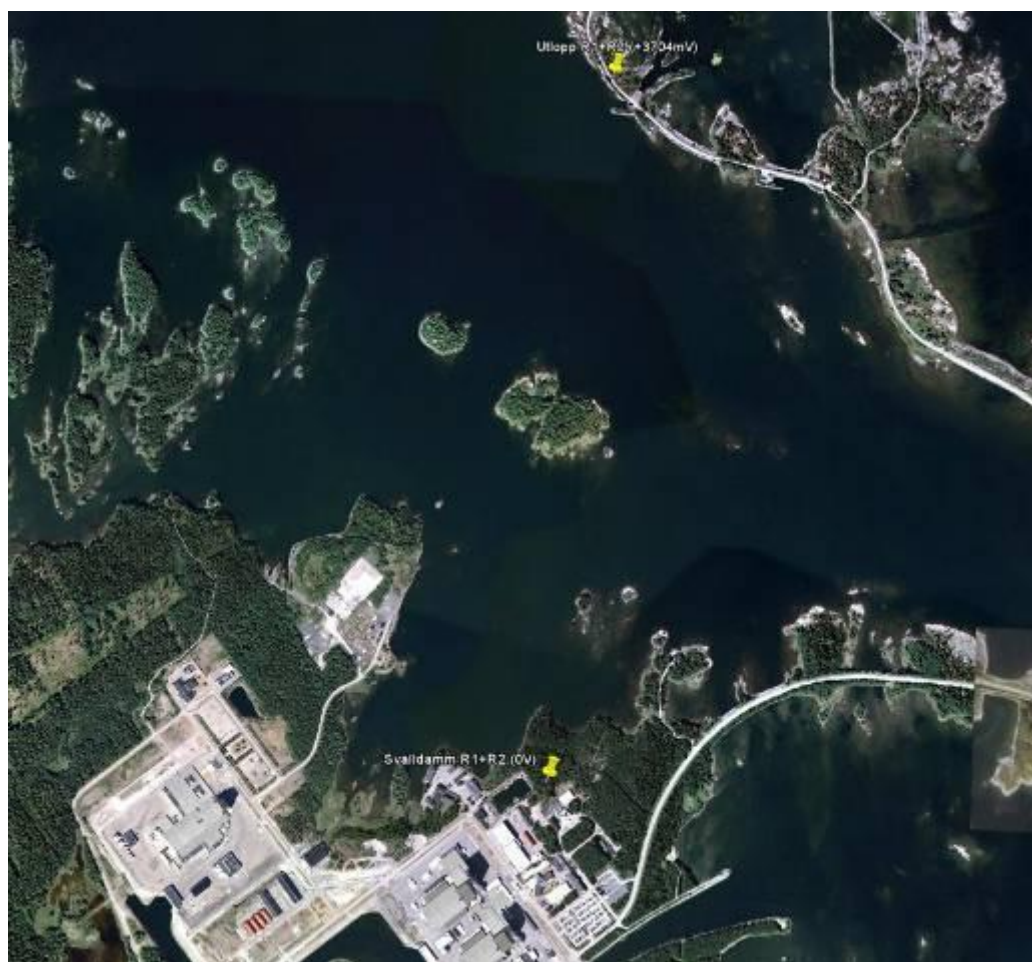
8.1 Utförande

Två referenselektroder av typen Cu/CuSO_4 kopplades ihop med en 300 m lång mätkabel. Potentialdifferensen mellan de båda elektroderna registrerades med en hög-ohmig voltmeter. Med start från slutpunkten för Forsmark 3:s utloppstunnel mättes på detta sätt skillnader i markpotentialer ända in till svallschakten där utloppstunnlarna börjar.

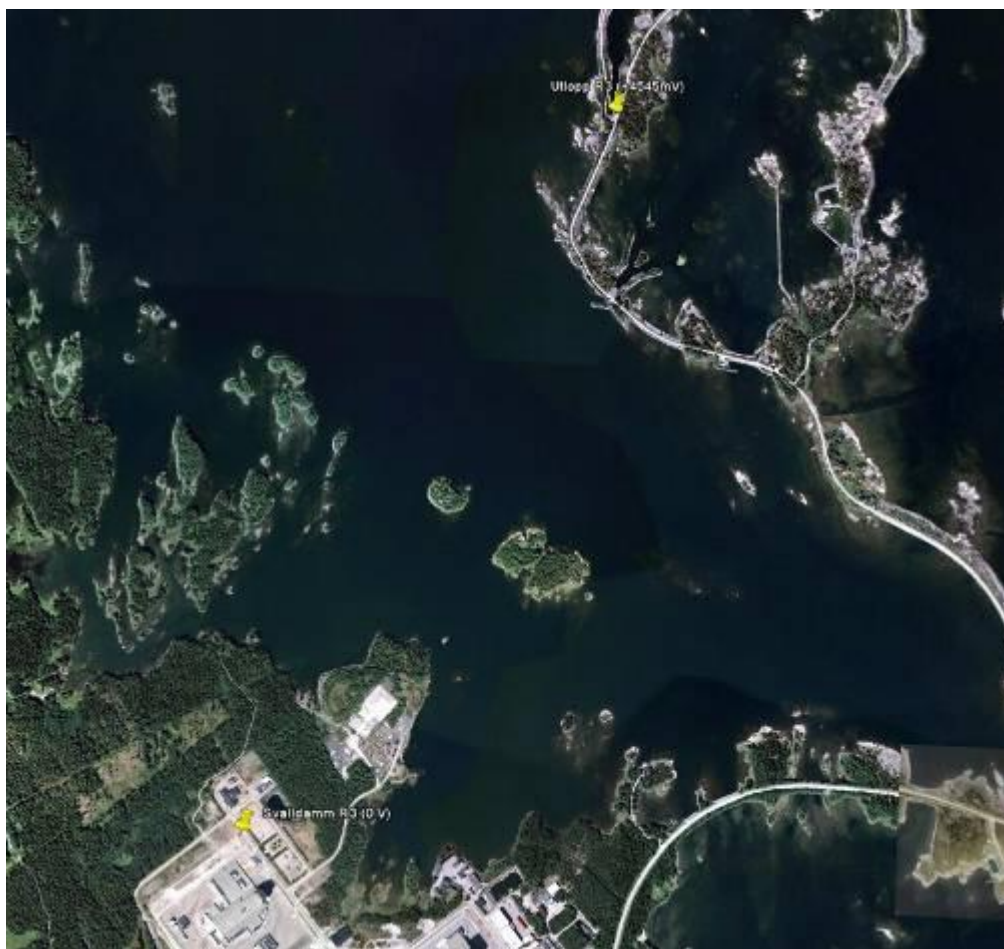
Under mätningarna varierade effekten på Fenoskan mellan 506 och 512 MW dvs i princip full effekt (512 MW) hela tiden.

8.2 Resultat

Skillnaden i markpotential mellan svallschaktet på Forsmark 1,2 och utloppet från tunneln uppmättes till 3,7 V, se Figur 81. Motsvarande värde för Forsmark 3 var 4,5 V, se Figur 82. Detta är mycket större potentialdifferenser än vad som förväntats.

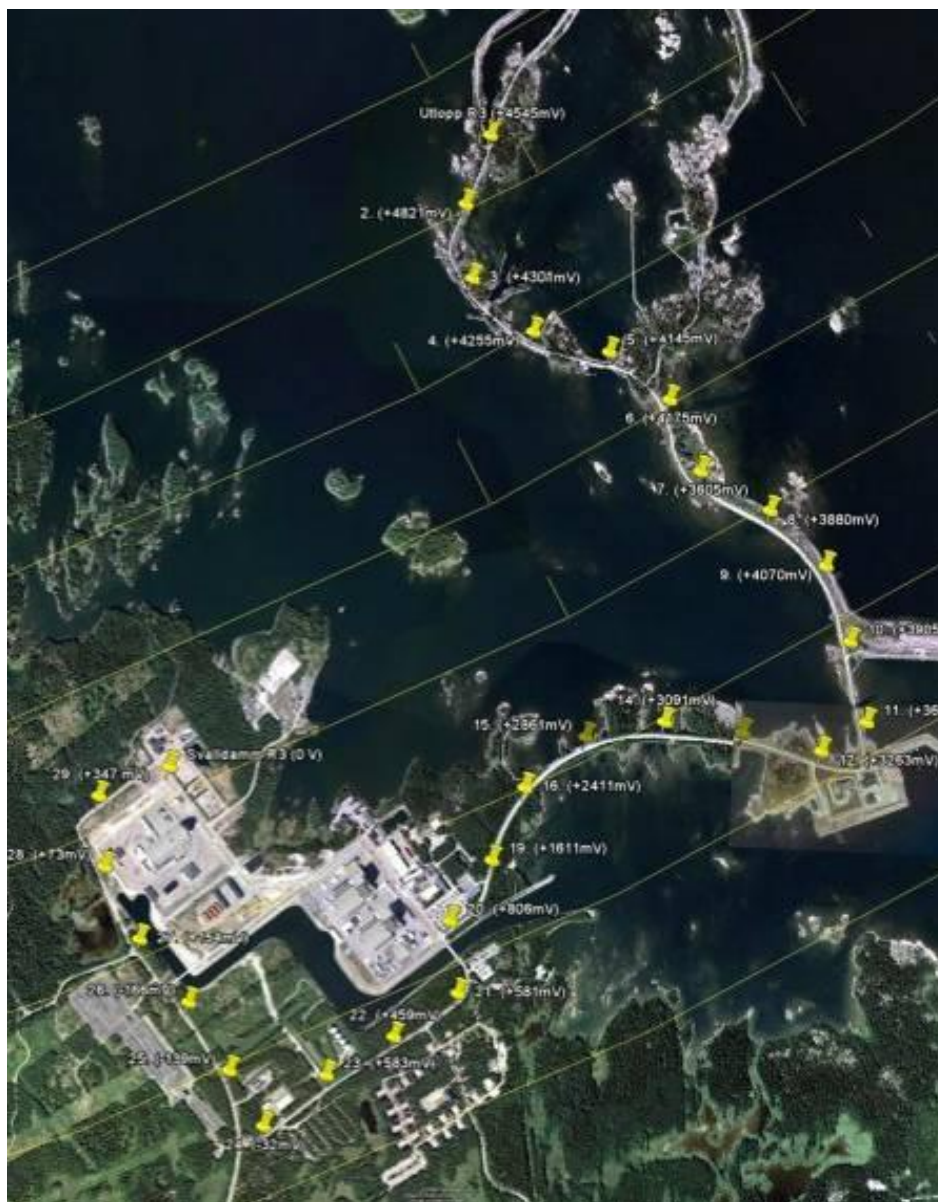


Figur 81 Potentialskillnad mellan svallschakt och utlopp Forsmark 1/2. (Utløpp 3704 mV positivare än Svallschakt).



Figur 82 Potentialskillnad mellan svallschakt och utlopp Forsmark 3. (Utlöpp 4545 mV positivare än svallschakt).

Fenoskans elektrod på den svenska sidan fungerar som anod varför markpotentialen bör vara mer negativa ju längre från elektroden man befinner sig. I Figur 83 har tänkta radiella gradientlinjer från Fenoskan lagts in för mätningen utmed Forsmark 3:s tunnel. I samma figur återges potentialerna i varje enskild mätpunkt längs mätsträckan. Som framgår av figuren är överensstämmelsen dålig.



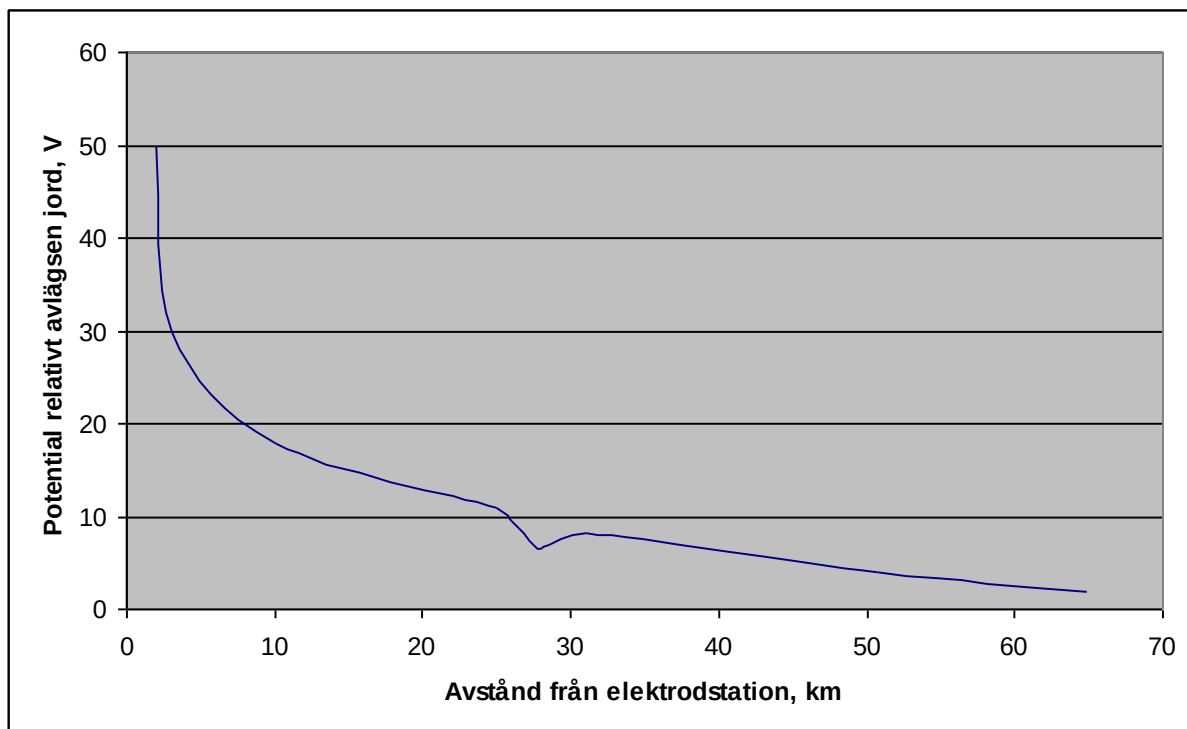
Figur 83 Radiella gradientlinjer från Fenoskan och resultat från mätningen för Forsmark 3:s utloppstunnel.

De lägsta potentialnivåerna uppmättes i anslutning till ställverket. Om vi antar att ställverket fungerar som en lokal jordpunkt och ströminläckningen skapar ett lokalt fält erhålls bilden i Figur 84.



Figur 84 Radiella gradientlinjer utgående från en tänkt jordpunkt i Forsmarks ställverk.

Detta ger en god korrelation mellan uppmätta potentialer och avståndet från ställverket. Således tar jordlinorna på ställverket upp ström från marken och transporterar bort den till mer avlägsna jordpunkter via kraftledningarnas topplinor. Detta resulterar i ett lokalt fält runt Forsmark med en markgradient på ca 1,5 V/km, se Figur 85.



Figur 85 Schematiskt gradientfält för Fenoskan vid passage av Forsmark.

8.3 Diskussion

Utloppstunnlarna vid Forsmark består av bergtunnlar med betongförstärkta delar. Om t.ex. ett katodiskt skydd skulle installeras i framtiden bör varje betongdel skyddas separat. En förbindning av all armering i tunnlar till ett gemensamt skydd skulle skapa ett läckströmsproblem pga de stora skillnaderna i markpotentialer.

9 Undersökningar/inspektioner kylvattenvägar

I början på 90-talet uppmärksammades armeringskorrosion i kylvattenvägarna på Barsebäck 1 och 2. Skadorna fanns på väggar och tak från vattenlinjen och uppåt. Besluts togs att installera katodiskt skydd. I ett första steg vidtogs åtgärder på undervattensdelarna. I intagsbyggnaderna kontrollerades om armeringen hade kontakt med luckor, galler och silmaskiner. Detta gjordes genom att armeringen bilades fram i ett mycket stort antal punkter. Mätningar visade att kontakt förelåg överallt. Inte någonstans konstaterades angrepp på armeringen. Syftet med arbetet var att säkerställa att armeringen ingick i det system med påtryckt ström som skyddar luckor, galler och silmaskiner i byggnaden. I kulvertar, pumpsumpar och schakt, där system med påtryckt ström saknades, installerades offeranoder av aluminium.

Med den teknik som då fanns tillgänglig rörande katodiskt skydd på atmosfäriskt exponerad betong (platinerade nät i sprutbetong, elledande färg osv) bedömdes installationstiden allt för lång. På försök provades istället en ny teknik, nämligen att termiskt spruta zink på betongytan. Genom att dess för innan ha bilat fram armeringen i några punkter kunde ett galvaniskt katodiskt skydd etableras.

Offeranoder har senare också installerats i kylvattenvägarna i både Forsmark och Ringhals. På båda verken har armeringskorrosion konstaterats i positioner under vattenlinjen. Angreppen förekommer i två tydliga områden, nämligen (11):

- På väggar alternativt bjälklag där betongen gränsar mot luft på utsidan.
- I närhet av huvudkylvattenpumpar.

Ovanför vattenlinjen är den kritiska delen skvalpzonen där omfattande skador har upptäckts.

På väggar och bjälklag verkar det som att det yttre armeringslagret är mer utsatt för korrosion än det inre vilket inte tyder på en makrocell. I en dylik cell borde armeringslagret på den våta sidan fungera som anod.

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

10 Diskussion

Betong exponerad för havsvatten vattenmättas och får med tiden en hög kloridhalt. Stålet i armeringen korroderar aktivt men med en mycket låg korrosionshastighet. Orsaken är den låga transporthastigheten för syre in till armeringen. Detta har verifierats genom tidigare genomförda laboratorieundersökningar och fältexponeringar. Trots detta förekommer skador på armering i vattenmättad betong.

För att försöka bringa klarhet i vilka mekanismer som ligger bakom faktumet att icke försumbar korrosion i vissa fall uppstår på, i vatten nedsänkta, fullskaliga betongkonstruktioner har en rad olika studier genomförts inom ramen för detta projekt:

- Litteraturstudie.
- Erfarenhetsinsamling från andra betongkonstruktioner exponerade för havsvatten.
- Modellering av korrosionsmekanismer.
- Teoretiska beräkningar av risken för sekundärverkan från katodiska skydd.
- Experimentell undersökning av risken för galvanisk korrosion.
- Fältmätningar avseende läckströmmar.
- Insamling av information från pågående inspektioner i kärnkraftverkens kylvattenvägar.

Litteraturen bekräftar att armeringens korrosionshastighet blir försumbar i vattenmättad betong. Redovisade laboratorieundersökningar och fältexponeringar har dock utförts med betongblock och inte på fullskaliga objekt. Det ligger därför nära till hands att misstänka att rapporterade skador uppstått till följd av någon eller en kombination av flera så kallade makroceller alternativt en yttre pålagd spänning.

Pågående inspektioner vid Ringhals och Forsmark har identifierat tre typiska områden där skador förekommer, nämligen:

- Skvalpzonen.
- Väggar, bjälklag där utsidan är exponerad mot luft.
- Nära huvudkylvattenpumpar.

Genomförda modelleringar verifierar att förhöjd korrosionsrisk är att förvänta strax ovanför vattenlinjen respektive i väggar vars utsida är luftad. Korrosionen är dock inte resultatet av en makrocell till följd av olika luftning. Istället uppstår korrosion där betingelserna är som mest optimala (tillgång på syre, fukt och klorider).

Armeringskorrosionen i närheten av pumpar bedöms vara en effekt av galvanisk korrosion, se längre ner i texten.

I modelleringsarbetet framkom också att tunna täcksikt inte är kritiska för korrosionsrisken i vattenmättad betong. Vidare konstaterades att vattnets flödes hastighet utanför betongytan inte har någon betydelsefull inverkan. Även vid höga flöden blir korrosionshastigheten försumbart låg.

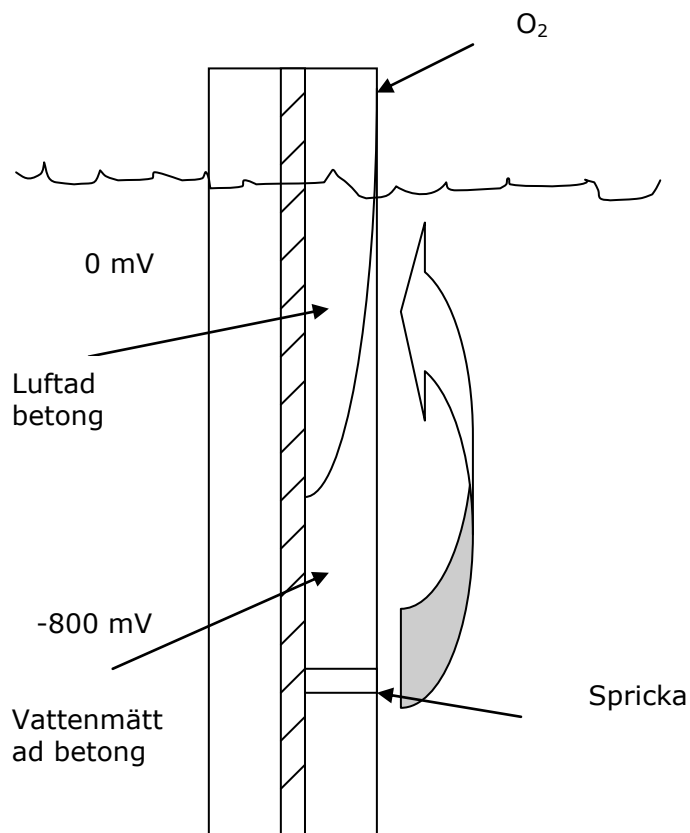
Genom teoretiska beräkningar har vi kunnat påvisa att järn som är isolerade från övrig armering kan bli utsatta för så kallad sekundärverkan dels nära anoderna där skyddsströmmen matas ut dels nära pumpar vid högt flöde. I det första fallet bedöms dock risken som liten.

Sammankoppling mellan armering och i vattnet fritt exponerade metallytor kan ge upphov till galvanisk korrosion. De flesta metallkonstruktioner i vattenvägarna galler, luckor, pumpar och silmaskiner är idag katodiskt skyddade. Om skyddsnivån är god uppstår inga galvaniska angrepp på närliggande armering. De experimentella försöken indikerar även att det i princip är ofarligt att sammankoppla armeringen med oskyddade kolstålkonstruktioner i vattnet. Problem kan dock uppstå om den oskyddade eller ofullständigt skyddade konstruktionen är av rostfritt stål. Beroende på skyddsnivå på den rostfria ytan och areaförhållandet mellan armering och rostfri ytan kan förhöjd korrosion uppstå på armeringen. I anslutning till huvudkylvattenpumpar kan dylika förhållanden uppstå.

Mätningar utförda vid Forsmark visar att läckström från näraliggande likströmsöverföringar kan utgöra en riskfaktor för långsträckta betongkonstruktioner om all armering hänger ihop. Någon risk för växelströmskorrosion behöver dock inte befaras (teoretisk bedömning).

Således kan vi konstatera att iakttaga skador i kylvattenvägarna antingen beror på någon form av luftning (vattenlinjen, utsida vägg) eller galvanisk kontakt med ädlare konstruktioner i vattnet (nära pumpar). Om det inte vore för skadorna på Ölandsbron och i Göteborgs hamn skulle det ligga nära till hands att ange korrosionsrisken på övriga betongytor i kylvattenvägarna som försumbar. Någon direkt förklaring till de på bron och i hamnen konstaterade skadorna har dock inte kunnat ges.

I båda fallen har korrosionsangreppen uppstått på vertikala betongkonstruktioner delvis exponerade för luft och delvis nedsänkta i vatten. Uppgifter indikerar att skadorna legat på ca 5 m djup. I båda fallen kan defekter i betongens ytskikt misstänkas, gjutfog på Ölandsbron och sprickor i slagna pålar. Om hela konstruktionen varit nedsänkt i vatten borde dessa defekter skyddas katodiskt av omgivande armering i intakt vattenmättad betong. Detta indikerar att det trots allt finns en makrocell på en vertikalt orienterad konstruktion som går genom vattenlinjen. Då pålen slås alternativt vattnet släpps på kring en platsgjuten pelare innehåller betongens porsystem luft. Pga ett med vattendjupet ökat tryck vattenmättas de nedre delarna av konstruktionen först. En situation enligt den i Figur 86 skulle kunna tänkas uppstå.



Figur 86 Makrocell i vertikal betongkonstruktion.

Då de nedre delarna blivit vattenmättade fungerar de som anod mot de övre delarna där betongens porsystem fortfarande är luftfyllda. Vid närvaro av en defekt kan lokalt höga anodiska strömtätheter uppstå, pga det lägre övergångsmotståndet för järn direkt exponerat mot vatten, och därmed höga korrosionshastigheter. Denna typ av angrepp uppträder i så fall i början av konstruktionens liv.

Med tiden vattenmättas hela konstruktionen som är i vattnet. Kapillärt sugas vatten upp i atmosfärsdelen och med tiden sker en anrikning av klorider som tillsammans med god tillgång på syre flyttar den för korrosion mest utsatta delen till splashzonen.

En med den i Figur 86 liknande cell kan också uppstå mellan ett rostfritt isskydd och defekter i djupare liggande delar. Denna cell upphör dock inte att verka med tiden.

11 Slutsatser

De genomförda undersökningarna medger följande slutsatser:

- I vattenmättad betong, utan närvaro av makroceller, korroderar armeringen aktivt dock med en försumbart låg hastighet. Detta aktiva tillstånd föreligger oberoende av betongens kloridhalt.
- Korrosionshastigheten är låg även vid tunna täcksikt och med stor sannolikhet även i urlakad betong.
- Inte heller höga vattenflöden ger upphov till allvarliga angrepp.
- Inspektioner har påvisat angrepp i skvalpzonen, på väggar som utvändigt är luftade och i närheten av pumpar.
- I skvalpzonen sker korrosionen ovanför vattenlinjen. En makrocell som resulterar i förhöjd korrosion under vattenlinjen är av underordnad betydelse och bedöms vara utan praktisk betydelse. Korrosionen sker där de yttre betingelserna för korrosionen är optimala.
- Det samma gäller för väggar som är utvändigt luftade. Makrocellen är av underordnad betydelse.
- I närheten av pumpar orsakas sannolikt armeringskorrosionen av galvanisk korrosion till följd av att rostfria ytor i pumparna inte är fullständigt katodiskt skyddade.
- Enskilda armeringsjärn som inte har kontakt med övrig armering kan läckströmspåverkas om de befinner sig nära konstruktioner som kräver hög skyddsströmtäthet och eventuellt om de är nära anoder för system med påtryckt ström.
- Långsträckta betongkonstruktioner kan läckströmspåverkas från befintliga system för högspänd likström. Framtida installationer av katodiskt skydd bör ej innebära att armeringen i långa kulvertar, typ utloppstunnlar, görs kontinuerlig.
- Risken för växelströmskorrosion bedöms som försumbar.
- Om det inte vore för angreppen på Ölandsbron och i Göteborgs hamn, som ännu inte har kunnat förklaras, skulle man kunna utesluta risken för armeringskorrosion i andra positioner än i skvalpzonen, på väggar som utvändigt är luftade och i närheten till oskyddade rostfria konstruktioner.

12 Referenser

1. Arup, H: The mechanisms of the protection of steel by concrete. Proc. Corrosion of reinforcement in concrete construction, ed A.P. Crane, SCI/Ellis Horwood, Chichester, 151-157. 1983
2. Raupach, M: Investigations on the influence of oxygen on corrosion of steel in concrete-Part 1. Materials and Structures. Vol. 29. April 1996, p 174-184.
3. Wranglen, G: Metallers korrosion och ytskydd. Almqvist & Wiksell. 1967.
4. Wilkins, N.J.M: The corrosion of steel reinforcements in concrete immersed in seawater. Conf. Corrosion of reinforcement in concrete construction, ed A.P. Crane, SCI/Ellis Horwood, Chichester, 1119-142. 1983
5. Polder, R: Investigation of concrete exposed to North Sea water submersion for 16 years. TNO report 94-BT-R1548.
6. Rail, R.D: Long-term, deep-ocean test of concrete spherical structures – results after 13 years, Naval Civil Engineering Laboratory Technical Report R-195.
7. Ullberg, M: Elektrokemiska aspekter på korrosion i svenska reaktorinneslutningar. SKI rapport 2007:13.
8. Kranc S C and Sagüés A A, Polarization current distribution and electrochemical impedance response of reinforced concrete when using guard ring electrodes., *Electrochimica Acta*, Vol 38, No 14, pp 2055-2061, 1993.
9. Ngala V T, Page C L, Parrot L J and Yu S W, Diffusion in cementitious materials. II Further investigations of chloride and oxygen diffusion in well-cured OPC and OPC/30%PFA pastes., *Cement and Concrete Research*, Vol 25, No 4, pp 819-826, 1995.
10. Sandberg, B: Studie av läckströmspåverkan Gasledning Kalkugnen-Stockholm norr. Konfidentiell rapport. April-Maj 1991.
11. Hassanzedeh, M: Personligt meddelande.

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