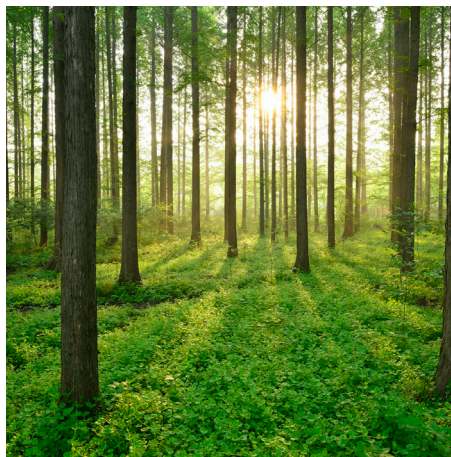
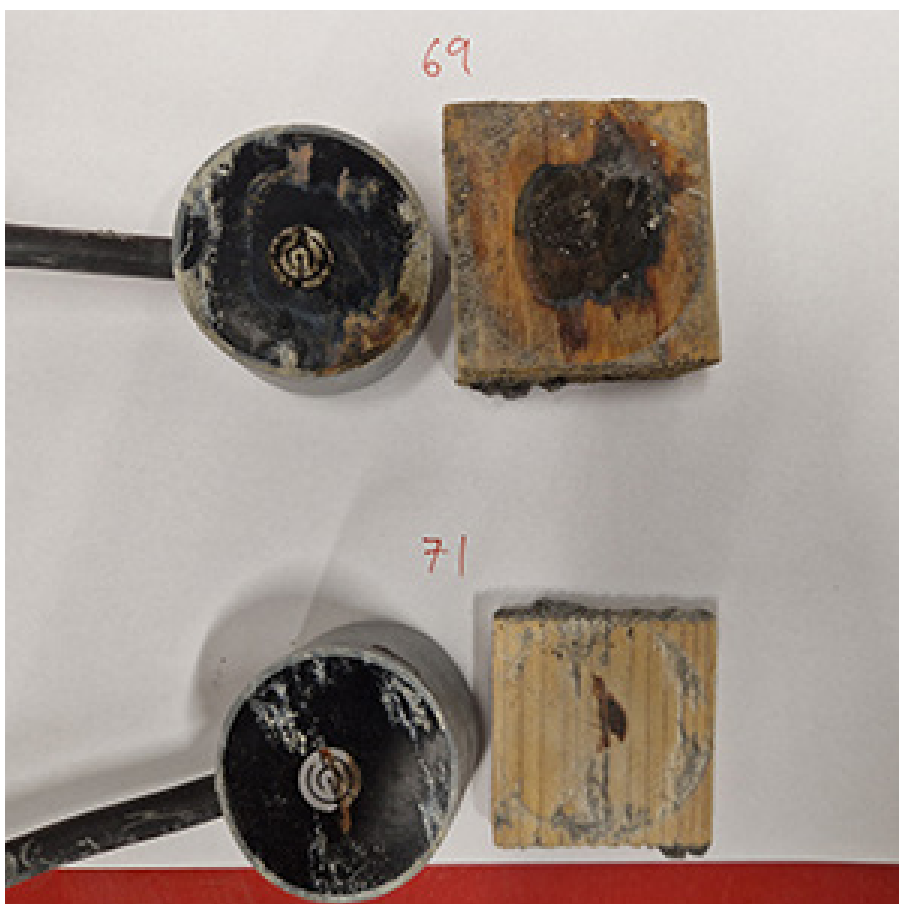


TRÄINDUCERAD KORROSION PÅ INGJUTEN TÄTPLÅT

RAPPORT 2025:1123



BETONGTEKNISKT PROGRAM
KÄRNKRAFT



Träinducerad korrosion på ingjuten tätplåt

- Initiering

JONAS ENGBLOM, BERTIL SANDBERG, JOHAN AHLSTRÖM

ISBN 978-91-89918-24-5 | © Energiforsk juni 2025

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

Förord

Denna rapport är del av resultaten från ett projekt som utförts inom ramen för Energiforsks Betongtekniska program inom kärnkraft.

Energiforsks Betongtekniska program inom kärnkraft har som syfte att öka kunskapen om de aspekter som påverkar säkerhet, underhåll och utveckling av betongstrukturer i de nordiska kärnkraftverken. En del av detta är att undersöka möjligheter att med bibehållen säkerhet förenkla det arbete som sker på kraftverken.

Träinducerad korrosion på betongingjuten tätplåt är en viktig fråga för kärnkraftverken, eftersom det potentiellt kan leda till strukturella integritetsproblem. Denna laborativa studie syftade till att undersöka initiering och kortsiktig utveckling av denna typ av korrosion. Trots signifikanta skillnader inom försöksuppställningen så visade resultaten att om vissa kritiska faktorer som t.ex. kontakt med en extern katodyta samt stor volym och hög fuktighet i träbiten så kan korrosion uppstå även i betongingjuten stålplåt.

Studien utfördes av Jonas Engblom, Bertil Sandberg, Johan Ahlström, RISE. Studien utfördes inom Energiforsks Betongtekniska program, som finansieras av Vattenfall, Uniper, Fortum, TVO, Skellefteå Kraft, Karlstads Energi, SSM samt SKB.

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

Sammanfattning

Detta projekt har närmare undersökt de korrosionsfenomen som uppstår när en träbit ligger an mot en stålyta i samband med gjutning. Syftet har varit att undersöka hur initiering av en så kallad aktiv/passiv-cell sker och hur den utvecklas på kort sikt. Detta projekt ska ses som en del av en projektserie med målet att utreda långsiktiga risker med ingjutna träbitar inom kärnkraftverk.

Projektet har haft som målbild att lyckas efterlikna de situationer där praktiska erfarenheter visat på tätplåtsperforering efter en i sammanhanget kort tid. Utgångspunkten för detta har varit de praktiska skadefall som kunnat härledas till ingjutna träbitar i kontakt med tätplåt. Projektet har utförts genom försöksuppställningar på laboratorium, där ER-prober (elektrisk resistans-prober) har nyttjats för att ge ögonblicksbilder av det initiala korrosionsförloppet. Vidare har även resistivitets- och pH-mätningar utförts som stöttande försök.

Resultaten tyder på att det föreligger stor heterogenitet inom försöksuppställningen. Både betong och trä är heterogena material som när de kombineras ger stor spridning i förutsättningar. Vidare tillkommer de många olika aspekter som kan skilja vid montering.

Projektet har lyckats återskapa situationer i vilka en aktiv/passiv-cell skapas och åtminstone kortsiktigt stabiliseras. Att denna etablerade teori styrks av laborativa data är av vikt för framtida utredningar. Det är även tydligt att en extern katodyta krävs för att korrosionen ska komma i gång. Vidare kan det konstateras att utgångsresistansen vid anoden (stålytan under träbiten) troligen är avgörande för att en aktiv/passiv-cell ska initieras, men framför allt fortleva. Fortlevnaden begränsas sannolikt av inträngande alkali, men även av den ökande totalresistansen i cellen i samband med härdning. Teorin att interna aktiv/passiv-celler ska uppstå har också lagt fram, vilka förefaller kunna ha en initialt hög korrosionshastighet, men som på sikt förefaller klinga av.

Sammanfattningsvis kan det sägas att projektet har påvisat att aktiv/passiv-celler uppstår under träbitar ingjutna i betong vid sammankoppling med externa katodytor. Faktorer som bedöms ha stor inverkan beträffande initieringen är förhållande mellan anod- och katodytorna, anläggningen metall/trä, fukthalt i träbiten, samt volym på träbiten.

Nyckelord

Korrosion
Tätplåt
Kärnkraft
Aktiv/passiv-cell
Trä
Betong

Summary

This project has examined the corrosion phenomena that occur when a piece of wood is in contact with a steel surface during concrete casting. The purpose has been to investigate how the initiation of a so-called active/passive cell occurs and how it develops in the short term. This project should be seen as part of a series of studies aimed at assessing the long-term risks associated with embedded wood pieces in nuclear power plants.

The objective of the project has been to replicate situations where practical experience has shown penetration of steel liners after a relatively short period. The starting point for this has been documented damage cases that could be traced back to embedded wood pieces in contact with steel liners. The project has been carried out through laboratory experiments, where ER (electrical resistance) probes have been used to monitor the initial corrosion processes. Additionally, resistivity and pH measurements have been conducted as complementary tests.

The results indicate significant heterogeneity within the test setup. Both concrete and wood are heterogeneous materials which, when combined, lead to a wide range of conditions. Furthermore, numerous variables related to the installation process may also contribute to this variability.

The project has successfully recreated scenarios in which an active/passive cell is formed and at least temporarily stabilize. The fact that this established theory is supported by experimental data is important for future investigations. It is also evident that an external cathodic surface is required for corrosion to initiate. Moreover, it can be concluded that the initial resistance at the anode (the steel surface beneath the wood piece) is likely a critical factor not only for the initiation but also for the continued activity of an active/passive cell. The longevity of the cell is likely limited by the intrusion of alkali, as well as the increasing overall resistance of the cell during concrete curing. The hypothesis of internally formed active/passive cells has also been proposed. These may initially exhibit high corrosion rates but appear to diminish over time.

In summary, the project has demonstrated that active/passive cells form under wood pieces embedded in concrete when connected to external cathodic surfaces. Factors assessed to have significant impact on initiation include the ratio between anodic and cathodic surface areas, contact between wood and steel, the moisture content of the wood, and the volume of the wood piece.

Innehåll

1	Bakgrund	8
1.1	Korrosion på stål i betong	8
1.2	Träinducerad APC	9
1.2.1	Träinducerad korrosion på svensk kärnkraftsreaktor	10
1.3	Syfte	12
2	Metod	13
2.1	PH-mätning	13
2.2	Torkning av trä	13
2.3	Resistivitetsmätning	13
2.4	Exponering av ER-prober	14
2.4.1	Provmatris	14
2.4.2	ER-prober	15
2.4.3	Träbitar	16
2.4.4	Betong16	
2.4.5	Montering	16
2.5	Brytning av försök och inspektion av prober	18
3	Resultat	19
3.1	ph-inträngning	19
3.2	Torkning av Trä	20
3.3	Resistivitetsmätning	20
3.4	Exponering av ER-prober	21
3.4.1	Kommentarer om resultat från ER-prober	29
3.5	Visuell inspektion av ER-prober	30
4	Diskussion	34
4.1	Inverkan av uppställning	39
4.2	Inverkan av Trä	40
5	Slutsatser	42
6	Förslag på vidare studier	44
7	Referenser	45

1 Bakgrund

Under 2019 publicerades en Energiforskrapport inom Betongtekniskt Program – Kärnkraft med titeln "Genomgång av potentiella korrosionsrisker för ingjuten tätplåt i reaktorinneslutningar". Syftet med projektet var att utvärdera samtliga potentiella korrosionsprocesser aktuella för tätplåten, för att identifiera riskzoner för reaktorinneslutningarnas tätplåtar. Underlaget till rapporten var såväl nationella som internationella rapporter. Slutsatsen i rapporten var att korrosion i defektfri betong, det vill säga betong utan inträngning av klorider eller karbonatisering, ej kan uppstå. För att korrosion trots det ska uppstå krävs någon typ av kavitet som gör att tätplåten ej är passiverad, vilket leder till uppkomst av en aktiv/passiv-cell. För att korrosionen sedan ska kunna propagera till större angrepp krävs antingen omsättning av vatten/syre i kaviteten eller att någon typ av heterogenitet, så som en träbit, vilket orsakar en lokal förurning som motverkar alkalisering från omgivande betong. En del av dessa risker kan identifieras från ritningar, andra, så som närvaro av en träbit, är omöjliga att förutse var de kan inträffa.

Med bakgrund av detta initierades ett projekt med syfte att utföra omvärldsbevakning samt en avslutande workshop med syfte att diskutera relevanta parametrar och karaktäristik för dessa aktiv/passiv-celler. Under omvärldsbevakningen och den efterföljande workshopen förekom en relativ samsyn i litteratur och mellan medverkande parter. Uppkomsten av en träinducerad aktiv/passiv-cell beror på att träbiten gör så att den underliggande stålytan ej passiveras. Än vidare, för att korrosion ska kunna uppstå krävs att en aktiv/passiv-cell sluts, det vill säga att det finns tillräckligt god ledningsförmåga i träbiten. Vikten av den surgörande effekten av hydrolysering vid anoden framhölls, då annars inträngande alkali borde passivera stålytan under träbiten efter ett tag och således avstanna korrosionen.

Utifrån denna diskussion framarbetades etapp två, för att undersöka initiering. Det är denna etapp som rapporten avhandlar.

1.1 KORROSION PÅ STÅL I BETONG

När stål gjuts in passiveras stålytan tack vare betongens höga pH. När passivering av stål har skett krävs det att ytan avpassiveras, eller aktiveras, för att korrosion ska kunna uppstå. Vanligtvis sker detta antingen på grund av karbonatisering eller kloridinträngning.¹ Bägge dessa processer är emellertid relativt långsamma förlopp.

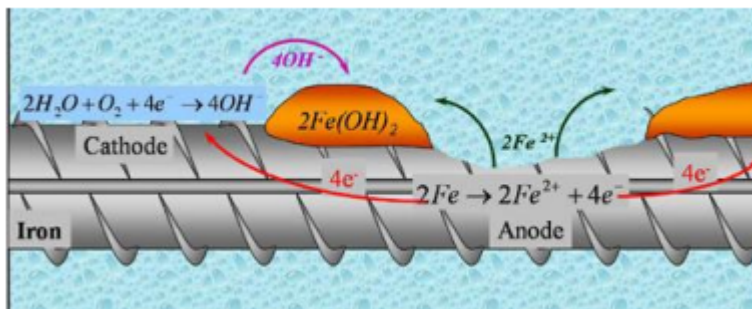
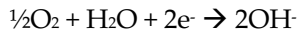
Om en ingjuten aktiv stålyta sitter ihop elektriskt med en ingjuten passiv stålyta finns möjligheter att en så kallad aktiv/passiv-cell (hädanefter APC), uppstår.

¹ (Sederholm, Kalinowski, & Eistrat, 2008)

Drivkraften i en APC är den potentialskillnad som föreligger mellan den aktiva och den passiva stålytan. Förutsatt låg resistivitet i betongen och att ytorna sitter ihop elektriskt, kommer en korrosionsström flyta mellan anoden (den aktiva ytan) och katoden (den passiva ytan), se Figur 1. Vid anoden sker en upplösning av järn:

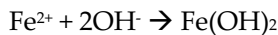


Och vid katoden sker reduktion av syre:

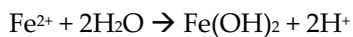


Figur 1: Översiktsbild av aktiv/passiv-cell i betong, med elektrodreaktioner.²

Under förutsättning att järnjonerna kommer ut i en alkalisk lösning, kan sedan korrosionsprodukter bildas enligt nedan:

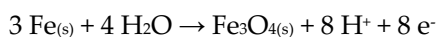


I frånvaro av syre vid anoden sker en hydrolys av järnjonerna, vilket förutom korrosionsprodukter även bildar vätejoner²:



Detta leder till en kontinuerlig förurning vid anoden, förutsatt att de bildade vätejonerna ej neutraliseras av omkringliggande hydroxidjoner.

Vidare är även följande korrosionsreaktion möjligen bidragande till förurning förutsatt syrefattiga förhållanden.



1.2 TRÄINDUCERAD APC

Ovan korrosionsmekanism är den vanligaste förekommande för armeringsjärn i betong, där betongen förändrats över tid på grund av karbonatisering eller kloridinträngning. För träinducerad korrosion är dock situationen annorlunda, även om principerna bakom en APC är desamma. Den största skillnaden är att istället för att betongens karaktär förändras över tid (karbonatisering/kloridinträngning) vilket ger upphov till en aktivering av stålytan, sker aktiveringen av stålytan genom att den inte etablerar kontakt med betongen till att börja med. Istället för att ytan går från passivitet till att vara aktiv, blir aldrig

² (Sederholm, Kalinowski, & Eistrat, 2008)

stålytan passiv till att börja med utan blir aktiv direkt. Detta skulle kunna ske om något objekt ligger an mot stålytan och på så sätt hindrar att stålytan kommer i kontakt med det alkaliska gjutvattnet. I samband med undersökningar av korrosionsskador på tätplåten har det noterats flertalet gånger att träbitar återfunnits direkt på den korroderade tätplåten. Detta har dokumenterats i Sydkorea³, Sydafrika, Sverige och USA⁴. Även annat organiskt material har påträffats, nämligen en arbetshandske och filduk.⁴ Givet de situationer som dokumenterats har diskussionen konsensus beträffande inverkan av lågt pH, där det noteras att samtliga material som påträffats i samband med korrosion har varit organiska, vilka har möjlighet att bidra till en sur miljö.⁴ Detta bekräftades även i en fallstudie.⁵ Det lägre pH-värdet bidrar med två aspekter till korrosionen; dels möjliggör det för korrosion att uppstå initialt då det låga pH-värdet gör att stålytan ej passiveras, och dels för att ett lågt pH-värde, och därmed hög koncentration av vätejoner, möjliggör att inträngande hydroxidjoner från gjutvattnet buffras, vilket fördröjer alkalisering och passivering.

Vidare krävs det sannolikt att objektet som ligger an mot stålytan är genomsläpplig för elektrolyt.⁴ Detta möjliggör elektrolytisk kontakt med kringliggande ädla ytor vilket gör att en APC kan etableras.

När en APC väl är etablerad kommer anoden hamna under träbiten, och katoden på den kringliggande tätplåten och armeringen. Detta skulle ge ett väldigt ogynnsamt anod/katod-förhållande, vilket kan leda till höga korrosionshastigheter. Intensiteten av en APC bestäms av, utöver areaförhållandet mellan anod och katod, potentialskillnad mellan anod och katod, resistivitet i elektrolyt (både vid anod och katod) samt tillgång på syre (oxidationsmedel vid katoden). Anodreaktionen i denna korrosionsprocess kommer då vara förlagd till stålytan under träbiten, vilket frigör järnjoner. Dessa järnjoner kommer, då miljön därunder är syrefattig och sur/neutral, kunna hydrolyseras, vilket bidrar till ytterligare sänkning av pH. Denna produktion av vätejoner vid anoden kommer sen stå och väga mot de inträngande hydroxidjonerna från det omgivande gjutvattnet.⁶

1.2.1 Träinducerad korrosion på svensk kärnkraftsreaktor

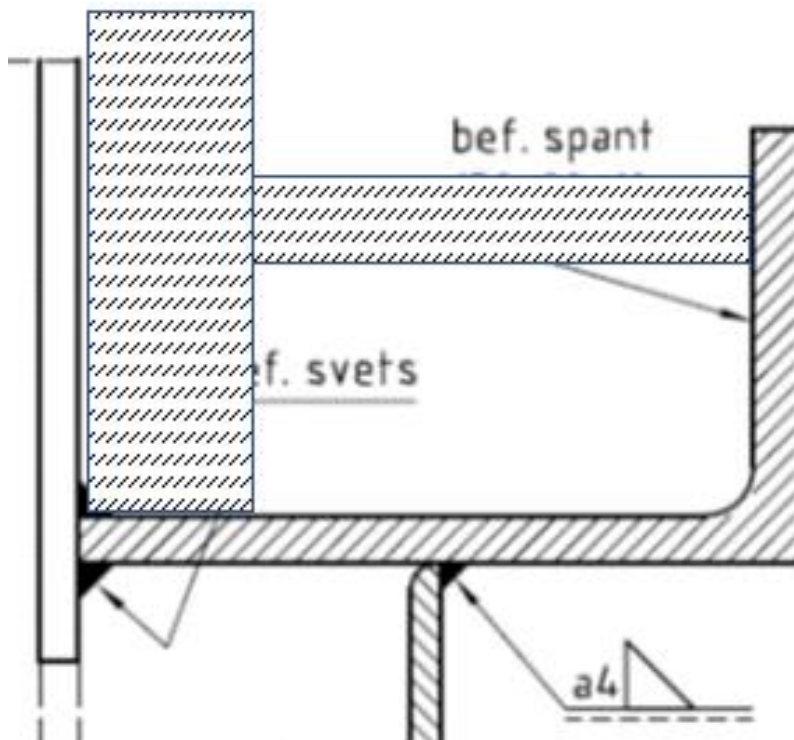
Som tidigare nämnt har fenomenet träinducerad korrosion även påträffats i en svensk reaktorbyggnad. Under provtryckning indikerades en läcka, vilket ledde till att betongen på insidan av tätplåten bilades upp. Inom det uppbildade området påträffades en perforering av tätplåten, och på andra sidan tätplåten, på utsidan, påträffades en träregel i direkt anslutning till skadan. Bakom denna träregel fanns ytterligare träreglar. Träreglarna bedöms ha använts som distanser mellan tätplåt/L-järn vid gjutning, se Figur 2. Noterbart är att den kraftigaste korrosionen inträffat mittemot de mindre träreglarna, alltså där trycket troligen varit som högst.

³ *Introduction of Containment Liner Plate (CLP) Corrosion*. Paek, Yonglak, o.a. Jeju : Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, 2018.

⁴ (Dunn & Pulvirenti, 2011)

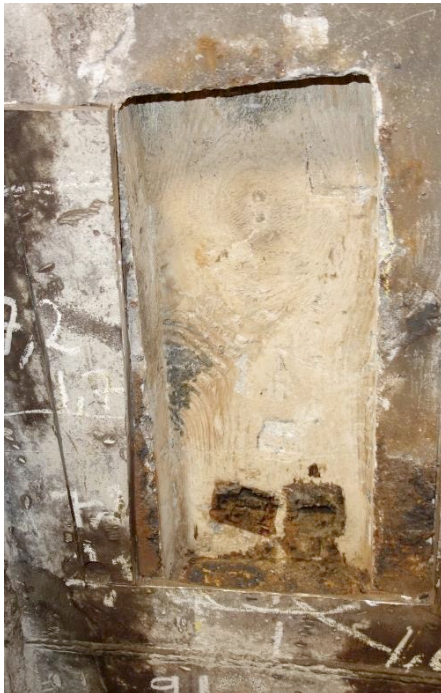
⁵ (Deterioration and Evaluation of Steel Liners and Vessels: Operating Experience)

⁶ (Sandberg, Sederholm, Taxén, Trägårdh, & Tidblad, 2019)



Figur 2: Skiss över placering av träreglar invid tätplåt.

Den större träregeln som legat emot tätplåten hade måtten 140x350x45 mm, och förefaller ha legat med fiberriktningen parallellt med tätplåten, Figur 3.



Figur 3: Avtryck i betong från träregeln, vilket visar orienteringen på träfibrerna.

Utifrån tjockleken på tätplåten och tiden till perforering uppskattades den högsta genomsnittliga korrosionshastigheten till $<200 \mu\text{m}/\text{år}$. Samtliga stålytor som varit i kontakt med träbiten var emellertid angripna av korrosion i olika omfattning. Orsaken till korrosionen bedöms vara att en APC bildats, och det nämns vidare att den initiala korrosionen sannolikt varit betydligt högre än $200 \mu\text{m}/\text{år}$ då korrosionsprodukter antas ha bidragit till en successiv höjning av resistansen på stålytan.

Direkt när träbiten togs ut noterades det att den var "fuktig" vid beröring. Träprovet uppmättes sedan ha en fukthalt på 27%, vilket skulle motsvara en fuktighet i atmosfären på ca 100%. Tidigare undersökningar har indikerat att den relativa fuktigheten vid tätplåten är 80–85%, vilket skulle motsvara en fukthalt i träbiten på ca 20%. Träbiten analyserades även med avseende på pH, vilket visade på att träbiten var sur, ca 4,5, vilket ansågs vara normalt för trä. Även resistiviteten på trä och betong uppmättes, och det noterades att ledningsförmågan i träbiten var mer än 100 gånger så hög som den i betong. Även kloridhalten i betongen analyserades, och visades ligga kring 0,03 vikt-%. Påverkan på korrosion föreligger kring 0,4 vikt-%, vilket tyder på att kloridinträngning inte är anledningen till korrosionen.

1.3 SYFTE

Syftet med denna studie är att närmare undersöka initiering av en träinducerad APC. Genom att studera detta söks att kunna bekräfta de teorier om APC, och de faktorer som påverkar dess initiering och etablering, som tidigare förekommit i diskussionen. Detta ses som ett steg i ett större projektsammanhang där det långsiktiga målet är att utreda var det finns risk för att träinducerade korrosionsangrepp ska ha uppkommit, samt hur de kommer förändras över tid.

2 Metod

2.1 PH-MÄTNING

För att undersöka alkalisering av trä exponerades träbitar i en NaOH-lösning på ca pH 13. De träbitar som exponerades var gran (ca 100*100*300 mm) och tall (ca 50*95*300 mm). Exponering utfördes så att träbitarna hela tiden var helt nedsänkta.

Efter en och två veckors exponering tog provbitarna upp och ett tvärsnitt (ca 1 cm) togs ut från mitten av provkroppen. Från mitten av detta tvärsnitt togs en remsa (ca 1 cm bred) ut. Från denna remsa tog träflisor ut i centimeterstora intervall. Initialt utfördes en mätning i radiell riktning (mot fibrerna) varefter försöket för gran repeterades i fibrernas riktning.

Dessa träflisor torkades i ugn i ca 24 h, varefter 1,5g träflisor blandades med 5 ml avjonat vatten i ett provrör som sedan förslöts.

Efter ytterligare 24 timmar dekanterades proven varefter pH-uppmättes med en elektronisk pH-mätare (Knick SE 555x/NMSN).

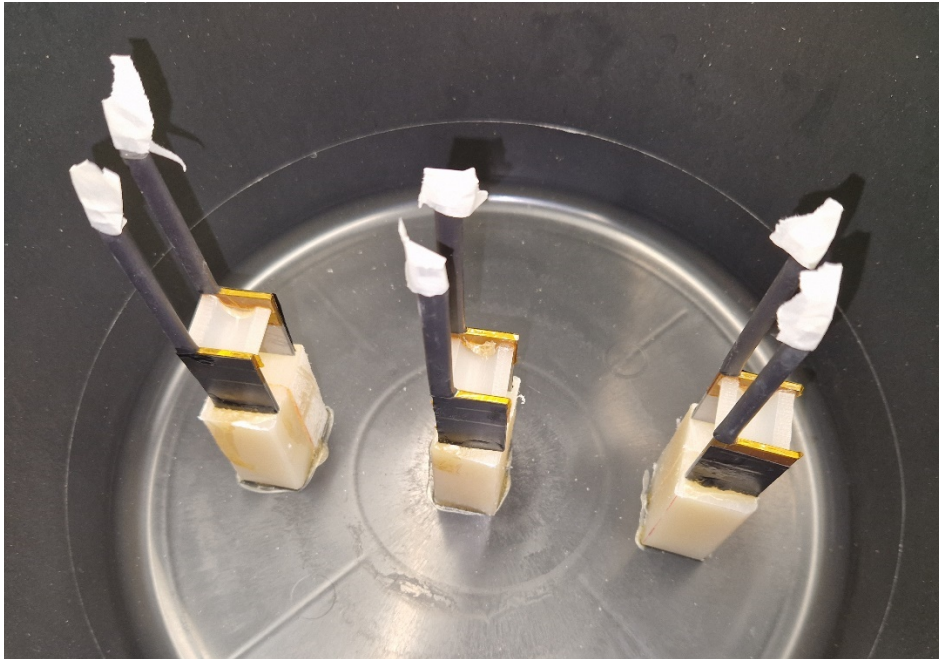
2.2 TORKNING AV TRÄ

Vid gravimetrisk fuktbestämning i trä torkades provbitar i ugn i ca 103 °C i ca 24 h.⁷ Frånsteg från standarden gjordes då mindre provkroppar än föreskrivet användes.

2.3 RESISTIVITETSMÄTNING

För att undersöka hur resistiviteten i betongen förändras under det initiala härdningsförloppet gjöts tre resistansprober in i betong enligt samma förfarande som provkropparna. Resistansproberna bestod av två 2x2 cm stora stålbleck monterade 2 cm ifrån varandra. Samtliga andra ytor bortsett från mätytorna var maskerade. I Figur 4 visas tre resistansprober placerade i gjuthink innan gjutning. Från respektive prob gick två sladdar upp vilka kunde koppas till en Megger för att mäta resistiviteten.

⁷ (SS-EN 13183-1: Trävaror – Fuktmätning – Del 1: Bestämning av fuktkvoten hos ett stycke sågat virke (Torrviktsmetoden – Ugnstorkning), 2003)



Figur 4: Resistansprober inför gjutning.

Resistiviteten uppmättes med en Fluke 1625-2 Advanced Earth/Ground Tester GEO, inställd på två-polig resistansmätning.

Utifrån de erhållna resistansvärdena kunde resistiviteten beräknas genom Ekvation 1, där;

A = area (m²)

L = längd (m)

R = resistans (Ω)

ρ = resistivitet (Ωm)

$$\rho = R \frac{A}{L}$$

Ekvation 1

2.4 EXPONERING AV ER-PROBER

2.4.1 Provmatris

De prov som valts att studeras inkluderar olika parametrar som möjligen skulle kunna påverka korrosionsinitieringen, så som storlek på träbit, fukthalt, och katodyta. Även ett test där lägre kraft vid fastspänning utfördes. Av dessa utfördes två dubbelprov (72/77 och 74/79) för att undersöka repeterbarheten. Några ytterligare försök utfördes för att påvisa funktionen av ER-proben (elektrisk resistans-proben) i några enkla miljöer. En försöksmatris visas nedan i Tabell 1.

Tabell 1: Provmatris med beskrivning av variabler

Logger ID	Träart	Tjocklek (mm)	Fukt	Katodyta	Övrigt
69	Gran	40	Vattenmättad	200x	
70	Tall	10	Vattenmättad	100x	
71	Gran	10	Vattenmättad	200x	
72	Gran	10	75%	100x	
73	Gran	10	Vattenmättad	100x	Löst fastspänd
74	Gran	10	Vattenmättad	-	
75	-	-	-	-	Prob ingjuten i betong
76	Gran	20	Vattenmättad	100x	
77	Gran	10	75%	100x	
78	Gran	10	Torr	100x	
79	Gran	10	Vattenmättad	-	
81	Gran	10	Vattenmättad	100x	
82	Gran	10	Torr	-	
83	-	-	-	-	Prob exponerad i 3 vikts-% NaCl _(aq)
84	-	-	-	100x	Prob ingjuten i betong

2.4.2 ER-prober

ER-proberna som användes var av modellen ERv2 probe circular (500µm, 1cm² kolstål) och levererades av Metricorr, se Figur 5. Dessa anslöts till en datalogger av modellen ICL, även den från Metricorr. Proberna fungerar genom att resistansen mäts i den tunna metallfilmen. När korrosion uppstår kommer tvärsnittsarean för filmen att minska, vilket således leder till ökad resistans. Utifrån detta erhålls korrosionshastigheten. Via loggerenheten kan även ström till och från ett sekundärt objekt mätas.



Figur 5: ER-prob av typen ERv2

2.4.3 Träbitar

Utifrån informationsinhämtning beträffande det faktiska skadefallet på tätplåten på en svensk kärnkraftsreaktor har följande utformning av träbitarna valts.

De träarter som valdes ut var gran och tall, då dessa är vanliga och billiga konstruktionsmaterial, och som bedömts som troliga i det praktiska fallet. Virke valdes för att ej vara av kärnträ, vilket under initiala försök visats vara mycket svårt att vattenmätta.

Träbitar sågades ut medelst bandsåg till ca 40*40 mm stora träblock. Träblocken tillverkades i olika tjocklekar om 10, 20 och 40 mm. Träbitarna valdes medvetet att vara mindre än den träbit som påträffades i det praktiska fallet, då osäkerhet fanns hur den stora avvikelser mellan sensoryta och trävolym skulle påverka. Dock valdes den tjockaste träbiten för att vara i samma storleksordning som den som påträffades i det praktiska fallet. Träblocken slipades med 200-grit sandpapper varefter de lämnades för att jämvikta i antingen rumsatmosfär på labb vid ca 55 % RH (benämns som "Torr" framöver), i exsickator vid 75% RH (benämns som "75%" framöver), eller nedsänkta i kranvatten (benämns som "Blöt" framöver). Vid bygge av kärnkraftsreaktorn, på vilken korrosionsskadan på tätplåten sedermera upptäcktes, var platsen ej väderskyddad, vilket möjliggör att träbitar kan ha varit påtagligt blöta.⁸

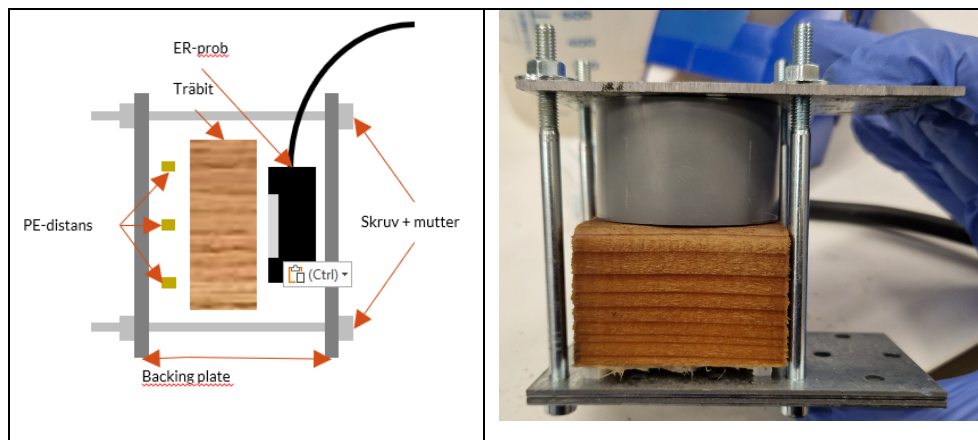
2.4.4 Betong

Vid gjutning användes WEBER REP 932 Anläggningsbetong, som blandades till ca VCT 0,4. Betongblandning och vatten blandades i en extern hink vilken placerades på skakbord i 5 minuter.

2.4.5 Montering

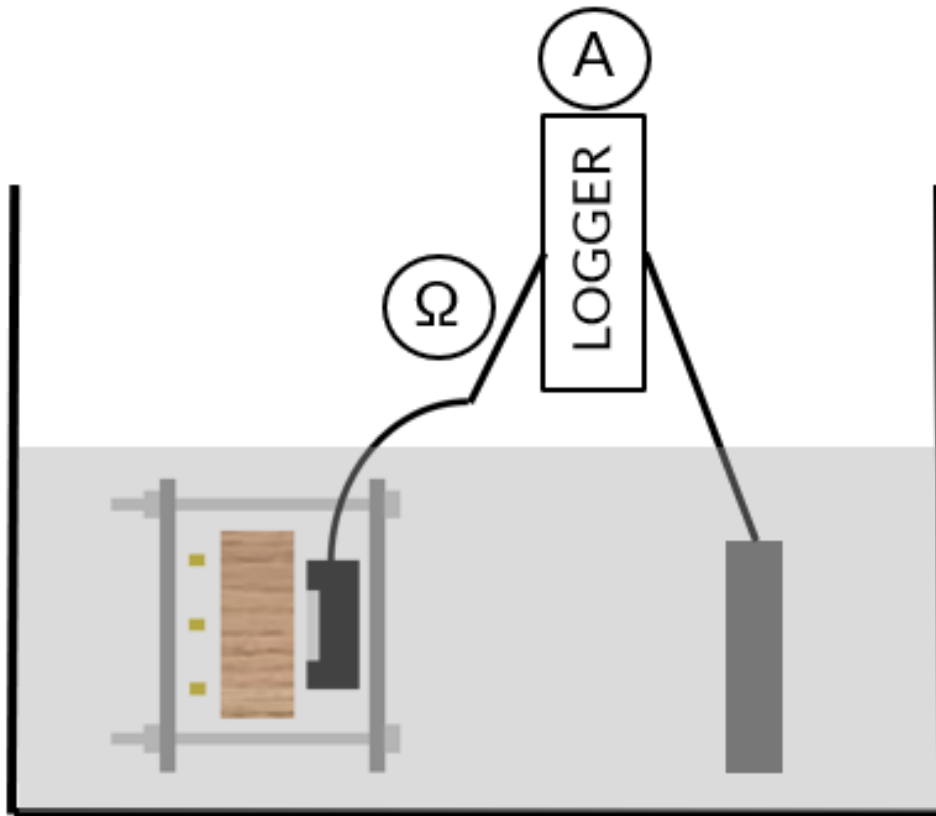
Provkropparna monterades genom att träbitarna placerades mot sensorytan, orienterade så att stålytan löpte parallellt med träfibrerna, vilket var en sannolik orientering i det praktiska fallet, baserat på material från skadefallet. Därefter placerades smala (ca 5 mm) PE-distanser mellan träbitarna och en stödplatta. En ytterligare stödplatta placerades på andra sidan sensorn, varefter dessa spändes fast med fyra skruvförband. En förenklad skiss, samt bild, visas i Figur 6.

⁸ (Sandberg, Sederholm, Taxén, Trägårdh, & Tidblad, 2019)



Figur 6: Förenklad skiss, samt bild över provmontering

Provkropparna placerades i botten av provbehållaren. Ca 30 cm därifrån placerades de tilltänkta katodytorna. Dessa var plattstänger av varmvalsar kolstål, utan synliga skador på glödskalet. Anod/katod-förhållandet var ca 1/100, förutom i två fall där det var 1/200. Proben och det varmvalsade stålet kopplades in i respektive port på loggern, se Figur 7. Loggning av resistansen i ER-probens stålfilm samt strömmen som gick mellan det varmvalsade stålet och ER-proben utfördes var 20:e minut.



Figur 7: Förenklad skiss över provuppställning.

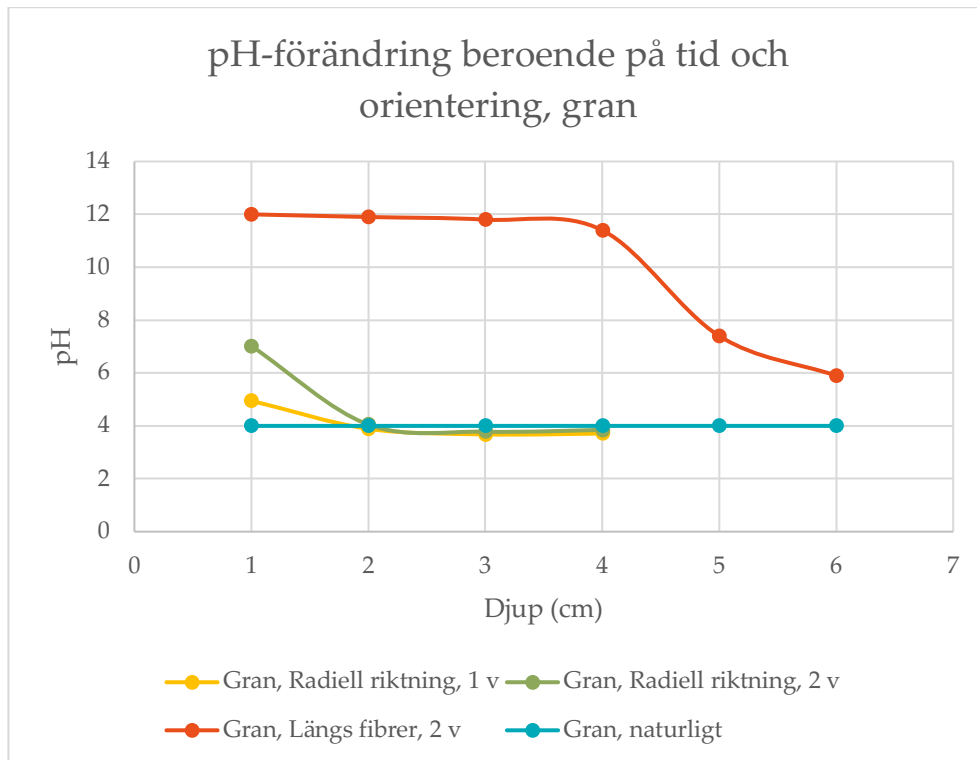
2.5 BRYTNING AV FÖRSÖK OCH INSPEKTION AV PROBER

Efter att experimenten avslutats valdes att bryta upp två gjutningar för att inspektera ER-proberna. Innan experimenten bröts upp, gjordes en omkoppling i försökskretsen för att mäta potentialskillnad för ER-proben med och utan inkopplad katodyta. Den referenselektrod som användes vid potentialmätningen var en Silvion ME100 (0,5 KCl). Därefter, medelst slägga, bröts betongen upp varpå provkroppen monterades isär medelst Dremmel med sågskivetillsats. Ytorna inspekterades med avseende på fördelning av korrosionsprodukter, och trä som legat an mot stålfilmerna samlades in varefter pH mättes enligt metod beskriven i kapitel 2.1.

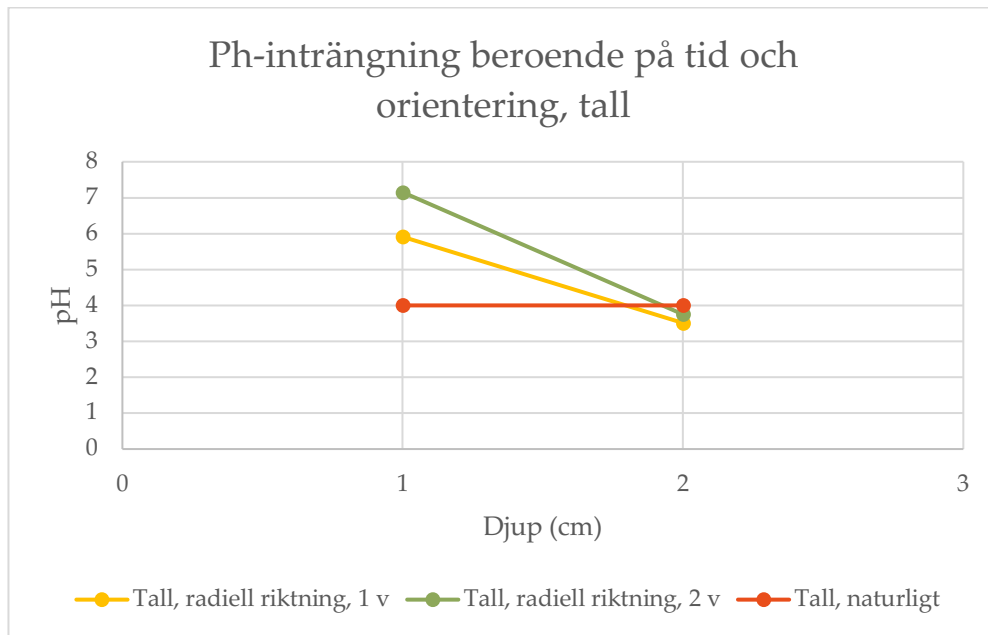
3 Resultat

3.1 PH-INTRÄNGNING

I Figur 8 och Figur 9 nedan presenteras resultat från pH-mätning vid NaOH-inträngningsförsöken. Som framgår sker pH-förändringen relativt långsamt i radiell riktning, medan den går snabbare i fibrernas riktning.



Figur 8: pH-förändring i gran beroende på tid och riktning.



Figur 9: pH-förändring i tall beroende på tid.

3.2 TORKNING AV TRÄ

Resultaten från de gravimetriska mätningarna visas i Tabell 2.

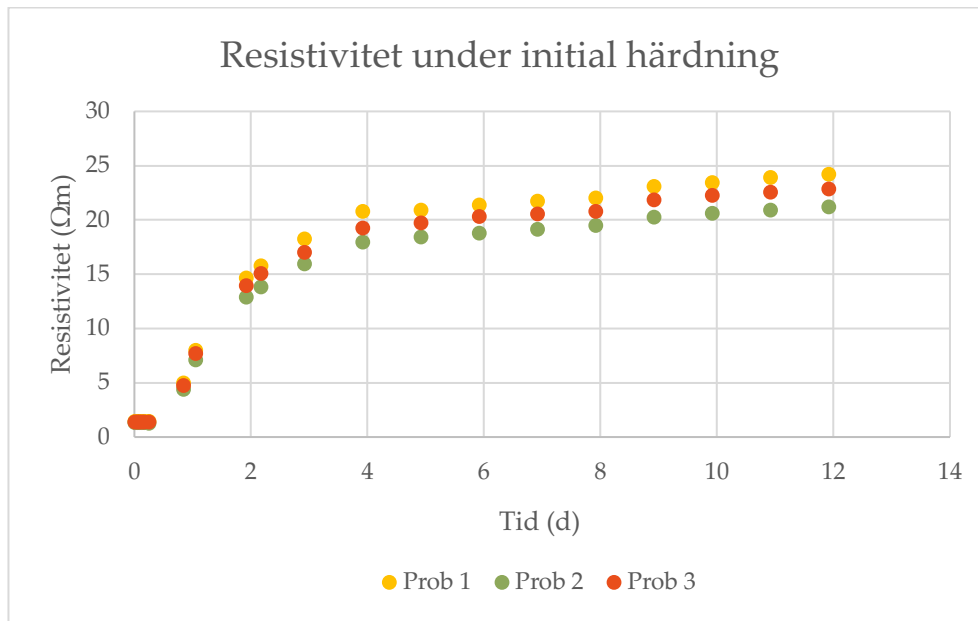
Tabell 2: Resultat från de gravimetriska fukthaltsmätningarna.

Träprov	Fukthalt (%)
Gran (Torr)	6
Gran (75%)	12
Gran (Blöt)	65
Tall (Torr)	6
Tall (Blöt)	58

3.3 RESISTIVITETSMÄTNING

Resultaten från mätningarna på de ingjutna resistansproberna redovisas i Figur 10. Som däri framgår är resistiviteten initialt mycket låg, varefter den sakta ökar, för att slutligen stabilisera sig kring ca 20–25 Ωm . Detta får ändå anses vara en låg resistivitet, i storleksordningen som blöta, marina leror.⁹

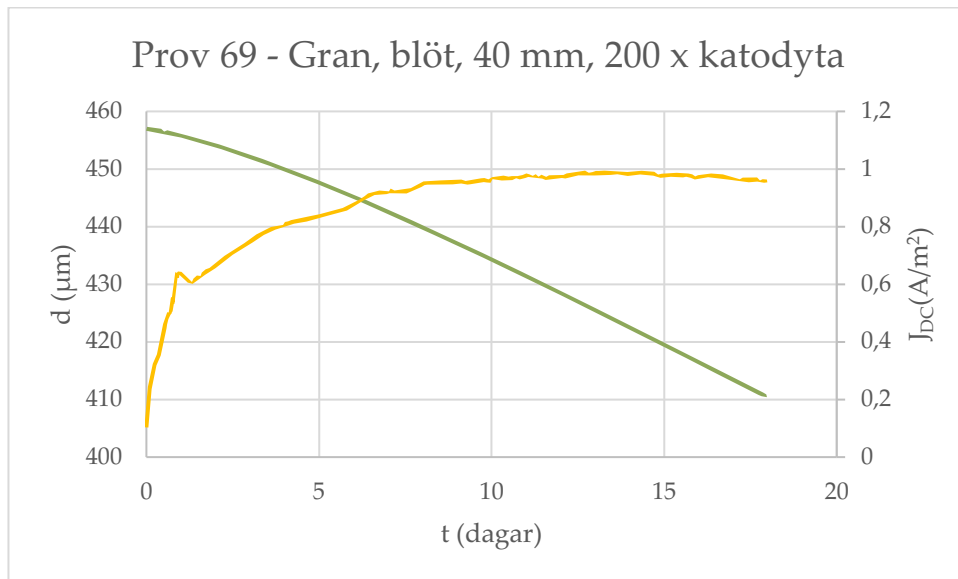
⁹ (Vinka, 2003)



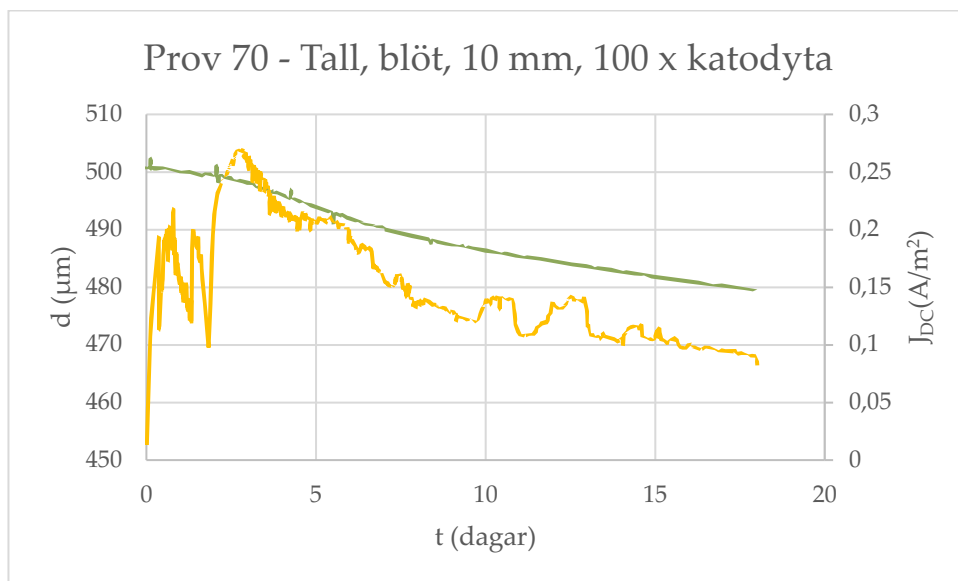
Figur 10: Inledande resistivitetsförändring under gjutning.

3.4 EXPONERING AV ER-PROBER

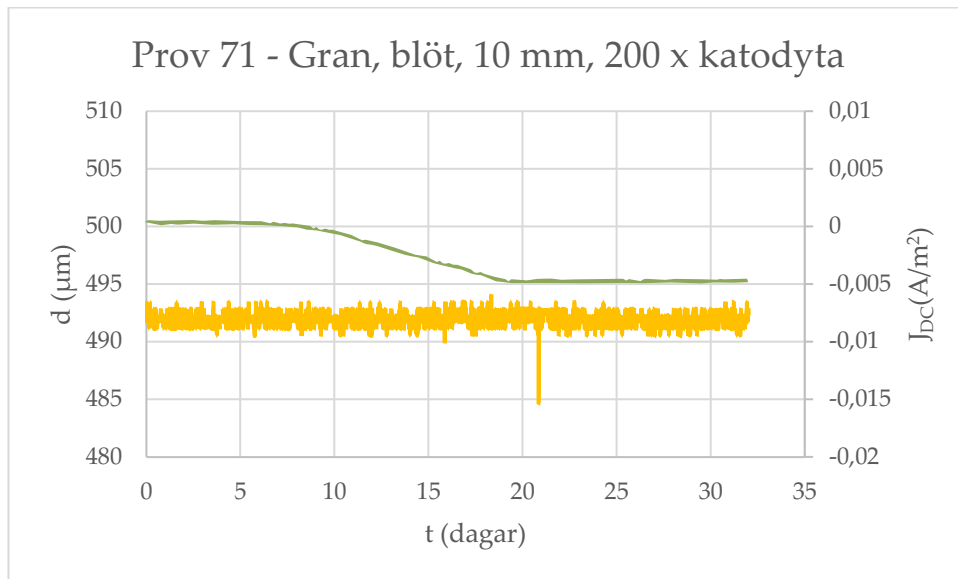
Resultaten från de utförda försöken redovisas nedan i Figur 11 till Figur 25. Notera att skalorna på axlarna varierar, detta för att tydligare åskådliggöra skeenden. De parametrar som redovisas är dimension (μm) samt strömdensitet (A/m^2). Bägge parametrarna beräknas i loggern. Dimension beräknas utifrån att mäta resistansen på den tunna stålfilmerna på proben – när den korroderar minskar tvärsnittsarean med ökande resistans som följd. Strömdensiteten mäts genom att strömmen som går till proben (från ett annat anslutet objekt, i detta fall varmvalsat stål som tilltänkt katodyta), divideras med den kända ytan på probens stålfilm. Strömdensitet är relevant att redovisa då den står i direkt proportion till den korrosion som orsakas av sammankopplingen mellan proben och den yttre katodytan.



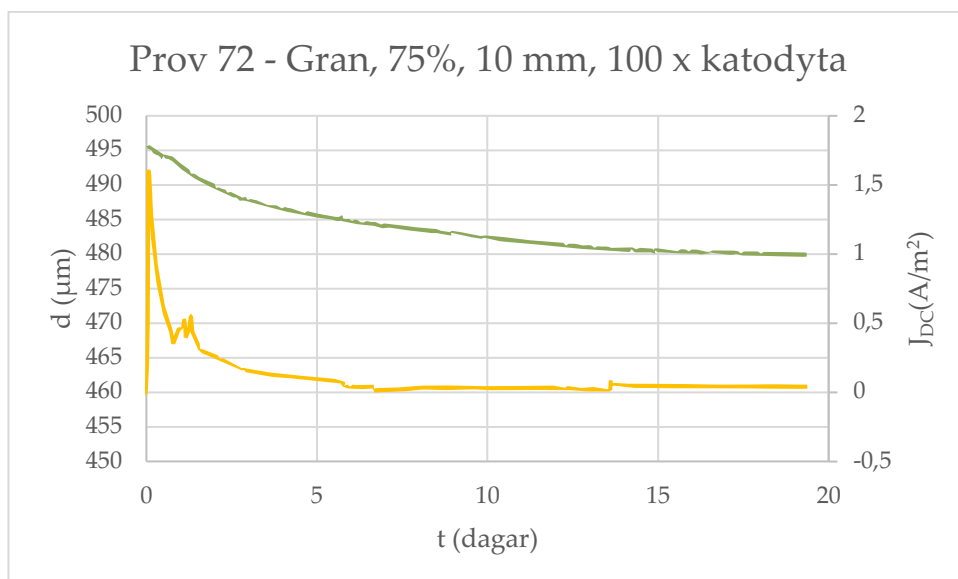
Figur 11: Prov 69 - Gran, blöt, 40 mm, 200 x katodyta, visar dimension (d , grön kurva) och strömdensitet (J , gul kurva).



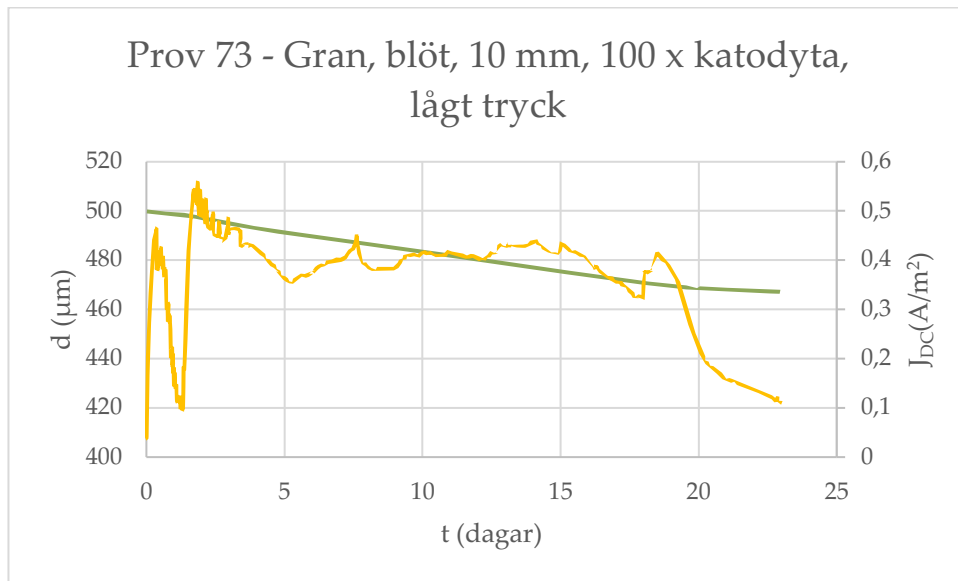
Figur 12: Prov 70 - Tall, blöt, 10 mm, 100 x katodyta, visar dimension (d , grön kurva) och strömdensitet (J , gul kurva).



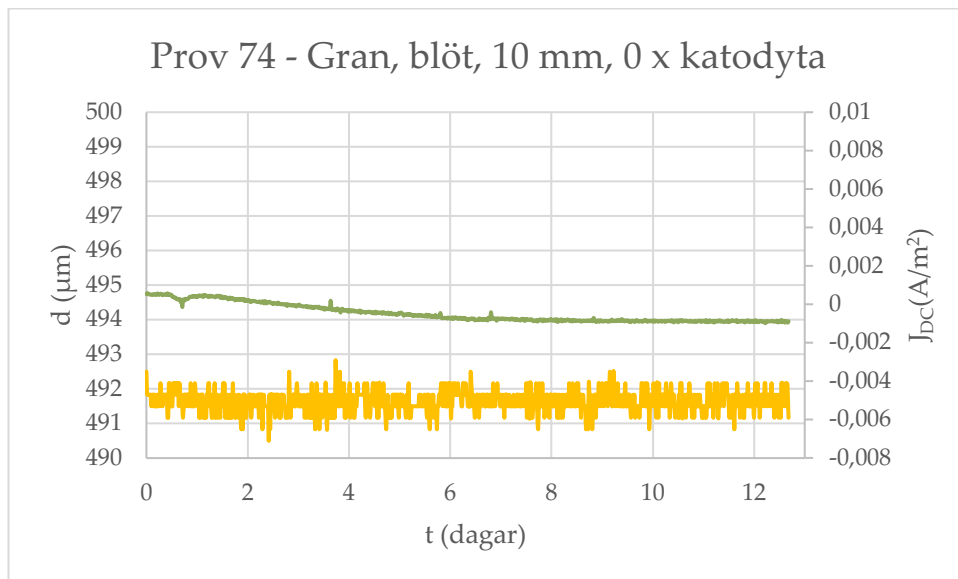
Figur 13: Prov 71 - Gran, blöt, 10 mm, 200 x katodyta, visar dimension (d , grön kurva) och strömdensitet (J , gul kurva).



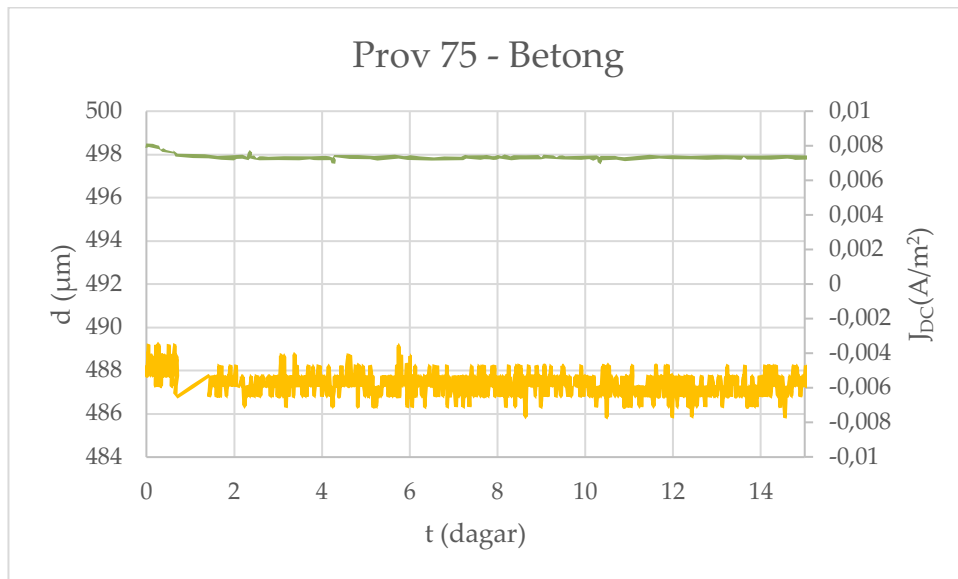
Figur 14: Prov 72 - Gran, 75%, 10 mm, 100 x katodyta, visar dimension (d , grön kurva) och strömdensitet (J , gul kurva).



Figur 15: Prov 73 - Gran, blöt, 10 mm, 100 x katodyta, lågt tryck, visar dimension (d , grön kurva) och strömdensitet (J , gul kurva).



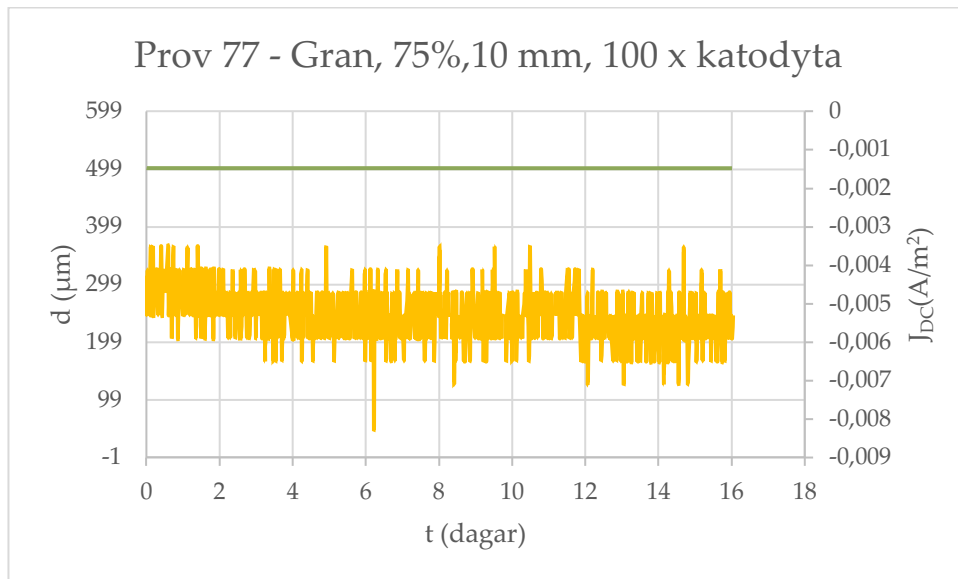
Figur 16: Prov 74 - Gran, blöt, 10 mm, 0 x katodyta, visar dimension (d , grön kurva) och strömdensitet (J , gul kurva).



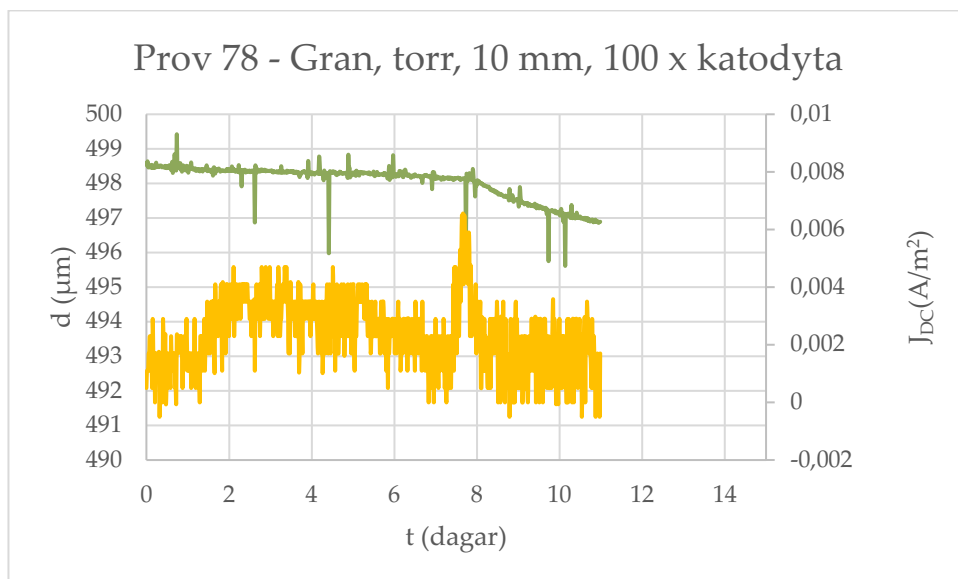
Figur 17: Prov 75 - Betong, visar dimension (d , grön kurva) och strömdensitet (J , gul kurva).



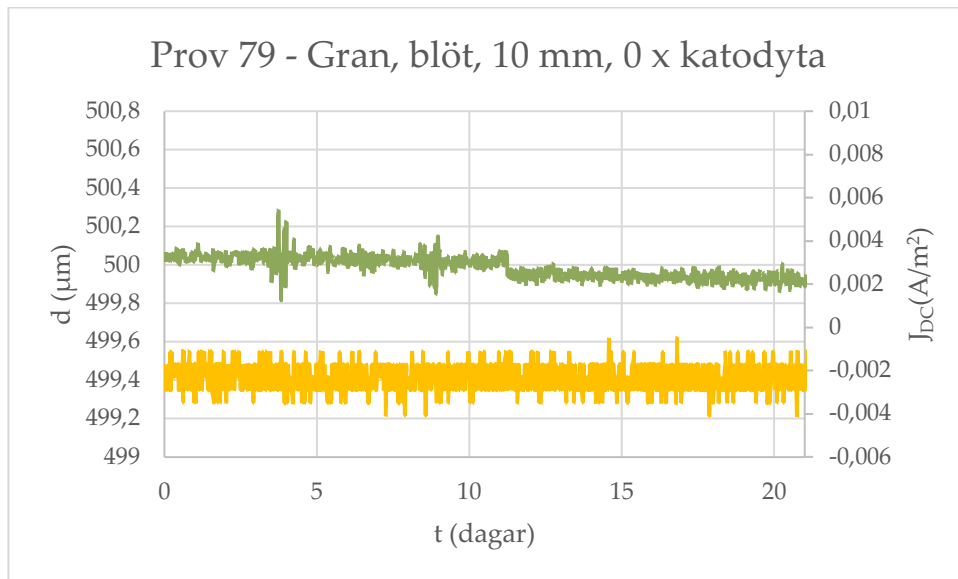
Figur 18: Prov 76 - Gran, blöt, 20 mm, 100 x katodyta, visar dimension (d , grön kurva) och strömdensitet (J , gul kurva).



Figur 19: Prov 77 - Gran, 75%, 10 mm, 100 x katodyta, visar dimension (d , grön kurva) och strömdensitet (J , gul kurva).



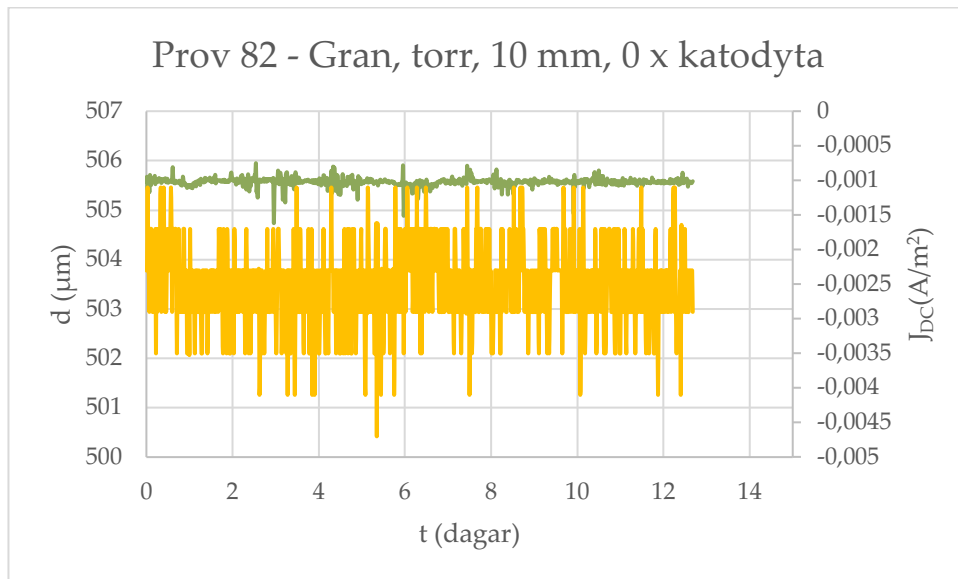
Figur 20: Prov 78 - Gran, torr, 10 mm, 0 x katodyta, visar dimension (d , grön kurva) och strömdensitet (J , gul kurva).



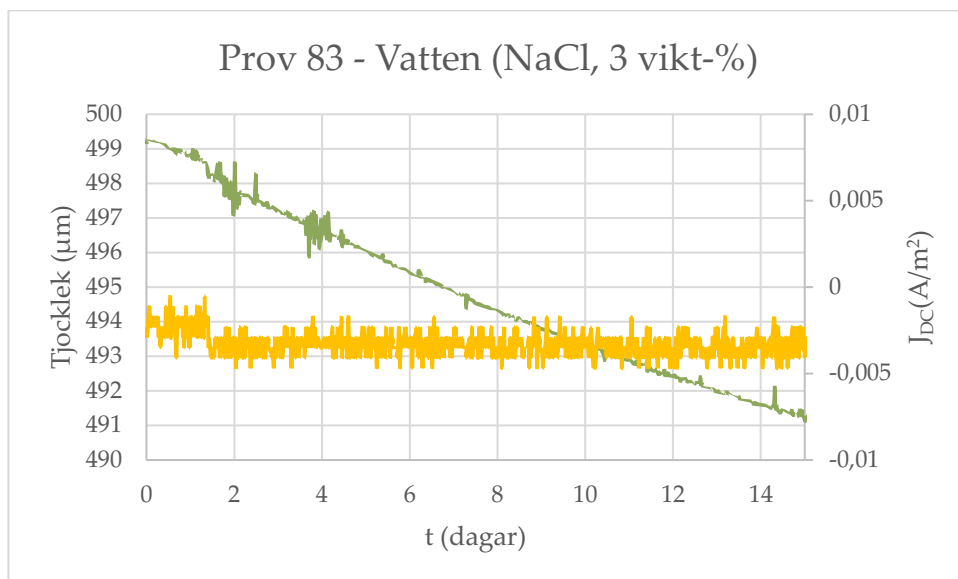
Figur 21: Prov 79 - Gran, blöt, 10 mm, 0 x katodyta, visar dimension (d , grön kurva) och strömdensitet (J , gul kurva).



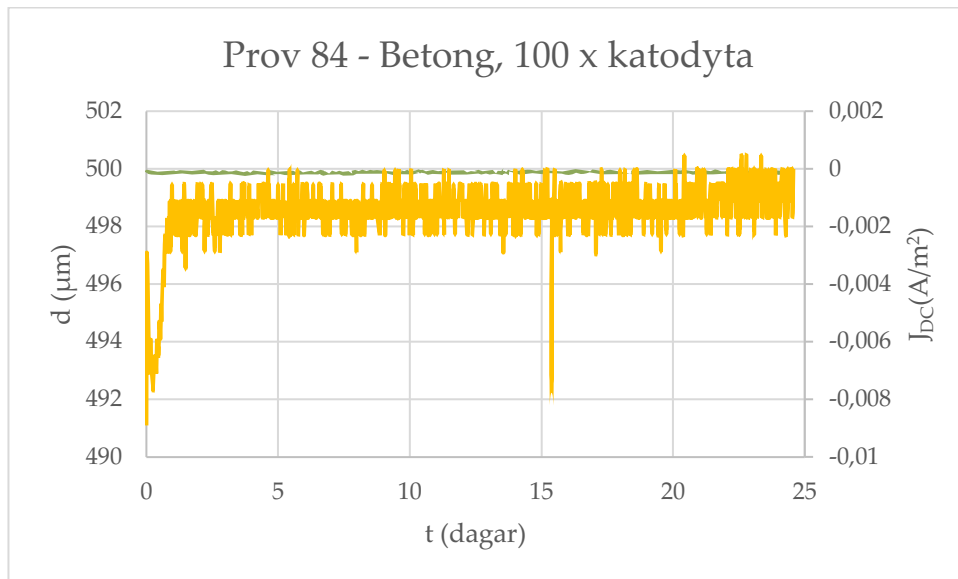
Figur 22: Prov 81 - Gran, blöt, 10 mm, 100 x katodyta, visar dimension (d , grön kurva) och strömdensitet (J , gul kurva).



Figur 23: Prov 82 - Gran, torr, 10 mm, 0 x katodyta, visar dimension (d , grön kurva) och strömdensitet (J , gul kurva).



Figur 24: Prov 83 - Vatten, 3 vikt-% NaCl, visar dimension (d , grön kurva) och strömdensitet (J , gul kurva).



Figur 25: Prov 84 - Betong, 100 x katodyta, visar dimension (d, grön kurva) och strömdensitet (J, gul kurva).

3.4.1 Kommentarer om resultat från ER-prober

Nedan i Tabell 3 sammanfattas kommentarer för respektive prov med ER-prob.

Tabell 3: Sammanfattande kommentarer för de genomförda försöken med ER-prober.

Prov	Kommentar
69	Strömdensiteten tilltar under den första veckan för att stabilisera sig på ca 1 A/m ² (motsvarande 1 mm/år). Dimensionsminskningen hos stålfilm matchar strömdensiteten, med konstant lutning när strömdensiteten planar ut.
70	Strömdensiteten ökar de första dagarna, varefter den klingar av och kurvan börjar plana ut. Dimensionsminskningen hos stålfilm matchar strömdensiteten, med avtagande dimensionsminskning i takt med avtagande strömdensitet.
71	Ingen ström från katodyta kunde uppmätas. Korrosionen kommer igång efter en dryg vecka, och avtar efter ytterligare ca en vecka.
72	Hög initial strömdensitet, varefter kraftigt avtagande för att slutligen stabilisera sig ca 0,04 A/m ² (motsvarande 40 µm/år). Dimensionsminskningen hos stålfilm matchar strömdensiteten, med hög initial korrosion, och därefter avtagande.

Prov	Kommentar
73	Initial hög strömdensitet, varefter den sjunker något, men ligger kvar på en hög nivå under ca två veckor varefter den avtar. Dimensionsminskningen hos stålfilmerna uppvisar en nästan konstant korrosion under försökstiden, med en avtagande korrosion i samband med utplaningen av strömdensiteten.
74	Okopplad – finns ingen katodström att mäta. Dimensionsförlustförändringen pågår under ca en vecka, varefter den avtar.
75	Initial uppbyggnad av passivskikt (ca 1 µm), därefter passiv.
76	Initial strömdensitet som avtar successivt för att slutligen börja stabilisera sig på ca 0,03 A/m ² (motsvarande 30 µm/år). Dimensionsminskningen hos stålfilmerna matchar strömdensiteten, med avtagande dimensionsminskning i takt med avtagande strömdensitet.
77	Ingen ström från katodyta kunde uppmätas. Låg dimensionsminskning.
78	Mycket svag ström från katodyta kunde uppmätas. Svag pik efter 8 dagar. Initialt låg dimensionsminskning, varefter dimensionsminskningen tilltar i samband med strömdensitetspiken efter 8 dagar.
79	Okopplad – finns ingen katodström att mäta. Svag dimensionsminskning.
81	Initial strömdensitet som avtar successivt, varefter den ökar för att slutligen börja stabilisera sig på ca 0,05 A/m ² (motsvarande 50 µm/år). Dimensionsförlustförändringen hos stålfilmerna matchar strömdensiteten, med avtagande dimensionsminskning i takt med avtagande strömdensitet.
82	Okopplad – finns ingen katodström att mäta. Ingen märkbar dimensionsminskning
83	Konstant korrosionshastighet (ca 180 µm/år)
84	Ingen mätbar katodström Ingen synbar effekt av uppbyggnaden av passivitet. Ingen dimensionsminskning.

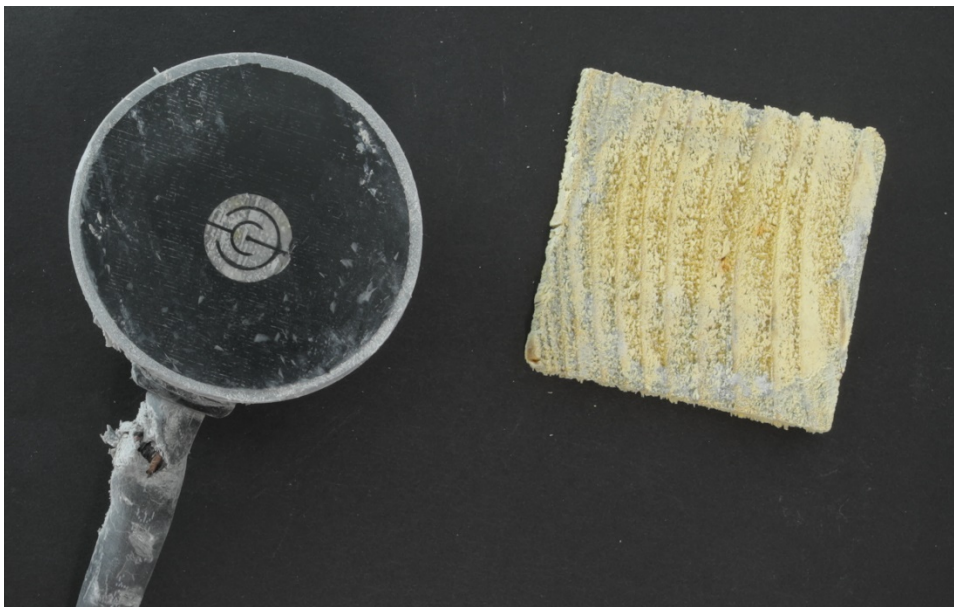
3.5 VISUELL INSPEKTION AV ER-PROBER

I samband med avslutande försök, valdes att bryta upp fem celler för att inspektera stålfilmerna. För detta valdes försök 69, 71, 74, 79 och 82. Efter att dessa brutits

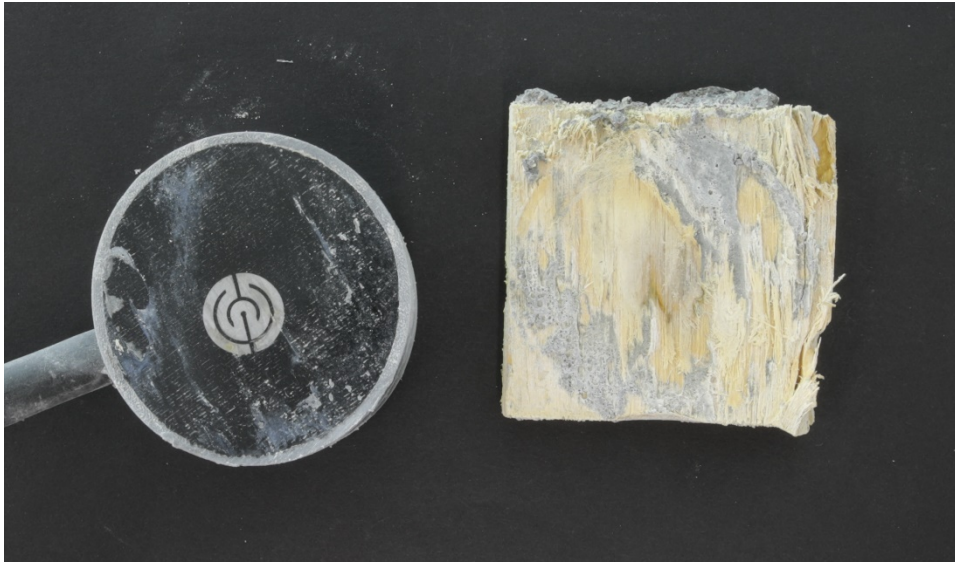
upp, dokumenterades utseendet på de sondaerna. Resultaten visas i Figur 26 till Figur 29.



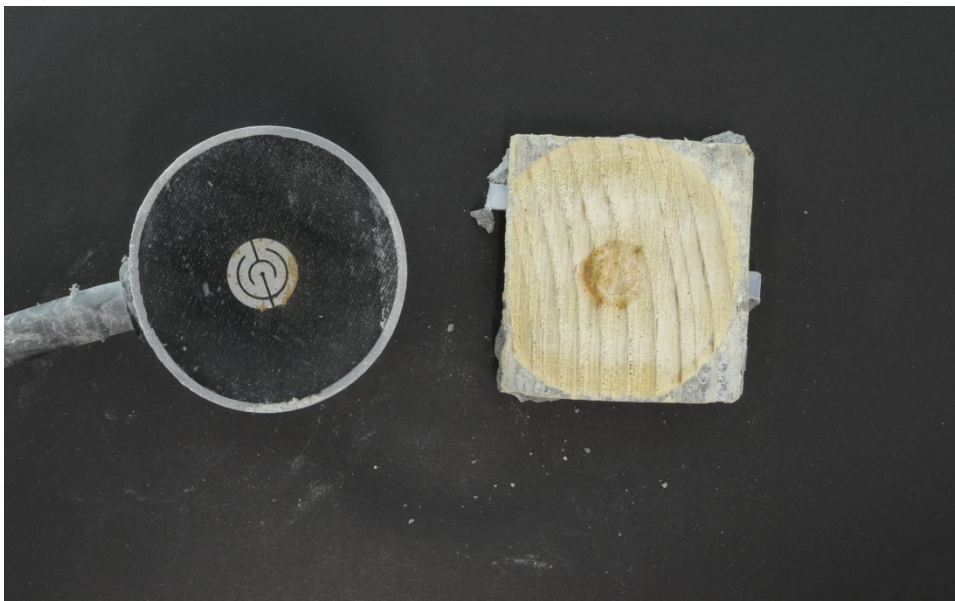
Figur 26: Visuell inspektion av ER-prob från försök 69 och försök 71.



Figur 27: Visuell inspektion av ER-prob från försök 74.



Figur 28: Visuellt inspektion av ER-prob från försök 79.



Figur 29: Visuellt inspektion av ER-prob från försök 82.

Vid den visuella inspektionen syntes det att det var påtagligt mycket korrosionsprodukter vid prob 69, noterbart var även att de var företrädesvis i utkanten av stålfilmen. Prob 71 uppvisade endast korrosionsprodukter längs ett smalt stråk, vilket ligger i anslutning till vad som kan vara inträngning av gjutvattnet.

Prob 74 uppvisar en i stort sett orörd ståyta, med vad som kan vara en inträngning av gjutvattnet.

Prob 79 uppvisar även den en i stort sett orörd ståyta, med vad som troligen är omfattande inträngning av gjutvattnet.

Prob 82 uppvisar mindre mängd korrosionsprodukter, men ingen tydlig inträngning av gjutvatten. Utifrån loggade värden syns ingen dimensionsminskning eller galvanisk ström. Det finns en möjlighet att korrosionen har skett efter att försöket brutits.

Vid de närmare undersökningarna av prob 69 och 71 kunde det fastslås att pH-värdena var 4,3 och 11,3, respektive.

Potentialer för ER-prober 69, 70, 71 samt 73 med samt utan katod var enligt Tabell 4. Även skillnaden i potential mellan dessa, avpolariseringen som uppstår då kontakten mot katod bryts, redovisas.

Tabell 4: Potentialer före/efter bortkoppling av extern katod, samt skillnad mellan dessa, mätt på ER-prob.

Försök	Potential före bortkoppling av katod (mV)	Potential efter bortkoppling av katod (mV)	Potentialskillnad (mV)
69	-453	-700	247
70	-358	-479	121
71	-828	-798	-29
73	-360	-451	91

4 Diskussion

Utifrån de erhållna resultaten kan det, utifrån riktningen på strömmen i försöken, konstateras att en anod uppstår när en träyta pressas mot en stålfilm och denna kopplas samman med ingjutet varmvalsat stål. Detta i sig bevisar denna viktiga aspekt i ett resonemang som återkommande har förts^{10,11,12,13,14}, men som hittills, enligt författarnas erfarenheter, främst haft teoretisk grund.

Initialt kan sägas att försöken som utfördes utan träbit i betong och saltvatten gav de resultat som förväntades. ER-prober i betong korroderar inte utan passiveras mer eller mindre omedelbart (försök 75 och 84). ER-proben i saltvatten (försök 83) korroderar med ca 180 µm/år, vilket är i rätt storleksordning, men något högre än vad som anges i många källor baserade på långtidsexponeringar, där det snarare ligger mellan ungefär 50–150 µm/år.¹⁵ Detta beror sannolikt på att korrosionen är högre i början innan korrosionsprodukter har hunnits byggas upp.

Emedan det är svårt att dra kvantitativa slutsatser utifrån resultatet, kan resultaten ses ur en kvalitativ vinkel.

Det är uppenbart att trä kan motverka passiveringen av stål, vilket annars sker när alkaliskt gjutvatten kommer i kontakt med stålytan. Trä, eller något annat organiskt material, fungerar som ett hinder som saktar ner alkaliseringen, och därmed fördröjer passiveringen. Om ingen extern drivkraft, så som en extern katod vid en APC, finns, kommer egenkorrosionen av trä fortgå till dess att alkalisering sker och korrosionen saktar ner och avstannar. Hur kraftig denna egenkorrosion är beror till stor del på fukthalt i trä, där fuktigt trä ger högre korrosionshastighet. Hur länge egenkorrosionen kommer kunna fortgå bestäms till del av hur snabbt alkali kan tränga in till stålytan. Denna inträngning begränsas troligen starkt av storleken på träbit. Det är även värt att beakta att alkali inte diffunderar inert in i träet, utan löser upp ligninet¹⁶, och till viss del även cellulosan¹⁷, vilket i sin tur torde öka diffusionshastigheten. Detta kan troligen förklara utseendet på försök 71 där korrosionen endast uppmäts till någon µm, vilket skulle kunna motsvara en omedelbar alkalisering om gjutvattnet trängt in direkt. Mer omfattande korrosion kan ses för prob 74, se Figur 30.

¹⁰ (Dunn & Pulvirenti, 2011)

¹¹ (Sandberg, Sederholm, Taxén, Trägårdh, & Tidblad, 2019)

¹² (Deterioration and Evaluation of Steel Liners and Vessels: Operating Experience)

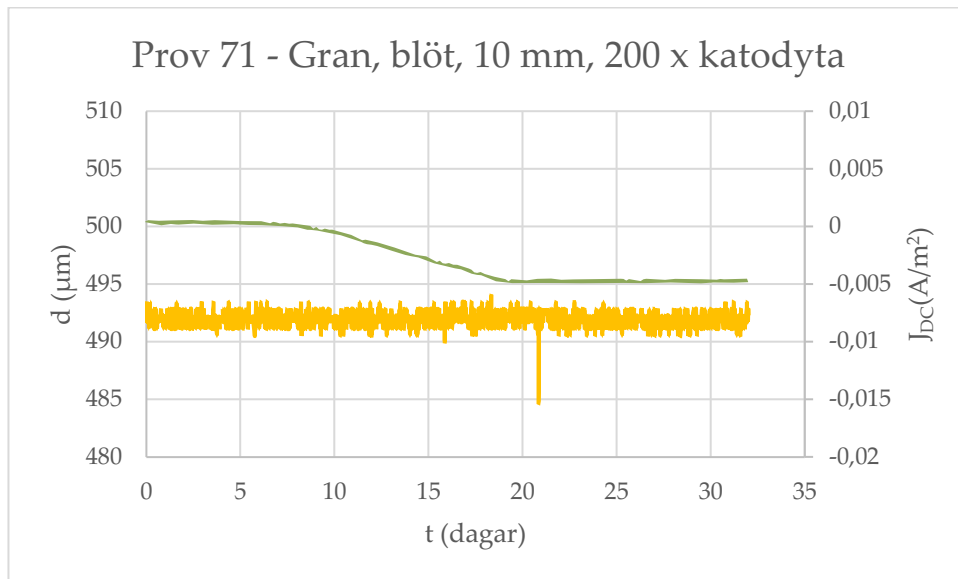
¹³ (Petti, o.a., 2011)

¹⁴ (Sagüés & Fernandez, 2013)

¹⁵ (Sandberg, Tekniskt PM 4:2015 - Korrosion på stålkonstruktioner med lång förväntad livslängd - nuläggessammanställning., 2015)

¹⁶ (Melro, o.a., 2020)

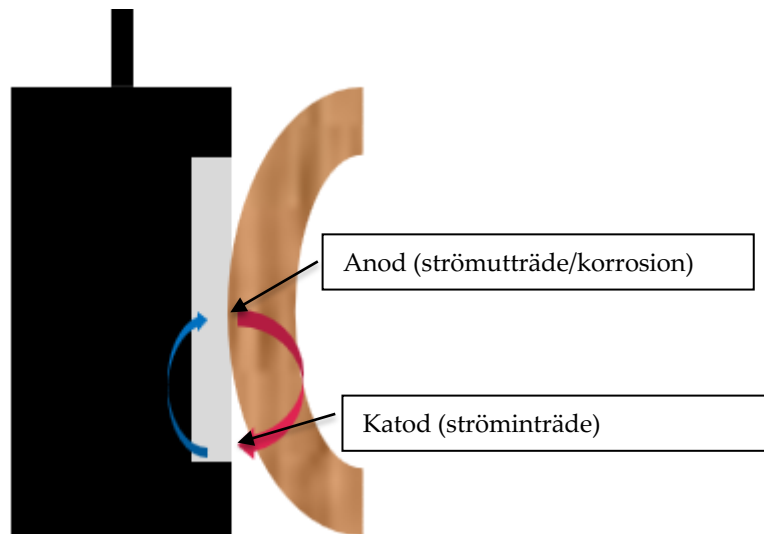
¹⁷ (Kamide, Okajima, & Kowsaka, 1992)



Figur 30: Prov 71 - Gran, blöt, 10 mm, 200 x katodyta, visar dimension (d, grön kurva) och strömdensitet (J, gul kurva). (Samma figur som Figur 13).

Korrosionen har för prob 71 initierats först efter ca en vecka, varefter den slutligen upphör. Ingen anodström finns, vilket tyder på att korrosionsprocessen är intern. En möjlig förklaring i dessa fall kan vara att en intern APC har bildats. En sådan intern APC skulle fungera på samma sätt som de med en extern katodyta, med skillnaden att både anod och katod finns på ER-proben. Anledningen till att en sådan intern APC uppstår skulle exempelvis kunna vara någon heterogenitet i träbiten som orsakar att alkali kan tränga in och passivera en del av stålfilmen, medan en annan del av filmen fortsätter vara aktiv. En möjlig orsak till detta skulle kunna vara sprickbildning i träet, ojämnheter i träytan, eller om träbiten slår sig, se Figur 31. En intern APC skulle vara mindre i omfattning, och skulle då kunna upphöra i takt med att full alkalisering uppnås, eller att syret lokalt tar slut.

Vid visuell inspektion av prob 71 syns det att gjutvatten har trängt in i smala kanaler under träbiten in till stålfilmen. Det syns även att korrosionen är koncentrerad till en liten del av stålfilmen, vilket skulle stämma överens med en intern APC. Anledningen till att det inträngande gjutvattnet ej har gjort så att stålfilmen fått kontakt med den externa katoden är troligen på grund av den höga resistansen i kanalen. APCn har sedan pågått till dess att syret konsumerats. Att gjutvatten har trängt in och alkaliserat ytan stöds av pH-mätningen. Vid uppmätning av potentialskillnad med/utan extern katod uppmättes en polarisering åt det omvända hållet jämfört med vad som vore förväntat om ER-proben hade haft kontakt med en extern katodyta. Potentialskillnaden var emellertid så liten att den möjligen kan förklaras av IR-fallet i betongen.



Figur 31: Schematisk skiss på möjlig intern APC.

I andra försök utan katodyta, har korrosionen knappt varit mätbar, vilket såldes gör det svårt att avgöra om/när den avstannat (försök 79 och 82). För försök 77 förefaller ER-proben ej fått kontakt med katodytorna, utan endast egenkorrosion i trä förekommer. Korrosionshastigheten på stål i trä bedöms bero mycket på fukthalten. Under en viss fukthalt (ca 15–18%) är allt vatten bundet till hydroxyl inuti cellväggarna. I takt med att fukthalten ökar kommer träets resistivitet att minska vilket ökar korrosiviteten.¹⁸ I fältmiljöer har ståls korrosion inne i trä uppmätts till ca 3 $\mu\text{m}/\text{år}$ ¹⁹, i labbmiljö i 100% luftfuktighet till ca 1 $\mu\text{m}/\text{år}$ ²⁰. I en metastudie har det noterats att korrosion inne i trä når sitt max vid en fukthalt på ca 45% varefter den är konstant. Vid denna fukthalt har korrosionshastigheten bedömts till ca 60 $\mu\text{m}/\text{år}$.²¹

Om stålbiten under träbiten däremot etablerar kontakt med en extern katod, kommer en APC uppstå och en korrosionsström att börja flyta. Som resultat av korrosionsströmmen kommer järnjoner frisättas (till följd av anodprocessen) vilket leder till hydrolysning och försurning. Denna process (upplösning av järn $\rightarrow$ hydrolysning av järnjoner $\rightarrow$ försurning) kommer fortgå så länge stålbiten under träbiten fortfarande är aktiv, resistansen i kretsen är tillräckligt låg, samt att det finns oxidationsmedel vid katodytorna. Ju längre en APC fortgår, och ju kraftigare den är, desto mer H^+ -joner kommer hinna bildas och som följd kommer det ta längre tid för alkalien att höja pH så pass mycket att stålet passiveras.

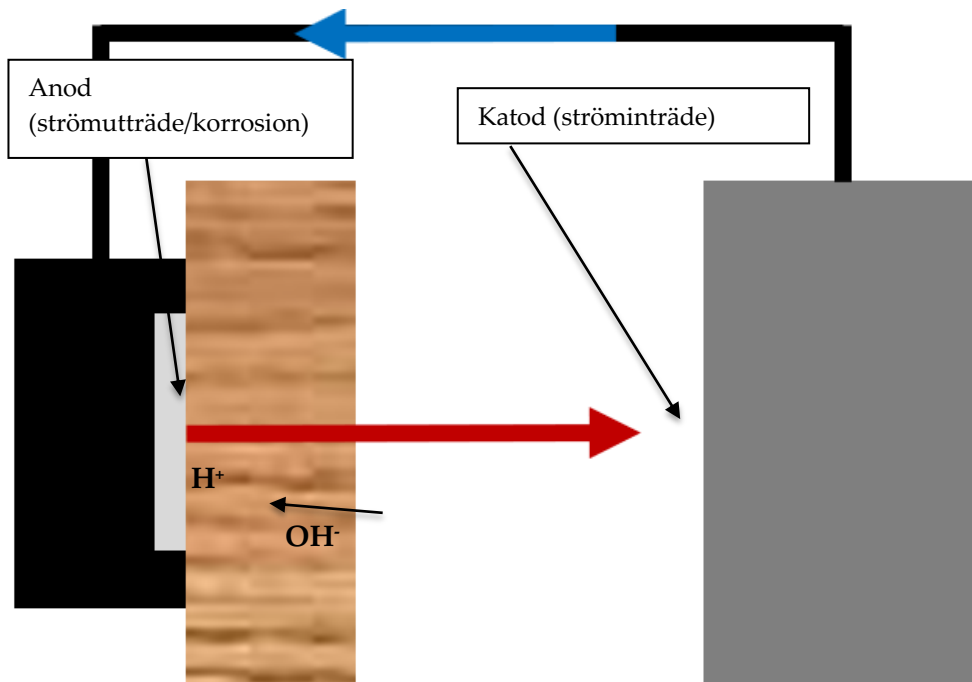
I en situation där stålbiten under träbiten etablerar elektrolytisk kontakt med en extern katodytan kommer en korrosionsström börja flyta och en APC att bildas, se Figur 32.

¹⁸ (Schofield, 2010)

¹⁹ (Zelinka, Glass, Boardman, & Derome, 2016)

²⁰ (Zelinka, Sichel, & Stone, Exposure testing of fasteners in preservative treated wood: gravimetric corrosion rates and corrosion product analyses, 2010)

²¹ (Zelinka S., 2014)



Figur 32: Schematisk skiss på strömgång i en träinducerad APC.

Storleken på denna korrosionsström bestäms, som tidigare nämnts, främst på:

- Den drivande kraften, potentialskillnaden.
(Givet kontakt med blött trä föreligger en potentialskillnad. När alkalisering sker är det denna faktor som begränsas då alkaliseringen gör att ytornas potential blir densamma.)
- Resistiviteten.
(I takt med att resistiviteten ökar i en cell, minskar korrosionsströmmen, förutsatt att allt annat är samma.)
- Anod/katod-ytförhållandet.
(Anod/katod-ytförhållandena satta för att vara samma (om inte annat är beskrivet). Denna faktor kan dock variera om en del av stålfilmen får bättre kontakt med elektrolyten än en annan)
- Tillgängligt oxidationsmedel (syre) vid katoden.
(I dessa försök kommer tillgången på oxidationsmedel vara begränsande, då de är relativt korta.)

Utifrån de resistivetsmätningar som har utförts på betong under den initiala härdningen går det att dra tydliga kopplingar mellan härdning av betong (och därmed resistivetsökning) och avtagande ström. Enligt resistivetsmätningarna börjar betongen härda märkbart efter någon dag, varefter resistiviteten börjar stabilisera sig efter ca en vecka. Denna ökning i resistivitet korrelerar väl med utseendet på dimensionsminsknings- och strömdensitetskurvorna för försök 81, 72, 76, 70, se Figur 33 som exempel. Samtliga dessa uppvisar en initialt hög strömdensitet och dimensionsminskning, vilken sedan avtar och uppvisar

tendenser på att plana ut. Försök 72 sticker ut från denna grupp då detta försök utfördes med en träbit som jämviktat i 75% RH, medan de övriga var blöta. Utifrån resultatet är det emellertid tydligt att elektrolytisk kontakt etablerats, varpå en APC bildas. Det kan resoneras att 75% har en viss ledningsförmåga, men att denna förbättras av sprickbildning i trä i vilken inträngande gjutvatten kan vandra. Intressant är även att notera de avslutande potentialmätningarna som utfördes för försök 70, vilka bekräftar att det finns en extern drivande spänning på ca 120 mV även efter drygt 4 veckor.



Figur 33: Prov 81 - Gran, blöt, 10 mm, 100 x katodyta, visar dimension (d, grön kurva) och strömdensitet (J, gul kurva). (Samma figur som i Figur 22).

Samma tendens, men med något sämre korrelation, återfinns för försök 73. Här är strömmen initialt hög, varefter den sjunker ner till en svajig plattå. I slutet av försöket börjar strömdensiteten avta kraftigt och kan eventuellt uppvisa en tendens till utplaning. Dimensionsminskningen följer strömdensiteten, med närmast konstant dimensionsminskning under plattån, varefter kurvan börjar plana ut vid avtagande strömdensitet. De avslutande potentialmätningarna som utfördes för försök 73, bekräftar att det finns en extern drivande spänning på ca 90 mV även efter drygt 4 veckor.

En närmast omvänd tendens återfinns för försök 69, där strömdensiteten ökar med ökande resistivitet, för att sedan stabilisera sig på en konstant strömdensitet. Dimensionsminskningskurvan följer strömdensitetskurvan, men konstant korrosionshastighet vid konstant strömdensitet, vilket tyder på en kraftig APC. Att en APC initierats stöds även av den visuella inspektionen, där korrosionsprodukter syntes i stor mängd utanför anoden. Detta är typiskt vid en APC (eller annan typ av galvanisk cell), och beror på att de positiva järnjonerna rör sig mot katoden.²² Att strömdensitetskurvans utseende avviker från de andra försökens skulle möjligen kunna förklaras med de att parametrarna för försöket skiljer sig. I

²² (Sederholm, Kalinowski, & Eistrat, 2008)

försök 69 var träbiten markant större, och så även katodytan. Utifrån de parametrar som kan påverka strömstorleken i denna APC, bedöms resistiviteten den enda som rimligen kan påverkas under försökstiden. Att träbiten är större gör troligen att resistansen i träet får en tydligt större inverkan på den totala resistansen i kretsen än om träbiten skulle vara av en mindre volym. Vidare skulle resistansen i träbiten initialt kunna sjunka i takt med att alkali tränger in. På grund av den större volymen på träbiten kan alkali tränga in längre utan att anodprocessen avstannar. Således är det möjligt att denna resistanssänkning vid anoden gör att totalresistansen i kretsen sjunker, resistansökningen i betongen till trots. Att den ej har alkaliserats bekräftas av pH-mätningarna, och de avslutande potentialmätningarna visar på att det finns en extern drivande spänning på ca 250 mV även efter drygt 4 veckor.

Noterbart är att flertalet av de utförda försöken har stabiliserat sig på en viss strömdensitet, vilket tyder på att den initierade APCn, åtminstone under försökets gång, har stabiliserats. Dessa tendenser återfinns i 69, 72, 76, 81, med strömdensiteter motsvarande (1 mm/år, 40 $\mu\text{m}/\text{år}$, 30 $\mu\text{m}/\text{år}$, 50 $\mu\text{m}/\text{år}$, respektive). Viktigt här är att trycka på hur ER-proben fungerar. Den förutsätter att strömmen som uppmäts gå till ER-proben fördelar sig jämnt på stålfilmens yta. Om så dock ej är fallet, utan säg att på grund av lokala ojämnheter, koncentreras i stället strömmen till 10% av stålfilmens yta, kommer strömdensiteten, och därmed korrosionen, att vara tiofaldigt större på den angripna ytan än vad som uppmäts.

Det är möjligt att anta att det initiala förloppet är av högsta vikt, då det då finns mest alkaliskt gjutvatten som kan tränga in och alkalisera ytan. Efter att betongen är fullhärdad finns fortfarande alkaliskt överskottsvatten, men i betydligt mindre mängd vilket torde göra att en alkaliseringsprocess går långsammare. Om APCn således "överlever" gjut- och härdningsförloppet, och även efter fullhärdning har en pågående APC, kan det således resoneras att det är stor risk att den finns kvar under längre tid.

Det bör även nämnas att i de praktiska fallen av träinducerad korrosion (även läder och filt) har sannolikt stålytan under objektet börjat korrodera långt innan gjutningen skedde. Således är stålytan redan fri från glödskalet och täta oxider, och, förutsatt ett lågt pH i trä/läder/filt så kan korrosionsprodukterna vara i löst form, vilket ytterligare bidrar till förhöjd ledningsförmåga. Denna situation ger således korrosionen ett "försprång" i att etablera en situation gynnsam för en APC.

4.1 INVERKAN AV UPPSTÄLLNING

I samband med att erfarenheter från stora konstruktioner ska omsättas i labbskala finnas alltid risker med att volymeffekter går förlorade. I denna uppställning föreligger det en risk att elektrodyterna interfererade med varandra, dvs närheten mellan anod-katod, eller katod-katod, påverkade den ström som gick ut. Denna effekt återfinns säkerligen i det verkliga fallet också, men på grund av volymbegränsningarna i försöksuppställningen finns det en risk att den blir mer uttalad.

Ytterligare en faktor som tillkommer på grund av försöksuppställningen är effekter av sprickor/spalter som uppstår vid härdning. I samband med att lösa objekt gjuts in finns viss risk att spalter uppstår.

Ytterligare ett labbtekniskt moment som bedömts ha haft viss momentan inverkan på korrosionen är att vatten har tillfört på betongytorna under härdning. I samband med att detta skett, har strömdensiteten ökat kraftigt, varefter den sjunkit igen. Dessa toppar kan ses i försök 70, 72, 73, 76, 78, 81. I ett av fallen, försök 78, där den använda träbiten var torr, förefaller vätningen ha initierat korrosionen. Innan vätning sker en låg korrosion, men vid en punkt ökar strömdensiteten momentant, och samtidigt ökar även korrosionshastigheten. Det är möjligt att detta kan förklaras av att vatten har runnit ned i någon typ av spricka invid sensorn, vilket har blött träet och på så sätt skapat en tillräckligt låg resistivitet för att korrosion ska kunna uppstå.

Vidare bör det framhållas att i det verkliga fallet var sannolikt anod/katodytförhållandet än mer ogynnsamt än det i detta projekt. Med tanke på den mycket låga resistivitet som återfinns i nygjuten betong, är det sannolikt att katodytan var väsentligt större. Detta skulle markant öka intensiteten på korrosionsströmmen, och därigenom korrosionen, och även förurning vid anoden.

Om resonemanget om vikten av en stor, låg resistanskropp vid anoden ska utvecklas, kommer en mycket stor katodyta göra att utgångsresistansen vid anoden blir den delresistans som får markant högst bidrag till cellresistansen. I normala förenklade fall kan elektrisk och elektrolytisk resistans försummas, då utgångsresistanserna har påtagligt störst inverkan. I fallet med en trä-APC på tätplåten kommer katodytan vara så stor, att den är nästintill försumbar den med. Ur ett förenklat perspektiv kommer således APCn vara beroende av att låg resistivitet bibehålls vid anoden för att kunna hållas igång över tid.

4.2 INVERKAN AV TRÄ

Medan projektet har avsett att tillverka och montera träbitarna så lika som möjligt, finns det inneboende egenskaper i trä som kan vara svårkontrollerbara och som kan ha påverkat resultaten.

En noterbar skillnad är den mellan prov 72 och prov 77, som var dubbelprov (gran, 75%, 10 mm, 100x katodyta), men som gav helt olika resultat. Medan prov 72 uppvisar en kraftig APC, uppvisar prov 77 varken dimensionsförlust eller katodström. Detta skulle eventuellt kunna förklaras med att det i tidigare studier setts att träet korrosiva egenskaper avtar under en fukthalt på ca 15–18% på grund av att det ej finns kontinuerliga jonvandringsvägar.²³ Således skulle de markant olika resultaten kunna förklaras med individuella skillnader i träet som leder till att det ena provet (prov 77) ej leder ström (liknande "torr" träbit), medan den andra (prov 72) gör det. En annan möjlig förklaringsmodell är att gjutvatten omedelbart trängt in och alkaliserat stållytan på prov 77, medan gjutvattnet endast trängt in i träbiten, och därmed sänkt resistiviteten däri, vilket möjliggjort en APC.

²³ (Zelinka S., 2014)

En möjlig inverkan är volymförhållandet mellan vårved (ljusa årsringar) och sommarved (mörka årsringar). Sommarveden har tre gånger så hög densitet som vårveden och har således lägre vätskepermeabilitet. Beroende på växtförhållande och -sätt kommer årsringsbredden att variera.²⁴ Volymförhållandet mellan sommar- och vårved skulle alltså teoretiskt kunna inverka på fukttransporten. Skillnaden i vätskepermeabilitet gör att även orienteringen av träbiten kan ge en effekt, då vätskeabsorptionen sker med olika hastigheter beroende på orientering till träets fibrer, där vätskepermeabiliteten i fiberriktningen är 20 gånger större än i den tangentiell riktning, och 10 gånger större än i den radiella riktningen.²⁵ Detta stämmer väl överens med resultaten från mätning av pH-förändringar i gran, där alkalisering skedde mycket snabbare i fiberriktningen än tvärs fibrerna.

Vidare är det även möjligt att en viss effekt sker på lokal nivå beroende på om ytan på träbiten har en hög andel sommarved eller vårved. Med samma resonemang kan även närvaro av kvistar lokalt förändra vätskepermeabiliteten. Även komprimering av trä kan förändra densitet och därigenom vätskepermeabilitet.²⁶

Skillnaden i densitet mellan sommarved och vårved gör även att orienteringen på träbiten har en stor inverkan. När träet absorberar fukt kommer vår- och sommarveden att svälla olika mycket. Detta gör att geometrin på en träbit, beroende på orientering och form, kommer att förändras med ändringar i fukthalt.²⁷

²⁴ (Årsringar, 2025)

²⁵ (Fukttransport och fuktupptagning, 2025)

²⁶ (Densitet träprodukter, 2025)

²⁷ (Wood Handbook - Wood as an Engineering Material. Centennial Edition, 2010),

5 Slutsatser

Resultaten och erfarenheterna visar på att följande är kritiska faktorer för att initiering ska uppstå givet en ingjuten träbit;

- Sammankoppling med extern katodyta
- Hög fuktighet i träbiten
- Stor volym på träbiten
- God anläggning/hårt tryck mot stålyta

Det förefaller som att det krävs sammankoppling med en **extern katodyta** för att korrosionen ska komma igång och bibehållas över tid. I de fall där extern katodyta saknas visar resultaten på att korrosion kan uppstå, ibland direkt och ibland efter ett tag, men avstannar efter ett tag.

Förutsättningarna vid gjuttillfället förefaller ha mycket stor inverkan på om och hur en APC utvecklas. Karaktären på träbiten (volym och fukthalt) och dess **anläggning mot stålet**, har stor inverkan på om en APC initieras eller inte. Utifrån försöken framgår det att svag eller ojämn anläggning mot stålytan möjliggör alkali att tränga in och passivera stålytan. Det initiala korrosionsförloppet förutsätter en god elektrolytisk kontakt mellan anod och katod, vilket möjliggörs av **blött trä**. Vidare förefaller **volymen** i sig på träbiten ha en effekt, möjligen på grund av att den dels utgör en större buffert mot inträngande alkali, dels för att en större träbit sänker totalresistansen i kretsen. Det senare är en effekt av att ju större area som en ström kan fördela sig på, desto lägre blir resistansen. Detta är särskilt påtagligt vid övergångar från lågresistiva material till högresistiva. Efter det initiala korrosionsförloppet kommer en drastisk ökning av resistiviteten ske under härdningsförloppet av betongen. Detta har i sin tur en stor inverkan på den ström som flyter i den initierade APCn. Om APCn ej i detta skede är tillräckligt kraftig, kommer APCn bli resistivt begränsad och korrosionshastigheten avta markant.

Om APCn fortlever med tillräckligt hög intensitet, kommer dess långsiktiga propagering sannolikt dels bero på vätejonsproduktionen vid anoden vilken bibehåller en aktiv yta, samt dels på att betongen hålls fuktig över tid för att ej torka ut träbiten.

Resultaten från denna studie kompletterar och definierar ytterligare den bild som tidigare presenterats i Energiforskrapporten där korrosionsrisker genomlystes. För att en skada på tätplåten ska uppstå inom den relativt korta tidsperiod som har noterats, krävs det att en APC uppstår, vilket tidigare har förts fram. Resultaten i denna studie styrker det tidigare antagandet att korrosionshastigheten initialt är mycket hög. Huruvida, och under vilka förutsättningar, den avtar på sikt blir en punkt att utreda i ett senare projekt.

De parametrar som presenterats som krav för att en APC ska etableras visar även på att det inte räcker med att en träbit/heterogenitet introduceras, utan det krävs att ytterligare faktorer tillkommer för att en APC ska komma igång. Detta kan återkopplas till tidigare studier där bland annat vikten av bibehållet lågt pH under

träbiten betonas, samt där träbitar påträffats invid tätplåten utan att korrosion kunnat konstateras.

Den valda metodiken var framgångsrik i skapandet av en aktiv/passiv-cell och denna cells, åtminstone kortsiktiga, stabiliserande. Att denna etablerade teori styrks av laborativa data är av vikt för framtida utredningar.

6 Förslag på vidare studier

Enligt vad som framkommit under projektets gång har träbitens karaktär en stor inverkan på eventuell formation av en APC. Metodiken har visats ge resultat som är av stor relevans för frågeställningen, och som annars varit svåra att erhålla, varför fortsatta försök med liknande utrustning förordas. Detta för att ytterligare förbättra förståelsen för vad som händer vid längre exponeringstider.

Teorin att korrosionen uppstår direkt i byggskedet har stärkts. I de praktiska fallen har träbitarna suttit ute under en längre tid innan gjutning vilket föranleder att närmare studier på förkorroderade prover bör utföras för att ytterligare komplettera bilden.

Framöver bör miljön som betongen exponeras för efter exponeringsstart undersökas närmare. Vidare bör även framtida projekt planeras så att dubblett eller tripplettprov utförs i större utsträckning.

Vidare syntes under försökens gång att de korrosionsceller som bildades stabiliserades relativt snabbt, vilket leder till frågeställning beträffande vilka faktorer som påverkar propagering, i vilken omfattning, samt i vilket skede. Som exempel på faktorer kan undersökas är uttorkning av betong/träbit, förändring av pH, storlek (och eventuell förändring därav) på katodyta, syrehalt i omgivande atmosfär och syretillgänglighet vid olika katodytor över tid.

Även katodytans totala storlek och tredimensionella utbredning har sannolikt en stor påverkan på propageringshastigheten. Detta bedöms dock vara mer lämpligt att undersöka i modelleringsstudier.

7 Referenser

- Densitet träprodukter.* (den 29 01 2025). Hämtat från Svenskt Trä:
<https://www.traguiden.se/om-tra/materialet-tra/traets-egenskaper-och-kvalitet/densitet1/densitet-traprodukter/>
- Deterioration and Evaluation of Steel Liners and Vessels: Operating Experience. (u.d.). EPRI - Technical Brief — Nondestructive Evaluation, P41.04.01.
- Dunn, D. S., & Pulvirenti, A. L. (2011). *Containment Liner Corrosion Operating Experience Summary - Technical Letter Report - Revision 1*. U.S. Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory Research.
- Fukttransport och fuktupptagning.* (den 29 01 2025). Hämtat från Svenskt Trä:
<https://www.traguiden.se/om-tra/byggfysik/fukt/fukt/fukttransport-och-fuktupptagning/>
- Kamide, K., Okajima, K., & Kowsaka, K. (1992). Dissolution of Natural Cellulose into Aqueous Alkali Solution: Role of Super-Molecular Structure of Cellulose. *Polymer Journal*, 71-86.
- Melro, E., Filipe, A., Sousa, D., Valente, A. J., Romano, A., Antunes, F. E., & Medronho, B. (2020). Dissolution of kraft lignin in alkaline solutions. *International Journal of Biological Macromolecules*, 688-695.
- Paek, Y., Kim, S., Yoon, E., & Cha, H. (2018). Introduction of Containment Liner Plate (CLP) Corrosion. Jeju: Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting.
- Petti, J. P., Naus, D., Sagüés, A., Weyers, R. E., Erler, B. A., & Berke, N. S. (2011). Nuclear Containment Steel Liner Corrosion Workshop: Final Summary and Recommendation Report. Sandia National Laboratories.
- Sagüés, A., & Fernandez, J. (2013). NACE 2013 paper 2668 - Modeling Nuclear Containment Liner Steel Liner Corrosion. NACE.
- Sandberg, B. (2015). *Tekniskt PM 4:2015 - Korrosion på stålkonstruktioner med lång förväntad livslängd - nuläggessammanställning*. Pålkommisionen.
- Sandberg, B., Sederholm, B., Taxén, C., Trägårdh, J., & Tidblad, J. (2019). *Rapport 2019:581: Genomgång av potentiella korrosionsrisker för ingjuten tätplåt i reaktorinslutningar*. Stockholm: Energiforsk.
- Schofield, M. (2010). 2.28 - Corrosion by Wood. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering - Shreir's Corrosion*, 1323-1329.
- Sederholm, B., Kalinowski, M., & Eistrat, K. (2008). *Studie av vattenlinjekorrosion på tätplåt ingjuten i betong vid kondensationsbassäng. Elforskrapport 09:20*. Elforsk.
- (2003). *SS-EN 13183-1: Trävaror – Fuktmätning – Del 1: Bestämning av fuktkvoten hos ett stycke sågat virke (Torrviktsmetoden – Ugnstorkning)*. Stockholm: SIS.
- Träets fuktrörelser.* (den 28 01 2025). Hämtat från Svenskt Trä:
<https://www.svenskttra.se/trafakta/allmant-om-tra/tra-och-fukt/traets-fuktrorelser/>
- Vinka, T.-G. (2003). *Rapport Nr 34 2003: Korrosion på metaller i svenska jordar*. Svenskt Vatten AB.
- Wood Handbook - Wood as an Engineering Material. Centennial Edition.* (2010). Madison Wisconsin: United States Department of Agriculture Forest Service.
- Zelinka, S. (2014). *Webinar series - Timberbridges*.
- Zelinka, S. L., Glass, S. V., Boardman, C. R., & Derome, D. (2016). Comparison of the corrosion of fasteners embedded in wood measured in outdoor exposure with the predictions from a combined hygrothermal-corrosion model. *Corrosion Science*, 178-185.

- Zelinka, S., Sichel, R., & Stone, D. (2010). Exposure testing of fasteners in preservative treated wood: gravimetric corrosion rates and corrosion product analyses. *Corrosion Science*, 3943-3948.
- Årsringar. (den 28 01 2025). Hämtat från Svenskt Trä: <https://www.traguiden.se/om-tra/material-et-tra/traets-uppbyggnad/traets-uppbyggnad/arsringar/>

TRÄINDUCERAD KORROSION PÅ INGJUTEN TÄTPLÅT

Projektet har utfört labbstudier med syfte att närmare undersöka de fenomen som sker vid initiering av en aktiv/passiv-cell inducerad av en ingjuten träbit på tätplåt.

Resultaten bekräftar uppkomsten, och etableringen, av aktiv/passiv-celler under dessa förhållanden, och tyder på att förhållandet mellan anod- och katodytor, fukthalt och storlek på träbit är av vikt. Tillsammans verkar de synergistiskt för att bibehålla en aktiv miljö under träbiten samt en tillräckligt låg utgångsresistans vid anoden.

Resultaten visar på vikten av initieringsförloppet vid denna typ av skador, och av att studera de olika komponenterna i en aktivcell samt hur dessa förändras över tid.

Ett nytt steg i energiforskningen

Forskningsföretaget Energiforsk initierar, samordnar och bedriver forskning och analys inom energiområdet samt sprider kunskap för att bidra till ett robust och hållbart energisystem. Energiforsk är ett politiskt neutralt och icke vinstutdelande aktiebolag som ägs av branschorganisationerna Energiföretagen Sverige och Energigas Sverige, det statliga affärsverket Svenska kraftnät, samt gas- och energiföretaget Nordion Energi. Läs mer på energiforsk.se.



Energiforsk