

Forskning

Elektrokemiska aspekter på korrosion i svenska reaktorinneslutningar

Mats Ullberg

Oktober 2006

SKI-perspektiv

Bakgrund

Samtliga svenska reaktorinneslutningar är konstruerade av spännarmerad betong. Ingjutningsgods i betong skyddas normalt mot korrosion genom att porvattnet i betongen är starkt alkaliskt. Denna miljö medför att stål passiveras. Under speciella omständigheter kan korrosion ändå uppstå. Viss uppföljning av korrosionsbilden i reaktorinneslutningarna är därför önskvärd.

En genomgång av erfarenheterna av korrosionsproblem med stål i betong pekar starkt mot att det dominerande, potentiella problemet i de svenska reaktorinneslutningarna är oavsiktliga kaviteter i betongen som bryter kontakten mellan betong och stål. Korrosion blir då möjlig om relativa fukthalten är tillräckligt hög. Risk för kaviteter finns främst vid injektering.

På grund av reaktorinneslutningarnas grova dimensioner är sedvanliga metoder för uppföljning av korrosion i betong inte användbara. Då tillståndskontrollen är svår att utföra är det angeläget att den fokuseras till de mest utsatta områdena. I föreliggande rapport har bakgrundskunskap som kan vara värdefull i detta sammanhang sammanställts. Ursprungligen tänkt huvudinriktning för arbetet var mot elektrokemiska metoder för korrosionsuppföljning. Då potentialen för sådana metoder visade sig vara svag breddades genomgången.

Projektets syfte

Ett av huvudsyftena med detta projekt och denna rapport är att dokumentera väsentlig kunskap om korrosion av stål i armerad betong som kan vara potentiellt tillämplig på reaktorinneslutningar. Kunskap om de grundläggande korrosionsmekanismerna, och de faktorer som är viktiga i sammanhanget, ger goda förutsättningar att fokusera kontrollinsatserna på ett optimalt sätt.

Resultat

Rapporten behandlar risker med korrosion i de svenska reaktorinneslutningarna och ger förslag på metod för att tillståndsbestämma inneslutningarna. Förslag ges även till på vilket sätt kan insatserna begränsas och därmed effektiviseras.

Projektets effekt på SKI-s arbete

Resultatet från projektet kommer att användas som underlag för SKI:s fortsatta forskningsinsatser inom området.

Information om projektet

Behnaz Aghili har varit ansvarig för projektet inom SKI.
SKI-referens: SKI 2005/1019/200541006

Forskning

Elektrokemiska aspekter på korrosion i svenska reaktorinneslutningar

Mats Ullberg

Studsвик Nuclear AB
SE-611 82 Nyköping
Sweden

Oktober 2006

Contents

Sammanfattning	1
Summary	3
Inledning.....	1
Cement som korrosionsmiljö.....	3
Kemisk miljö	3
Karbonatisering.....	4
Kloridupptag	5
Mikrostruktur.....	7
Makrostrukturens inverkan.....	10
Korrosionsmekanismer för stål i betong	12
Kvalitativ beskrivning av korrosionsprocessen.....	12
Evansdiagram	15
Makroceller.....	20
Inverkan av hålrum i betongen	24
Konsekvenser vid korrosion i betong	25
Relevanta korrosionsmekanismer för reaktor-inneslutningar.....	27
De svenska reaktorinneslutningarna	28
Erfarenheter från andra områden.....	33
Ynys-y-Gwas.....	33
Problem med andra spännbetongbroar	34
Nyare erfarenheter av spännbetongbroar i USA.....	36
Några föreslagna motåtgärder	39
Injekteringsbrukets betydelse	41
Sammanfattande slutsatser angående spännkablar korrosion i broar.....	42
Provningsmetoder för korrosion i betong	44
Normalfallet med enbart slakarmering	44
Reaktorinneslutningars armering.....	45
Erfarenheter från provning av spännarmerade brokonstruktioner.....	47
CONMOD	50
Diskussion och slutsatser	52
Referenser	55

Sammanfattning

Samtliga svenska reaktorinneslutningar är konstruerade av armerad och efterspänd betong. Ingjutningsgods i betong skyddas normalt mot korrosion genom att porvattnet i betongen är starkt alkaliskt. Denna miljö medför att stål passiveras. Under speciella omständigheter kan korrosion ändå uppstå. Viss uppföljning av korrosionsbilden i reaktorinneslutningarna är därför önskvärd.

En genomgång av erfarenheterna av korrosionsproblem med stål i betong pekar starkt mot att det dominerande, potentiella problemet i de svenska reaktorinneslutningarna är oavsiktliga kaviteter i betongen bryter som kontakten mellan betong och stål. Härigenom passiveras inte stålytan. Korrosion blir då möjlig om relativa fukthalten är tillräckligt hög. Risk för kaviteter finns främst vid injektering.

På grund av reaktorinneslutningarnas grova dimensioner är sedvanliga metoder för uppföljning av korrosion i betong inte användbara. Då tillståndskontrollen är svår att utföra är det angeläget att den fokuseras till de mest utsatta områdena. I föreliggande rapport har sammanställts bakgrundskunskap som kan vara värdefull i detta sammanhang. Ursprungligen tänkt huvudinriktning för arbetet var mot elektrokemiska metoder för korrosionsuppföljning. Då potentialen för sådana metoder visade sig vara svag breddades genomgången.

Både denna och tidigare utredningar pekar mot att cementinjekterade spännkablar är huvudproblemet vid tillståndskontroll av de svenska reaktorinneslutningarna. Cementinjekterade spännkablar förekommer i ett mycket stort antal broar byggda efter ca 1950. Erfarenheter från broområdet har därför studerats.

Behovet av en undersökningsmetod för cementinjekterade spännkablar i broar har länge varit stort. Utvecklingsarbete har bedrivits sedan tidigt 1970-tal, bland annat inom Strategic Highway Research Project i USA. Möjliga metoder för oförstörande provning (OFP) har utvärderats ett flertal gånger. Ingen lämplig OFP-metod för injekterade spännkablar i broar har hittills framkommit eller befinner sig i ett framskridet utvecklingsskede. För undersökning av korrosionsstatus hos en spännkabel används typiskt först någon OFP-metod för att detektera kaviteter. Därefter tas ett inspektionshål upp genom slagborrning och korrosionsstatus undersöks med hjälp av endoskop. Slutligen fylls kaviteten upp genom vakuuminjektering.

Inom CONMOD-projektet har ett antal utvalda OFP-metoder provats praktiskt på reaktorinneslutningen för Barsebäck 1. Högenergiradiografering visade sig vara en användbar metod för att detektera kaviteter intill ingjutningsgods i inneslutningsväggen. Graden av korrosion undersöktes med endoskop efter upptagning av inspektionshål.

En faktor som starkt påverkar korrosionshastigheten hos en icke passiverad stålyta i betong är den relativa fukthalten. Korrosionshastigheten är hög vid en relativ fukthalt på 95-98 %, men försumbart låg vid en relativ fukthalt på 70 %. Vid undersökningarna i Barsebäck 1 inom CONMOD-projektet uppmättes en relativ fukthalt på ca 80 % vid spännkablar. Relativa fukthalten i betong är initialt hög, men avtar med tiden. I grova konstruktioner, som en inneslutningsvägg, torkar betongen mycket långsamt.

Enligt författarens bedömning kan en OFP-metod för undersökning av korrosionsstatus hos cementinjekterade spännkablar inte förväntas bli tillgänglig inom överskådlig tid. Man är därför hänvisad till förstörande ("intrusive") provning på ett begränsat antal ställen. Det är av vikt att dessa väljs på ett optimalt sätt. Urvalet bör ske genom en stegvis process där man successivt ringar in de mest kritiska punkterna. Förslagsvis kan följande procedur tillämpas.

1. Beräkna temperaturfördelningen i inneslutningsväggen.
2. Mäta fukthalten i inneslutningsväggen på utvalda punkter i väggen.
3. Kartlägga var kaviteter i injekteringen erfarenhetsmässigt är mest sannolika (avlufning mm).
4. Välja ut ett antal punkter där både fukthalten och risken för kaviteter är hög.
5. Radiografera.
6. Ta upp inspektionshål och undersöka korrosionsstatus med fiberoptik vid konstaterad större kavitet som exponerar spännkablarna.
7. Vakuuminjektera kaviteten.

Tillståndskontroll av cementinjekterade spännkablar är svår att genomföra. Samtidigt ger en väl utförd cementinjektering ett utomordentligt gott korrosionsskydd. Oinjekterade spännkablar har väsentligt sämre och osäkrare korrosionsskydd. Tillståndskontrollen av oinjekterade spännkablar i svenska reaktorinneslutningar bör anpassas till denna omständighet.

Summary

Post-stressed concrete is used in all Swedish nuclear reactor containments. Steel in concrete is normally protected from corrosion by the highly alkaline pore solution in concrete. A passive film develops on the surface of steel in contact with the pore solution. However, corrosion may still occur under special circumstances. It is therefore desirable to monitor the corrosion status of the containment.

A review of the corrosion experience with steel in concrete strongly suggests that the potential problem of most concern for the Swedish reactor containments is cavity formation during grouting of tendons and of penetrations in the containment wall. Cavities break the contact between alkaline grout and steel. Corrosion is then possible, provided the relative humidity is high enough.

Normal methods for inspection of the corrosion status of steel reinforcement in concrete are not applicable to very heavy structures like reactor containments. Since inspections are difficult to carry out, it is important that they be focused on the most susceptible portions of the containment. This report is an attempt to assemble potentially useful background information. The original intention was to focus on electrochemical methods of investigation. When it was realized that the potential use of electrochemical methods was limited, the scope of the review was broadened.

The present as well as previous investigations indicate that nondestructive testing of grouted tendons is the outstanding problem in the condition assessment of Swedish nuclear reactor containments. Grouted tendons are also used in a very large number of bridges built since the early 1950-ies. The experience gained in connection with bridges has therefore been investigated.

The need for a testing method for grouted tendons in bridges has long been strongly felt and development work has been in progress since the early 1970-ies, for example within the Strategic Highway Research Project in the United States. Potential methods for nondestructive testing have been evaluated a number of times. No practical testing method for grouted tendons in bridges has thus far been developed or is in its final state of development. To investigate the corrosion status of a grouted tendon, typically a nondestructive method is first used to detect cavities in the duct. An inspection hole is then drilled and the corrosion status of the tendons investigated using an endoscope. Finally, the cavity is grouted using vacuum injection.

Selected nondestructive methods have been tested on the Barsebäck 1 containment within the CONMOD project. High energy radiography was found to be a useful method for detecting cavities in grout. To inspect the corrosion status within cavities, an inspection hole was first drilled. An endoscope was then used.

A factor strongly affecting the corrosion rate of a non-passivated steel surface in concrete is the relative humidity. The corrosion rate is high at a relative humidity of 95-98 %, but negligible at a relative humidity of 70 %. In the CONMOD project, a relative humidity of approx. 80 % was measured at the position of the tendons in the Barsebäck 1 containment. Relative humidity is initially high in concrete, but decreases

with time. In heavy designs, like nuclear reactor containments, the concrete dries extremely slowly.

In the opinion of the author, a nondestructive testing method for grouted tendons cannot be expected to be available in the foreseeable future. The available alternative is to use intrusive testing in a limited number of places. It is then particularly important to select the places where testing is performed in the best possible way. The selection should be made in a stepwise process. The following procedure is suggested.

1. Calculate the temperature distribution in the containment wall.
2. Measure the relative humidity at selected points within the wall.
3. Map out where cavities in the grout are most probable (vents, etc).
4. Select a number of points where at the same time the relative humidity is high and cavity formation probable.
5. Perform radiography.
6. Drill an inspection hole and investigate the corrosion status using fiber optics if a cavity is indicated.
7. Grout the cavity using vacuum injection.

Condition assessment of grouted tendons is a major challenge. However, a well performed grouting provides superior protection against corrosion. Non-grouted tendons are considerably more at risk. The condition assessment of non-grouted tendons in the Swedish nuclear reactor containments must be adapted accordingly.

Inledning

Betong är ett i grunden beständigt material. Som exempel kan nämnas att den fullt intakta betongkupolen i Pantheon i Rom, Figur 1, är byggd ca år 125.



Figur 1: Betongkupolen i Pantheon i Rom, byggd ca år 125. Här återgiven av 1700-talsmålaren Giovanni Paolo Panini.

En svaghet hos betong är att draghållfastheten endast är ca 10 % av tryckhållfastheten. Ett stort framsteg gjordes därför under andra hälften av 1800-talet, då stålarmerad betong introducerades som byggnadsmaterial. Genom stålarmering kan god draghållfasthet uppnås. Armerad betong förenar därigenom flera goda egenskaper hos betong respektive stål och är ur många synpunkter ett mycket gott byggnadsmaterial.

En nackdel med vanlig, armerad betong är att sprickor kan uppstå vid belastning. Genom förspänning av armeringen kan kompressionskrafter introduceras som motverkar sprickbildning vid belastning, så kallad spännbetong. Förspänningen kan introduceras antingen före eller efter betongen stelnat – förspänd respektive efterspänd betong. I det senare fallet utgörs spännarmeringen vanligen av stålkablar förlagda i rör i betongen. De svenska reaktorinneslutningarna är alla konstruerade av armerad och efterspänd betong.

Den armerade betongens goda egenskaper bygger bland annat på att betongen effektivt skyddar stålet mot korrosionsangrepp. Korrosionsskyddet beror inte i första hand på att betongen utgör ett skyddsskikt för stålet, på samma sätt som ett färgskikt ofta skyddar stålkonstruktioner. Skyddet grundar sig istället på att den kemiska miljön i cement leder till att ett tunt, naturligt skyddsskikt bildas på själva stålets yta – stålet passiveras. Kontakten med betong ger genom denna mekanism kolstål korrosionsegenskaper jämförbara med dem hos rostfritt stål.

Under vissa omständigheter kan passiveringen av stål i betong brytas och korrosionsangrepp uppstå. Så sker till exempel om stålet exponeras för icke oväsentliga halter av kloridjoner. Anledningen till sådan exponering kan vara att betong av otillräcklig kvalitet använts i marin miljö eller utsatts för vägsalt (broar, viadukter). Även olämplig konstruktion eller för tunna täckskikt spelar in.

Armeringsskador initierade av vägsalt eller marin miljö har fått betydande ekonomiska konsekvenser och har lett till att stora forskningsprogram initierats. Sedan flera decennier finns därför en omfattande kunskapsbas som, rätt använd, kan förhindra korrosionsangrepp på armerade betongkonstruktioner. De problem som trots allt fortfarande uppstår med korrosion av stål i betong har i huvudsak sin grund i bristfällig tillämpning av den befintliga kunskapen, till exempel genom ojämn byggkvalitet.

Risken för skador gör det angeläget att kunna tillståndskontrollera armerade betongkonstruktioner. Flera metoder för tillståndskontroll har därför utvecklats. Speciellt beträffande mycket massiva betongkonstruktioner med djupt liggande ingjutningsgods, som reaktorinneslutningar, stöter emellertid de gängse undersökningsmetoderna på praktiska problem och begränsningar. Då tillståndskontrollen är svår att genomföra är det särskilt angeläget att den koncentreras till de potentiellt mest utsatta områdena.

Ett av huvudsyftena med denna rapport är att dokumentera väsentlig kunskap om korrosion av stål i armerad betong som kan vara potentiellt tillämplig på reaktorinneslutningar. Kunskap om de grundläggande korrosionsmekanismerna, och de faktorer som är viktiga i sammanhanget, ger goda förutsättningar att fokusera kontrollinsatserna på ett optimalt sätt.

Cement som korrosionsmiljö

Korrosion i betong är ett elektrokemiskt fenomen, analogt med korrosion i vatten eller i fuktig miljö. För att förstå korrosion i betong bör man därför kombinera kunskap om korrosion som elektrokemiskt fenomen med kunskap om den speciella miljö som cement utgör. Den förståelse detta ger är en viktig grund för att behandla problemen kring tillståndskontroll av reaktorinneslutningar.

I detta avsnitt ges viss bakgrundsinformation om betong. Huvudinriktningen är mot faktorer som har betydelse för hur betong fungerar som korrosionsmiljö.

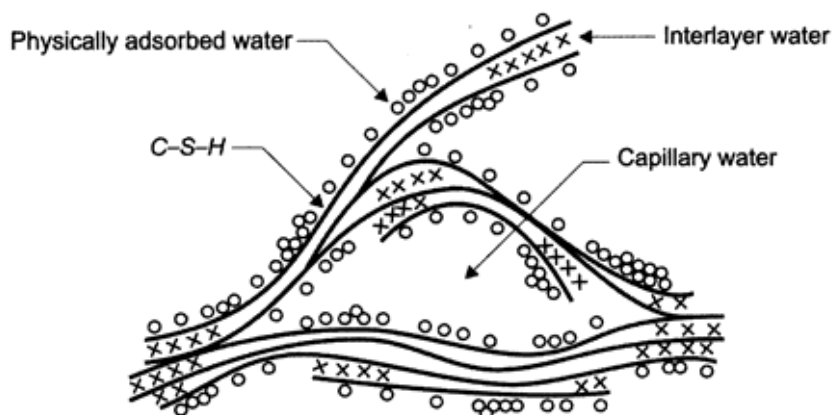
Kemisk miljö

Bindemedlet i betong, Portlandcement, består i huvudsak av fyra mineral med följande ungefärliga sammansättning: trikalciumpsilikat ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), dikalciumsilikat ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), trikalciumaluminat ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) och tetrakalciumferroaluminat ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$). Dessutom tillsätts 3-5 % gips, $\text{CaO}\cdot\text{SO}_3$.

Inom cementkemin används ett förenklat kemiskt beteckningssätt där CaO betecknas C, SiO_2 betecknas S, Al_2O_3 betecknas A, Fe_2O_3 betecknas F, SO_3 betecknas S_- och H_2O betecknas H. Ovan nämnda föreningar skrivs då C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF respektive CS_- .

Då vatten tillsätts cement undergår blandningen en komplicerad kedja av hydratiseringsreaktioner. Viktigast är att C_3S och C_2S omvandlas till en gel med dåligt definierad sammansättning och struktur, C-S-H gel, samt till kristallin kalciumhydroxid (portlandit). Dessa två komponenter utgör efter avslutad reaktionsprocess ca. 70 resp. 20 vikt% av cementen (Page och Treadaway, 1982).

C-S-H gelen består av extremt små partiklar med en skiktad struktur och stor specifik yta, Figur 2. Denna struktur ligger bakom den mekaniska hållfastheten hos stelad cementpasta.



Figur 2: Struktur hos C-S-H gel i cement (Neville, 1990).

Kalciumhydroxiden bidrar inte till den stelade cementpastans hållfasthet, men har tillsammans med små mängder kaliumhydroxid och natriumhydroxid (lut) avgörande betydelse för korrosionsmiljön. Genom hydroxidernas löslighet upprätthålls ett pH-värde på ca 13 i porvattnet i cementmatrisen. Denna starkt alkaliska miljö passiverar ingjutningsgods av stål. Passiveringen innebär att den alkaliska miljön stabiliserar ett mycket tunt, men tätt och skyddande passivskikt av korrosionsprodukter på metallytan. Passivskiktet skyddar mot vidare korrosionsangrepp, så länge skiktets integritet upprätthålls.

Det finns i grunden två sätt på vilket passivskiktet kan förstöras. Det ena sättet är att pH sänks kraftigt i cementmatrisen, det andra att skiktet kollapsar lokalt genom reaktion med (vanligen) kloridjoner. Båda mekanismerna har praktisk betydelse.

Karbonatisering

Koldioxid i luften reagerar mycket långsamt med cementmatrisen. Bland annat omvandlas kalciumhydroxid till kalciumkarbonat. Detta skadar inte cementen i sig, men sänker pH kraftigt från drygt 13 ner mot det neutrala området. Ett passivskikt kan då inte längre upprätthållas på stålytor i betongen. Stål i karbonatiserad cement blir därför utsatt för allmänkorrosion om miljön är tillräckligt fuktig.

Karbonatisering har särskilt tidigare varit ett praktiskt problem vid ytligt liggande armering i betong av låg kvalitet med hög porositet. Koldioxiden transporteras in i cementmatrisen framförallt genom diffusion i luftfyllda (grövre) porer. Reaktionen är relativt snabb och omfattande jämfört med den långsamma tillförseln (låg koldioxidhalt i luften), varför en karbonatiseringsfront långsamt utbreder sig från ytan, in i betongen. I fronten sker ett omslag från starkt alkaliskt pH till nära neutralt.

Eftersom frontens utbredning är långsam jämfört med diffusionshastigheten beskrivs förloppet approximativt av den tidsberoende diffusionsekvationen (Ficks lag).

$$F = -D \frac{dC}{dx} \quad (1)$$

I ekvation (1) är F massflödet ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$), C koncentrationen av koldioxid på avståndet x från ytan (kg/m^3) och D diffusionskonstanten (m^2/s).

Koldioxiden diffunderar genom ett successivt allt tjockare skikt av redan karbonatiserad cement. Fronten kommer därför att röra sig allt långsammare. Antas konstant diffusionshastighet kan man genom integration visa att karbonatiseringsfrontens inträngning är proportionell mot roten ur tiden:

$$d = \text{Konst} \cdot \sqrt{t} \quad (2)$$

I verkligheten går diffusionen allt långsammare vid tilltagande karbonatisering (D är inte konstant, utan minskar), varför frontens inträngning överskattas av ekvation (2).

Fukthalten i betongen påverkar karbonatiseringen på två sätt. För det första kräver karbonatiseringsreaktionen vatten, varför den avstannar då fukthalten blir för låg. För det andra diffunderar koldioxid ca fyra tiopotenser snabbare i luft än i vatten. Det senare leder till att karbonatiseringen även går mycket långsamt då fukthalten är så hög att de flesta porer i betongen vattenfyllda. Summaretsultatet av de två mekanismerna blir att karbonatiseringshastigheten får ett maximum vid en relativ omgivningsfukthalt på 70-80 %.

Vid en konstant relativ fukthalt i omgivningen på mindre än 80 % är korrosionshastigheten försumbart låg i karbonatiserad betong av god kvalitet. Karbonatisering är därför normalt inte något problem i inomhusmiljö (Bertolini et al., 2004). Utomhus har man däremot oftast en högre fukthalt i betongen än den som svarar mot jämvikt med omgivningen. Anledningen är att vatten tas upp snabbare av betongen än det avges. Detta håller fukthalten på en hög, genomsnittlig nivå i betong som då och då utsätts för väta.

Som nämnts ovan är karbonatisering en långsam process. Detta, liksom existensen av en karbonatiseringsfront, kan hänföras till en kombination av tre faktorer:

- Betongens låga permeabilitet.
- Luftens låga halt av CO₂.
- Ett stort förråd av kristallin Ca(OH)₂ i cementmatrisen som löser sig i porvattnet då pH sjunker.

I betong av god kvalitet, som i de svenska reaktorinneslutningarna, kommer karbonatisering uppskattningsvis drabba någon centimeter av ytskiktet under reaktorernas livstid. Karbonatisering saknar därmed praktisk betydelse för korrosion av ingjutningsgods i reaktorinneslutningarna.

Kloridupptag

Medan karbonatisering inte längre är ett problem med moderna betongkvaliteter, så är kloridupptag fortfarande livslängdsbegränsande för många betongkonstruktioner som utsätts för saltvatten eller vägsalt. Precis som koldioxid transporteras kloridjoner in i betongen genom diffusion i porerna. Till skillnad från koldioxid transporteras kloridjoner endast i vattenlösning. Diffusionskonstanten är därför låg. Å andra sidan tas kloridjonerna upp av cementmatrisen endast i begränsad omfattning. Inträngningen blir därför ändå tillräckligt snabb för att kräva omsorgsfulla motåtgärder i form av tät betong (genom tillsatser) och tillräckligt tjockt betongskikt utanpå armeringen. I praktiken påverkas kloridupptaget påtagligt av fukthaltsvariationer. Kloridanrikning i ytskiktet, och därmed extra snabbt upptag, erhålls t.ex. i betong som är utsatt för tidvatten eller vågstänk.

Att kloridjoner begränsat absorberas av betongen medför att inträngningen inte kan beskrivas som en front som vandrar inåt. Istället ökar kloridhalten vid armeringen mer successivt. Problem i form av lokala korrosionsangrepp uppstår när kloridhalten blir tillräckligt hög vid armeringen. Vanliga gränsvärden är 0,2-0,4 vikt-% klorid i

cementen. (Ett stort antal olika gränsvärden finns för olika situationer och från olika källor.)

Att diffusionen av kloridjoner i betong inte kan beskrivas som en front som vandrar in i betongen medför att den matematiska behandlingen blir mer komplicerad. Diffusionen måste i detta fall beskrivas med den tidsberoende diffusionsekvationen. Om variationen antages begränsad till en dimension är ekvationen

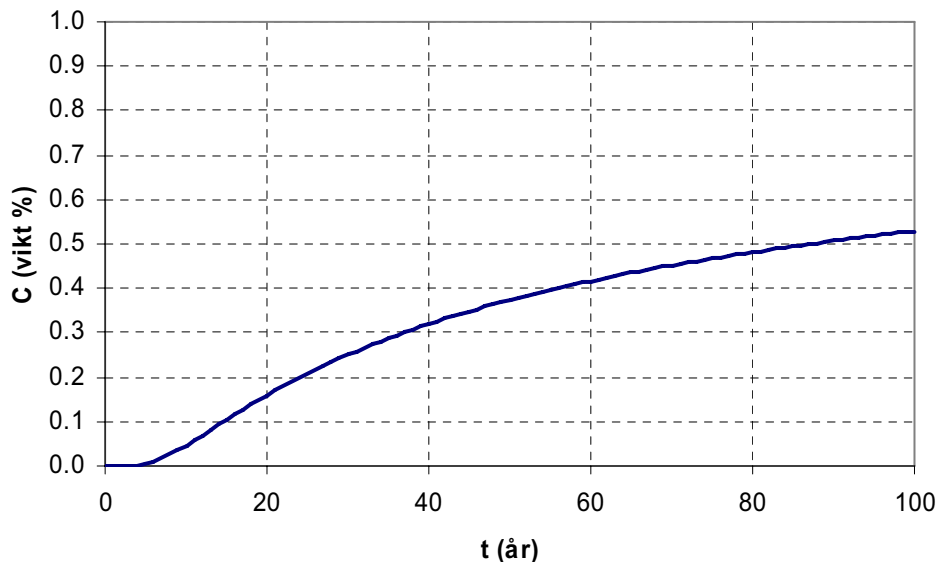
$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3)$$

Om koncentrationen vid ytan antages vara konstant och lika med C_0 är lösningen till ekvation (3)

$$C(x, t) = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (4)$$

där erf är den så kallade felfunktionen (eng. error function). Ekvation (4) beskriver dels hur koncentrationsprofilen ser ut efter viss tid, dels hur koncentrationen varierar i tiden i en viss punkt.

Diffusionskonstanten för kloridjoner i betong varierar typiskt mellan 10^{-11} och 10^{-13} m^2/s (Bertolini et al., 2004). Antag ett värde på 10^{-12} m^2/s och en kloridhalt vid ytan på 1 vikt-%. Figur 3 visar hur kloridhalten 50 mm in i betongen då ökar som funktion av tiden. Den undre gränsen för kloridinducerad korrosion, 0,2 vikt-% klorid, överskrids efter 25 år. Ett täcksikt av 50 mm betong skyddar således stålarmering mot korrosionsangrepp under minst 25 år med de givna förutsättningarna.

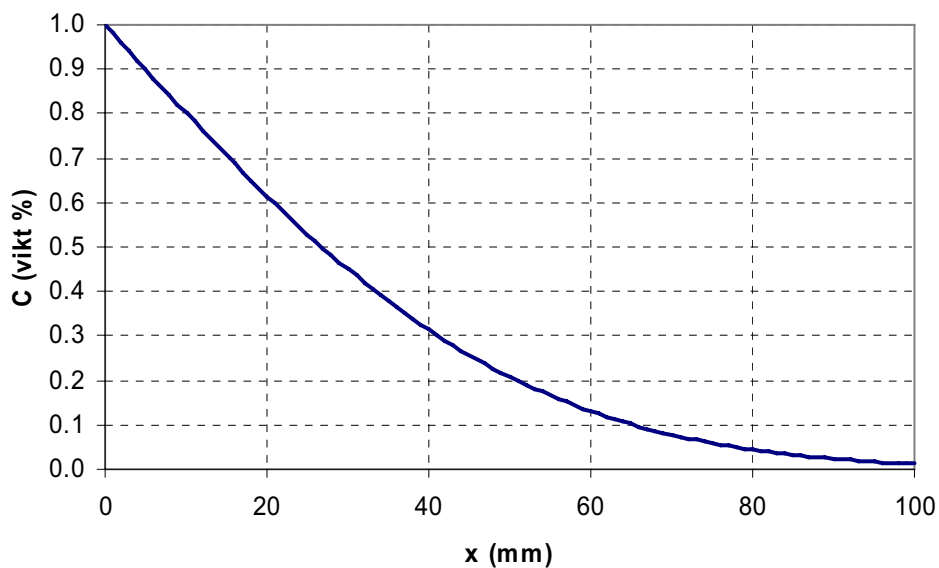


Figur 3: Diffusion av kloridjoner i betong vid en diffusionskonstant på 10^{-12} m^2/s och en kloridhalt vid ytan på 1 vikt-%. Figuren visar kloridhalten 50 mm in i betongen som funktion av tiden.

Ur ekvation (4) framgår att skyddet utsträcks med en faktor fyra (till 100 år) om täcksiktet av betong kan ökas med en faktor två (till 100 mm). Samma förbättring uppnås om diffusionskonstanten kan sänkas med en faktor fyra.

Kloridhaltens variation i djupledd i betongen efter 25 år visas i Figur 4. Diffusionskonstanten och kloridhalten vid ytan är desamma som i Figur 3.

Av både Figur 3 och Figur 4 framgår att frontbeteende som kan iaktas vid diffusion av koldioxid saknas vid diffusion av kloridjoner. Skillnaden i beteende beror på att koldioxiden reagerar med den relativt stora mängden kalciumhydroxid i betongen.

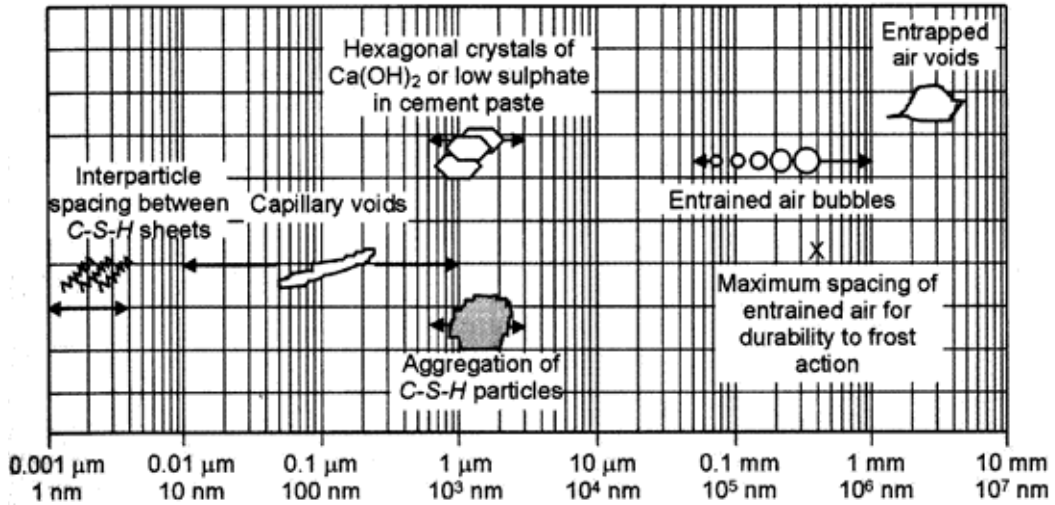


Figur 4: Diffusion av kloridjoner i betong vid en diffusionskonstant på $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ och en kloridhalt vid ytan på 1 vikt-%. Figuren visar kloridhalten i betongen efter 25 år, som funktion av avståndet från ytan.

Mikrostruktur

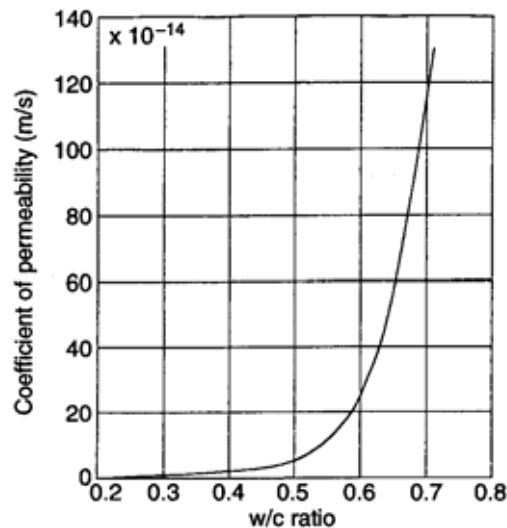
Att koldioxid respektive kloridjoner kan tränga in från ytan, för att slutligen nå stålarmeringen, beror på att cement och betong är porösa material. Även själva korrosionsprocessen förutsätter den porösa strukturen hos cement. Genom att porerna delvis vattenfylls skapas den elektrolyt i kontakt med stålytan som är nödvändig för sedvanlig, elektrokemisk korrosion (till skillnad från t.ex. oxidation av metall vid hög temperatur i gasfas).

Diametern hos porerna i betongen varierar starkt, från kapillärporer med en diameter runt $0,1 \text{ }\mu\text{m}$ och upp till flera mm stora håligheter orsakade av bristfällig kompaktering av betongen, se Figur 5.



Figur 5: Storleksordning hos porer och partiklar i hydratiserad cementpasta (Metha och Monteiro, 1993).

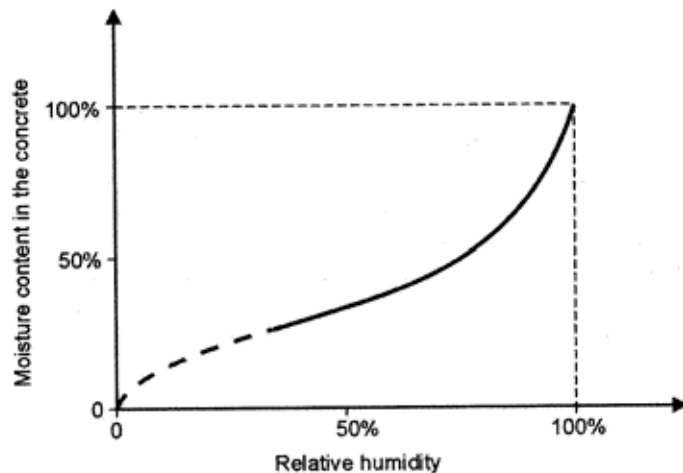
Avgörande betydelse för betongens porositet har förhållandet mellan vatten och cement, w/c-kvoten. Figur 6 visar att betongens genomsläpplighet för vatten ökar kraftigt vid en w/c-kvot över 0,5. Betong med låg w/c-kvot är mer trögflytande och svårare att hantera i samband med gjutningen, men ger ett färdigt resultat av högre kvalitet med bättre skyddad, och därför mer beständig, armering.



Figur 6: Samband mellan w/c-kvoten och cementens genomsläpplighet för vatten (dess permeabilitet). Från Bentur, Diamond och Berke (1997).

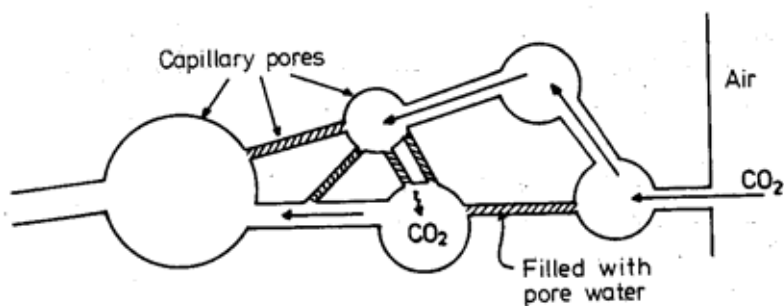
Genom ytspänningens inverkan vattenfylls först de finare porerna, därefter de grövre. Detta leder till att jämviktsfukthalten i betongen varierar med omgivningens relativa

fukthalt. Sambandet är dock inte linjärt; De grövre porerna vattenfylls först vid en hög relativ omgivningensfukthalt se Figur 7



Figur 7: Schematiskt jämviktsamband mellan fukt i cementens porstruktur och omgivningens relativa fukthalt (CEB, 1992).

Den beskrivna porstrukturen leder till att diffusion i betong normalt sker i ett nätverk av delvis luftfyllda, delvis vattenfyllda porer. Diffusionen av koldioxid går snabbast i luftfyllda porer och väsentligt långsammare i vattenfyllda. Denna situation illustreras i Figur 8. För diffusionen av kloridjoner är förhållandet det motsatta: kloridjonerna kan endast diffundera i vattenfyllda porer. I båda fallen får betongens fukthalt stor betydelse för diffusionsförloppet¹.



Figur 8: Schematisk skiss av diffusionen av CO_2 i betong. De grövre porerna som inte är vattenfyllda fungerar som primära transportkanaler. Detta kanalsystem avbryts av smalare kanaler fyllda med porlösning. Den långsammare diffusionen i de vätskefyllda porerna bromsar koldioxidfrontens penetration av betongen (Tuutti, 1982).

Syretransporten i betongen kan ha stor inverkan på korrosionen av ingjuten armering. Precis som koldioxid transporteras syre fram till armeringen genom diffusion i delvis luftfyllda, delvis vattenfyllda porer. Diffusionen beskrivs av ekvationerna (3) och (4) och ger upphov till förlopp av den typ som illustreras i Figur 3 och Figur 4.

¹ Kloriddiffusion studeras normalt på betongprov helt nedsänkta i kloridlösning, dvs betongens vattenupptag är maximalt.

Liksom för koldioxid avtar syres diffusionshastighet med ökande fukthalt i betongen. Särskilt låg blir diffusionshastigheten i betong nedsänkt i vatten. Den resulterande syreutarmningen vid stålytan får konsekvenser för korrosionshastigheten, för vilka korrosionsprodukter som bildas och för hur betongen påverkas.

För reaktorinneslutningar är syrediffusionen av intresse bland annat genom att syrehalten inuti inneslutningen växlar mellan mycket låg nivå under reaktordrift och normal nivå under avställning. Dessa växlingar fortplantar sig med en betydande fördröjning till t.ex. tätplåten, som är täckt av 25 cm betong. Tänkbara konsekvenser är bland annat temporära elektrokemiska koncentrationsceller vid atmosfärsbyte i inneslutningen samt missvisande resultat av elektrokemiska mätningar (potential, korrosionshastighet), såvida dessa inte utförs lång tid efter ett atmosfärsbyte.

Makrostrukturens inverkan

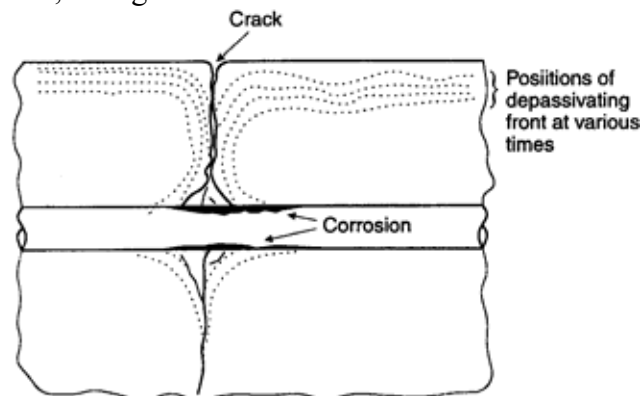
Betongen skyddar normalt armeringen mot kontakt med omgivningen och upprätthåller samtidigt en gynnsam, kemisk miljö. Hur bra skyddet är beror på betongens mikrostruktur (kapillärporer), men även på dess makrostruktur i form av sprickor och håligheter. Defekter av denna typ påverkar korrosionen av ingjutningsgods, ibland kraftigt.

I Bentur, Diamond och Berke (1997) särskiljs tre fall beroende på tillståndet hos det betongskikt som täcker armeringen:

- Sprickfritt täckskikt utan hålrum.
- Täckskikt innehållande sprickor.
- Täckskikt innehållande andra defekter än sprickor, främst hålrum.

Sprickfritt täckskikt har behandlats ovan. Täckskikt innehållande sprickor eller håligheter har negativ effekt genom att diffusion av koldioxid och klorid underlättas.

Beeby (1979) har genom en kritisk analys av data kommit fram till att den främsta effekten av en spricka är att den underlättar transport av koldioxid till betongen runt armeringen nära sprickan, se Figur 9.



Figur 9: Schematisk bild av depassiveringsfronten i ett område med sprickor (Beeby, 1979).

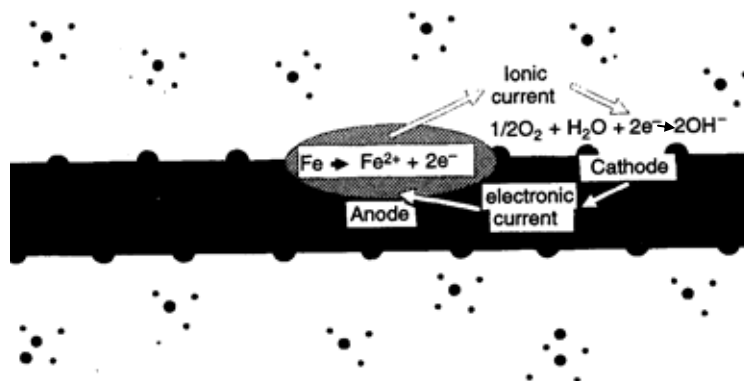
Hålrums kan medföra att pH på ytan på ingjutningsgods inte når upp till den nivå som krävs för passivering av stål. Även andra negativa korrosionseffekter kan uppstå, såsom koncentrationsceller. Förståelsen av detta kräver kännedom om de elektrokemiska mekanismerna bakom korrosionsprocessen. Dessa behandlas därför i det följande och inverkan av hålrums i ett senare avsnitt.

Korrosionsmekanismer för stål i betong

Av föregående avsnitt har framgått att betong är ett poröst material och att porerna normalt är delvis vattenfyllda. Betong kan därigenom fungera som elektrolyt och ingjuten armering kan reagera elektrokemiskt, korrodera. Korrosion av stål i betong förhindras i normalfallet av högt pH som passiverar stålytan. Under vissa förhållanden är emellertid korrosion möjlig. De två viktigaste fallen är att pH sänks genom karbonatisering av betongen respektive att passivskiktet kollapsar lokalt genom inverkan av kloridjoner. Diffusionsförlopp spelar en betydande roll för transport av olika ämnen i betongen, bland dem korrosionsdrivande syre. Fukthalten i betongen är en väsentlig parameter som starkt påverkar både tillgängligheten av elektrolyt och diffusionen.

Kvalitativ beskrivning av korrosionsprocessen

Korrosion i närvaro av elektrolyt är en elektrokemisk reaktion och kan delas upp i en anod- och en katodreaktion. Anodreaktionen är oxidation av metall och katodreaktionen reduktion av syre (i syrefri miljö reduktion av vatten). Utmärkande för elektrokemisk korrosion är att anod- och katodreaktionerna kan äga rum på olika ställen på metallytan och kopplas till varandra genom en sluten strömkrets. Strömkretsen sluts via en elektronström i metallen och en jonström i elektrolyten. Situationen illustreras i Figur 10.



Figur 10: De anodiska och katodiska delreaktionerna vid korrosion av ett armeringsjärn. (Broomfield, 1997)

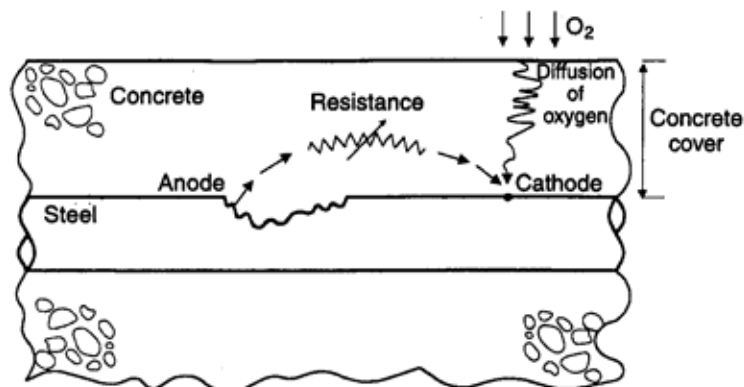
Att anod- och katodreaktionen kan separeras enligt Figur 10 medför att varje delreaktion kan ske där förutsättningarna är gynnsammast. Till exempel kan anodreaktionen ske på ett ställe med hög kloridhalt, där passivskiktet har brutits ner, medan katodreaktionen kan koncentreras till områden med hög syrehalt.

Drivkraften för den kemiska reaktionen resulterar i en potentialskillnad som driver strömmen i kretsen i Figur 10. Potentialskillnaden kan beräknas termodynamiskt som skillnaden mellan två potentialnivåer, jämviktspotentialen för respektive delreaktion i figuren. Jämviktspotentialen beror på reaktionen och på koncentrationerna av de reagerande ämnena. Den kan mätas relativt en referenselektrod om andra elektrokemiska reaktioner förhindras. Jämviktspotentialen för syrereduktion kan t.ex. inte mätas på en korroderande elektrod, men däremot (med viss svårighet) på en platinaelektrod.

När strömkretsen är kortsluten, som i Figur 10, blir potentialskillnaden väsentligen noll mellan de två ställen på armeringsjärnet där anod- respektive katodreaktion antas ske. Strömmen per ytenhet (strömtätheten, korrosionshastigheten) begränsas då på olika sätt, dvs. potentialfallet kan delas upp på olika komponenter. Mest grundläggande är att varje delreaktion kräver en potentialskillnad relativt jämviktspotentialen för att en ström skall flyta. Denna potentialskillnad benämns aktiveringspolarisation.

Hastigheten för anodreaktionen ökar med ökande *positiv* aktiveringspolarisation, medan hastigheten för katodreaktionen ökar med ökande *negativ* aktiveringspolarisation. När armeringsjärnets potential förändras ökar således hastigheten för den ena delreaktionen och minskar hastigheten för den andra. Kravet på laddningsbalans medför att metallens elektriska potential ställer in sig så att hastigheten för de båda reaktionerna i Figur 10 anpassas till varandra. Denna potential utgör metallens korrosionspotential. Den kan mätas i en punkt på metallytan relativt en referenselektrod i betongen, nära den aktuella punkten på metallytan.

Korrosionspotentialen för stål i betong är en lokal storhet som normalt inte är densamma vid anod och katod. Detta beror på begränsad ledningsförmåga i betongen. Jonströmmen i betongen ger därför upphov till ett större eller mindre potentialfall, se Figur 11. Detta potentialfall medför att potentialsprånget mellan metall och betong skiljer sig åt mellan anod och katod. Med andra ord, korrosionspotentialen skiljer sig åt mellan anod och katod².



Figur 11: Två faktorer som begränsar korrosionshastigheten hos stål i betong, resistansen respektive diffusionsmotståndet i betongen. (Bentur, Diamond och Berke, 1997)

Potentialfallet i betongen reducerar den aktiveringspolarisation som är tillgänglig för att driva anod- och katodreaktionen. Därigenom sjunker korrosionshastigheten. Potentialfallet i betongen, som följer Ohms lag, benämns IR-potentialfall.

Syre diffunderar endast långsamt i betong. Syreförbrukningen kan därför reducera syrehalten på ytan av armeringsjärnet påtagligt. Denna koncentrationsändring reducerar

² Metallen på båda ställena befinner sig på väsentligen en och samma elektriska potential (relativt jord), det är den elektriska potentialen i betongen som skiljer sig åt mellan anod och katod. Korrosionspotentialen, som kan uppfattas som den lokala potentialskillnaden mellan metall och betong, skiljer därför mellan anod och katod

drivkraften för korrosionsreaktionen, dvs. den potentialskillnad som driver korrosionsreaktionen. Potentialsänkningen benämns koncentrationspolarisation.

Den teoretiskt tillgängliga potentialskillnaden mellan anod och katod kan således delas upp på aktiveringspolarisation, koncentrationspolarisation och IR-potentialfall. Endast aktiveringspolarisationen driver reaktionen medan koncentrationspolarisationen och IR-potentialfallet är ”förlusttermer”.

Aktiveringspolarisationens fördelning mellan anod- och katodreaktion behöver inte vara jämn. Om t.ex. anodreaktionen är långsam kräver denna kraftigare aktiveringspolarisation än katodreaktionen. Man talar då om anodisk styrning av totalreaktionen. Eftersom den snabbare katodreaktionen kräver mindre aktiveringspolarisation kommer korrosionspotentialen att ligga nära katodreaktionens jämviktspotential, dvs högt, vid anodisk styrning. Omvänt gäller vid katodisk styrning.

Jonvandringen i betongen sker i de vattenfyllda porerna/kapillärerna. Betongens fukthalt blir därför avgörande för dess elektriska ledningsförmåga. I torr miljö, som inomhusmiljö, blir betongens resistans hög, åtminstone efter lång tid och vid betongskikt av begränsad tjocklek. Korrosionshastigheten blir då låg. För karbonatiserad betong blir den försumbart låg (Bertolini et al., 2004). I kloridhaltig betong kan korrosionen fortgå vid lägre fukthalt än i karbonatiserad betong.

För karbonatiserad betong har ett linjärt samband noterats mellan korrosionshastigheten och betongens resistans. Många författare drar slutsatsen att korrosionen förutsätter strömmar mellan anodiska och katodiska delytor på armeringen på det sätt som visas i Figur 10 och Figur 11 och att det är motståndet mot strömmarna mellan dessa delytor som leder till korrelationen mellan korrosionshastigheten och betongens ledningsförmåga. Detta kan vara en förhastad slutsats. Att anod- och katodreaktionen är åtskilda i rummet, som i Figur 11, är *en möjlighet* vid en elektrokemisk reaktionsmekanism, men *inte en nödvändighet*. Ur energisynpunkt är det mer gynnsamt att båda reaktionerna sker i samma punkt (bortsett från atomära dimensioner), eftersom resistansen i Figur 11 då bortfaller. I fallet karbonatisering är både anod- och katodreaktion fördelad över ytan. Betydelsen av strömmar i betongen är då rimligen begränsad. En möjlig förklaring till samvariationen mellan korrosionshastigheten och betongens ledningsförmåga är att båda storheterna är proportionella mot tillgången på elektrolyt.

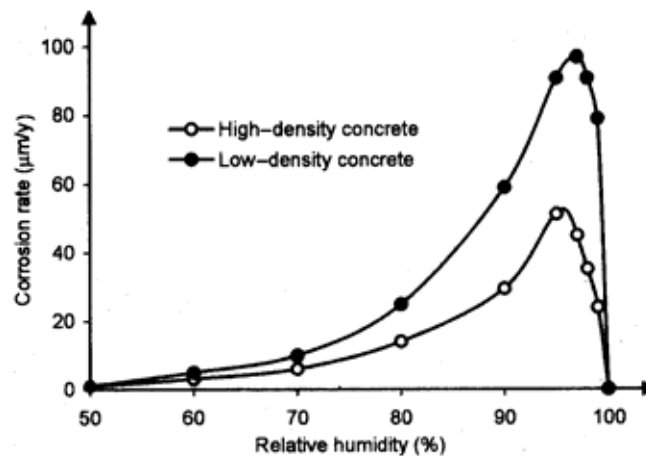
Kloridinducerad korrosion svarar mer direkt mot situationen i Figur 11 genom att den anodiska metallupplösningen sker lokalt på ställen där passivskiktet har kollapsat. Den balanserande, katodiska syrereduktionen kan däremot ske över en större yta. Jäggi, Böhni och Elsener (2001) har emellertid visat att korrosionshastigheten i fallet kloridinducerad korrosion i betong har ett temperaturberoende som svarar mot det hos de båda elektrokemiska delreaktionerna, medan betongens ledningsförmåga har en betydligt svagare temperaturvariation. Inte heller i fallet kloridinducerad korrosion, där jonvandring i betongen är att vänta, tycks således betongens elektriska ledningsförmåga i normalfallet vara avgörande för korrosionshastigheten.

Med hänvisning till Figur 11 kan man peka ut tre situationer som leder till låg, eller till och med försumbar korrosionshastighet:

- Den anodiska delreaktionen är långsam på grund av att metallytan är passiverad.
- Den katodiska delreaktionen är långsam på grund av syrebrist vid armeringen, till exempel på grund av att betongen är vattenmättad vilket ger långsam syrediffusion.
- Det elektriska motståndet i betongen är högt på grund av låg fukthalt i betongen. (Som påpekats ovan kan brist på elektrolyt vara den viktigaste konsekvensen av låg fukthalt i betongen.)

Omvänt är korrosionshastigheten hög i de fall då samtidigt metallen är (delvis) icke passiverad, då syre kan nå (delar av) armeringen och då betongens ledningsförmåga är hög/tillgången på elektrolyt god.

I praktiken har fukthalten stor inverkan på korrosionshastigheten, se Figur 12.



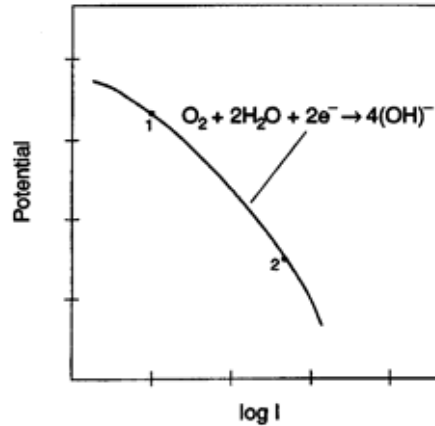
Figur 12: Korrosionshastigheten hos kloridhaltig betong som funktion av atmosfärens relativa fuktighet för betong med låg respektive hög täthet. (Bertolini et al., 2004)

Korrosionshastigheten är som högst i betong som står i jämvikt med luft med en relativ fuktighet på ca 95 %. I detta sammanhang bör man emellertid komma ihåg att betong, bortsett från ett ytskikt, oftast är fuktigare än vad som motsvarar jämvikt med atmosfären. Detta beror på att betongen lätt tar upp fukt men endast mycket långsamt avger den.

Evansdiagram

En fördjupad förståelse för den elektrokemiska korrosionsprocessen kan uppnås genom att sambandet mellan potential och ström för de olika delreaktionerna återges i diagramform, så kallade Evansdiagram. Dessa diagram utgör även en grund för diskussion av olika elektrokemiska mätmetoder för korrosionshastighet. Instruktiva uppsättningar av diagram finns flera läroböcker, t.ex. Bentur, Diamond och Berke (1997) och Bertollini et al. (2004). Potentialskanan i diagrammen nedan utgår ifrån att en mättad kalomel-elektrod (Saturated Calomel Electrode, SCE) används som referenselektrod.

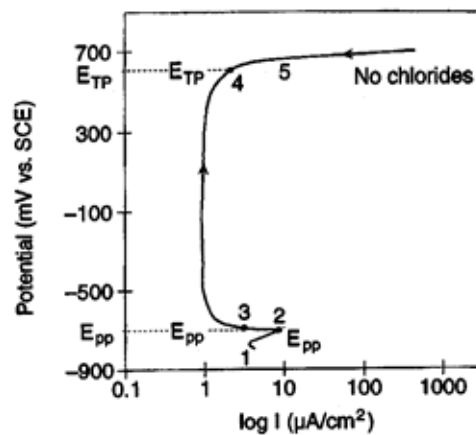
Mest grundläggande är att det för anod- respektive katodreaktion finns ett karakteristiskt samband mellan ström per ytenhet (reaktionshastighet) och potential. Detta samband benämns polarisationskurva. En polarisationskurva för katodreaktionen, dvs. syrereduktion, visas schematiskt i Figur 13³.



Figur 13: Schematisk polarisationskurva för syrereduktion i betongmiljö. (Bentur, Diamond och Berke, 1997)

Som nämnts ovan ökar reduktionshastigheten med ökande negativ polarisation, dvs. med avtagande potential. Ökningen är ofta exponentiell inom ett delområde. Inom detta område blir kurvan då en rät linje om den plottas mot logaritmen för strömtätheten.

Polarisationskurvan för anodreaktionen, dvs. metalloxidation, är mer komplicerad, se Figur 14.



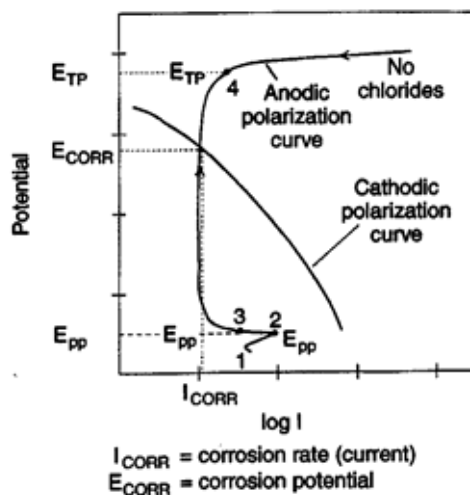
Figur 14: Schematisk polarisationskurva för stål i alkalisk miljö. (Bentur, Diamond och Berke, 1997)

Vid starkt negativa potentialer ökar korrosionshastigheten snabbt med potentialen, punkterna 1-2 i Figur 14. Vid en viss potential, den primära passiveringspotentialen, E_{pp} , inträder plötsligt en kraftig minskning av korrosionsströmmen, punkterna 2-3 i

³ Polarisationskurvor ritas ibland med x- och y-axlarna omkastade.

figuren. Över ett stort potentialområde är sedan korrosionshastigheten mycket låg, punkt 3-4 i figuren. Vid mycket hög potential inträder syrgasutveckling. Detta leder till en pH-förändring som kan bryta passiveringen. Korrosionen ökar då åter (TransPassiva området, punkt 4-5 i figuren).

Lokal laddningsbalans kräver att reduktions- och oxidationsreaktionen har samma strömtäthet. Denna kan bestämmas genom att överlagra diagrammen för de två delreaktionerna i Figur 13 respektive Figur 14, se Figur 15. Skärningspunkten mellan kurvorna ger korrosionsströmmen I_{CORR} och korrosionspotentialen E_{CORR} .

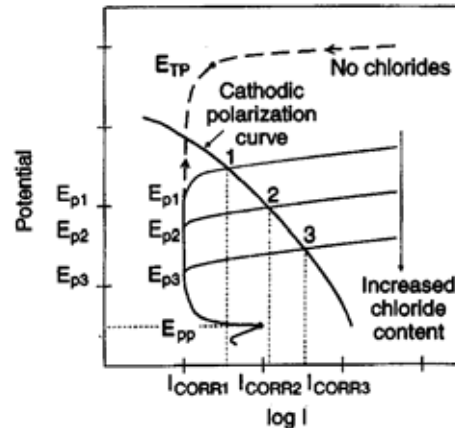


Figur 15: Överlagring av katod- och anodreaktionen ger korrosionshastigheten I_{CORR} och korrosionspotentialen E_{CORR} (Bentur, Diamond och Berke, 1997)

Genom utveckling av Evansdiagrammet i Figur 15 kan inverkan av karbonatisering respektive kloridupptag åskådliggöras.

Närvaro av klorid vid metallytan modifierar den anodiska polarisationskurvan i Figur 14 genom att passivskiktet kollapsar vid en viss, positiv potential. Gropfrättningsangrepp uppstår då på metallytan, vilket lokalt kan ge mycket kraftig korrosion. Vid successivt ökande kloridhalt blir denna så kallade gropfrättningspotential (pitting potential, E_p) successivt allt lägre. Detta ger situationen i Figur 16. Man ser att polarisationskurvan för metalloxidation skär polarisationskurvan för syrereduktionen vid successivt allt lägre korrosionspotential och allt högre korrosionshastighet då kloridhalten ökar.

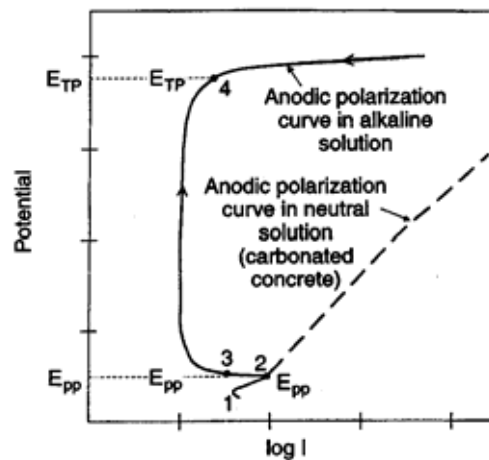
Figur 16 indikerar att en lägre korrosionspotential kan associeras med en högre korrosionshastighet. Korrosionspotentialen kan ofta mätas relativt enkelt, om än med begränsad noggrannhet. Det kvalitativa sambandet mellan korrosionspotential och korrosionshastighet i Figur 16 används vid utvärderingen av potentialmätdata och stämmer i allmänhet med vad som framkommer vid en närmare undersökning av korrosionen. Att lägre korrosionspotential medför högre korrosionshastighet är dock inte ett generellt samband. Sambandet gäller då kloridhalten varierar, som i Figur 16,



Figur 16: Inverkan av successivt ökande kloridhalt på korrosionshastighet och korrosionspotential. (Bentur, Diamond och Berke, 1997)

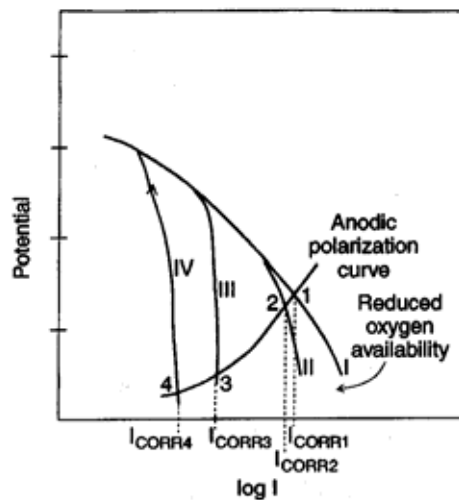
men inte om syrehalten varierar och kloridhalten är konstant eller betongen karbonatiserad. Det senare fallet presenteras nedan.

Att betongen är karbonatiserad innebär att all stark alkali förbrukats och att pH närmast sig det neutrala området. Oxidfilmens löslighet ökar då, vilket leder till att ett passivskikt inte kan upprätthållas – metallen övergår till aktivt tillstånd. Polarisationskurvan för detta fall illustreras schematiskt av den streckade linjen i Figur 17.



Figur 17: Polarisationskurvor för stål i betong respektive karbonatiserad betong. (Bentur, Diamond och Berke, 1997)

Då polarisationskurvan för aktiv metall i Figur 17 kombineras med kurvor för syre-reduktion vid olika syrehalter får man situationen i Figur 18. Kurvorna I-IV svarar mot successivt lägre syrehalt. Man ser att en sänkning av syrehalten ger en sänkning av såväl korrosionspotential som korrosionshastighet. De katodiska kurvorna III och IV med ett nästan vertikalt förlopp vid låga potentialer svarar mot diffusionsstyrd syrereduktion som ger en betydande koncentrationspolarisation. Både korrosionspotentialen och korrosionshastigheten blir då låg.

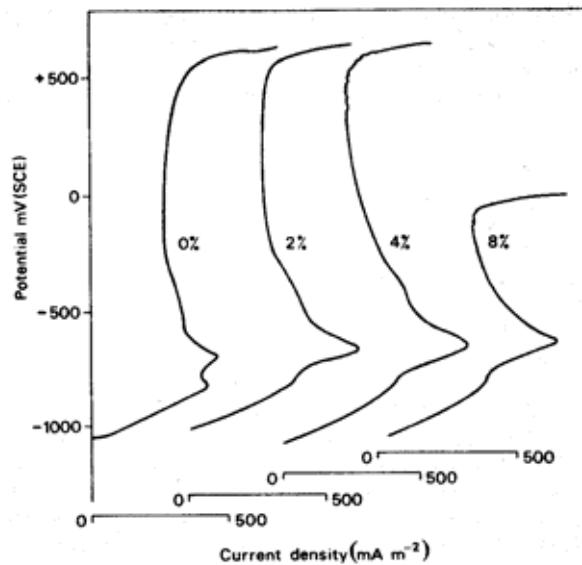


Figur 18: Polarisationskurva för stål i karbonatiserad betong, respektive för syre-reduktion vid olika syrehalter. (Bentur, Diamond och Berke, 1997)

Potentialmätning är en relativt säker metod att särskilja passivt och aktivt/korroderande stål i betong, baserat på att korrosionspotentialen är påtagligt högre vid passivt tillstånd (Figur 15) än vid gropfrätning (Figur 16) eller aktivt tillstånd (Figur 18). Däremot kan variationer i korrosionspotential inte enkelt och kvantitativt översättas till variationer i korrosionshastighet.

Ett fall som kan vara av intresse är när syrehalten sänks vid atmosfärsbyte från luft till kväve i reaktorinneslutningen för en kokarrektor. Genom att jämföra de olika syrekurvorna i Figur 18 med kurvan för passiverande metall i Figur 15 ser man att tätplåtens insida förblir i passivt tillstånd tills förhållandena blir nära anaeroba. Metallen kan då gå över till aktivt tillstånd, men korrosionshastigheten blir ändå låg. Hög korrosionshastighet kräver både att metallen är (förblir) aktiv och att drivkraft för korrosionen finns i form av oxidationsmedel, elektrokemisk cell, läckström eller motsvarande.

En reservation som måste tillfogas Evansdiagrammen ovan är att samtliga polarisationskurvor är schematiska. Ett sådant påpekande innebär normalt att ett diagram skall ses som typexempel på mätdata. Här är reservationen starkare än så: I fallet stål i betong är det förenat med principiella svårigheter att ta upp realistiska polarisationskurvor. Främsta orsaken är att den begränsade jonrörligheten i cementmatrisen ger upphov till stora koncentrationsgradienter, och som konsekvens därav kemiförändringar, vid upptagning av en polarisationskurva. Resultatet beror därför på den hastighet varmed potentialsvepet utförs. Ett exempel på vad konsekvensen kan bli ges av Page och Treadaway (1982), se Figur 19. Enligt polarisationskurvorna i figuren har hela 4 % kalciumklorid ingen effekt på den anodiska polarisationskurvan, och därmed inte heller på korrosionen. Detta är ett orealistiskt resultat. Författarna hänför avsaknaden av effekt till långsam diffusion av kloridjoner i cementmatrisen. Härigenom hinner gropfrätning inte uppstå under svepet, trots den relativt låga svephastigheten. (Även provkroppens begränsade storlek kan ha spelat in, mer om detta i avsnittet om hålrums inverkan.)



Figur 19: Experimentell anodisk polarisationskurva för stål i Portlandcement (w/c 0,4) innehållande varierande viktprocent $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Svephastighet 1 mV/s. (Page och Treadaway, 1982)

För att komma runt diffusionsbegränsningarna utför man ofta elektrokemiska försök i simulerad porlösning, vanligen vatten mättat med $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Detta är emellertid en grov simulering av de verkliga förhållandena (Page och Treadaway, 1982). I cementmatrisen driver KOH och NaOH upp pH till över 13, mot 12,6 i mättad kalciumhydroxidlösning. Ännu viktigare är troligen att pH är väl buffrat i betong genom att cementmatrisen innehåller ca 20 % kristallin kalciumhydroxid. Denna buffring försvårar utveckling av en lokalt sur miljö och bildning av en frätgrop. En annan skillnad är att kloridhalten i cementmatrisen inte kan jämföras med den i en simulerad porlösning eftersom klorid adsorberas på porytan i cementmatrisen, något som även påverkar diffusionskinetiken.

En konsekvens av ovanstående svårigheter är att elektrokemiska metoder normalt inte ger kvantitativt pålitliga resultat, vare sig i simulerad porlösning eller i en cementmatris. För pålitliga, kvantitativa resultat krävs som regel långvarig exponering av provkroppar. Däremot är elektrokemiska metoder ofta användbara för accelererade parameterstudier och jämförande undersökningar.

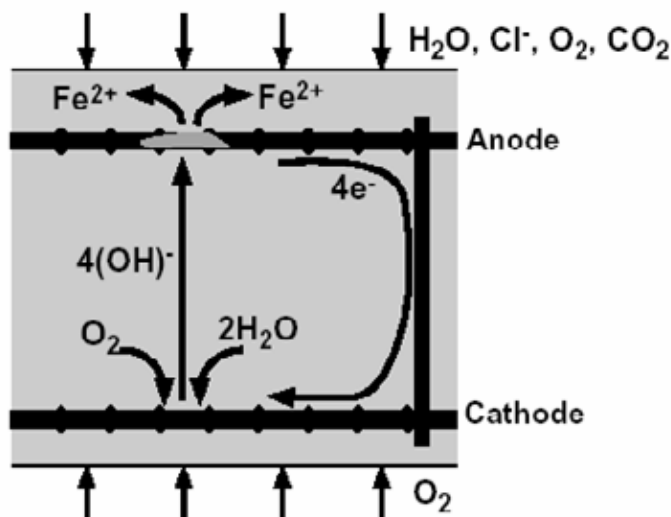
Makroceller

En begränsning hos samtliga Evansdiagram i föregående avsnitt är att de avspeglar en situation där oxidation och reduktion sker i samma punkt och inga strömmar utväxlas med omgivningen. Detta är ofta en förenkling. Armeringsjärn har betydande utsträckning och är galvaniskt sammankopplade. I betongen råder ofta olika kemiska betingelser på olika ställen. Detta ger upphov till koncentrationsceller, även kallade makroceller, som drastiskt kan påverka korrosionshastigheten.

Man kan jämföra en koncentrationscell med en galvanisk cell. I en galvanisk cell ger skilda metaller i samma miljö en potentialskillnad. I en koncentrationscell ger samma

metall i (kvantitativt) skilda miljöer en potentialskillnad. Miljöskillnaderna kan hänföra sig till pH, syrehalt, kloridhalt, fukthalt eller en kombination av dessa. Variationen i miljö kräver en viss utsträckning i rummet, därav namnet makrocell. Även temperaturskillnader kan ge upphov till en makrocell.

En makrocell innebär att anod- och katodreaktionen separeras i större eller mindre omfattning. Situationen har i princip redan illustrerats i Figur 11. Ett idealiserat exempel på hur en makrocell kan uppstå och påverka korrosionen visas i Figur 20.



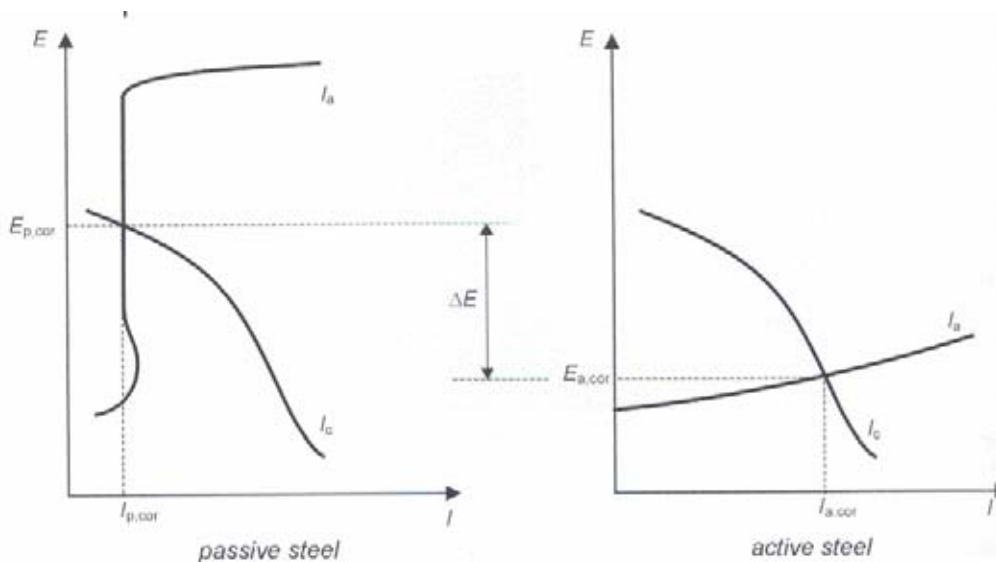
Figur 20: Idealiserad makrocellkorrosion i körbana av armerad betong.
(West et al., 1999)

Figuren avser att illustrera hur korrosionsangrepp kan uppstå i körbanan på en bro under inverkan av vägsalt och en makrocell. Vatten och vägsalt tillförs ovanifrån. Detta ger en hög kloridhalt vid det övre lagret av armering som leder till lokal kollaps av passivskiktet. Samtidigt leder vattentillförseln till att porerna i betongen vattenfylls och att syrediffusionen uppifrån därför försvåras. Undersidan av körbanan är emellertid skyddad från vattentillförsel och väsentligt torrare. Därför kan syre med lätthet diffundera upp underifrån mot det nedre lagret av armering. Resultatet blir en makrocell där det övre lagret av armeringen reagerar anodiskt med metallupplösning och den balanserande katodreaktionen, syrereduktion, sker på det nedre lagret av armering. Strömkretsen sluts genom en jonström i betongen samt en elektronström i sammanbindande länkar mellan de övre och undre skikten av armering.

Jonströmmen i betongen ger upphov till ett spenningsfall i denna, samtidigt som den elektriska potentialen är väsentligen densamma i det övre och det undre skiktet av armering. Denna situation upprätthålls genom att korrosionspotentialen (potentialskillnaden mellan stål och betong) är högre vid det nedre, passiva skiktet armering än vid det delvis aktivt korroderande övre skiktet. Den elektriska potentialen blir därför lägre i den nedre delen av betongen än i den övre. Denna potentialskillnad driver den jonvandring som indikeras i Figur 20.

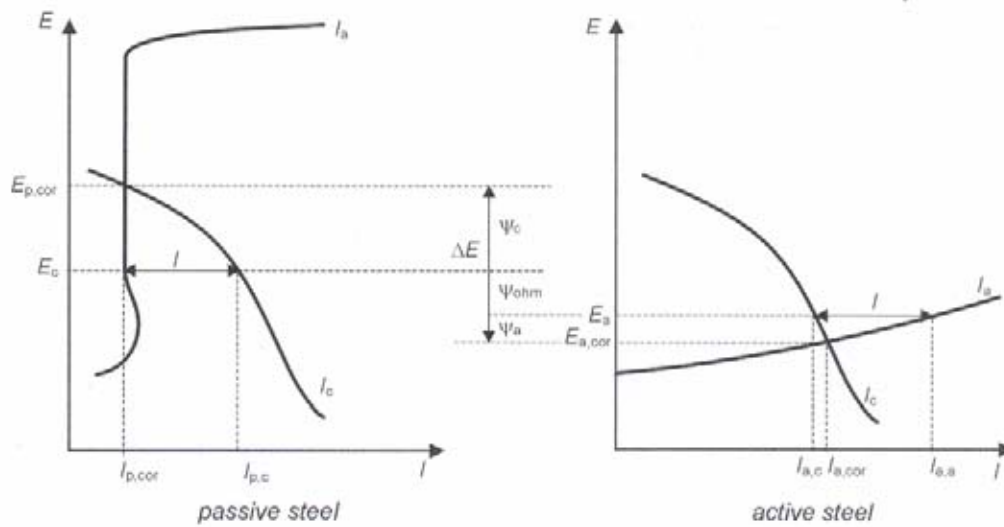
I makrocellen i Figur 20 förstärks korrosionen kraftigt av att syrereduktionen kan ske på en stor yta med tillräcklig syretillförsel (ingen koncentrationspolarisation). Jonströmmen i betongen kräver emellertid god ledningsförmåga. Betongens ledningsförmåga är kraftigt beroende av fukthalten. Beroende på fukthalten kommer därför den teoretiskt tillgängliga potentialskillnaden att fördela sig på olika sätt. Vid relativt hög fukthalt i betongen blir ledningsförmågan hög. IR-potentialfallet i betongen blir då lågt och potentialskillnaden fördelar sig på aktiveringspolarisation för anod- respektive katodreaktionen. Korrosionshastigheten blir då hög. Vid lägre fukthalt i betongen ökar IR-potentialfallet. Den sammanlagda aktiveringspolarisationen minskar i motsvarande grad och korrosionshastigheten blir lägre.

En makrocell kan illustreras med Evansdiagram, men bilden blir något komplicerad beroende på att såväl anod som katod i makrocellen är ”mikroceller” med var sin anodreaktion respektive katodreaktion. Om anod och katod i makrocellen i Figur 20 antas vara elektriskt isolerade från varandra har man situationen i Figur 21. (De två delfigurerna motsvarar Figur 15 respektive Figur 18 ovan.) Skillnaden i korrosionspotential mellan katod och anod, ΔE , är den tillgängliga drivkraften för strömmen i makrocellen.



Figur 21: Schematisk bild av korrosionsbetingelserna vid ett passivt respektive ett aktivt armeringsjärn. Den tillgängliga drivkraften för en makrocell är ΔE . (Bertolini et al., 2004)

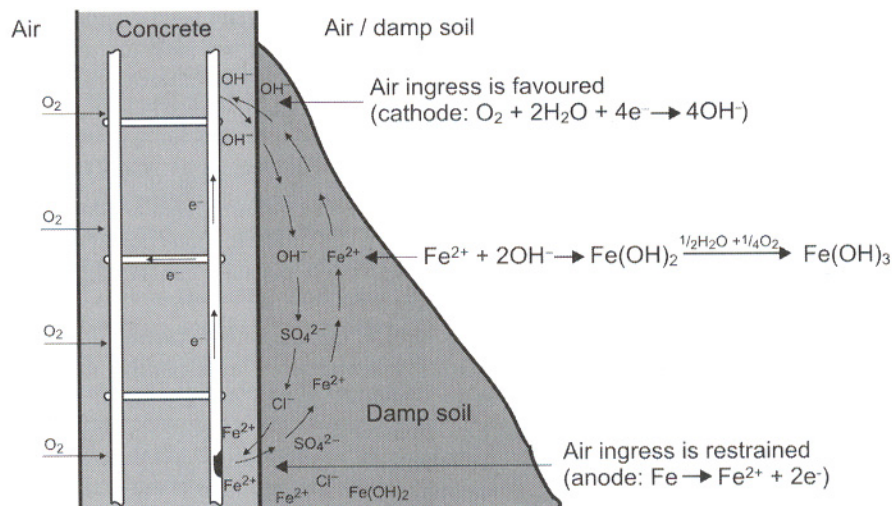
När strömkretsen i makrocellen sluts börjar en ström I flyta i makrocellen och man får situationen i Figur 22. Det tillgängliga potentialfallet ΔE delas upp på tre delbidrag, IR-potentialfallet Ψ_{ohm} samt den polarisation av anod och katod i makrocellen, Ψ_a respektive Ψ_c , som krävs för att strömmen I skall flyta. Sambandet mellan strömmen I och Ψ_a respektive Ψ_c ges av polarisationskurvorna för respektive ”mikrocell”. Syrereduktionen polariseras tills nettoströmmen $I_{p,c} - I_{p,cor}$ blir lika med cellströmmen I . Med hänsyn till logaritmisk skala på x-axeln är $I_{p,cor}$ försumbart låg jämfört med $I_{p,c}$ varför $I \approx I_{p,c}$. Sambandet mellan I och Ψ_c ges således väsentligen av polarisationskurvan för syrereduktion.



Figur 22: Schematisk bild en makrocell mellan ett passivt och ett aktivt armeringsjärn. Den tillgängliga potentialskillnaden ΔE fördelar sig på aktivering av anoden, Ψ_a , aktivering av katoden, Ψ_c , samt IR-potentialfall i betongen, Ψ_{ohm} . (Bertolini et al., 2004)

Vid anoden i makrocellen ges på motsvarande sätt sambandet mellan I och Ψ_a väsentligen av polarisationskurvan för oxidation av aktiv metall.

Med hänsyn till den stora praktiska betydelsen av makroceller ges nedan ytterligare ett exempel på en makrocell som beskrivits av Laase och Stichel (1983) och som kortfattat återges i Bertolini et al. (2004). Exemplet gäller en skiljevägg av armerad betong som avgränsar en nedgrävd trafikled, se Figur 23.



Figur 23: Makrocell vid skiljevägg. (Bertolini et al., 2004)

Anodiska ytor hade bildats i väggens inre, nedre del där den fuktiga marken förhindrade syretransport. Katodytor fanns i väggens yttre samt övre delar. Som ett resultat av den makrocell som indikeras i figuren återfanns stora mängder korrosionsprodukter på varierande avstånd från anodyterna, och även i jorden intill väggen. Detta indikerar att anaeroba förhållanden lett till bildning av löslig Fe^{2+} som spridit sig från anodyterna.

Normalt råder inte anaeroba förhållanden i betongen och järn oxideras vidare till svår-löslig Fe^{3+} . Korrosionsprodukterna fälls då ut direkt vid korrosionsstället. Detta får lätt negativa konsekvenser för betongkonstruktionen.

Inverkan av hålrum i betongen

Oavsiktliga hålrum i betong är, tillsammans med kloridkontaminering och karbonatisering, en känd källa till korrosion av stål i betong. Genom att stålytan saknar kontakt med cementmatrisen utbildas inte ett skyddande passivskikt. Korrosion uppstår då, såvida inte fukthalten är låg. Samtidigt är förutsättningarna goda för att den avvikande miljön i hålrummet skall ge upphov till en elektrokemisk koncentrationscell. Korrosionshastigheten kan då bli hög.

Ett exempel skulle kunna vara ett hålrum, ev. vattenfyllt, i fuktig betong. Den höga fukthalten leder till låg diffusionshastighet för syre, samtidigt som den aktiva metallen i hålrummet förbrukar syre genom korrosion. Resultatet blir syreutarmning och låg korrosionspotential i hålrummet. I avsaknad av makrocell blir korrosionshastigheten låg, styrd av låg syretillförsel/syrereduktion. Emellertid ger hög fukthalt i betongen god ledningsförmåga och därigenom goda förutsättningar för att den aktiva metallen i hålrummet skall bilda en makrocell tillsammans med passiv metall i bättre kontakt med syre. Denna mekanism har antagits ligga bakom initieringen av anodyterna i Figur 23. Angreppet har sedan förstärkts av att kloridjoner från vägsalt transporterats mot anodyterna av jonströmmen i betongen.

I hålrum i reaktorinneslutningar har i några fall skador uppstått som förutsätter hög korrosionshastighet. Detta tyder starkt på att en makrocell, kanske av ovan beskriven typ, varit verksam.

En viktig fråga är hur stort ett hålrum måste vara för att effekter av ovan beskrivna art skall uppstå. Tillräckligt små hålrum bör inte leda till depassivering av metallytan, eftersom pH vid ytan inte kan variera diskontinuerligt. Vid små dimensioner är även hålrummets förhållande yta/volym stort. Förutsättningarna ökar då för att kalciumhydroxiden i cementmatrisen skall dominera miljön i hålrummet. Det är dock intressant att notera att även mycket små hålrum har en korrosionspåverkan. Detta visar sig genom att små blåsor i betongen intill metallytan ökar metallens känslighet för klorid-inducerade korrosionsangrepp. Page (1975) konstaterar att korrosionsangrepp vid höga kloridhalter så gott som uteslutande börjar vid små luftblåsor på metallytan. Detta tillskriver han att den pH-buffrande effekten hos kalciumhydroxiden i cementmatrisen där saknas eller är svagare. En senare, mer utförlig undersökning (Yonezawa, Ashworth och Procter, 1988) har lett till liknande slutsatser: Stålets passivitet bibehålls vid mycket högre kvot $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$ i cementens porlösning jämfört med stål nedsänkt direkt i

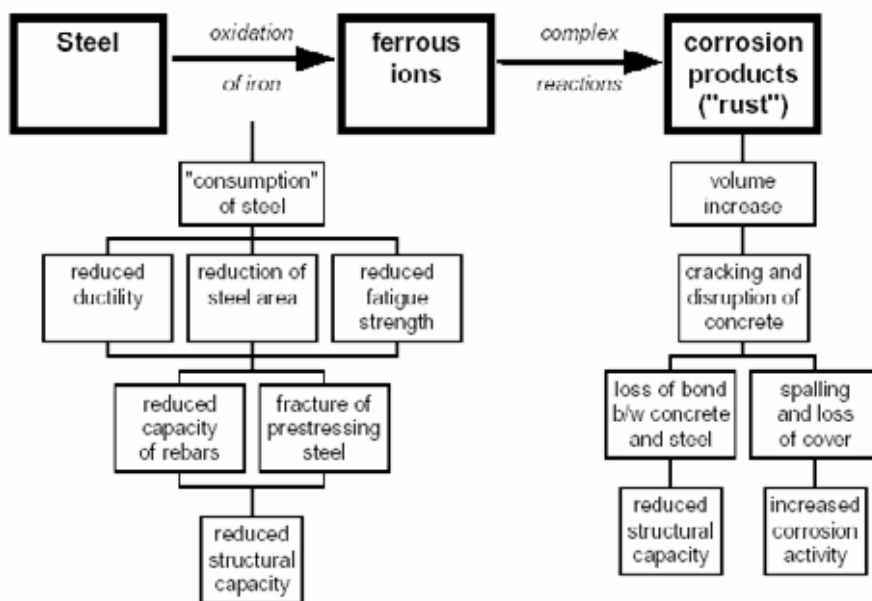
motsvarande alkaliska vattenlösning. Detta bekräftar att cementbruk ger ett bättre korrosionsskydd än en alkalisk lösning med samma pH. Observerad upplösning av kalciumhydroxidkristaller vid gränssytan mot aktivt korroderande metall bekräftar att kalciumhydroxiden verkar pH-buffrande och att detta är en av mekanismerna bakom det goda korrosionsskyddet för stål i cement. En annan mekanism kan ev. vara den diffusionsbarriär som hindrar att löst järn transporteras bort från metallytan (Grönvold, Preece och Arup, 1981).

Glass och Buenfeld (2000) menar att förekomsten av luftblåsor vid metallytan är en okvantifierad parameter som sannolikt ligger bakom de stora variationer i tröskelvärden för kloridinducerad korrosion som observerats (0,2 -2,5 vikt % klorid). Att onormalt höga tröskelvärden ofta observeras vid laboratorieexperiment kan korreleras till att provkropparna är små och väl vibrerade. Detta borgar för god kontakt mellan metall och cement samt låg sannolikhet för luftblåsor.

Man kan således konstatera att hålrum vid gränssytan mellan stål och betong har påtagliga konsekvenser vid både små och stora dimensioner hos håligheten. Vid små luftblåsor ökar oxidfilmens känslighet för klorid. Vid ökande storlek på kaviteterna försämras kalciumhydroxidens pH-buffrande effekt. Hydrolys av metalljoner kan då ge en pH-sänkning vid metallytan och ett omslag till aktivt tillstånd även i "ren" betong. Vid vilken minsta storlek på hålrummen som metallytan kan bli aktiv även i kloridfri miljö tycks inte vara känt, men är av visst intresse med hänsyn till korrosion av stål i reaktorinneslutningar.

Konsekvenser vid korrosion i betong

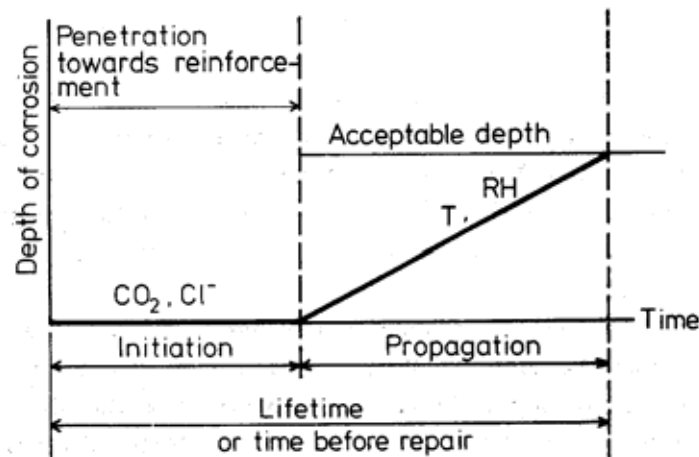
En översikt av konsekvenserna av korrosion av stål i betong ges i Figur 24.



Figur 24: Konsekvenser av korrosion av stål i betong. (West et al., 1999)

Vid korrosion förbrukas metall. Detta är normalt huvudproblemet, till exempel genom att hållfastheten nedsätts eller genomrostning inträffar. Förbrukningen av metall kan även vara ett problem vid korrosion i betong, men är vanligen inte huvudproblemet i detta fall. Huvudproblemet är istället korrosionsprodukterna. Dessa har i normalfallet en volym som är 3-4 gånger större än volymen hos den bortkorroderade metallen. Volymökningen ger snabbt stora spänningar i betongen. Vanligen angrips först ytligt liggande armering. Konsekvensen blir då att betongens yttre skikt spricker upp, i förlängningen att det lossnar och att armering friläggs. Skador av denna typ inträffar normalt långt innan förbrukningen av metall har blivit ett hållfasthetsproblem. Detta har fördelen att korrosionsskador normalt upptäcks innan konstruktionen allvarligt försvagats. Under anaeroba förhållanden bildas däremot huvudsakligen lösta korrosionsprodukter. Korrosionen kan då fortgå länge innan den uppmärksammas och korrosionsskadorna bli allvarliga.

I litteraturen om korrosion i betong citeras ofta en enkel korrosionsmodell som introducerades av Tuutti (1982). Denna illustreras i Figur 25.



Figur 25: Tuuttis korrosionsmodell (Tuutti, 1982).

Korrosionen delas in i en initieringsfas och en propageringsfas. Under initieringsfasen penetreras betongen vanligen av koldioxid eller klorid. Detta leder till att korrosion utvecklas. Under propageringsfasen växer skadorna på betong och armering successivt och når slutligen sin största tolerabla omfattning. Reparation blir då nödvändig.

Genom att vanligen endast relativt måttlig korrosion krävs för att skador på betongen skall uppstå, inriktar sig korrosionsförebyggande åtgärder normalt på att förlänga initieringstiden, till exempel genom tät betong och tillräckligt tjockt täckskikt utanpå armeringen.

Inträffade korrosionsskador i svenska reaktorinneslutningar av betong faller inte in i det mönster som beskrivits ovan. I reaktorinneslutningarna har skador på betongen inte uppstått. I ett par fall har däremot ingjutna tätplåtar av stål korroderat så kraftigt att de penetrerats och läckage uppstått. En gemensam nämnare i de inträffade fallen är att ingjutningsgodset inte varit i direkt kontakt med betongen och att stålytan därför inte

passiverats på avsett sätt. Initieringstiden bör därför ha varit kort. Att skador på betongen inte uppstått kan ha flera orsaker: Mycket tjockt täcksikt av betong som tål stora krafter, hålrum som kan ta upp en volymökning samt möjligen även en syrefattig miljö. Det senare ger upphov till lösta korrosionsprodukter istället för en oxidmassa. Korrosionen förorsakar då inte någon mekanisk påkänning på betongen, och kan bli omfattande innan den upptäcks.

Relevanta korrosionsmekanismer för reaktorinneslutningar

Den mer detaljerade genomgången av mekanismerna för korrosion av stål i betong i detta kapitel förändrar inte den bild av grundorsakerna till korrosion som gavs i föregående kapitel: Stål i betong passiveras normalt genom högt pH i porvattnet i betongen. Korrosion uppstår då passiveringen bryts. Tre mekanismer för detta dominerar helt:

- Karbonatisering, som bryter passiveringen genom att sänka pH i betongen.
- Kloridupptag, som bryter passiveringen lokalt genom reaktion mellan kloridjoner och passivskiktet.
- Hålrum i betongen intill metallytan. Hålrummet bryter passiveringen genom att ett tillräckligt högt pH inte kan upprätthållas på metallytan.

De mest utförligt studerade mekanismerna är karbonatisering och kloridupptag. Genom förbättrade betongkvaliteter och byggmetoder är karbonatisering inte längre ett praktiskt problem. Kloridupptag är däremot fortfarande ett problem i marin miljö samt då broar och viadukter utsätts för vägsalt. Inverkan av hålrum behandlas i långt mindre utsträckning i litteraturen om korrosion i betong. Hålrum i injektering runt spännkablar kan få stora konsekvenser, till exempel brohaveri. Skador orsakade av hålrum tycks dock vara relativt ovanliga.

För reaktorinneslutningar är karbonatisering knappast en relevant degraderingsmekanism genom den goda betongkvaliteten.

Kontrollen av klorider är strikt i alla kärnkraftverk med hänsyn till potentiella effekter på rostfria material. De inomhus belägna BWR-inneslutningarna är därför mycket väl skyddade.⁴ De utomhus belägna PWR-inneslutningarna bör vara relativt lätta att kontrollera med avseende på kloridhalt på olika djup i täcksiktet.

Som potentiell grundorsak till korrosionsskador på reaktorinneslutningar återstår endast hålrum (eller liknande, icke passiverande miljö) i kontakt med ingjutningsgodset. Korrosionshastigheten kan variera påtagligt beroende på fukthalten och tillgången på syre. Vanligtvis utbildas en makrocell. Korrosionshastigheten kan då bli hög, över 1 mm/år. Erfarenhetsmässigt har hålrumsmekanismen medfört flera korrosionsskador på svenska reaktorinneslutningar.

⁴ Risken för att kloridkontaminering skett under byggtiden undandrar sig författarens bedömning. I närvaro av klorid är det sannolikt att initering kan ske vid mindre kaviteter än i avsaknad av klorid.

De svenska reaktorinneslutningarna

Statens kärnkraftinspektion har tidigare genomfört ett flertal utredningar av aktuella frågor kring de svenska reaktorinneslutningarna. Delar av resultaten har sammanställts i två relativt utförliga rapporter av Roth, Silfwerbrand och Sundquist (2002) respektive Barslivo, Österberg och Aghili (2003). En genomgång av dessa rapporter har gjorts med avseende på faktorer som påverkar korrosionsriskerna. Några kommentarer ges nedan.

Roth, Silfwerbrand och Sundquist ägnar huvuddelen av rapporten åt att dokumentera de tolv reaktorinneslutningarna i Sverige. De viktigaste skillnaderna som framkommer är att PWR-inneslutningarna inte är väderskyddade samt att reaktorerna i Barsebäck och Oskarshamn, jämte Ringhals 1, har cementinjekterad spännarmering. Spännkablar är därmed i princip oåtkomliga och tillståndskontroll kan inte utföras. Reaktorerna i Forsmark samt Ringhals 2-4 har däremot oinjekterade spännkablar som kan kontrolleras och bytas. Cementinjektering erbjuder det bästa skyddet – förutsatt att injekteringen är korrekt utförd och utan kaviteter. Skyddet för de ej injekterade spännkablar är mindre säkert. Å andra sidan är kontroll och utbyte möjligt. I Forsmark 3 uppges två spännkablar ha befunnits skadade och lagats 1986.

Därutöver ges i rapporten en kortare inledning som bland annat behandlar nedbrytningsmekanismer för betongkonstruktioner, samt några avslutande slutsatser och rekommendationer. Några av slutsatserna presenteras nedan.

Tre frågor bedöms som viktiga att bevaka och följa upp ur korrosionssynpunkt:

1. För Ringhals 2-4 finns risk för kloridinitierad armeringskorrosion på grund av luftburna föroreningar och havssalt.
2. För några reaktorer kan risk för alkali-ballastreaktioner inte helt uteslutas.
3. Ofullständigt kringgjutet eller injekterat ingjutningsgods till genomföringar och spännarmeringsenheter kan korrodera.

Samtidigt avfärdas karbonatisering och oinjekterade spännkablar som potentiella korrosionsproblem.

Till ovanstående kan tillfogas att alkali-ballastreaktioner inte primärt är ett korrosionsproblem. De identifierade, potentiella källorna till korrosionsproblem är således kaviteter i betong eller injekteringsbruk samt yttre miljöpåverkan på Ringhals 2-4. Detta är i god överensstämmelse med slutsatserna i föreliggande rapport.

Vidare konstateras att slakarmeringen utan men för strukturens verkningsätt kan vara kraftigt skadad och att armeringens status därför inte behöver ägnas intresse annat än möjligen när den utgör förankring för ingjutningsgods till genomföringar och liknande.

För spännarmeringen i Ringhals 2-4 finns enligt författarna ett system med kontroll och utbyte som ger en mycket god uppföljning av spännarmeringens status. Med hänsyn till slakarmeringens begränsade betydelse kan man konstatera att risken för korrosion av ingjutningsgods i Ringhals 2-4 orsakat av havssalt bör vara ett hanterbart problem

(tätplåten skyddas mot yttre miljöpåverkan av ett mycket tjockt betongskikt). Korrosionsriskerna bör därmed främst vara förknippade med den tredje punkten ovan, ofullständig kringgjutning eller injektering. Författarna rekommenderar också utveckling av metoderna för oförstörande provning, särskilt med bäring på ingjuten, cementinjekterad spännarmering.

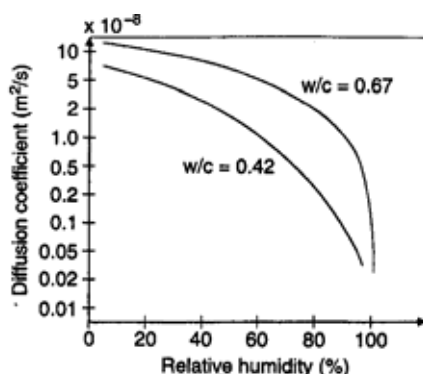
Den utredning som utförts av Barslivo, Österberg och Aghili är bred och översiktlig till sin uppläggning. Även i denna rapport beskrivs inneslutningarnas konstruktion. Därutöver behandlas bland annat degraderingsmekanismer, inträffade skador samt metoder för oförstörande provning. Slutsatserna beträffande korrosionsriskerna är väsentligen samma som dras av Roth, Silfwerbrand och Sundquist. Samstämmighet råder således mellan dessa båda utredningar och den föreliggande om att ofullständigt kringgjutet eller injekterat ingjutningsgods utgör den väsentliga korrosionsrisken i de svenska reaktorinneslutningarna.

Till de faktorer som påverkar korrosionshastigheten kraftigast hör fukthalten i betongen (jfr. Figur 12) samt tillgången på oxidationsmedel, dvs syre. När det gäller reaktorinneslutningen i en BWR påverkas dessa båda faktorer av några speciella omständigheter:

- Reaktorinneslutningen kan ses som en 1-1,5 m tjock vägg över vilken det råder en temperaturskillnad på 15-25 °C.
- På ett avstånd cirka en fjärdedel av väggjockleken från insidan räknat finns en ogenomsläpplig plåt.
- Normalt är syrehalten på väggens insida under 1 vol %.

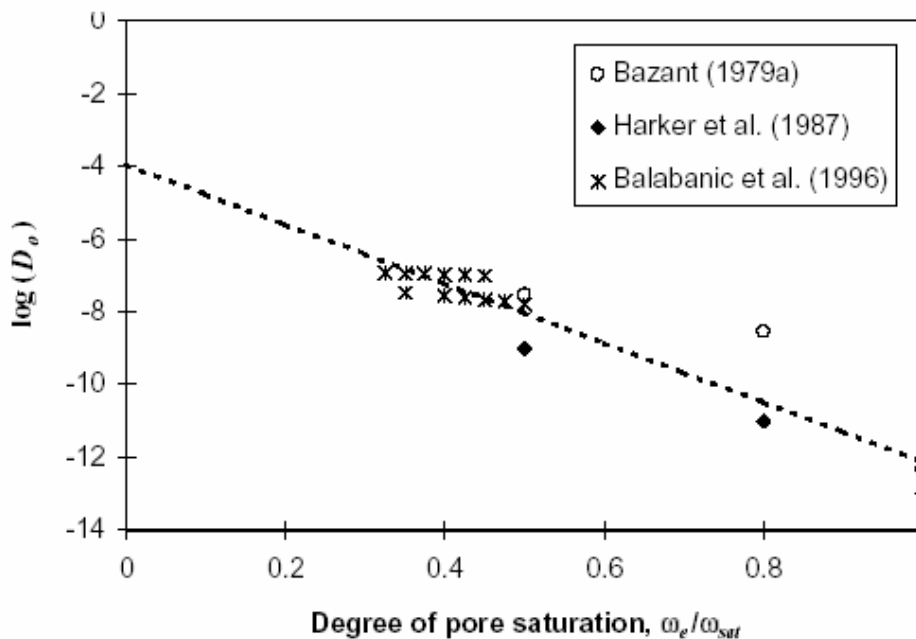
Antag att temperaturen är 40 °C på innerväggen och 25 °C på ytterväggen. Relativa fukthalten i inneslutningsatmosfären är ofta hög på grund av ångläckage, säg i snitt 85 %. Vid tätplåten, där temperaturen är knappt 4 °C lägre, är relativa fukthalten vid jämvikt då över 100 %. Porerna i betongen är då vattenfyllda. Detta innebär att diffusionen av syre är kraftigt hämmad.

Diffusionskonstanten för syre i betong har uppskattats till mellan $1\text{E}-7$ och $1\text{E}-9$ m^2/s och varierar med fukthalten approximativt enligt Figur 26.



Figur 26: Inverkan av relativa fukthalten på diffusionen av syre i betong med w/c-tal 0,42 resp. 0,67. (Bentur, Diamond och Berke, 1997)

För reaktorinneslutningar är kurvan för $w/c = 0,42$ mest relevant. Med hänsyn till den uppskattade fukthalten innanför tätplåten bör således diffusionskonstanten vara under $1E-9 \text{ m}^2/\text{s}$. Figur 26 hänför sig emellertid till en situation då betongen är i jämvikt med luft med en lägre relativ fukthalt än 100 %. För vattendränkt betong minskar diffusionskonstanten dramatiskt. Detta framgår av Figur 27 där diffusionskonstanten istället avsatts som funktion av vatteninnehållet i betongen. Man ser att diffusionskonstanten för syre i vattendränkt betong är ca $1E-12$ eller tre tiopotenser lägre än för betong i jämvikt med luft av relativt hög fukthalt. Den stora skillnaden sammanhänger med långsam syrediffusion i vatten samt att grövre porer i betongen vattenfylls först då relativa fuktigheten överskrider 100 %, dvs då betongen vattendränks.



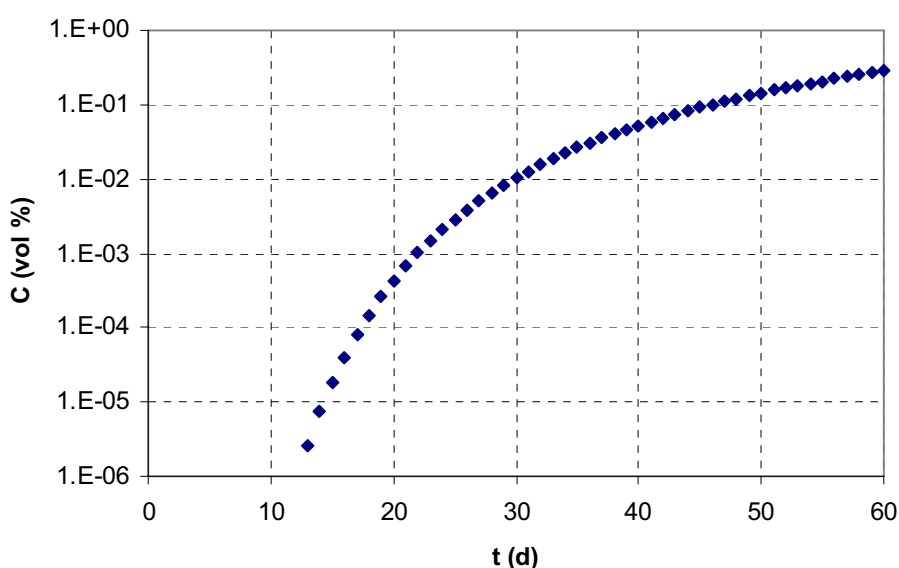
Figur 27: Diffusionskonstanten för syre i betong (m^2/s) som funktion av betongens vatteninnehåll. (Martin-Pérez, 1999)

Diffusionen av syre i betongen styrs vid stationära förhållanden av ekvation (1). Med ett värde på diffusionskonstanten på $1E-9 \text{ m}^2/\text{s}$, en väggjocklek på 0,25 m och en syrehalt på 1 vol % i reaktorinneslutningen blir maximala syretransporten till tätplåtens inneryta ca $2E-9 \text{ mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$.⁵ Vid reduktion till vatten motsvarar denna syretransport en strömtäthet på $8E-4 \text{ A}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$. Detta kan jämföras med passivströmmen, som brukar anges till $1E-4 \text{ A}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ (Figur 14; Bertolini et al., sid. 112). Med hänsyn till att vatteninnehållet i betongen närmast tätplåten kan vara högt, och diffusionskonstanten för syre då är upp till tre tiopotenser lägre, se Figur 27, är anaeroba och aktiva områden tänkbara.⁶

⁵ Ytterligare diffusionsmotstånd finns i färgskiktet på inneslutningsväggen. Färgen har valts bland annat för att genom låg genomsläpplighet minimera inträngning av radioaktiva nuklider i väggen.

⁶ Viss möjlighet finns att tätplåten passiveras genom att en makrocell bildas med mer ytligt liggande armering. Mot detta talar att tillgången på syre är låg även på armeringen samt att ytförhållandet anod/katod kan vara stort.

Den vanliga elektrokemiska metoden för att upptäcka korrosionsangrepp i betong är potentialkartering. Metoden har bland annat tillämpats på tätplåten i Barsebäck 2 i samband med ett konstaterat läckage. Med hänsyn till vägg tjockleken måste undersökningen göras från insidan av reaktorinneslutningen. Detta innebär att den endast kan utföras efter avställning och atmosfärsbyte i inneslutningen. Om undersökningen utförs kort tid efter ett atmosfärsbyte riskerar man att eventuella anaeroba områden förväxlas med korrosionsangrepp. Det är därför av intresse att uppskatta hur snabbt atmosfärsbytet i inneslutningen fortplantar sig till tätplåten. Detta styrs av den tidsberoende diffusionsekvationen, ekvation (3) med lösning enligt ekvation (4). Antag åter en diffusionskonstant för syre på $1\text{E-}9\text{ m}^2/\text{s}$. En höjning av syrehalten i inneslutningen med 20 vol % i samband med atmosfärsbyte från kvävgas till luft leder då till att syrehalten vid tätplåten ökar enligt Figur 28.



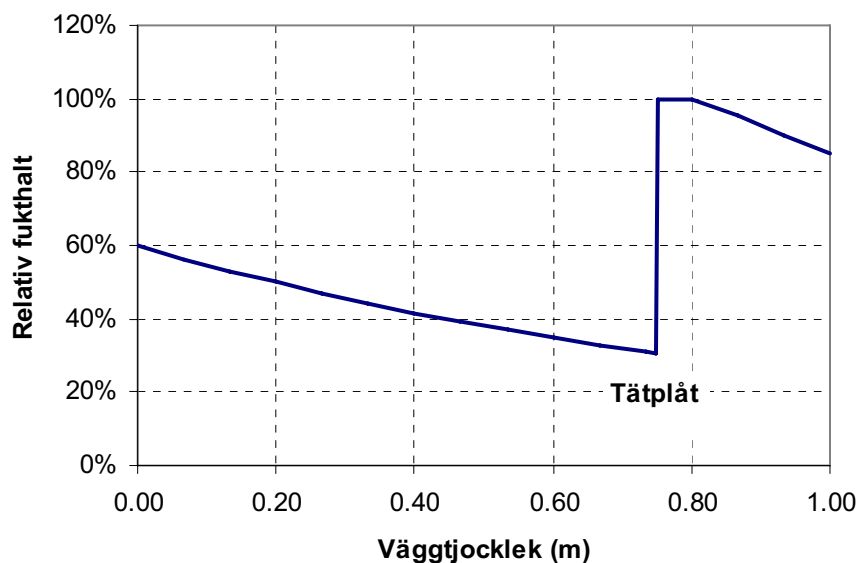
Figur 28: Ökning av syrehalten vid tätplåten efter atmosfärsbyte från kvävgas till luft i reaktorinneslutningen. Antagen diffusionskonstant är $1\text{E-}9\text{ m}^2/\text{s}$.

I beräkningsexemplet ökar således syrehalten vid tätplåten endast med 0,1 vol % på 1½ månad. Detta innebär att en potentialkartering som utförs under en normal revisionsavställning kan komma att påverkas av eventuella områden som är anaeroba vid kvävgasfylld inneslutning.

Atmosfärsbyte från kvävgas till luft kan ge upphov till makroceller med betydande potentialskillnad. Vid god kontakt mellan plåt och betong utgör detta inte ett problem. En eventuell, aktiv yta på tätplåten passiverar då enligt polarisationskurvan i Figur 14 när strömtätheten tenderar att öka. Vid kaviteter i kontakt med tätplåten, som förhindrar passivering, kan emellertid korrosionshastigheten bli hög genom att den höga fukthalten medför hög ledningsförmåga hos betongen.

På utsidan av en BWR-inneslutning råder i princip normal inomhusmiljö. Eftersom temperaturen ökar inåt i inneslutningsväggen kommer relativa fukthalten att sjunka, om jämvikt förutsätts. Antas temperaturen på utsidan av inneslutningen vara 25 °C och

relativa fukthalten i medeltal 60 % får man, vid jämvikt, en fukthaltsvariation i inneslutningsväggen enligt Figur 29. Vid jämvikt är som synes fukthalten på tätplåtens insida mycket låg. Någon korrosionsrisk föreligger då inte.



Figur 29: Vid uppnådd jämvikt och en temperaturskillnad på 15 °C över inneslutningsväggen svarar betongens fukttinnehåll på olika djup i inneslutningsväggen mot en relativ luftfuktighet enligt diagrammet.

Korrosionsskador på stål behöver inte befaras vid en fukthalt motsvarande normal inomhusmiljö, eller lägre. Inträffade korrosionsskador på tätplåtens utsida i reaktorinneslutningarna visar således att de verkliga fuktförhållandena ligger (eller åtminstone: har legat) långt från jämviktstillståndet i Figur 29. Uppenbarligen går jämviktsinställningen mycket långsamt i den kraftiga konstruktionen. Det kan ändå vara av intresse att risken för korrosionsskador i de yttre $\frac{3}{4}$ av inneslutningsväggen avtar med tiden. Om en undersökning skulle visa att skador inte har inträffat efter 20-30 år kan risken för framtida skador antas vara försumbart låg.

Erfarenheter från andra områden

För att belysa korrosionsriskerna i reaktorinneslutningar kan det vara intressant att jämföra mot grova betongkonstruktioner inom andra områden. Den genomgång av reaktorinneslutningarnas konstruktion som utförts av Roth, Silfwerbrand och Sundquist (2002) har visat att korrosionsangrepp på slakarmeringen normalt inte är kritiskt för inneslutningens funktion. Korrosionsangrepp på tätplåten, som leder till att denna penetreras, kan leda till ökat läckage av aktivitet till omgivningen vid haveri. Även relativt små läckage upptäcks emellertid vid återkommande provning av inneslutningens täthet. Vid läckage begränsas utsläpp till omgivningen av filtrering i inneslutningsväggen och, i BWR-fallet, av reaktorbyggnadens haverifiltersystem. Som den allvarligaste korrosionsrisken ter sig därför korrosionsangrepp på cementinjekterade spännkablar. Omfattande angrepp kan i princip leda till brott på inneslutningen i samband med trycksättning vid ett eventuellt haveri. Det är därför av intresse att studera korrosionserfarenheterna från andra grova konstruktioner av spännarmerad betong, i praktiken främst broar.

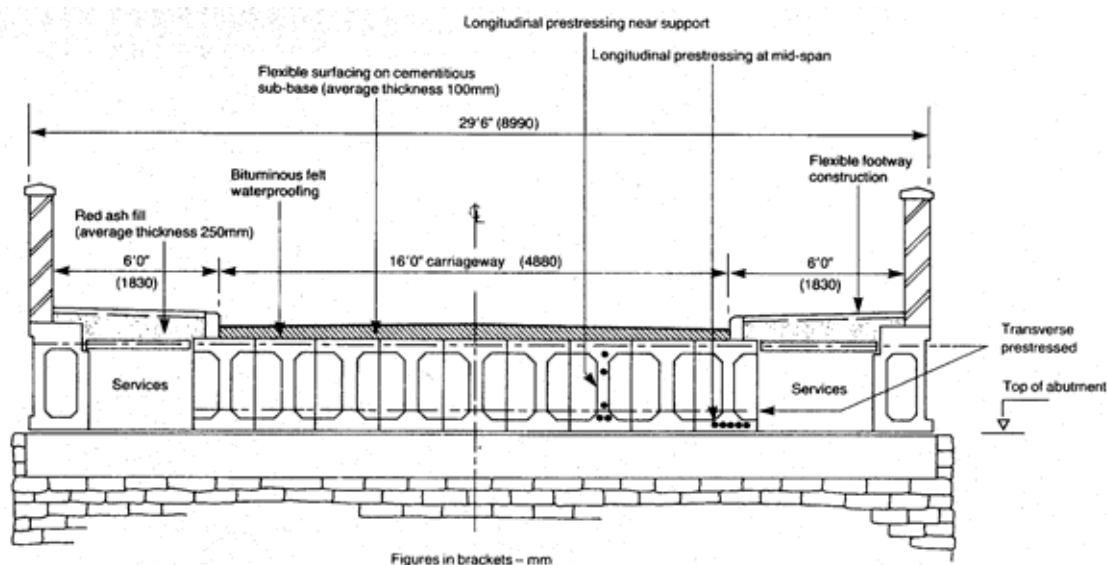
På grund av det mycket stora kapital som är investerat i broar och motsvarande konstruktioner har omfattande satsningar gjorts på olika utredningar, exempelvis inom Strategic Highway Research Program i USA. Ett område som behandlats återkommande sedan tidigt 1970-tal har varit provningsmetoder. Detta diskuteras i ett följande avsnitt.

Ynys-y-Gwas

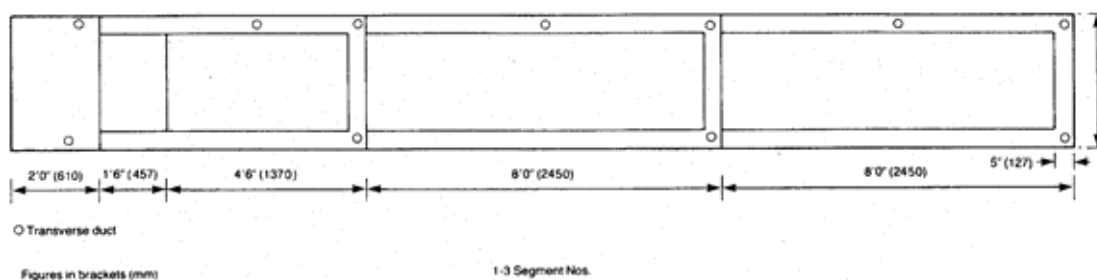
En händelse som skakade om branschen var kollapsen 1985 av bron Ynys-y-Gwas i södra Wales i Storbritannien. Bron, som var 32 år gammal, hade inspekterats bara 6 månader innan den utan förvarning kollapsade under sin egen vikt. Bron hade provbelastats med 460 ton 1981 och hade inspekterats totalt 10 gånger under sin livstid utan att några tecken på korrosion eller annan väsentlig degradering upptäckts. I Storbritannien bidrog haveriet till dels ett moratorium för broar med cementinjekterade spännkablar 1992 (efter kollaps av ytterligare en spännbetongbro, denna gång i Belgien), dels att spännkablarna i ca. 3000 andra broar undersöktes med endoskop via uppborrade hål (D'Appolonia, 2001). Moratoriet hävdes 1996 då en rapport med rekommendationer för utformningen av varaktiga konstruktioner gavs ut (Concrete Society, 2002).

Ynys-y-Gwas brons körbana var konstruerad av 72 prefabricerade I-balksegment som spänts ihop longitudinellt (8 segment i följd) och transversellt (9 I-balkar i bredd). Se Figur 30 och Figur 31. Varje spännkabel var sammansatt av 12 st 5 mm trådar och injekterad med cementbruk.

Bron kollapsade nattetid i obelastat tillstånd. Vid haveriet bröts samtliga 9 I-balkar i körbanan av. Gångbanorna, som i huvudsak bars upp av en separat O-balk på var sida om körbanan (Figur 30), berördes inte.



Figur 30: Tvärsnitt genom Ynys-y-Gwas bron. (Woodward och Williams, 1988)



Figur 31: Ynys-y-Gwas bron, longitudinellt snitt genom I-balkar, segment 1-3. (Woodward och Williams, 1988)

Den havererade bron undersöktes noga och det var uppenbart att kollapsen orsakats av kraftig korrosion av spännkablarna vid de longitudinella och transversella skarvarna mellan segmenten. Huvudorsak till korrosionen befanns vara att fukt och klorider trängt in i injekteringsbruket vid skarvarna mellan elementen. I övrigt var injekterade kablar oskadda. Vissa kablar visade sig vara ofullständigt injekterade. Korrosionen hade där fått väsentligt större utbredning.

Grunden till haveriet kan sägas vara att effektiva åtgärder mot inträngning av vägsalt inte vidtagits vid konstruktion och uppförande av bron, snarare än principiella svagheter hos brotypen som sådan. Det större problemet är emellertid att korrosionsangreppen inte upptäcktes vid de återkommande inspektioner som utfördes av bron. Detta sammanhänger givetvis med de stora svårigheterna att inspektera injekterade spännkablar.

Problem med andra spännbetongbroar

Utöver Ynys-y-Gwas nämns i litteraturen två andra haverier av broar i förspänd betong. Beckton Meadows Footbridge i Hampshire kollapsade överraskande 1967. Även i detta

fall orsakades haveriet av att spännkablarna utsatts för en korrosiv kombination av klorid, fukt och syre (Clark, 1992). En bidragande orsak anses ha varit en mycket låg kvalitetsnivå hos bron, bland annat sprucken och porös betong. Även överlast kan ha spelat in. Bron var 15 år gammal vid haveriet.

En bro i Belgien över floden Schelde kollapsade år 1992. Även i detta fall rapporteras kollapsen ha orsakats av korrosion av spännkablar (Concrete Society, 2002). Även påsegling med en tankbåt och en efterföljande brand kan ha spelat in (Clark, 1992).

West et al. (1999) har bland annat genomfört en litteraturstudie av erfarenheter som dokumenterats vid undersökningar av broar i förspänd betong. Nedan ges några exempel hämtade från denna sammanställning.

- Isecke (1990) har beskrivit en detaljerad undersökning av en spännbetongbro i Tyskland. Bron revs efter mindre än 20 års bruk på grund av korrosionsskador. Injekteringen visade sig ha varierande utförande: full injektering, partiell injektering, partiell eller fullständig täckning av stålytan med ett tunt lager av bruk samt total avsaknad av injekteringsbruk. Ingen korrosion uppträdde där injekteringen var fullständig och stålet helt inbäddat i cementbruk. Varierande grad av korrosionsskador uppträdde under alla andra förhållanden. Den svåraste korrosionen uppträdde i partiellt injekterade kabelrör vid gränsen mellan täckt och fritt exponerat stål. I de kabelrör som helt saknade injektering var kablarna täckta av en tunn rostfilm, men tvärsnittet var inte nämnvärt reducerat.
- Schupack (1994) har genomfört en omfattande undersökning av en 35 år gammal spännbetongbro. Korrosionsangreppen var tillräckligt kraftiga för att påverka bronns strukturella beteende. Korrosionsskadorna kunde hänföras till två orsaker: undermålig och ofullständig injektering längs hela bron, samt användning av injekteringsbruk med hög kloridhalt i delar av bron. Schupack fann att injekteringen varierade från fullständig via partiell till att helt saknas. Graden av korrosion varierade beroende på graden av injektering, kloridhalten samt fukthalten. Ingen korrosion uppträdde i de kabelrör som var fullt injekterade med kloridfritt bruk. I partiellt injekterade rör (kloridfritt bruk) samt i rör som helt saknade injektering fanns ytliga korrosionsangrepp. Svåra korrosionsangrepp uppträdde däremot i lågpunkter, där vatten hade samlats i kabelrören. Flera kablar som var helt oinjekterade, men ej utsatta för fukt, saknade tecken på korrosion. Vissa balkar i bron hade injekterats med ett expanderande cementbruk som innehöll höga halter klorid. Detta bruk rekommenderades inte för injektering av tillverkaren eftersom det innehöll tillsats av järnfilspån och klorid. Expansionen erhöles genom korrosion av järnet under inverkan av kloriden. Svåra korrosionsangrepp konstaterades på kablar och kabelrör där detta bruk hade använts.

Enligt West et al. är oinjekterad, intern spännarmering ovanlig i brokonstruktioner av flera skäl. Avsaknaden av injekteringsbruk som sammanbinder kabeln med betongen begränsar konstruktionens lastbärande förmåga. Kollaps av en oinjekterad spännkabel, antingen beroende på kabelkorrosion eller korrosion hos ankaret, leder till totalt bortfall av förspänningen. Oinjekterad, intern spännarmering saknar det korrosionsskydd som injekteringsbruket utgör.

- Novokschenov (1999) har rapporterat en undersökning av en bro i Salt Lake City med för- och efterspända balkar. De efterspända balkarna var spända med två 25 mm samt två 38 mm stänger placerade i rör av galvaniserad plåt, utan övrigt korrosionsskydd. Bron utsattes för vägsalt vintertid. Efter att bron varit i bruk i 13 år började de efterspända stångarna att haverera. Detta indikerades först genom kraftiga smällar som noterades av personer i närheten, samt genom att stänger sköt ut från balkarnas ändar. Ytterligare brott upptäcktes genom att cementbruket som skyddade ankarna togs bort. Lösa muttrar och ändar upptäcktes då. Totalt påträffades 21 stänger med brott. Gropfrätning noterades på de havererade stångarna. Avsaknad av tvärsnittsreduktion vid brottytan indikerade att sprödbrott inträffat. Orsaken till korrosionen befanns vara att fukt och klorid tillförts via otäta ankare.

Ett par andra intressanta resultat från litteraturstudien i West et al. är följande:

- Tiden mellan uppspänning och injektering bör hållas kort eftersom det finns risk för korrosion. Brott genom väteförspändning har hänförs till korrosion under denna period (Clark, 1992). Många byggspecifikationer begränsar tiden mellan uppspänning och injektering till 48 timmar för att förhindra korrosion under denna period. Korrosion efter uppspänning, men före injektering, anses även kunna leda till brott efter det att konstruktionen har tagits i bruk.
- Många korrosionsproblem har sin grund i hur injekteringen utförts. Vanligaste problemorsaken är ofullständig injektering, dvs att kabelröret inte är helt fyllt med injekteringsbruk. Omfattningen kan variera från små kaviteter till fullständig avsaknad av injekteringsbruk. Vanliga orsaker till ofullständig injektering är byggproblem, felaktiga byggmetoder, blockerade eller skadade kabelrör eller felaktig placering eller användning av avluftningar. Egenskaperna hos det färska injekteringsbruket kan också påverka injekteringsarbetet genom felaktig konsistens eller genom vattenavskiljning på grund av sedimentation. Detta kan leda till vattenansamlingar ("bleed lenses") och luftinneslutningar. Korrosionsproblemen hos spännkablarna är relaterade till omfattningen av den ofullständiga injekteringen samt tillgången på fukt, syre och klorider. I allmänhet blir korrosionen mest uttalad när spännkabeln är omväxlande fritt exponerad och inbäddad i injekteringsbruk. Denna situation kan ge upphov till en elektrokemisk koncentrationscell beroende på variationerna i kemisk och fysikalisk miljö längs spännkabeln. Koncentrationsceller kan uppkomma till följd av skillnader i pH, syrehalt, fukthalt och kloridhalt och leder ofta till svårartad makrocellkorrosion.

Nyare erfarenheter av spännbetongbroar i USA

Med anledning av problemen i Europa initierade Transport Research Board i USA en studie av hållbarheten hos spännbetongbroar byggda av prefabricerade element. I rapporten, Poston och Wouters, 1998, konstateras att inga problem är kända i USA, men att ingen egentlig provning eller utvärdering av tillståndet hos interna spännkablarna har utförts. Det är därför föga förvånande att problem snart därefter upptäcktes hos tre broar i Florida. Detta ledde till en större insats som redovisats i en serie av fem rapporter, senare utökad till tio (Corven, 2002). Som exempel behandlas nedan det först upptäckta fallet, Niles Channel Bridge. Denna bro är en 1390 m lång lågbro med

förgjutna lådsegment och externa, injekterade spännkablar i polyetenrör. Vid en rutininspektion 1999 av den då 16 år gamla bron noterades att en del av ett kabelrör intill ankaret hade föskjutits 230 mm, se Figur 32.



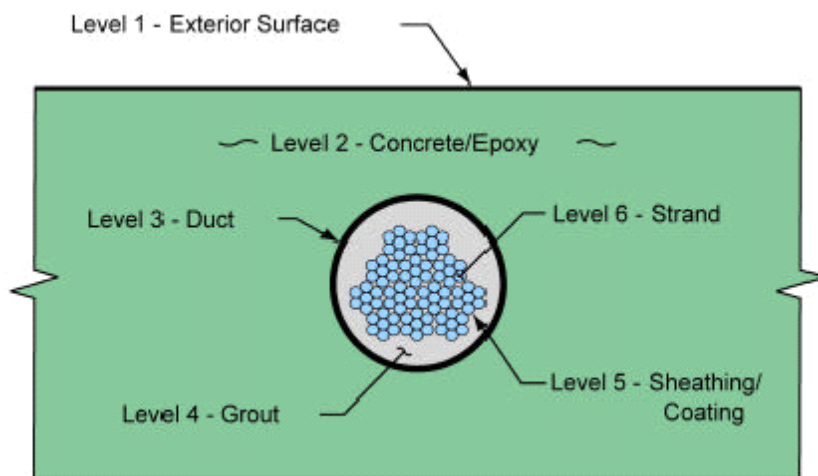
Figur 32: Förskjutning av kabelrör intill ankare i Niles Channel Bridge. (Corven 2002, Vol. 1)

Då kabelröret öppnades visade det sig att spännkabeln, en av totalt sex, korroderade aktivt och var kraftigt skadad, Figur 33. Eftersom bron utgör enda tillfartsväg till Florida Keys byttes spännkabeln skyndsamt. Orsaken till korrosionen befanns vara att vatten, kontaminerat med saltstänk, återkommande hade trängt in i en kavitet i injekteringen i ankarhuvudet.



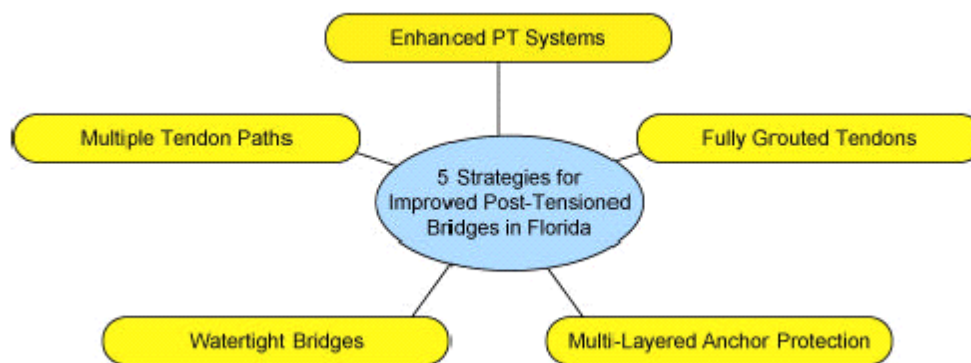
Figur 33: Långt framskriden korrosion av spännkabel vid ankare i Niles Channel Bridge. (Corven 2002, Vol. 1)

En huvuduppgift för den utredning som utfördes för Florida Department of Transportation (Corven, 2002) var att formulera åtgärder som kan förhindra liknande skador i framtiden. Arbetet utgick från att korrosionsskyddet kan delas upp på inte mindre än sex nivåer, Figur 34. Normalt utgörs skyddet för interna kablar av nivåerna 2-4, tät betong, tätt kabelrör och fullständig injektering. Viktigast av dessa är injekteringen. Ytterligare skydd kan erhållas genom till exempel användning spännarmering med epoxibeläggning (nivå 5) eller av rostfritt material (nivå 6). Det senare alternativet är verkningsfullt, men merkostnaden hög (faktor 10).



Figur 34: Olika nivåer av korrosionsskydd för spännarmering. (Corven 2002, Vol. 1)

Ett resultat av utredningen blev det fempunktsprogram som illustreras i Figur 35. Den första punkten kan sägas innebära att spännarmeringens konstruktion skall uppfylla relativt enkla kvalitetskrav, till exempel täta skarvar. Den andra punkten utgörs av krav på fullständig injektering. Den tredje punkten innebär krav på ett skydd i flera nivåer för ankare, som visat sig vara en svag punkt. Den fjärde punkten motsvarar nivå 2 i Figur 34 och utgörs av krav på vattentäta körbanor. Den femte och sista punkten innebär ett krav på viss diversifiering: Bron skall innehålla ett flertal spännkablar förlagda i separata rör, så att inte skador i några få kabelrör direkt leder till allvarliga konsekvenser.



Figur 35: Fempunktsprogram för mer beständiga spännbetongbroar i Florida. (Corven 2002, Vol. 1)

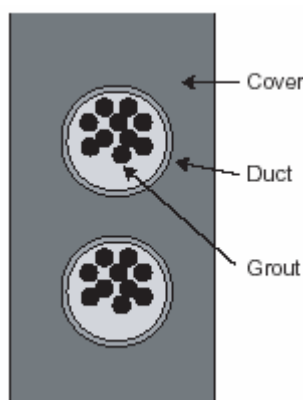
Några föreslagna motåtgärder

Man kan notera att trots att tillståndsbedömning av injekterade spännkablar är ett stort problemområde, och ofullständig injektering en av de vanligaste bidragande orsakerna till korrosionsproblem, så finns varken i USA eller i andra länder några planer på att avstå från injektering av spännarmering i broar. Detta sammanhänger med att injektering ses som det bästa korrosionsskyddet för spännarmeringen (Poston och Wouters 1998, Smith och Virmani 2000). Inriktningen är därför att försöka eliminera den hittills något ojämna kvaliteten hos injekteringen.

Som ett led i arbetet med att förbättra kvaliteten hos cementinjekterad spännarmering har Federal Highway Administration i USA tagit fram en 170-sidig manual för installation och injektering av spännarmering (Corven och Moreton 2004). Rapporten bygger på det arbete som författarna tidigare utfört för Florida Department of Transportation (Corven, 2002).

Enligt manualen utgjordes det huvudsakliga korrosionsskyddet för intern spännarmering ursprungligen av betongtäckningen av spännkabelröret. Det primära syftet med injekteringen var att binda spännkabeln till den omgivande betongen via ett korrugerat rör, vanligen av galvaniserat stål. Avsikten var emellertid även att injekteringsbruket skulle fylla upp kabelröret och förebygga korrosion orsakad av inträngande fukt och klorid. Tyvärr visade sig många spännkabelrör senare ha kaviteter orsakade av ofullständig injektering, överskottsvatten och separation genom sedimentering ("bleed").

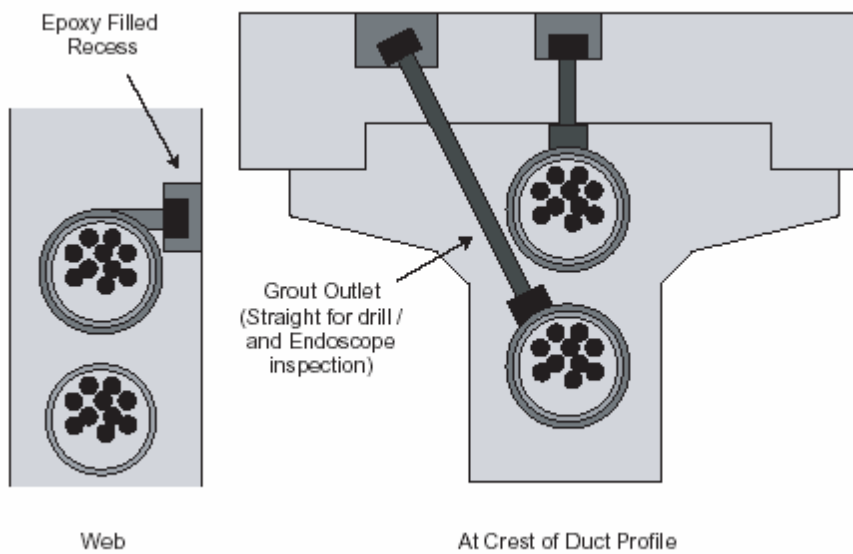
De åtgärder manualen rekommenderar kan sägas vara en förstärkning/kvalitetshöjning av de tre skyddsnivåer för intern spännarmering som indikeras i Figur 36, betongtäckningen, spännkabelröret och injekteringsbruket.



Figur 36: Viktigaste skyddsnivåerna för interna spännkablar i broar i USA. (Corven och Moreton 2004)

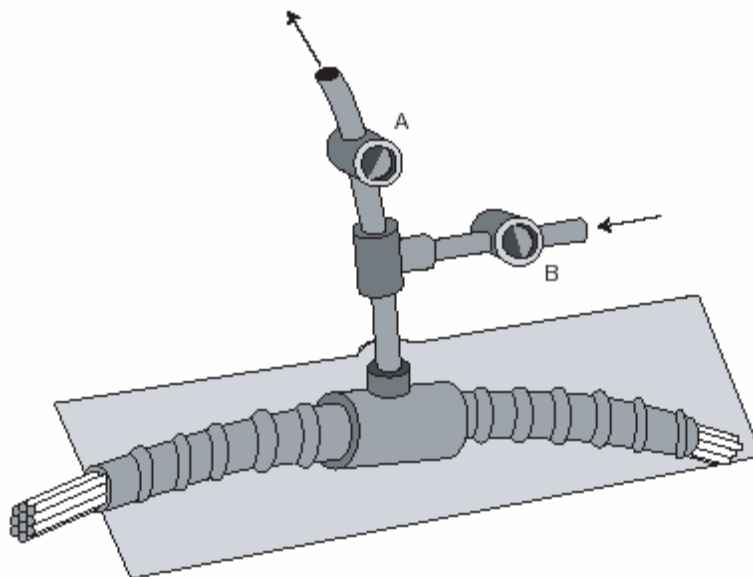
Inga högteknologiska åtgärder för att höja kvalitetsnivån på injekteringsarbetet föreslås i manualen. Inspektion av injekteringen förutses ske via avluftningsstutsar, eventuellt med hjälp av endoskop. För att underlätta uppborring och åtkomst med endoskop

rekommenderas raka avluftningsrör enligt Figur 37 samt försegling med epoxi eller cementbruk.



Figur 37: Rekommenderat utförande av inlopp och utlopp längs interna spännkablar. (Corven och Moreton 2004)

Eventuella kaviteter som upptäcks förutsätts bli efterfyllda genom vakuuminjektering enligt Figur 38. Förfarandet är följande: Först dras vakuum genom ventil A med ventil B stängd. Därefter stängs ventil A och öppnas ventil B och injekteringsbruk trycks in med ett övertryck på 4 bar. Efter fullständig injektering sänks övertrycket till 2 bar och även ventil B stängs.



Figur 38: Principen för vakuuminjektering. (Corven och Moreton 2004)

Genom sambandet mellan utsugen luftmängd och trycket vid vakuumdragningen kan kavitetens volym bestämmas. Detta kan utnyttjas för att fastställa att efterinjekteringen blir fullständig.

Injekteringsbrukets betydelse

Den avgjort vanligaste orsaken till korrosionsproblem i förspända konstruktioner är ofullständigt injekterade kabelrör (Schokker et al. 1999). Idealt skall injekteringsbruket fylla upp kabelröret fullständigt och ha överlägsna korrosionsskyddande egenskaper. Detta ställer krav på injekteringsbruket och leder till en avvägning innefattande flytegenskaper, w/c-kvoten, mineraltillsatser (flygaska, kiselstoft), flytmedelstillsatser, korrosionsinhibitorer m.m.

Schokker et al. har utfört provinjekteringar med olika injekteringsbruk i ett genomskinligt vinylrör med en inre diameter på 38 mm, som monterats på en träram enligt Figur 39. Kabelröret innehöll tre 7-trådiga 13 mm kablar.



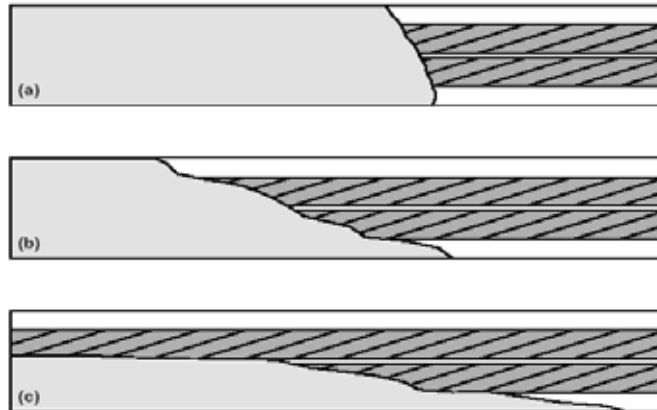
Figur 39: Kabelrör för provinjekteringar. (Schokker et al. 1999)

Resultatet av provinjekteringarna varierade mellan de olika bruk som provades. Specialbruk gav ett fullgott resultat. Standardbruket (TxDOT Standard Grout med 0,44 w/c och 0,9 % Intraplast-N) gav upphov till vattenavskiljning genom sedimentation. Vattnets lägre viskositet och densitet gjorde att vatten och luftblåsor rörde sig mot högpunkterna och ansamlades där. Då bruket stelnade återabsorberades det avskiljda vattnet och en större kavitet uppstod i högpunkten.

Risken för ofullständig injektering befanns vara kopplad till injekteringsbrukets flytegenskaper. Medan specialbruken utbreddes sig i kabelröret enligt (a) eller (b) i Figur 40 utbreddes sig standardbruket enligt (c). Det senare ledde till att bruket rann av sig självt mot lågpunkter, vilket ökade risken för luftinneslutningar. Med ett flödesmönster enligt (a) eller (b) fylldes däremot kabelröret successivt från injekteringspunkten till avluftningspunkten.

Risken för sedimentation och vattenavskiljning är särskilt stor i vertikala kabelrör och uppmärksammades redan 1971 vid arbete på sekundärinneslutningen för ett kärnkraftverk (Schupack, 1971). Sekundärinneslutningen innehöll vertikala kabelrör av upp till

60 m långd. Schupack visade att problemen med sedimentation kunde lösas med hjälp av lämpliga tillsatser till injekteringsbruket.



Figur 40: Flödesmönster för olika injekteringsbruk. (Schokker et al. 1999)

Motståndskraft mot sedimentation anses idag vara en av de viktigaste egenskaperna hos injekteringsbruk. Användning av färdigblandad torrs substans föreskrivs i allmänhet för att tillförsäkra jämn kvalitet hos bruket.

Svårigheterna att åstadkomma en fullständig injektering har även uppmärksamats i Storbritannien. Gällande specifikationer kräver således att företaget som utför injekteringen först utför ett fullskaleprov, varefter longitudinella och transversella snitt i valda punkter undersöks.

Sammanfattande slutsatser angående spännkablar korrosion i broar

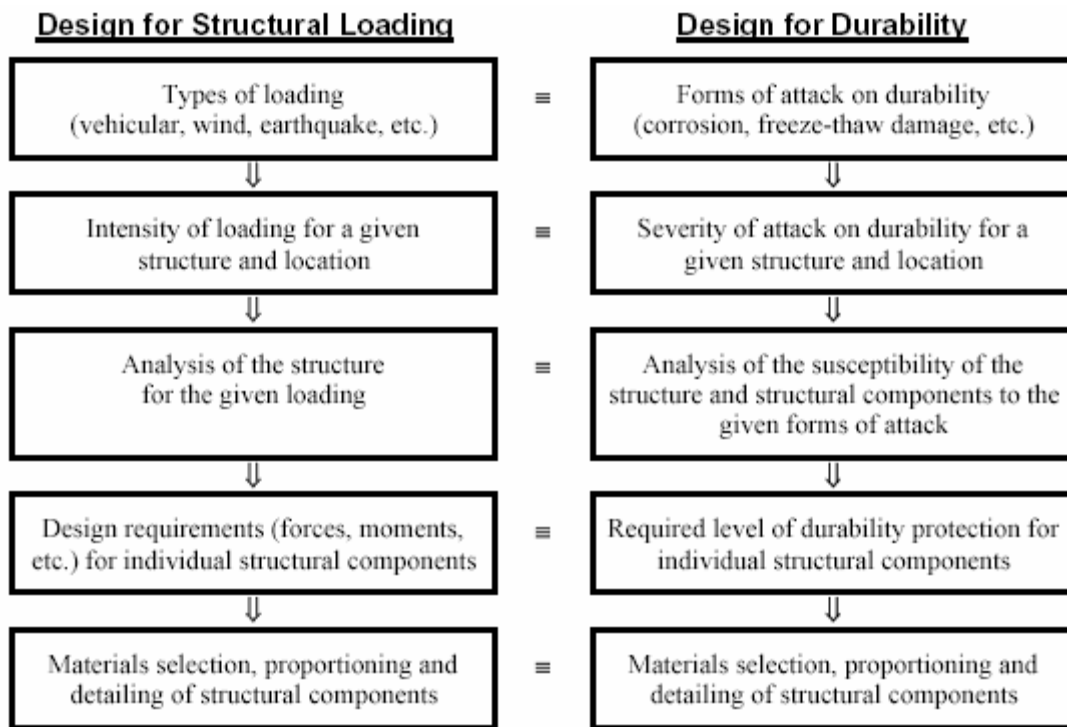
Lite förenklat kan man sammanfatta erfarenheterna av spännkablar korrosion i broar på följande sätt:

- En kloridfri cementinjektering utgör ett utomordentligt gott korrosionsskydd och eftersträvas därför.
- Ofullständig injektering leder ofta till kraftiga korrosionsangrepp. Angreppet är starkast vid gränsområdet mellan cementbruk och hålrum. Detta kan antas bero på att miljöskillnader ger upphov till en makrocell.
- Ofullständig injektering är relativt ovanlig, men förekommer.

Mer allmänt utgår man ifrån att spännarmeringen i broar ofta inte är utbytbar med rimliga insatser. Målsättningen måste därför vara att konstruera för lång hållbarhet. Detta betraktas som ett belastningsfall bland andra, som konstruktören måste ta hänsyn till. Analogin illustreras i Figur 41.

Några principiella svårigheter anses inte föreligga. De fall av förtida degradering som upptäckts kan alla hänföras till uppenbara och relativt triviala svagheter i konstruktion

och/eller utförande. Genom en mer genomtänkt konstruktion samt höjd byggkvalitet kan problemen undvikas. Allvarliga problem är också relativt ovanliga, trots att ett mycket



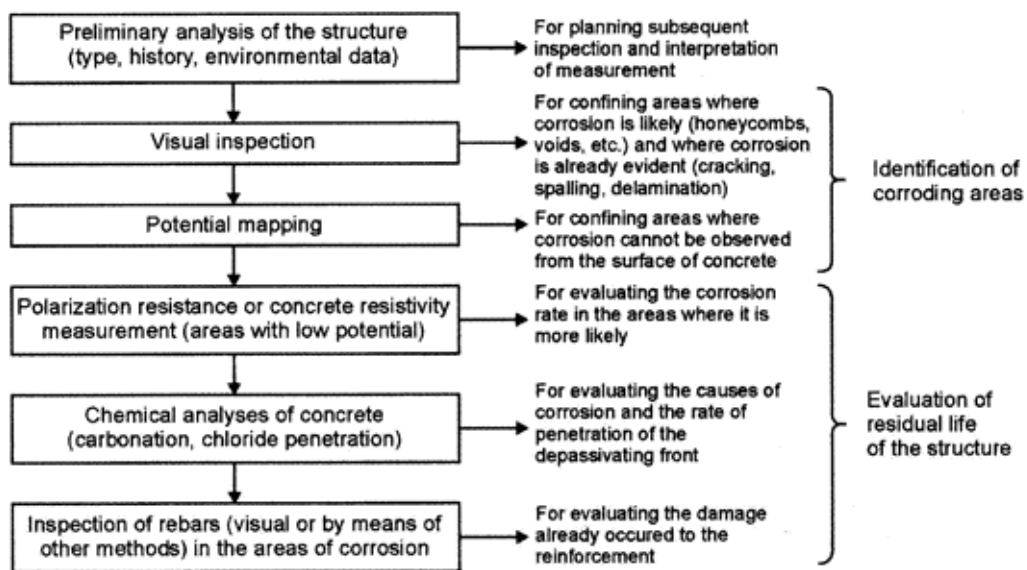
Figur 41: Analogi mellan att konstruera för olika lastfall och att konstruera för lång hållbarhet. (Salas et al. 2004)

stort antal spännbetongbroar byggts sedan 1950 (110 000 enbart i USA). Avsaknad av goda metoder för oförstörande provning är besvärande, men ses inte som ett skäl att förändra konstruktionen mer än i begränsad omfattning för att underlätta byggkontrollen. Detta trots den spektakulära händelse ett brohaveri utgör.

Provningsmetoder för korrosion i betong

Normalfallet med enbart slakarmering

De flesta betongkonstruktioner innehåller enbart slakarmering. Korrosionsangrepp på denna beror i allmänhet på att betongen tar upp klorid från omgivningen. Angreppet drabbar därför i första hand den mest ytligt liggande armeringen. Detta underlättar tillståndskontroll av armeringen. Metoder för tillståndskontroll beskrivs bland annat i Bertollini et al. 2004 och Broomfield 1997. Ett typexempel på undersökningsmetodik ges i Figur 42.



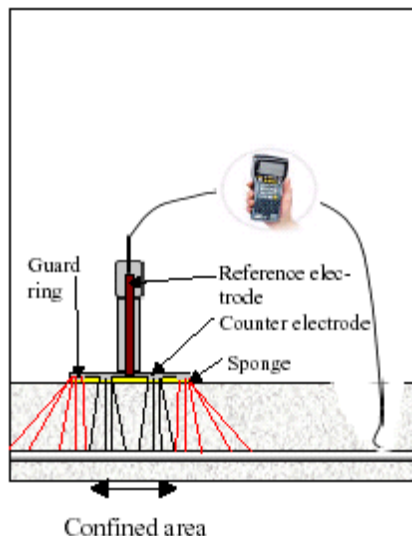
Figur 42: Exempel på metodik vid inspektion av armeringskorrosion. (Bertollini et al., 2004)

De undersökningsmetoder som i första hand kompletterar visuell inspektion när det gäller att bestämma korrosionsbilden är två elektrokemiska undersökningsmetoder, potentialkartering och polarisationsresistansmätning. Båda mätmetoderna bygger på att betongen fungerar som elektrolyt och att en strömkrets etableras mellan det armeringsjärn mätningen utförs på och ett yttre elektrodarrangemang.

Potentialkartering utgår från att armeringsjärnen normalt är galvaniskt samman-kopplade. Man kan därför på sedvanligt sätt mäta korrosionspotentialen hos ett visst armeringsjärn med en referenselektrod i kontakt med dels betongytan (elektrolyten), dels vilket armeringsjärn som helst. Den mäta korrosionspotentialen kommer på grund av IR-potentialfall i betongen att domineras av det armeringsjärn som är närmast referenselektroden, i allmänhet mest ytligt beläget. Detta är normalt önskvärt, eftersom i första hand ytligt liggande armering drabbas av korrosion.

Korrosion indikeras vid potentialkartering av potentialskillnader, snarare än av en viss absolutnivå på potentialen. De utpekade områdena kan sedan undersökas närmare

genom att polarisationsresistansen mäts. Denna mätning ger ett mått på korrosionshastigheten genom att utnyttja samband mellan strömtäthet och potential. Huvudproblemet är att hänföra den mätta strömmen till en viss, bestämd metallyta. Vanligen används ett arrangemang enligt Figur 43.



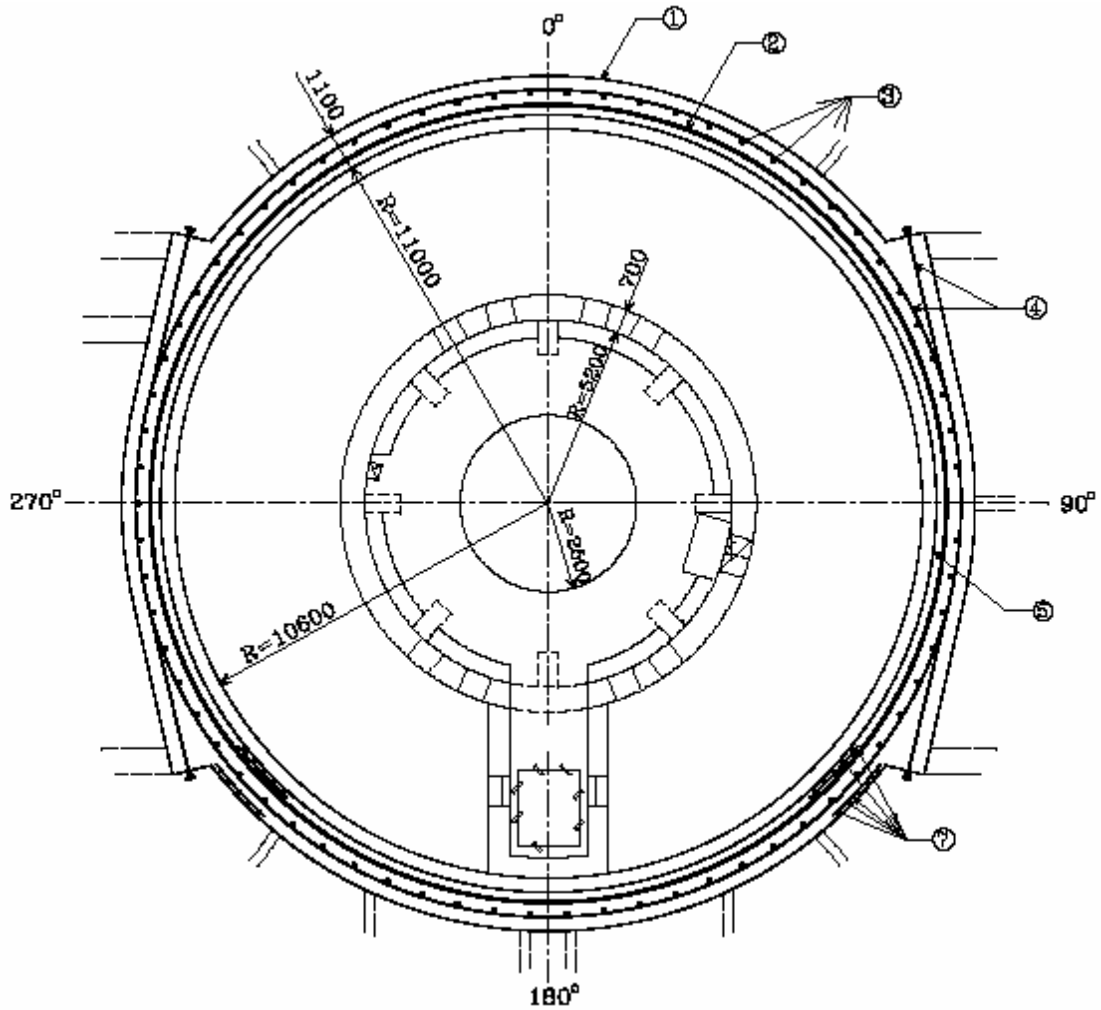
Figur 43: Mätning av polarisationsresistans för bestämning av korrosionshastigheten.

Med hjälp av en extra elektrod, ”guard ring,” avskärmas en del av metallytan. Den momentana korrosionshastigheten kan då bestämmas, förutsatt att korrosionen är likformig inom det avskärmade området. Så är i allmänhet fallet vid karbonatisering, men ej säkert vid kloridinducerad korrosion. För att arrangemanget enligt Figur 43 skall ha en möjlighet att ge ett korrekt värde på korrosionshastigheten krävs även att storleken hos motelektrod och ”guard ring” svarar mot betongskiktets tjocklek.

Utöver de elektrokemiska metoder som nämnts ovan är ett flertal andra metoder för oförstörande provning i princip användbara för tillståndskontroll av betongkonstruktioner. En genomgång av ett stort antal provningsmetoder som kan vara tillämpliga på betongdammar har utförts av Wiberg (1994). En något uppdaterad version har sammanställts av Bernstone (1999). De beskrivna metoderna baseras på olika fysikaliska principer och mäter t.ex. elektriska, elektromagnetiska, magnetiska, seismiska, akustiska eller radiologiska egenskaper hos betong och/eller armering. Liksom reaktorinneslutningar är betongdammar grova konstruktioner. Armering är emellertid sparsamt förekommande och problemen är huvudsakligen av annan karaktär än korrosion.

Reaktorinneslutningars armering

En slutsats av den studie av konstruktionen hos de svenska reaktorinneslutningarna som presenteras i Roth, Silfwerbrand och Sundquist (2002) är att slakarmeringens kondition spelar en underordnad roll för inneslutningsfunktionen, utom möjligen i vissa fall lokalt vid genomföringar. Intressantast ur korrosionssynpunkt är därför dels tätplåten, dels spännarmeringen. Båda täcks av betydande betongskikt i den 1-1,5 m tjocka inneslutningsväggen. Dessa skikt är dessutom armerade. Se Figur 44.

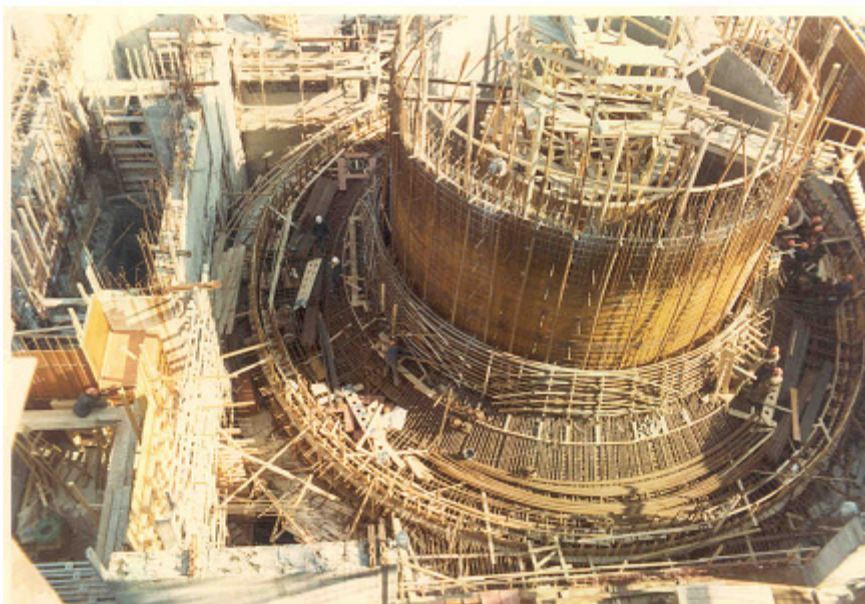


Figur 44: Tvärsnitt genom inneslutningen i Forsmark 1. I figuren betecknar 1 yttervägg, 2 tätplåt, 3 vertikal spännarmering, 4 horisontell spännarmering, 5 innervägg och 7 slakarmering.

Detta medför principiella svårigheter att mäta korrosionspotential och polarisationsresistans för spännarmering respektive tätplåt. Spännkablar är dessutom förlagda i metallrör, vilket gör dem oåtkomliga för elektrokemiska mätningar som bygger på dels en elektronström, dels en jonström mellan mätobjektet och en elektrod. Mätningar från insidan av inneslutningsväggen (mot tätplåten) kan påverkas av att syrehalten i inneslutningen hålls låg under drift (kvävgasatmosfär) och att långsam syrediffusionen medför en långt utdragen transient i samband med atmosfärsbyte.

En konsekvens av tätplåtens och spännkabelrörens relativa oåtkomlighet är att erfarenheterna av provning av de svenska reaktorinneslutningarna är begränsade. De mest omfattande insatserna har gjorts inom EU-projektet CONMOD. Erfarenheterna från CONMOD behandlas i ett följande avsnitt.

En bild från en av reaktorinneslutningarna i Barsebäck under byggskedet visas i Figur 45. De horisontella spännkabelrören är delvis monterade.



Figur 45: En av reaktorinneslutningarna i Barsebäck under byggskedet.

Erfarenheter från provning av spännarmerade brokonstruktioner

Precis som korrosionsproblemen är problemen med tillståndsuppföljning nära besläktade mellan reaktorinneslutningar och broar av spännarmerad betong. Oförstörande provning av djupt liggande, injekterad spännarmering är ett välkänt problem i samband med broar i förspänd betong. Problemet har inom det området varit föremål för intresse och utvecklingsinsatser under mer än 30 år. Bland annat har tänkbara provningsmetoder utvärderats ett flertal gånger.

I en genomgång från 1992 drar Gannon och Cady slutsatsen att det inte finns några OFP-metoder för att detektera korrosion i spännkablar i broar. Vissa metoder anses dock ha utvecklingspotential. Som sådana nämns högenergiradiografering, akustisk emission och Magnetic Field Disturbance (MFD). Högenergiradiografering anses besvärlig ur flera aspekter, men kan detektera ofullständig injektering i spännkabelrören. Akustisk emission kan detektera brott om metoden används för kontinuerlig övervakning. MFD anges som den metod för undersökning av spännkablar som har störst utvecklingspotential. För att metoden skall bli praktiskt användbar krävs enligt Gannon och Cady bland annat utveckling av mjukvaran som identifierar defekterna.

Poston och Wouters (1998) anger Impact Echo (IE) som den bästa metoden för att finna hålrum intill injekterade spännkablar. Metoden har provats 1997 på en amerikansk bro. Ofullständig injektering upptäcktes i 40 % av de undersökta balkarna. Inga korrosionsskador av betydelse hade däremot uppstått under de 30 år som gått sedan bron byggdes.

Georadar har enligt Poston och Wouters störst potential när det gäller att lokalisera spännkabelrören för vidare oförstörande provning, alternativt inspektion med förstörande metoder. En nackdel med metoden är att signalen störs av slakarmering.

Som den bästa oförstörande undersökningsmetoden för att fastställa brott eller betydande korrosionsskador på spännkablar anges radiografering. Akustisk emission anses ha stor potential som ett övervakningsverktyg, men författarna påpekar att metoden inte kan användas för att avgöra omfattningen av befintliga skador.

Enligt Poston och Wouters är injektering den primära försvarslinjen mot korrosion. En väl utförd injektering är därför av största vikt. Möjligheterna att i efterhand komplettera injekteringen för att eliminera kaviteter anges vara goda.

Ciolko och Tabatani (1999) har inom National Cooperative Highway Research Program i USA utvärderat oförstörande provningsmetoder för förspänt stål i betongbroar. Syftet med genomgången var att söka finna en praktisk och ekonomisk metod för oförstörande tillståndsuppföljning. Utvärderingen koncentrerades till de metoder som utvecklats mellan 1990 och 1999. Därutöver utvärderades även metoder vid den teknologiska horisonten. Författarna konstaterar att behovet av tillståndskontroll, utöver okulärbesiktning, är stort och att OFP-metoder för förspända broar har eftersökts sedan tidigt 1970-tal. Man noterar att ett antal fokuserade utvecklingsprojekt genomförts, men att utbytet av dessa varit ringa.

En av målsättningarna för Ciolko och Tabatani är att identifiera en metod som möjliggör att fastställa en femprocentig förlust av tvärsnittsytan. Författarna konstaterar att ingen metod, vare sig befintlig eller inom den teknologiska horisonten, lever upp till kraven. Ultraljudbaserade metoder anses ha den starkaste vetenskapliga basen för den eftersträvade upplösningen. Dessa metoder lider emellertid av en alltför snabb dämpning av signalen i betongmaterialet. Metoder baserade på magnetism uppges ha studerats ingående i ett par decennier. Stora svårigheter föreligger trots det att tolka signalen. Detta gäller speciellt då betongen utöver spännarmering även innehåller slakarmering. Akustisk emission anses ge alltför begränsad information. Utvecklingsinsatser rekommenderas beträffande Magnetic Field Disturbance.

Sagüés (2000) har använt resistansmätning för att identifiera delvis avslitna spännkablar i en bro. Metoden, som påminner om Direct Current Potential Drop Technique (DCPDT) som används för materialprovning inom kärnkraftbranschen, har låg känslighet på grund av spännkablarnas längd.

D'Appolonia (2001) har sammanställt provningsmetoder som har potential att tillämpas på spännmetall i geotekniska sammanhang (markankare, bergbultar). Intressantast är några notiser: Korrosionsriskerna med förspänt stål är inte bara vanlig rost, utan även sprödbrott orsakat av spänningskorrosion eller väteförsprödning (sid 16, referens ges). En annan uppgift är att det har förekommit flera korrosionsincidenter med icke injekterade spännkablar i reaktorinneslutningar. Den allvarligaste inträffade i Calvert Cliffs där både sprödbrott och duktila brott uppstod intill ankarna ca. 20 år efter uppförandet (sid 21, referens ges).

Rhazi (2001) behandlar OFP av brodäck. Uppgiften är att upptäcka delaminering orsakad av armeringskorrosion. Härför används i Kanada bland annat specialutrustade bilar med IR-kameror och georadar, som snabbt kan söka av stora ytor. Rhazi konstaterar sammanfattningsvis att utveckling och kvalificering av en OFP-metod är en mycket långdragen process. Kvalificeringen bedöms medföra förseningar på minst 10 år.

Podolny et al. (2001) har undersökt europeiska erfarenheter av snedkabelbroar. En kortfattad sammanställning av OFP-erfarenheter ges i rapporten. De schweiziska erfarenheterna anges vara följande:

- Electrochemical: some success
- Endoscopy (fiberscopy): limited success
- Georadar: doubtful results
- Impact echo: mixed results
- Infrared scan: unknown
- Magnetic perturbation: not good for anchors or massive sections
- Radiography: impractical, too bulky, and gives limited imaging
- Reflectometrical impulse: unknown
- Ultrasonic: does not work very well

Schweizarnas slutsats är att det inte finns någon enkel, tillförlitlig undersökningsmetod. Erfarenheterna från de andra besökta länderna är snarlika.

Williams och Thompson (2005) ger ett provningsföretags syn på olika OFP-metoders användbarhet för inspektion av förspända betongbroar. Flera olika metoder kan användas för att lokalisera spännkabelrör. Inledningsvis konstateras att ritningar i allmänhet har god tillförlitlighet. Georadar är användbart vid täckskikt på upp till 0,4 m, men signalen kan störas svårt av mellanliggande armering. Metoden rekommenderas då ritningar saknas eller inte stämmer. Impact Echo uppges endast fungera vid tunna täckskikt. Radiografering är den enda OFP-metod som kan "se" inuti spännkabelrören. En nackdel är kostnaden. Hålbörning uppges vara en relativt snabb lokaliseringsmetod.

För att komma åt spännkablar används i första hand slagbörning. Typiskt används ett 25 mm borr fram till spännkabelröret, därefter övergår man till handmejsling. För inspektion av djupt liggande kablar används endoskop. För undersökning av hålrum kan även tryck- eller vakuumprovning användas. Radiografering kan ge en klar bild av hålrum, men för att upptäcka mindre korrosionsskador krävs håltagning jämte undersökning med endoskop. Håltagning bör utföras i överdelen av spännkabelrören och i första hand vid högpunkter nära ankare eftersom hålrum visat sig vara vanligast där. I praktiken är det relativt ovanligt med signifikant hålrumsbildning, men hålrum uppträder ofta tillsammans. Hålrummen är vanligen mycket små och begränsade till de översta 5 mm av kabelrörets tvärsnitt, medan själva spännkablarna är väl täckta av injekteringsbruk. Helt oinjekterade kabelrör upptäcks dock någon gång.

CONMOD

EU-projektet CONMOD är en ambitiös satsning där man sökt kombinera beräkningar med finita elementmetoden och OFP i syfte att tillståndsbedöma reaktorinneslutningar samt även bedöma deras uppförande vid belastning liksom inverkan av åldring (Shaw, 2005). Det intressanta i detta sammanhang är erfarenheterna av de utvalda OFP-metoder som provats i Barsebäck 1 samt de erfarenheter som har bäring på korrosion.

De metoder som provades var följande:

- Täcksiktsmätare
- Georadar
- Radiografering (High Energy Computed Radiography, HECR)
- Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW)
- Spectral Analysis of Surface Waves (SASW)
- Impact Echo (IE)
- Ultrasonic Pulse Echo (UPE)

De metoder som rekommenderas för framtida undersökningar, samt användningsområdet för respektive metod, har sammanställts i tabell 1.

Method	Objective
Radar	Rebar and cable duct position and depth
HECR	Rebar and cable duct position, size and condition
HECR	Other details of concrete internal (high resolution)
HECR	Void detection and detection of alien materials in concrete
HECR	Concrete thickness (2-sided access)
MASW	Concrete thickness and thickness of layers
MASW	Concrete mechanical properties and quality
MASW	Quality of bond between concrete and embedded steel liner

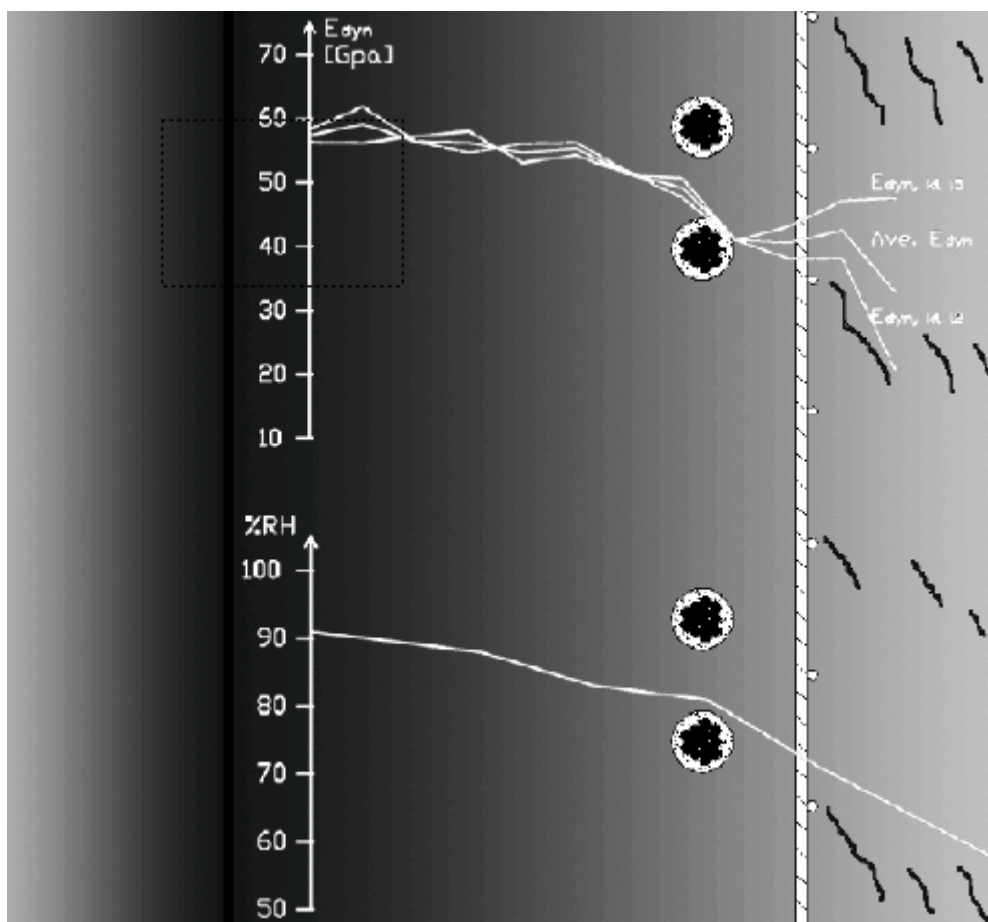
Tabell 1: De mest användbara OFP-metoderna vid undersökning av reaktorinneslutningen i Barsebäck 1, samt den information som erhålls med respektive metod. (Shaw, 2005)

Enligt mätningarna i Barsebäck 1 är radiografering den enda metod som kan ge information om läge, form, storlek och tillstånd hos armering och spännkabelrör. Det är även den enda metoden för att upptäcka hålrum i djupt liggande spännkabelrör.

I Barsebäck 2 har ofullständig injektering kring genomföringar lett till ett fall av penetrerande korrosionsskada på tätplåten. En genomföring i Barsebäck 1 undersöktes därför. Ett mindre hålrum upptäcktes genom radiografering. Vid upptagning av ett inspektionshål och undersökning med fiberoptik befanns stålytorna vara fria från korrosion. Detta är i god överensstämmelse med att fukthalten uppmättes till endast 82 %. Erfarenhetsmässigt uppstår inga korrosionsskador i karbonatiserad betong vid en fukthalt på ca 80 % eller lägre, trots att stål inte är passivt vid det lägre pH-värdet i karbonatiserad betong (Bertollini et al., 2004).

Undersökningen av inneslutningen i Barsebäck 1 avslöjade inte heller på andra punkter några allvarliga avvikelser från ritningsenligt utförande, defekter eller åldringsfenomen

av betydelse. Betongen är i de inre delarna av inneslutningsväggen av mycket hög kvalitet. Detta kan kopplas till att uttorkningen av betongen går mycket långsamt. En profil av fukthalten i inneslutningsväggen ges i Figur 46.



Figur 46: Fukthalt och hållfasthet hos betongen i inneslutningsväggen. Ytterväggen till höger i figuren. Relativa fukthalten är strax över 80 % vid spännkablarna resp. 90 % vid tätplåten. Närmast ytterväggen finns mindre skador i betongen orsakade av glidformsgjutningen. (Shaw, 2005)

Profilen i Figur 46 skall jämföras med den beräknade jämviktsprofilen för fukthalten i inneslutningsväggen i Figur 29 (där ytterväggen är till vänster i figuren). Jämförelsen hållar dock eftersom det i Figur 29 förutsätts finnas en temperaturgradient över inneslutningsväggen. Fukthalterna i Figur 46 uppmättes lång tid efter avställningen av Barsebäck 1, varför en temperaturgradient över väggen torde ha saknats. En höjd temperatur i väggens inre sänker fukthalten med ett belopp som bestäms av hygrottermiska koefficienten $(\partial h / \partial T)_w$, fukthaltens ändring med temperaturen vid konstant vatteninnehåll i betongen.

Diskussion och slutsatser

Ett mycket omfattande erfarenhetsmaterial från andra betongtillämpningar indikerar att frekvensen av allvarliga korrosionsskador på de svenska reaktorinneslutningarna kan förväntas vara låg. Samtidigt kan skador inte helt uteslutas. En till riskbilden anpassad tillståndskontroll är därför önskvärd.

Stål i betong passiveras normalt genom ett högt pH i porvätskan. Erfarenhetsmässigt beror så gott som alla korrosionsangrepp på ingjutningsgods på att passiveringen brutits genom en av följande tre mekanismer:

1. pH i porvattnet sänks genom karbonatisering av betongen.
2. Kloridjoner reagerar med passivskiktet.
3. Hålrum i betongen bryter kontakten mellan stålytan och den passiverande porvätskan.

När det gäller reaktorinneslutningar kan man bortse från de två första mekanismerna ovan. Oavsiktliga hålrum i betongen (motsvarande⁷) framstår därför som den helt dominerande korrosionsrisken. Detta är i god överensstämmelse med inträffade skadefall.

Enligt en tidigare utredning är det väsentligen korrosionsskador på tätplåt och spännarmering som har betydelse för inneslutningsfunktionen. Penetrerande korrosionsskador på tätplåten upptäcks genom återkommande täthetsprovning av inneslutningen. Det dominerande problemet är därför tillståndskontroll av cementinjekterad spännarmering. Mängden spännarmering i en reaktorinneslutning är mycket stor, Figur 45. Komplet tillståndskontroll av spännarmeringen kräver därför en rationell undersökningsmetod.

En lämplig provningsmetod för intern, cementinjekterad spännarmering har länge eftersökts på grund av behovet av tillståndskontroll av det mycket stora antal spännarmerade betongbroar som är i bruk. Ett omfattande utrednings- och utvecklingsarbete för att ta fram en lämplig metod har bedrivits under mer än 30 år. Detta arbete har hittills inte varit framgångsrikt och en bra undersökningsmetod saknas idag. Då utvecklingen av OFP-metoder tar lång tid är det enligt författarens bedömning en rimligt säker uppskattning att en ändamålsenlig undersökningsmetod heller inte kommer bli tillgänglig inom den närmaste 10-årsperioden. Frågan är därför hur redan tillgängliga OFP-metoder bäst kan användas för tillståndskontroll av cementinjekterad spännarmering i svenska reaktorinneslutningar.

En undersökningsmetod som finns tillgänglig, och som används vid undersökning av spännarmerade betongbroar, är en kombination av oförstörande och förstörande provning: Först lokaliserar kaviteter i cementinjekteringen genom en eller flera OFP-metoder. Därefter tas ett inspektionshål upp och armeringens status undersöks med hjälp av fiberoptik. Slutligen fylls kaviteten upp genom vakuuminjektning. Den OFP-metod som kan antas komma till användning vid lokalisering av kaviteter i en

⁷ Passiveringen bryts även om tex termisk isolering hindrar kontakt mellan betong och stålyta.

reaktorinneslutning är radiografering. Eventuellt kan georadar komma till användning för att lokalisera armering och spännkablar.

Den ovan beskrivna undersökningsmetoden kan uppenbarligen användas endast i mycket begränsad omfattning i ett kärnkraftverk i drift. Målsättningen måste därför vara att omsorgsfullt fokusera insatserna för att uppnå ett tillfredsställande underlag för en bedömning av korrosionsstatus. Denna undersökning har pekat på några punkter som kan vara värda att beakta i det sammanhanget:

- Korrosionshastigheten är signifikant endast då relativa fukthalten är tillräckligt hög. Man bör därför kartlägga fukthalten i betongen och koncentrera fortsatta undersökningar till de områden med spännarmering som har högst relativ fukthalt.
- Risken för korrosion i kaviteter intill genomföringar kan antas skilja mellan kalla och varma genomföringar.
- Relativa fukthalten, och därmed korrosionsrisken, avtar med tiden. Om undersökning visar att korrosionsskador i en viss punkt inte uppstått efter mer än 20 års drift kan sannolikheten för framtida skador i likvärdiga punkter antas vara mycket låg.
- Kaviteter uppträder ofta tillsammans på grund av systematiska fel. En vanlig bakomliggande mekanism är vattenavskiljning genom sedimentation av injekteringsbruket. Detta leder till ansamling av vatten och luft i högpunkter. I första hand bör därför högpunkter undersökas. Andra ställen av särskilt intresse är där avluftningar och andra påstick ansluter, samt den översta delen av vertikala kabelrör.
- Praktiska injekteringsförsök på en modell kan ge ytterligare information om risken för kaviteter och var sådana i första hand bör eftersökas. Vid ett sådant försök bör injekteringsbruk och kabel vara representativa. (Kabeln underlättar vattentransport.)

Ett program av ovanstående typ kan stödjas genom några kompletteringar av befintligt underlag:

- Bättre information om sambandet mellan relativ fukthalt och korrosionshastighet under aktuella betingelser.
- Information om hur korrosionsrisken påverkas av storleken på en kavitet.
- Ytterligare praktiska försök i Barsebäck. Möjligheterna till omfattande undersökningar och till att verifiera OFP-resultat genom förstörande provning bör tas tillvara. Möjlighet finns även att i Barsebäck söka verifiera det ovan föreslagna angreppssättet.

Som slutsats kan konstateras att avvikelser från ritningsenligt utförande i form av kaviteter intill stålytor utgör den enda identifierade, potentiellt allvarliga korrosionsrisken i svenska reaktorinneslutningar med injekterade spännkablar. På många sätt är den miljöpåverkan reaktorinneslutningarna utsätts för gynnsamma vid jämförelse med andra betongkonstruktioner. Detta, samt den stora erfarenhetsbank som andra betongtillämpningar utgör, innebär att risken för grundläggande överraskningar kan antas vara mycket liten.

Ur korrosionssynpunkt kan det troliga scenariot sägas vara närmast motsatsen till en med tiden accelererande degradering. Mest sannolikt är att hastigheten hos eventuell korrosion var högst initialt, då fukthalten i betongen var högst. Mätningarna inom CONMOD-projektet tyder på att fukthalten vid spännkablarna idag kan ha sjunkit till en nivå som medför att korrosionshastigheten är gott och väl en storleksordning lägre.

Att korrosionshastigheten numera sannolikt är både låg och avtagande möjliggör i princip ett resonemang av följande typ: Om reaktorinneslutningen provtrycks vid ett visst tryck, så medför en låg degraderingshastighet att inneslutningen under en längre tid kan förväntas motstå ett övertryck som är, säg, 80 % av provtrycket. Med en ansatt maximal korrosionshastighet bör ett lämpligt provtryckningsintervall kunna beräknas.

Det faktum att tillståndskontroll av cementinjekterade spännkablarna är problematisk förtar inte det faktum att en väl utförd cementinjektering ger ett utomordentligt gott korrosionsskydd. De oinjekterade spännkablarna i Ringhals 2-4 och Forsmark 1-3 har ett väsentligt sämre och osäkrare korrosionsskydd. Tillståndskontrollen för de oinjekterade spännkablarna bör anpassas efter denna omständighet.

Referenser

- Barslivo, G., Österberg, E. & Aghili, B., *Utredning kring reaktorinneslutningar – konstruktion, skador samt kontroller och provningar*, SKI Rapport 02:58.
- Bentur, A., Diamond, S. & Berke, N., S., *Steel Corrosion in Concrete*, E & FN Spon, London, 1997.
- Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P. & Polder, R., *Corrosion of Steel in Concrete*, Wiley-VCH, 2004.
- Beeby, A.W., *Concrete in the Oceans – Cracking and Corrosion*, Tech. Rep. No. 2, CIRIA/EG, Cement and Concrete Association, UK, 1979.
- Berstone C., *Utvärdering av befintliga metoder för tillståndskontroll av betong i kraftanläggningar*, Elforsk Rapport 99:45, 1999.
- Bricker, M., D. & Schokker, A., J., *Corrosion from Bleed Water in Grouted Post-Tensioned Tendons*, Research and Development Bulletin RD137, Portland Cement Association, Skokie, IL, USA, 2005.
- Broomfield, J., P., *Corrosion of Steel in Concrete*, E & FN Spon, London, 1997.
- CEB (Comité Européen du Béton), *Durable Concrete Structures*, Bulletin d'information N.183, Lousanne, 1992.
- Ciolko, A., T. & Tabatani, H., *Nondestructive Methods for Condition Evaluation of Prestressing Steel Strands in Concrete Bridges*, National Cooperative Highway Research Program Web Document 23, Transportation Research Board, Washington, DC, USA, March 1999.
- Clark, L., *Performance in Service fo Post-Tensioned Concrete Bridges*, Report prepared for British Cement Association, October 1992.
- Concrete Society, *Durable Post-tensioned Concrete Bridges*, Concrete Society Technical Report 47, ed. 2, Camberley, Surrey, United Kingdom, August 2002.
- Corven Engineering, *New Directions for Florida Post-Tensioned Bridges*, Volumes 1 through 10, Florida Department of Transportation Report, Corven Engineering, Inc., Tallahassee, Florida, 2002.
- Corven J. & Moreton, A., *Post-Tensioning Tendon Installation and Grouting Manual*, Federal Highway Administration, Washington, DC, May 2004.
- D'Appolonia, McMahon & Mann Consulting Engineers, P.C., *Evaluation of Metal-Tensioned Systems in Geotechnical Applications, Phase I*, National Cooperative

Highway Research Program Web Document 27, Transportation Research Board, Washington, DC, USA, March 2001.

Gannon, E., J. & Cady, P., D., *Condition Evaluation of Concrete Bridges Relative to Reinforcement Corrosion, Volume 1: State of the Art of Existing Methods*, SHRP-S/FR-92-103, Strategic Highway Research Program, Washington, DC, 1992

Grönvold, F., Preece, C. & Arup, H., *Corrosion Protection of Steel by Concrete, in Particular by Low Porosity Cement Mortars*, Int. Congress on Metallic Corrosion, Mainz Vol. 2, 1981

Isecke, B., *Long-term Behaviour of Materials in a Prestressed Concrete Bridge*, Proceedings, International Symposium of Corrosion in Reinforced Concrete Construction, Warwickshire, England, Elsevier Applied Science, Essex, England, 1990.

Jäggi, S., *Experimentelle und numerische Modellierung der lokalen Korrosion von Stahl in Beton unter besonderer Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit*, Doktorsavhandling, ETH, Zürich, 2001.

Jäggi, S., Böhni, H. & Elsener, B., *Macrocell Corrosion of Steel in Concrete – Experiments and Numerical Modelling*, Eurocorr 2001, CDROM, Associazione Italiana Metallurgia, Milano, 2001,

Laase, H. & Stichel, W., *Rehabilitation of Retaining Walls in Berlin, Special Aspects of Corrosion of the Back Side*, Die Bautechnik, 1983, 4, 124-129.

Martin-Pérez, B., *Service life modelling of reinforced concrete highway structures exposed to chlorides*, Doktorsavhandling, University of Toronto, 1999.

Metha, P., K. & Monteiro, P., J., M., *Concrete: Structure, Properties, and Materials*, 2nd Edn., Prentice Hall, 1993.

Neville, A., M., *Properties of Concrete*, 4th Edn., Longman Group Limited, Harlow, 1995.

Novokschenov, V., *Salt Penetration and Corrosion In Prestressed Concrete Members*, Publication No. FHWA-RD-88-269, Federal Highway Administration, McLean, Va., 1989. (Se även Novokschenov, V. *Condition Survey of Prestressed Concrete Bridges*, Concrete International, Vol. 11, No. 9, September 1989, pp. 60-68, samt Novokschenov, V., *Prestressed Bridges and Marine Environment*, Journal of Structural Engineering, American Society for Civil Engineering, Vol. 116, No. 11, November 1990, pp. 3191-3205.)

Page, C., L., *Mechanism of corrosion protection in reinforced concrete marine structures*, Nature, Vol. 258, 11 December 1975.

Page, C., L. & Treadaway, K., W., J., *Aspects of the electrochemistry of steel in concrete*, Nature, Vol. 297, 13 May 1982.

Podolny, W., et al., *Performance of Concrete Segmental and Cable-Stayed Bridges in Europe*, Federal Highway Administration Report FHWA-PL-01-019, Washington, DC, May 2001.

Poston, R., W. & Wouters, J., P., *Durability of Precast Segmental Bridges*, National Cooperative Highway Research Program Web Document 15, Transportation Research Board, Washington, DC, USA, June 1998.

Rhazi, J., *NDT in Civil Engineering: The Case of Concrete Bridge Decks*, NDT.net – Vol 6, No. 5, May 2001.

Roth, T., Silfwerbrand, J. & Sundquist, H., *Betonginneslutningar i svenska kärnkraftverk*, SKI Rapport 02:59.

Sagüés, A., A., Kranc, S., C. & Hoehne, R., H., *Initial Development of Methods for Assessing Condition of Post-Tensioned Tendons of Segmental Bridges*, Final Report to Florida Department of Transportation, University of South Florida, Tampa, May 2000.

Salas, R., M. et al., *Conclusions, Recommendations and Design Guidelines for Corrosion February 2004 Protection of Post-Tensioned Bridges*, Report FHWA/TX-04/0-1405-9, Center for Transportation Research, University of Texas at Austin, Austin, Feb 2004.

Shaw, P., *Concrete containment management using Finite Element technique combined with in-situ Non-Destructive Testing of conformity with respect to design and construction quality (CONMOD) – Main Report*, Force Technology, Brøndby, 2005.

Schokker, A., J., Koester, B., D., Breen, J., E. & Kreger, M., E., *Development of High Performance Grouts for Bonded Post-tensioned Structures*, Research Report 1405-2, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, Austin, Texas, USA, October 1999.

Schupack, M., *Grouting Tests on Large Post-Tensioning Tendons for Secondary Nuclear Containment Structures*, Journal of the Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, March-April 1971, sid. 85 to 97.

Schupack, M., *Durability Study of a 35-Year-Old Post-Tensioned Bridge*, Concrete International, Vol. 16, No. 2, February 1994, pp. 54-58.

Schupack, M., *Post-Tensioning Tendons After 35 Years*, Concrete International, Vol. 16, No. 3, March 1994, pp. 50-54.

Smith, J., L. & Virmani, Y., P., *Materials and Methods for Corrosion Control of Reinforced and Pre-Stressed Concrete Structures in New Construction*, Publication 00-081, Federal Highway Administration, McLean, VA, Aug 2000.

- Tuutti, K., *Corrosion of Steel in Concrete*, Cement- och betonginstitutet, 1982.
- West, J. S. et al., *State-of-the-Art Report about Durability of Post-Tensioned Bridge Substructures*, Center for Transportation Research, University of Texas at Austin, 1999.
- Wiberg, U., *Tillståndskontroll av betong i kraftanläggningar*, Elforskrapport 94:17, 1994.
- Williams, H., T. & Thompson, K., A., *Practical Considerations of Inspecting Post-Tensioned Bridges*, Testconsult limited, Risley, Warrington, Storbritannien, (www.testconsult.co.uk), 2005.
- Woodward, R., J. & Williams, F., W., *Collapse of Ynys-y-Gwan bridge, West Glamorgan*, Proc. Instn Civ. Engrs, Part 1, 1988, 854, Aug., 635-669.
- Yonezawa, T., Ashworth, V. & Procter, R., P., M., *Pore Solution Composition and Chloride Effects on the Corrosion of Steel in Concrete*, Corrosion (NACE), Vol. 44, No. 7, July 1988.

www.ski.se

STATENS KÄRNKRAFTINSPEKTION
Swedish Nuclear Power Inspectorate

POST/POSTAL ADDRESS SE-106 58 Stockholm

BESÖK/OFFICE Klarabergsviadukten 90

TELEFON/TELEPHONE +46 (0)8 698 84 00

TELEFAX +46 (0)8 661 90 86

E-POST/E-MAIL ski@ski.se

WEBBPLATS/WEB SITE www.ski.se