

Bruk av offeranoder ved betongrehabilitering

Litteratur og erfaringsstudie
FoU-programmet Bedre bruvedlikehold 2017-2021

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 721



RISE KIMAB

Foto – RISE KIMAB
Illustrasjon – Gaute Larsen, SWV

Tittel

Bruk av offeranoder ved
betongrehabilitering

Undertittel

Litteratur og erfaringsstudie

Forfatter

Johan Ahlström og Bror Sederholm

Avdeling

Konstruksjoner

Seksjon

Konstruksjonsteknikk

Prosjektnummer

L10114

Rapportnummer

Nr. 721

Prosjektleder

Bård M. Pedersen

Godkjent av

Bård M. Pedersen

Emneord

Offeranoder, katodisk beskyttelse, betongrehabilitering

Sammendrag

Statens Vegvesen, Vegdirektoratet tildelte i 2020 RISE KIMAB i oppdrag å utføre et litteraturstudie i bruk av katodisk beskyttelse med offeranoder ved reparasjon av betongkonstruksjoner. Bakgrunnen for oppdraget er at ved konvensjonelle reparasjoner av betongskader forårsaket av kloridinitiert armeringskorrosjon, har det blitt avdekket en kraftig økning av korrosjon på stålarmeringen som ligger i tilgrensede ikke-reparerte områder. RISE KIMAB har gjennomført en litteraturstudie fra 1996 frem til i dag, samt at de har oppsummert erfaringer fra egne forskningsprogram i tidsrommet 1996 til 2015.

Title

Use of sacrificial anodes in concrete repairs

Subtitle

Literature study

Author

Johan Ahlström and Bror Sederholm

Department

Structures

Section

Structural Engineering

Project number

L10114

Report number

No. 721

Project manager

Bård M. Pedersen

Approved by

Bård M. Pedersen

Key words

Sacrificial anodes, cathodic protection, concrete rehabilitation

Summary

The Norwegian Public Roads Administration assigned RISE KIMAB to prepare a state of the art report on the topic cathodic protection by using sacrificial anodes in concrete repairs. Recent knowledge confirms the problems arising when mechanical repairs is done where chloride induced corrosion is the cause of damage. The steel rebar in areas close to the repaired area strongly suffers from severe corrosion. RISE KIMAB have prepared a state of the art, based on literature from 1996 until today, and they have also summarized their own experiences from research-programs from the period 1996 to 2015.



Forord

Denne rapporten er utarbeidet av FoU-programmet Bedre bruvedlikehold (2017–2021). Bedre bruvedlikehold skal gjennom ny kunnskap bidra til at Statens vegvesen kan optimalisere ressursbruken knyttet til inspeksjon, vedlikehold og forvaltning av bruer.

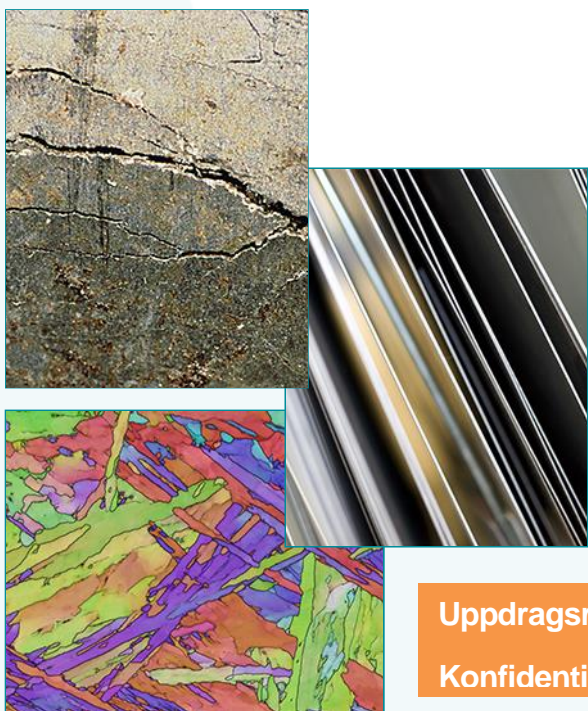
Bedre bruvedlikehold består av fire prosjekter:

- Prosjekt 1: Forvaltningsverktøy for bruer
- Prosjekt 2: Armeringskorrosjon i betong
- Prosjekt 3: Alkalireaksjoner i betong
- Prosjekt 4: Vedlikehold av stålbruer

Bedre bruvedlikehold ledes av Bård Pedersen, Vegdirektoratet.

Denne rapporten tilhører Prosjekt 2: «Armeringskorrosjon i betong» som ledes av Karla Hornbostel. Prosjekt 2 er rettet mot drift og vedlikehold av betongbruer med armeringskorrosjon. Mål for prosjektet er å utarbeide anbefalinger for inspeksjonsmetoder for å utrede omfang av skader på grunn av armeringskorrosjon samt å utvikle verktøy for å kunne bedømme konsekvenser av armeringskorrosjon for bruens levetid. Prosjektet skal også utarbeide et beslutningsgrunnlag for valg av reparasjonstiltak og anbefalinger for gjennomføring av tekniske gode og økonomisk effektive reparasjonstiltak.

Rapporten er skrevet av RISE Research Institutes of Sweden og er utarbeidet i delprosjekt 2.3 «Mekanisk reparasjon», som ledes av Stig Henning Helgestad. Prosjektet har søkelys på kartlegging av mekaniske reparasjoner og forutsetninger som må være til stede for et vellykket resultat av disse. Rapporten er en STAR State of The Art, innen bruk av galvaniske anoder i forbindelse med mekanisk reparasjon av betong, samt et sammendrag av resultater opparbeidet gjennom flere forskningsprosjekter i Sverige.



Uppdragsrapport

Konfidentiell

Katodiskt skydd med offeranoder vid reparation av stora betongkonstruktioner – litteratur- och erfarenhetsstudie

2021-01-25

Utredare: Johan Ahlström & Bror Sederholm

bror.sederholm@ri.se, +46 735127844

Avdelning: RISE Korrosion

Vårt referensnr: P102198

Er referens: Stig Henning Helgestad

Företag: Statens vegvesen Vegdirektoratet

Ert referensnr: 20/124839

Datum: 2021-01-25

Godkänd av:

Utredare: Johan Ahlström & Bror Sederholm

Vårt
referensnr: P102198

Er referens: Stig Henning Helgestad

Ert referensnr: 20/124839

Andrew Gordon - Enhetschef



Katodiskt skydd med offeranoder vid reparation av stora betongkonstruktioner – litteratur- och erfarenhetsstudie

Sammanfattning

Statens vegvesen Vegdirektoratet i Norge har gett RISE KIMAB i uppdrag att utföra en litteratur- och erfarenhetsgranskning av att använda katodiskt skydd med offeranoder vid partiell reparation av stora betongkonstruktioner. Bakgrunden till uppdraget är att vid konventionella reparationer av betongskador orsakade av armeringskorrosion har det konstaterats en kraftig ökning av korrosionen på stålarmingen hos icke reparerade betongytor som angränsar till reparerade betongytor. Från genomförd litteraturstudie av litteratur från 1996 och framåt och RISE KIMABs erfarenheter och forskningsresultat under åren 1996-2015 som omfattar användningen av offeranoder vid framförallt reparationer av stora betongkonstruktioner kan följande slutsatser dras:

- Det flesta undersökningar som har publicerats har genomförts genom kontrollerade försök i laboratorium.
- Mätningar på laboratorium och i fält samt datasimuleringar har visat att makroceller (aktiv/passivceller) kan bildas mellan armering i ursprunglig betong och armering i reparerad betong.
- När en reparation utförs så är det fördelaktigt om armeringen rengörs innan ingjutning med reparationsbetong och det är också fördelaktigt att välja en reparationsbetong med lågt vatten/cement-tal.
- För att undvika aktiv/passivceller så kan offeranoder av zink med cementshölje innehållande LiOH användas. De kan installeras både i reparationsbetongen och i en ursprunglig betong men det blir en bättre strömspridning om offeranoderna installeras i en ursprunglig betong nära gränsen till reparationsbetongen.
- Datasimuleringar har visat att aktiv/passivcellen blir störst då resistiviteten i den ursprungliga betongen är låg.

- Från kontrollerade fältundersökningar av olika termiskt sprutade offeranoder har den bästa vidhäftningen mot betongen uppnåtts med termiskt sprutat zink (99,5 % Zn).
- Skyddsförmågan hos zinkskiktet bedöms vara god (gäller Ölandsbron efter 11 års drift). Detta gäller dock inte de zinksprutade betongytorna som exponerats under vattenytan.
- Det sprutade zinkskiktet är relativt öppet för fukttransport, vilket medför att risken för frostsprängning bedöms vara liten.
- Transporten av klorider in till armering påverkas inte nämnvärt av det sprutade zinkskiktet.
- Betongens resistivitet, dvs fukt- och kloridhalten i betongen, har en stor betydelse för det galvaniska skyddets funktion.
- Både flam- och ljusbågssprutning kan användas för att termiskt spruta zink på betongkonstruktioner.
- Ingjutningsbara offeranoder av zink med ett cementshölje innehållande av litiumhydroxid (LiOH) har initialt en hög strömavgivning, som avtar med exponeringstiden. Storleken av strömavgivningen från anoden är beroende av betongens resistivitet. Låg resistivitet i betongen ger en hög strömavgivning från anoden och vice versa.
- Ett fullgott katodiskt skydd (100 mV depolarisation efter 24 timmars frånslag) av stålarmeringen är ofta begränsad till ett nära avstånd från anoden (ca 0,25 m). Anodens placering har betydelse för en effektiv strömspridningen. Om möjligt bör anoden inte placeras direkt på kamstängerna utan i utrymme mellan kamstängerna.

Innehållsförteckning

1	Inledning	1
2	Användning av offeranoder vid partiella reparationer av betongkonstruktioner	2
2.1	Jämförelse mellan påtryckt ström och ingjutna offeranoder ..	2
2.2	Makrocell mellan reparationsbetong och ursprunglig betong.	3
2.3	Utvärdering av olika reparationsmetoder	5
2.4	Offeranoders skyddsförmåga på olika armeringsytor	10
2.5	Skyddsförmåga hos offeranoder som installerats precis utanför en reparationsbetong.....	11
2.6	Olika typer av offeranoder som används i betongkonstruktioner	15
2.7	Modelleringsstudier	19
2.8	Offeranoder installerade på broar i England.....	23
3	RISE KIMABs undersökningar av galvaniska anodsystem för katodiskt skydd av betongkonstruktioner.	27
4	Slutsatser.....	29
5	Referenslista.....	30
	Bilaga 1	32

1 Inledning

Statens vegvesen Vegdirektoratet i Norge har gett RISE Korrosion i uppdrag att utreda möjligheterna att använda katodiskt skydd med offeranoder i samband med partiella reparationer av stora betongkonstruktioner (t ex vägbroar, tunnlar och kajer). Bakgrunden till uppdraget är att vid konventionella reparationer av betongskador orsakade av armeringskorrosion har det konstaterats en kraftig ökning av korrosionen på stålarmingen hos icke reparerade betongytor som angränsar till reparerade betongytor. En möjlig förklaring som förts fram är den skillnad i elektrokemisk potential som kan uppkomma mellan en nyligen ingjuten armering (passiverad, ädel potential) och en äldre befintlig armering (aktiv, oädel potential) som inte är reparerad. På grund av den uppkomna potentialskillnaden finns det en risk att korrosionen kommer att öka på den befintliga armeringen som inte är reparerad. Den armering som påverkas mest är den icke reparerade armeringen som är placerad i gränsytan närmast den nyingjutna stålarmingen.

Möjligheten att minska den ökade korrosionen som uppstår på en icke reparerad stålarmering i en kloridhaltig betong och som är i elektrisk ledande kontakt med en nyrenoverad och passiverad stålarmering är att minska den uppkomna potentialskillnaden som fås mellan befintlig armering och den nygjutna armeringen. Detta kan troligtvis göras genom att använda katodiskt skydd med antingen påtryckt ström (elektrolytiskt) eller med offeranoder (galvaniskt).

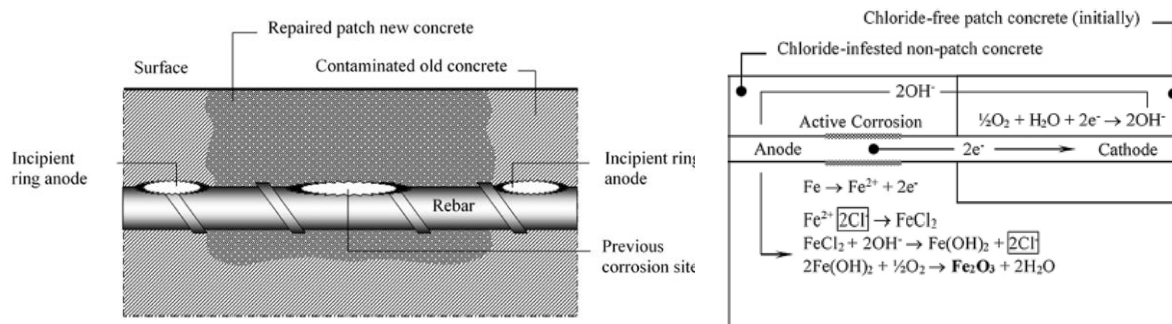
I denna utredning har möjligheterna vid en partiell reparation använda katodiskt skydd med offeranoder på stora betongkonstruktioner, såsom vägbroar, för att hindra en ökad armeringskorrosion på icke reparerade betongytor undersökts. Detta har gjorts genom att utföra en omfattande litteratur- och erfarenhetsinsamling (state of the art) för att utreda möjligheterna att använda offeranoder för att minska armeringskorrosionen på stora betongkonstruktioner efter att reparationer av betongskador orsakade av armeringskorrosion utförts. Detta har även gjorts genom en bred informationssökning i interna, internationella och nationella av lämpliga tidskrifter, konferensbidrag och doktorandarbeten från 1996 och framåt. Exempel på databaser som använts är följande:

- ACS Publication (American Chemical Society)
- Diva
- ScienceDirect (Elsevier)
- Sci Finder
- Scopus
- RISE KIMABs databas
- Springer Compact
- Taylor & Francis

Korrosionsinstitutet (numera RISE KIMAB) har sedan mitten av 1990-talet har haft ett flertal forskningsprojekt som resulterat i flera forskningsrapporter inom området katodiskt skydd med offeranoder av stora betongkonstruktioner. Sammanfattning av resultaten och de erfarenheter som erhållits från dessa forskningsprojekt redovisas i huvudsak i **Bilaga 1** och en kortare sammanfattning ges i **avsnitt 3**.

2 Användning av offeranoder vid partiella reparationer av betongkonstruktioner

Betongkonstruktioner som exponeras mot en kloridhaltig miljö kan få korrosionsangrepp. Klorider transporteras genom täcksiktet och när kloriderna når armeringen kan gropfrätning initieras. Armeringskorrosion kan även starta på grund av att pH-värdet på betongens porlösning sänks. Detta sker genom att porlösningen reagerar med koldioxid från luften (karbonatisering). När betongskador uppkommer i en konstruktion är det vanligt att byta ut den betong där skadan lokalt har uppkommit med ny betong. Den nya reparationsbetongen är fri från klorider och karbonatisering. Då bildas ett område med både ny betong och en ursprunglig betong, **Figur 1** vänsterbild. Det har rapporterats i litteraturen att korrosionshastigheten kan öka i den ursprungliga och oreparerade betongen nära den nya betongen, **Figur 1** högerbild, en så kallad ringanodeeffekt (aktiv/passivcell). Denna effekt uppstår på grund av att armeringen i den nya betongen passiveras och blir en katodyta (ädelyta) och den ursprungliga och oreparerade ursprunglig armering blir anodyta (oädelyta) i en makrocell.



Figur 1. Till vänster: Schematisk bild av reparerat område med ny betong. Till höger: Schematisk bild av en aktiv/passivcell som bildas mellan ursprunglig och ny betong [1]

2.1 Jämförelse mellan påtryckt ström och ingjutna offeranoder

Wilson et al. [2] diskuterade i en artikel fördelar och nackdelar med påtryckt ström (elektrolytiskt katodiskt skydd) och offeranoder (galvaniskt katodiskt skydd). Några fördelar med att använda påtryckt ström är att en mindre del av täcksiktet behöver tas bort. Betong som innehåller klorider men som fortfarande har bra kvalitet kan lämnas kvar. Det är även möjligt att reglera skyddsnivån och det är möjligt att övervaka systemet. Ett system kan designas för en livslängd på 30 år men teoretiskt kan ett system fungera upp till 120 år. Dock kan kablage och likriktare behövas att bytas ut efter ca 20 år. Nackdelar med system med påtryckt ström är att det krävs särskild kompetens för att övervaka systemet samt att den initiala kostnaden för installation är hög. Det finns även risker med överskydd då väteförsprödning kan inträffa. Detta är särskilt farligt på konstruktioner med förspänd eller efterspänd armering. Det är även viktigt att ta hänsyn till läckströmmar från t.ex. tågbanor som kan påverka skyddet.

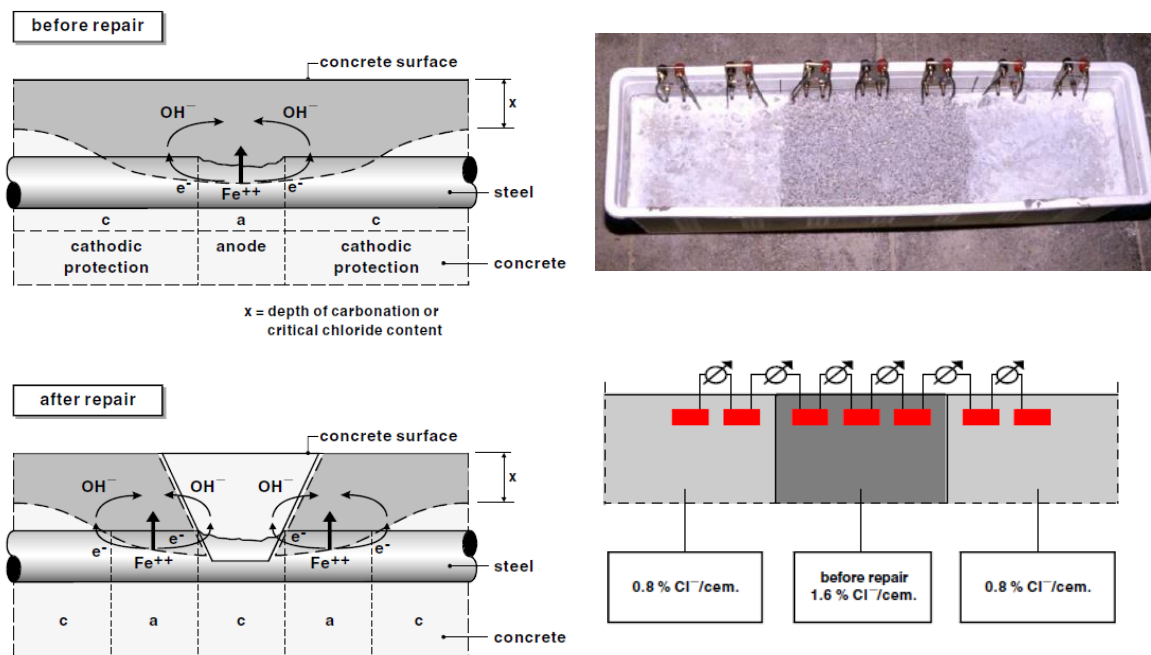
Fördelar med att använda system med offeranoder är att de är relativt enkla att installera och behöver ingen extern strömförsörjning. Därmed blir också kostnaden lägre. Det är även låg

sannolikhet för väteförspädning och finns en liten risk för problem med läckströmmar. Nackdelar med offeranoder är att det är svårt att uppskatta livslängden som påverkas t.ex. av kloridkoncentration, fukthalt, temperatur. Därför bör konstruktionen inspekteras regelbundet. Det är även svårt att fastställa skyddsförmågan hos galvaniska system.

Sammanfattningsvis så är offeranoder lämpliga vid mindre reparationer där kostnaden måste vara låg och livslängden bedöms vara ca 10 år. System med påtryckt ström är fördelaktigt när större ytor måste skyddas eller när livslängden måste vara ca 25 år.

2.2 Makrocell mellan reparationsbetong och ursprunglig betong.

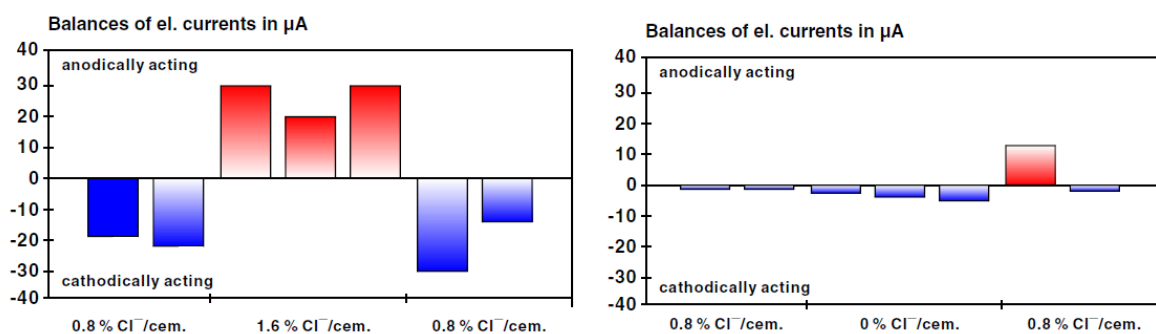
Raupach et al. [3] undersökte om korrosionshastigheten kan öka på armering som angränsar till en reparation, **Figur 2** vänsterbild. Teoretiskt sett är det möjligt att armeringen med reparationsbetong utan klorider kan fungera som en katodyta och armeringen i den ursprungliga betongen med klorider får en högre korrosionshastighet efter reparationen. **Figur 2**, överst visar provkroppen med ingjutna stänger och den nedre bilden visar en schematisk bild av provkroppen.



Figur 2. Vänsterbild: Schematisk bild på anod- och katodytor på armering före och efter en reparation. Högerbild: överst, provkroppen med ingjutna stänger. Nederst, schematisk bild av provkroppen.

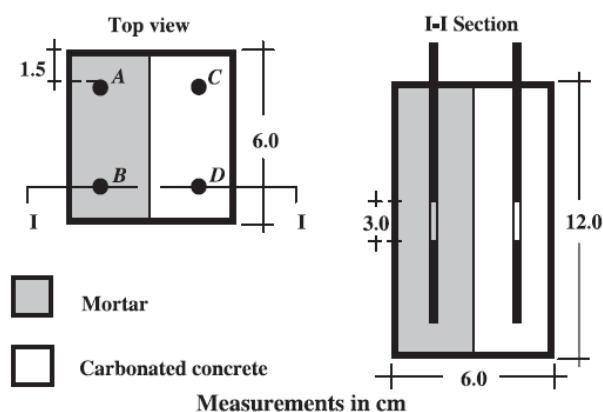
Vid starten av försöket så innehöll betongen i mitten 1,6% Cl per cementvikt och betongen på sidorna innehöll 0,8% klorider. Strömmen mättes på varje armeringsstång och stängerna i mitten hade en anodisk ström och stängerna på sidorna exponerade i betongen med lägre kloridhalt hade katodiska strömmar efter 28 dygn, **Figur 3** vänsterbild. Efter 28 dygn så reparerades betongen i mitten med betong utan klorider och provkroppen exponerades i ytterligare 300 dygn. Strömmarna efter 300 dygn, **Figur 3** till vänster, visar att en yttre del som tidigare fungerade som en katodyta hade skiftat till och blivit en anodyta efter att

reparationen gjordes. Detta visar att det är möjligt att reparation med betong utan klorider kan orsaka korrosionsangrepp på ursprunglig betong i närheten av en ny reparationsbetong.



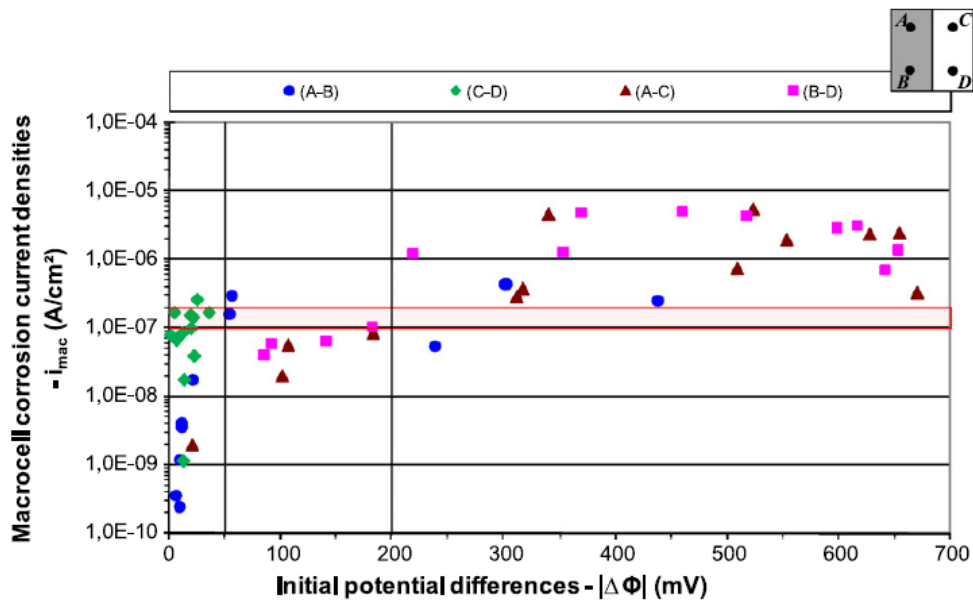
Figur 3. Vänsterbild, de uppmätta strömmarna på proverna i betong med klorider. Högerbild, de uppmätta strömmarna på proverna där mittendelen har bytts mot reparationsbetong utan klorider.

Ribeiro et al. [4] undersökte makroströmmar som kan bildas mellan karbonatiserad betong och ursprunglig betong. Armerade betongprover tillverkades där halva provet bestod av karbonatiserad betong och den andra halvan var obehandlad betong, **Figur 4**.



Figur 4. Schematisk bild av betongprovernas utseende.

Resultaten visas i **Figur 5** där makroströmmen mättes för varje enskild armering exponerad i en karbonatiserad betong eller obehandlad betong. Korrosionspotentialen mättes för varje stång före de kopplades ihop med en annan armering. Potentialskillnaden var låg mellan stänger som var exponerad i samma typ av betong. När stänger kopplades ihop som var exponerade i olika typer av betong så var potentialskillnaden och strömmen högre. Baserat på dessa resultat så drogs slutsatsen att när det finns en potentialskillnad som är mindre än 50 mV så är risken liten att en makrocell bildas. När skillnaden är ca 50-200 mV så finns en medelhög risk att en makrocell kan bildas. När potentialskillnaden är större än 200 mV så finns det en hög risk att det bildas en makrocell mellan karbonatiserad betong och obehandlad betong.

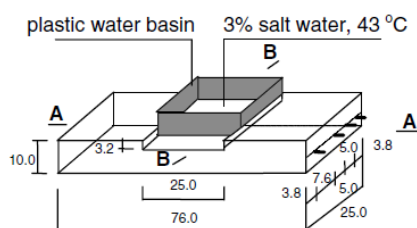


Figur 5. Resultaten då olika stänger kopplas samman som är exponerade i karbonatiserad eller obehandlad betong.

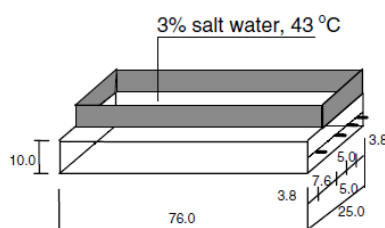
2.3 Utvärdering av olika reparationsmetoder

K. Wang et al. [5] undersökte om olika vattencementtal (vct) på reparationsbetong påverkar korrosionsangrepp på armering samt om zinkband runt armering kan skydda mot armeringskorrosion. Studien startade med att gjuta armerade betongprover där mittendelen exponerades mot en saltlösning i 10 veckor för att initiera korrosion. Efter detta så reparerades betongproverna och betongproverna exponerades på nytt i en saltlösning under ett år, **Figur 6**. De reparationsmetoder som användes visas i **Figur 7**. Den ursprungliga betongen hade ett vct av 0,65 och reparationsbetongen hade ett vct av 0,35 (system I) eller 0,65 (system V). Det undersöktes även om band av zink som monterades runt armeringen kunde skydda mot korrosion (system II och III)

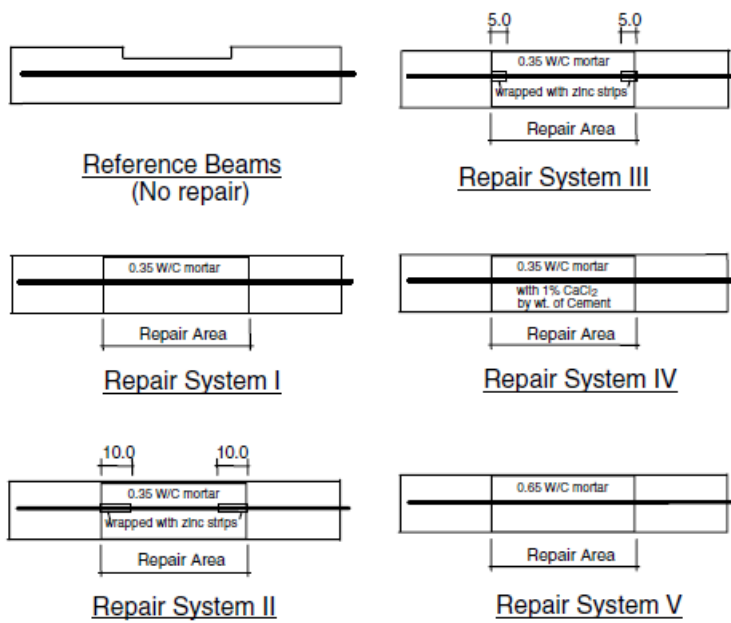
Before Repair



After Repair

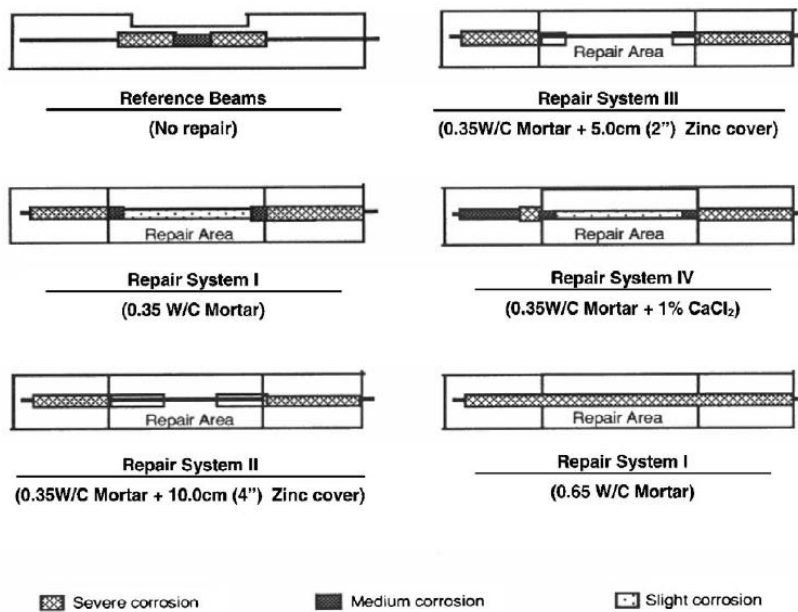


Figur 6. Schematisk bild av provkropparnas exponering.



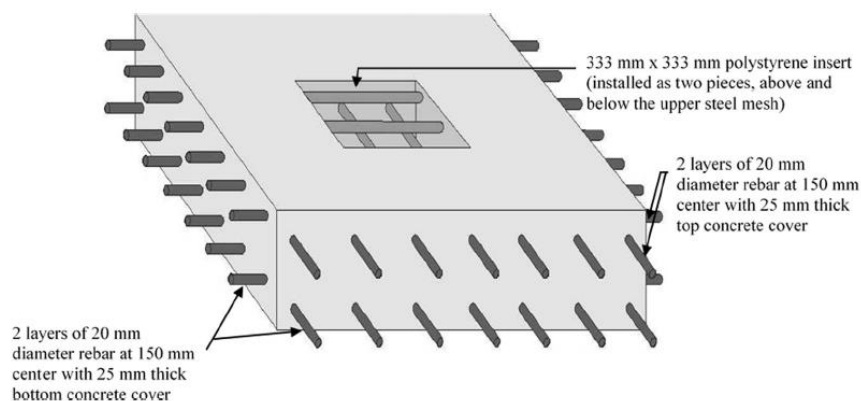
Figur 7. Schematisk bild av de olika reparationsmetoderna.

Resultaten visas schematiskt i **Figur 8**. Det kunde konstateras att reparationsmetoderna med zinkband gav skydd till armering direkt under banden men kunde inte ge skydd längre ut på armeringen. Det framgick även att en reparationsbetong med vct 0,35 gav en ökad korrosion vid gränsen till den ursprungliga betongen. Reparation med betong med vct 0,65 gav korrosionsangrepp på hela armeringen. Detta skedde troligen för att klorider transporterades till armeringen även i reparationsbetongen.



Figur 8. Schematisk bild av armeringens korrosionsangrepp efter olika reparationsmetoder.

Ali et al. [1] undersökte olika reparationsmetoder för betong genom att gjuta relativt stora provkroppar, **Figur 9**. Det gjordes ett hål i mitten av provkroppen med måtten 333x333 mm. I hålet var armeringens översta lager frilagd. Därefter fylldes håligheten med en syntetisk porlösning och hela provkroppen exponerades i en tre dagar lång fuktperiod då provkroppen exponerades mot en 15% NaCl lösning och därefter en fyra dagars torkperiod. Denna fuktcykel pågick i fem månader.



Figur 9. Schematisk bild av provkroppens utseende före lagningsmetoder.

Efter fem månaders exponering så reparerades armeringen i mitten av provkroppen med olika skyddsmetoder, **Figur 10** och hålet fylldes igen med en reparationsbetong. När provkroppen hade härdat färdigt så exponerades provkropparna i fuktcykeln på nytt under 15 månader. Provkropparna utvärderades genom att mäta korrosionspotentialen relativt mättad Cu/CuSO₄ elektrod under exponeringstiden och kloridkoncentration och korrosionshastighet mättes när försöken avslutades. Mätning av korrosionshastighet utfördes med massförlust enligt ASTM G1 och genom att ta upp Tafel linjer med en potentiostat. Några resultat från massförlustmätningar visas i **Figur 11**. Slutsatserna visade att offeranoder gav ett bra skydd och även inhibitorer gav ett bra skydd. Dock så framgår det inte vilka inhibitorer som har använts. Användning av impregneringsmetoder kunde reducera kloridtransport med inte förhindra helt att klorider initierade korrosion.

Slab No.	Designation	Patch steel treatment	Patch concrete mixture	Concrete top surface treatment	Comments
S01	Control A	None	Standard	None	Standard control mixture was used for the Dickson Bridge construction
S02	Epoxy primer	Epoxy	Standard	None	Evaluation of the effect of the epoxy steel primer*
S03	Zinc primer	Zinc	Standard	None	Evaluation of the effect of the zinc steel primer*
S04	Penetrating sealer	None	Standard	Sealer	Evaluation of the effect of the breathable surface sealer*
S05	Epoxy coating	None	Standard	Epoxy	Evaluation of the effect of the impermeable barrier*
S06	Membrane	None	Standard	Membrane	Evaluation of the effect of breathable membrane*
S07	Membrane and zinc primer	Zinc	Standard	Membrane	Evaluation of the effect of breathable membrane in conjunction with the zinc primer*
S08	Embedded anode	None	Standard	None	Evaluation of the effect of the embedded anode system*
S09	Membrane	None	Standard	Membrane	Evaluation of the effect of the breathable membrane*
S10	Control B	None	Standard	None	Comparison between the effects of NaCl and KCl ponding*
S11	Inhibitor	Inhibitor	Inhibitor	None	Evaluation of the effect of integrally mixed inhibitor compared to Slab S10
S12	Inhibitor	Inhibitor	Inhibitor	None	Evaluation of the effect of the integrally mixed inhibitor*
S13	Inhibitor and surface coating	Inhibitor	Inhibitor	Inhibitor	Evaluation of the effect of the integrally mixed inhibitor and surface treatment*
S14	Zinc sheet top	None	Standard	Zinc Sheet and Epoxy	Evaluation of the effect of the zinc sheet on the top surface*
S15	Zinc sheet bottom	None	Standard	None	Evaluation of the effect of the zinc sheet on the bottom surface*

Figur 10. Olika provade reparationsmetoder.

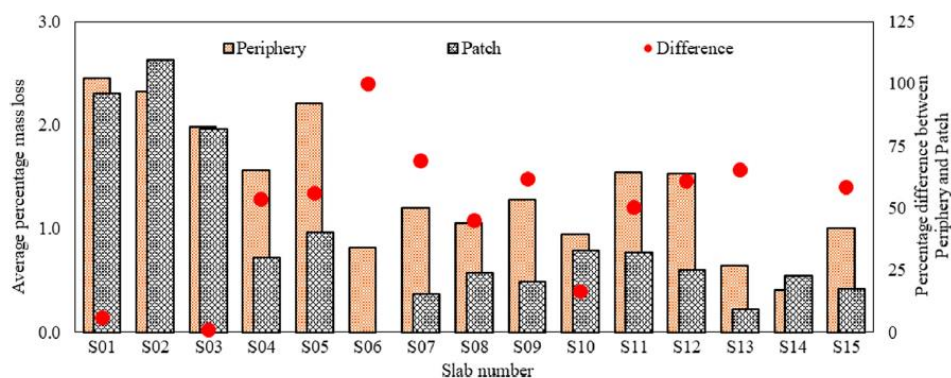
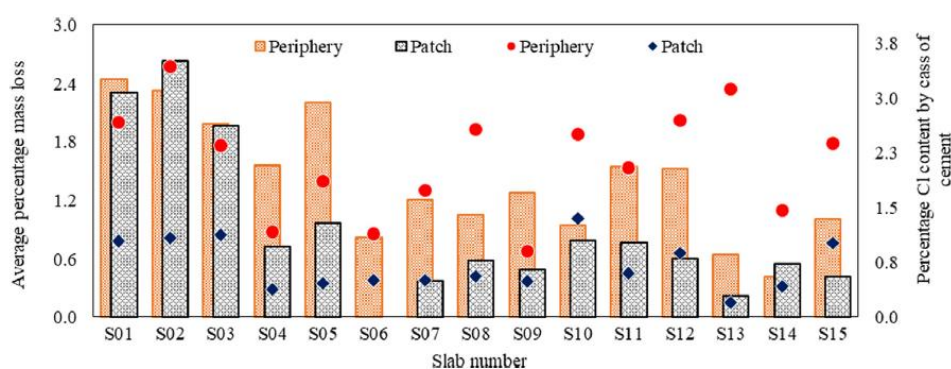


Fig. 15. Average percentage mass loss of the steel bars in the "patch" and the peripheral region for the different slabs.



Figur 11. Massförlust i procent på armering vid olika reparationsmetoder.

Pritzl et al [6]. Utvärderade olika metoder för att skydda betongkonstruktioner mot korrosion. De olika metoder som testades var termisk sprutad zink, ingjutna offeranoder, tri-silane sealant, akrylbeläggning, epoxi/polyuretan beläggning, **Tabell 1**. Alla beläggningar som användes var applicerade på betongytorna och inga beläggningar applicerades på armering.

Tabell 1: Betongprover med olika reparationsmetoder.

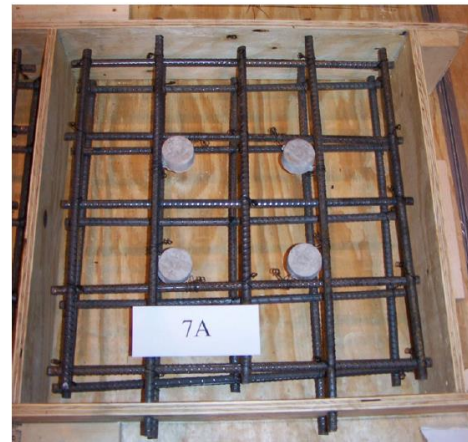
Specimen #	Type of treatment	General description	Notation
01 and 02	Thermal sprayed galvanic anode	Humectant activated thermal sprayed zinc	TSZ
03 and 04	Thermal sprayed galvanic anode with coating	Humectant activated thermal sprayed zinc with epoxy/polyurethane coating	TSZ w/EP-C
05 and 06	Embedded galvanic anode with coating	Cylindrical-shaped zinc anode with acrylic coating	EA-A w/A-C
07 and 08	Embedded galvanic anode	Cylindrical-shaped zinc anode	EA-A
09 and 10	Embedded galvanic anode	Box-shaped zinc anode	EA-B
11 and 12	Penetrating sealer	Alkylalkoxysilane (tri-silane)	T-SS
13	Coating	Acrylic coating	A-C
14	Coating	Epoxy/polyurethane coating	EP-C
15 and 16	Control	No treatment	Control

Betongprovernans utseende visas i **Figur 12** och ett prov före ingjutning av armering och offeranoder av zink i **Figur 13**. När betongproverna var tillverkade så exponerades de i en

fuktcykel. Översidan av provkroppen exponerades i en vecka i en 6 % NaCl lösning. Därefter, en vecka torrt i luft.

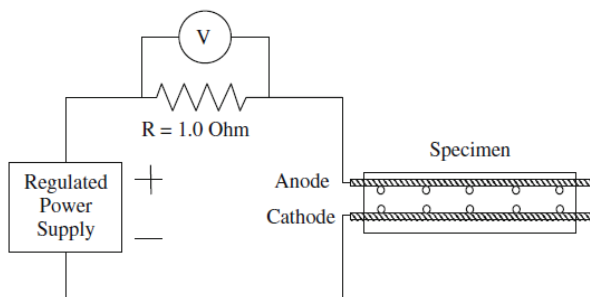


Figur 12. Betongprovernas uppställning



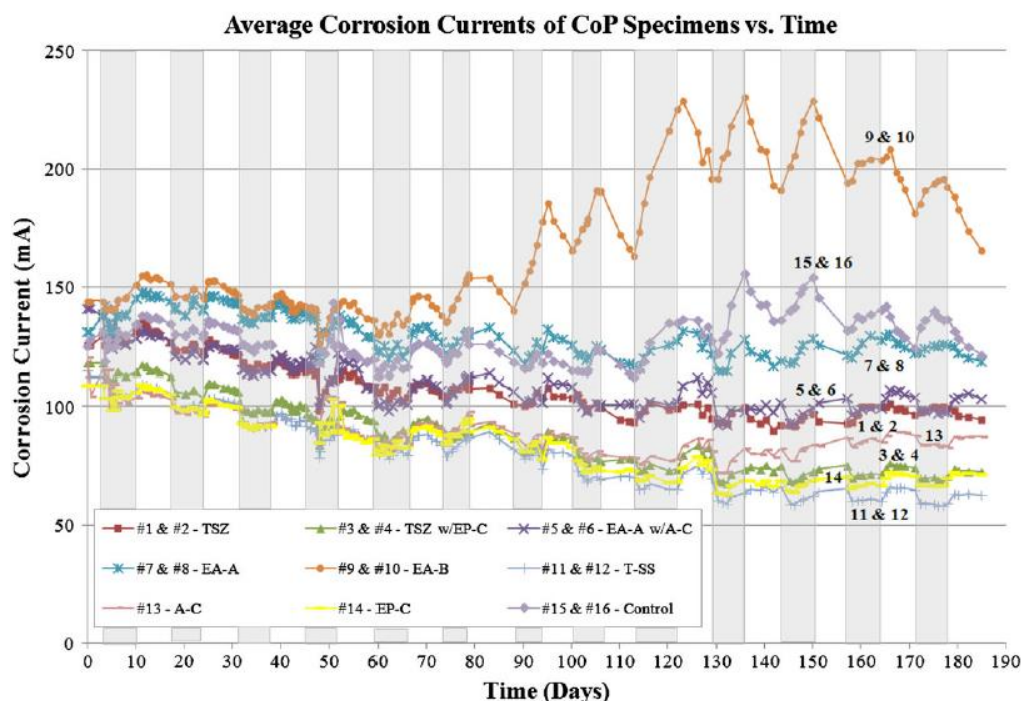
Figur 13. Före ingjutning av armering och offeranoder.

För att öka korrosionshastigheten på det övre armeringslagret användes en likriktare som gav en likspänning av 9 volt mellan armeringsstängerna, **Figur 14**. Proverna utvärderades genom att mäta likströmmen i kretsen och korrosionspotentialen på proverna samt en okulär undersökning.



Figur 14. Schematisk bild på uppställning för att höja korrosionshastigheten på det övre armeringslagret.

Den uppmätta strömmen in kretsen visas i **Figur 15**. Proverna med ingjutna offeranoder var: prov nr 5-6 med en akrylbeläggning, 7-8 cylindrisk offeranod, 9-10 box offeranod. Proverna med den högsta strömmen var 9-10 och armeringen hade även kraftiga korrosionsangrepp som var synliga i den okulära undersökningen. Den metod som fungerade bäst i studien var kombinationen av termisk sprutad zink med en epoxibeläggning. Den näst bästa var tri-silan beläggningen. Resultaten av denna studie är nog ganska felaktiga eftersom den pålagda spänningen kan slå ut skyddet av de ingjutna offeranoderna.

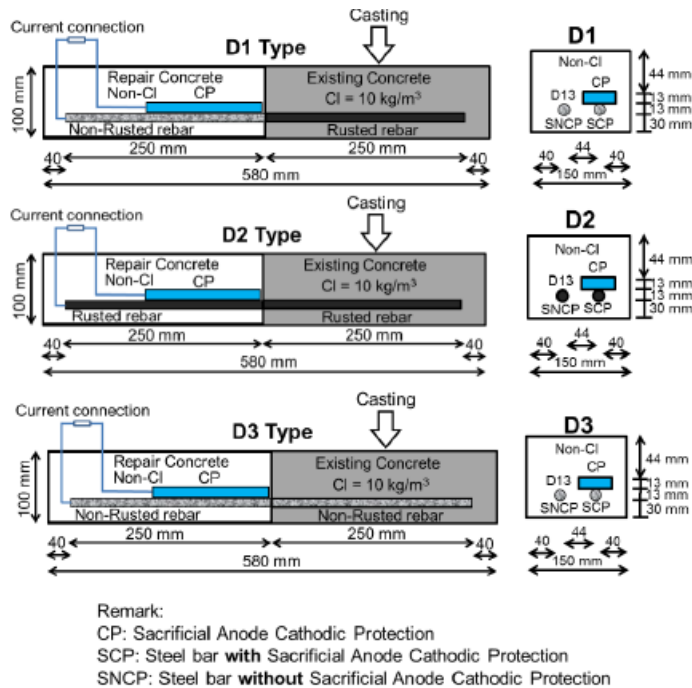


Figur 15. Den uppmätta strömmen i kretsen, där prov nr 5-6 är offeranod med akrylbeläggning, nr 7-8 cylindrisk offeranod, nr 9-10 box offeranod.

2.4 Offeranoders skyddsförmåga på olika armeringsytor

Astuti et al. [7] undersökte skyddsförmågan hos offeranoder av zink i reparationsbetong där armeringen antingen var rengjord eller rostig. En schematisk bild av den experimentella uppställningen visas i **Figur 16**. Betongen som användes hade ett vct av 0.45 och halva provkroppen gjöts med klorider i blandningsvattnet. Den andra halvan som representeras av en reparationsbetong var utan klorider och hade installerade offeranoder av zink till armeringen. Provkropparna exponerades i en fuktcykel som pågick i 140 dygn. En cykel startade med att proverna exponerades i vanlig luft och därefter exponerades proverna i två dygn i en saltlösning, 3% NaCl. Efter 140 dygn så exponerades proverna i luft i 1000 dygn.

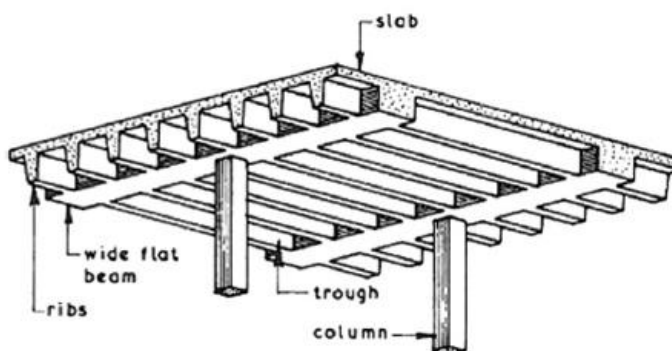
Resultaten visade att anodernas skyddsström var högst under den fuktcykel perioden och sänktes under den torra perioden p.g.a. betongens fukthalt. Skyddskriteriet vid katodiskt skydd är att potentialskillnaden mellan påslaget skydd och avslaget skydd skall vara minst 100 mV. Detta skyddskriterie kunde uppnås när offeranoden var kopplad till rengjord armeringsyta. Offeranod som var kopplad till rostig armering gav sämre skydd. Detta betyder att det är fördelaktigt att rengöra armeringsytor vid reparation när offeranoder skall installeras.

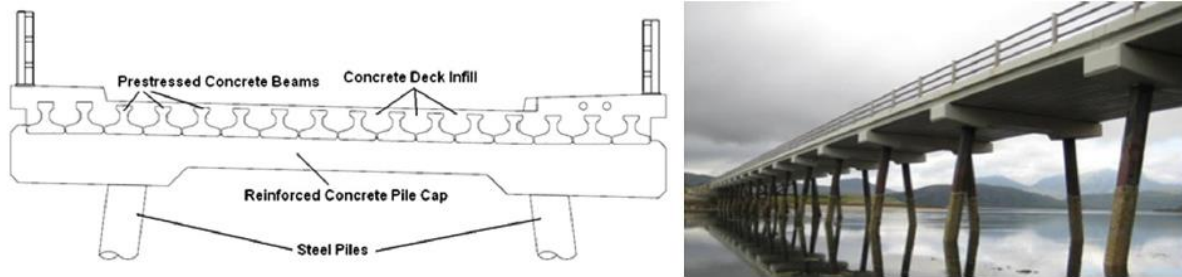


Figur 16. Schematisk bild av den experimentella uppställningen.

2.5 Skyddsförmåga hos offeranoder som installerats precis utanför en reparationsbetong

Christodoulou et al. [8] undersökte skyddsförmågan hos offeranoder som installeras i den ursprungliga betongen intill den nya reparationsbetongen. Vid betongreparationen användes offeranoder av zink på ett parkeringsdäck där kloridkoncentrationen uppmättes till 2,9 % Cl per cementvikt och en mindre bro där kloridkoncentrationen uppmättes till 1,8 % Cl per cementvikt, **Figur 17**. Skador på dessa konstruktioner visas i **Figur 18**. Anoderna som användes var av zink, ca 65 gram, med en diameter på 20 mm och 40 mm långa. Anoderna installerades i borrarade hål nära området med reparationsbetong. Anoderna placerades runt det reparerade området med ca 300 mm mellanrum, se Figur 19.

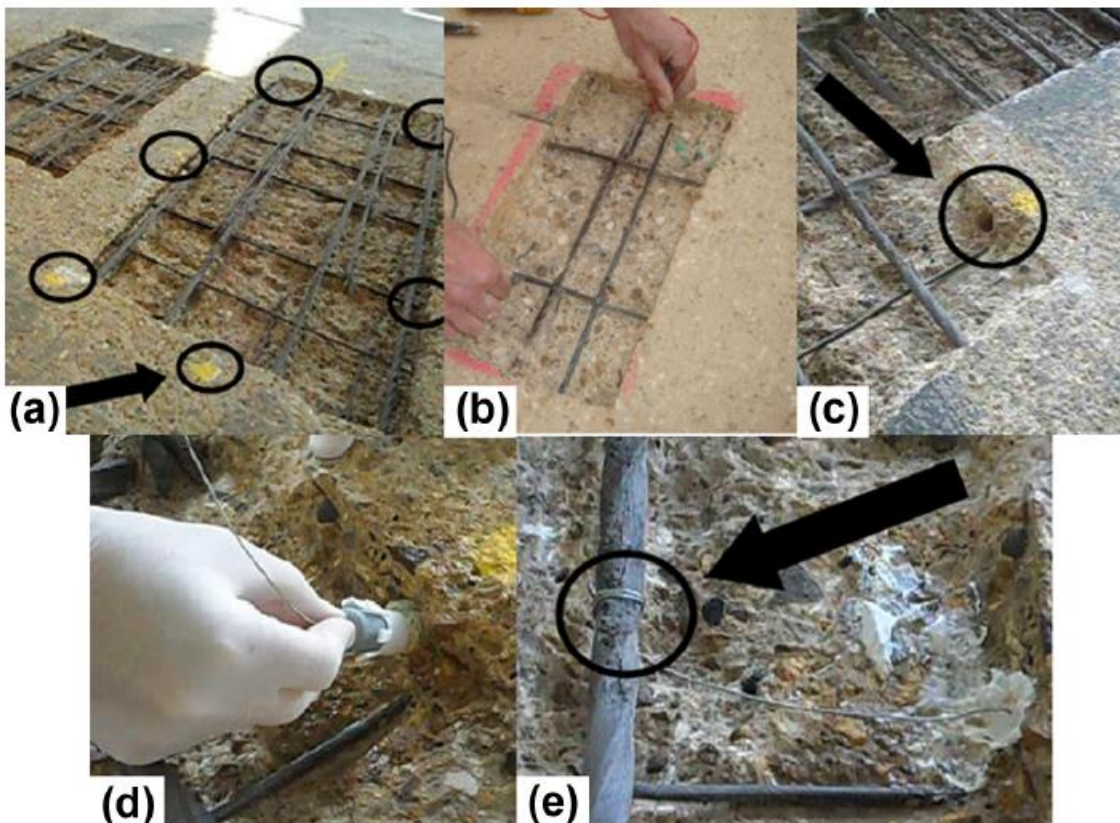




Figur 17. Ett parkeringsdäck och en mindre bro där reparation utfördes med offeranoder.



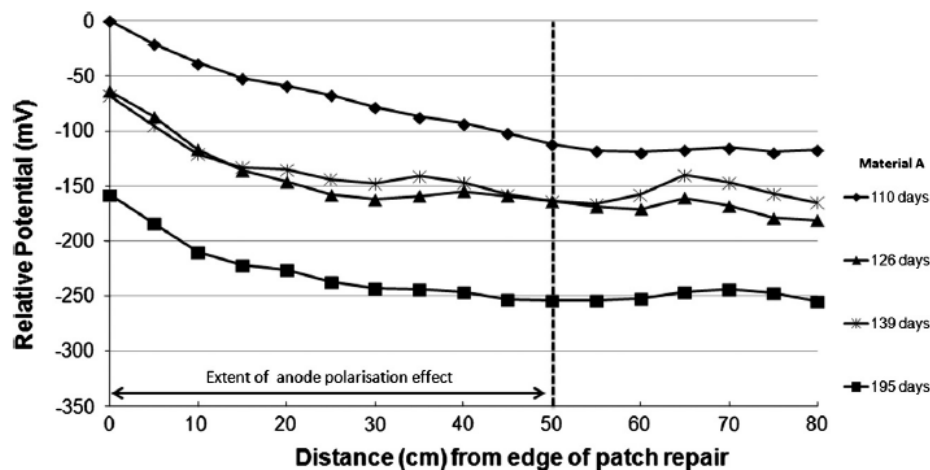
Figur 18. Korrosionsskada på parkeringsdäcket till vänster och den mindre bron till höger. Skadorna var orsakade av höga kloridhalter i betongen.



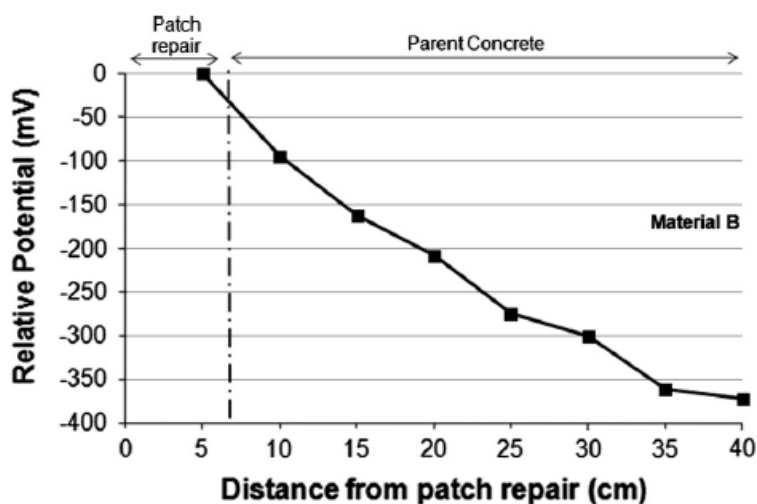
Figur 19. Installation av offeranoder runt det reparerade området.

För att mäta skyddsförmågan från gränsen mellan reparationsbetongen och den ursprungliga betongen så användes två referenselektroder. En elektrod hölls mot gränsen och den andra

elektroden mätte längre ifrån. **Figur 20** visar potentialskillnaden mellan två elektroder med olika avstånd från reparationsgränsen vid olika tidpunkter. Det framgår att anoderna polariserade armeringen ca 500 cm från gränsen efter 195 dygn. **Figur 21** visar samma typ av mätning men vid en reparation med offeranoder på den mindre bron.

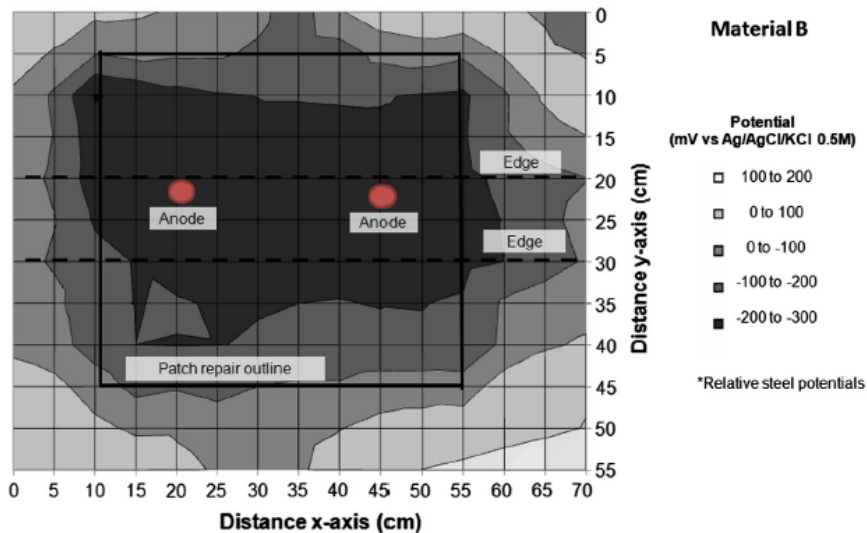


Figur 20. Potentialskillnad mellan två elektroder med olika avstånd från reparationsgränsen på parkeringsdäcket.



Figur 21. Potentialskillnad mellan två elektroder med olika avstånd från reparationsgränsen på den mindre bron.

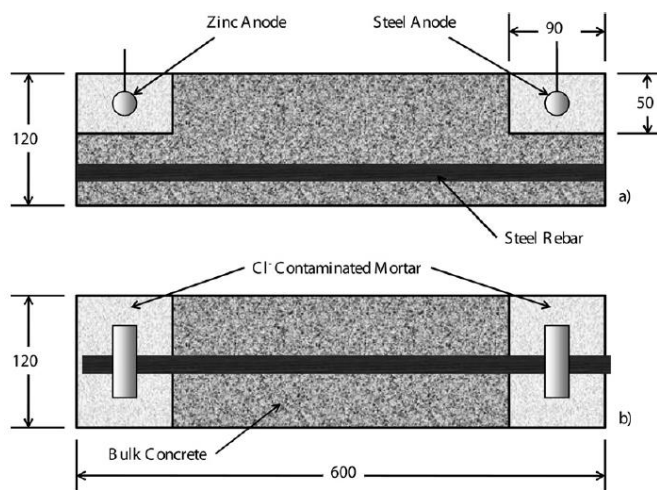
Det gjordes även potentialkartering av det reparerade området, **Figur 22**. Denna metod ansågs vara bra för att utvärdera skyddsförmågan hos offeranoder.



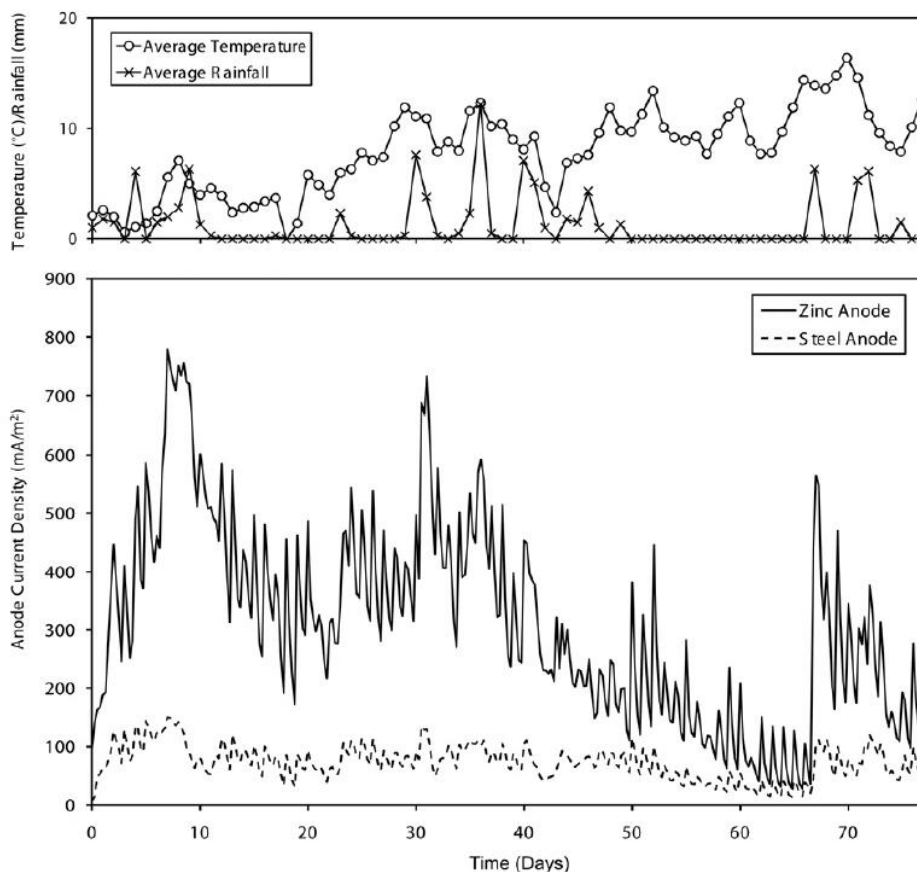
Figur 22. Potentialkartering av det reparerade området på bildäcket. De två röda prickarna visar placeringen av offeranoderna.

Slutsatser av studien var att genom att installera offeranoder precis utanför det reparerade området så kunde skyddsförmågan sträcka ut ca 250-600 mm från gränsen ut i den ursprungliga betongen. Hur stor denna effekt blir styrs t.ex. hur mycket armering som finns i konstruktionen och betongens resistivitet.

Holmes et al. [9] undersökte skyddsförmågan hos ingjutna offeranoder av zink med påverkan av regn och temperatur. Betongproverna som tillverkades visas i **Figur 23**, där anoderna var ingjutna i kloridhaltig betong och armering var ingjuten i betong utan klorider. Betongens vct var 0,32. Efter härdning i 90 dygn placerades betongkroppen utomhus. **Figur 24** visar temperatur, nederbörd och anodströmmen under exponeringsperioden utomhus. Slutsatser av studien var att anodströmmen tydligt påverkades av nederbörd då betongen var fuktig.



Figur 23. Schematisk bild av betongkroppens utseende.



Figur 24. Temperatur, nederbörd och anodströmmen under exponeringsperioden.

2.6 Olika typer av offeranoder som används i betongkonstruktioner

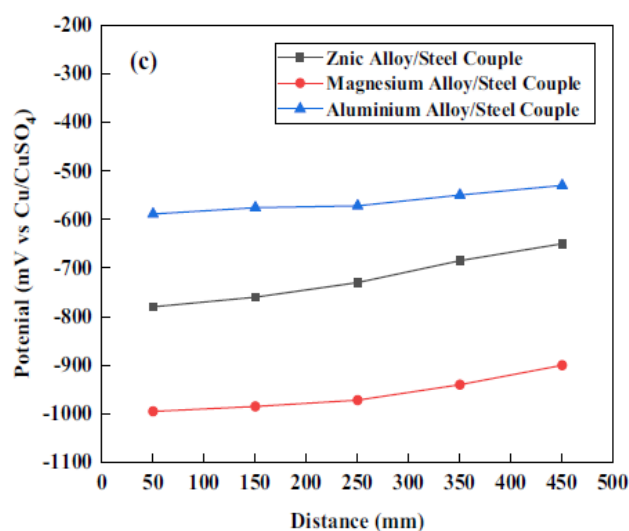
Khomwan et al. [12] undersökte skyddsförmågan hos två olika offeranoder av zink som är föringjutna i ett cementbruk med olika halter av LiOH. Armerade betongkroppar tillverkades där anoden placerades under det översta armeringslagret. Betongkroppens toppsida exponerades i en 3% NaCl lösning. Zinkanod med en högre halt av LiOH i cementbruket gav ett bättre korrosionsskydd. Anledningen är att LiOH i cementbruket innebär att zinkanoden inte kan passiveras utan är aktiv (korroderar). Ju högra halt LiOH som finns i cementbruket desto större skyddsström avges från zinkanoden

I en studie av F. Wang et al. [13] så undersöktes skyddsförmågan hos tre olika typer av offeranoder. Ingjuten armering i kloridhaltig betong exponerades under 170 dagar varvid blandpotentialen och skyddsströmmen uppmättes vid exponeringen. Offeranodernas sammansättning visas i **Tabell 2** där det framgår att både zink och aluminium materialen innehåller indium. Offeranoder av aluminium och zink legeras vanligen med indium för att förhindra att anoden passiveras.

Tabell 2: Anodmaterialens sammansättning.

Anode type	Al	Zn	Fe	Cu	Mg	In	Mn	Si
Zinc alloy	4.80	Bal	0.095	0.025	/	0.005	/	/
Magnesium alloy	2.96	0.52	0.003	0.006	Bal	/	0.31	/
Aluminum alloy	Bal	3.45	0.22	/	0.20	0.13	/	0.65

Innan anoderna göts in i betong så tillverkades ett hölje runt materialen. Detta hölje bestod av 75% gips, 20% bentonitlera och 5% natriumsulfat. Denna inpackning täcktes sedan med ett lager av cementbruk. Resultaten visade att anoderna av zink och magnesium hade en god skyddsförmåga medan aluminiumanoden kunde passivera och därmed ge ett sämre skydd. **Figur 25** visar blandpotentialer mellan anod och armering som funktion av avståndet från anoden efter 120 dygn. Blandpotentialen var lägst med magnesiumanoden och högst med aluminium anoden. Skyddsströmmen var även högst med magnesium och lägst med aluminium anoden. Det framgick även att klorider transporterades mot anoden så att kloridkoncentrationen vid armeringen minskade. Den lägre kloridkoncentrationen bidrar till att minskad armeringskorrosion.

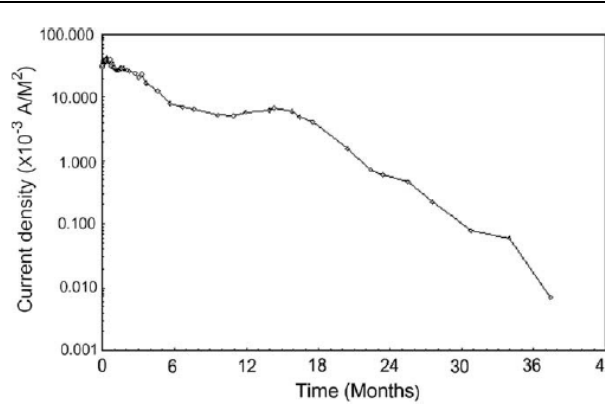


Figur 25. Uppmätta blandpotentialer av offeranod och armering som funktion av avstånd från offeranoden. Resultaten är efter 120 dygn.

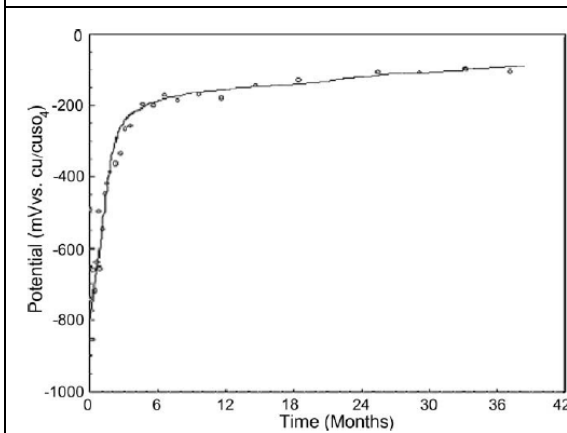
Parthiban et al. [14] Undersökte skyddsförmågan hos offeranoder av magnesium. Det gjöts ett relativt stort betongblock med måtten: 1,6x1,6x0,1 meter med 3,5% Cl per cementvikt. Armeringen rengjordes före ingjutning i en betlösning. Magnesiumanoden var packad i 75% gips, 20% bentonitlera och 5% natriumsulfat) och gjöts in i mitten av betongblocket, **Figur 26**. Några resultat från undersökningen visas i **Figur 27-29**, där **Figur 27** visar att strömmen är högst i början av exponeringen och minskar sedan med tiden. **Figur 28** visar armeringens potential vid 0,16 meter från anod och **Figur 29** visar potentialen vid 0,95 meter från anoden.



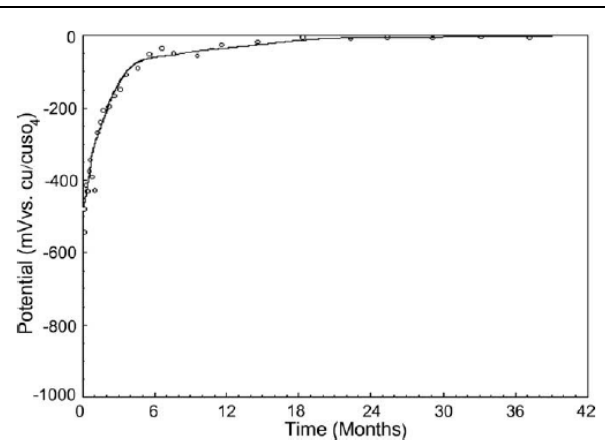
Figur 26. Betongblocket med armering och anod i mitten av blocket.



Figur 27. Den totala utmatade strömmen från anoden.



Figur 28. Armeringens potential vid 0,16 m från anoden efter 38 månaders exponering



Figur 29. Armeringens potential 0,95 m från anoden efter 38 månaders exponering.

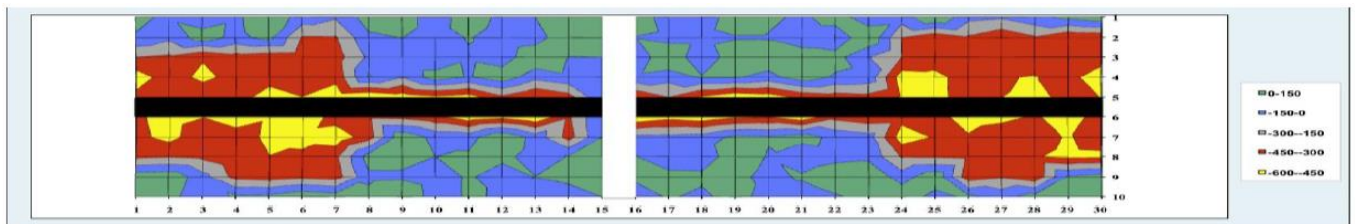
Det är oklart hur kloridkoncentrationen bestämdes i betongblocket men vid start så angavs att kloridkoncentrationen var 12 kg/m^3 . Efter tre månader så var kloridkoncentrationen $0,36 \text{ kg/m}^3$ 0,23 meter från anoden och $0,07 \text{ kg/m}^3$ 0,95 meter från anoden. Den största kloridsänkningen skedde alltså längre ifrån anoden. Slutsatsen var att anoden kunde skydda

armeringen. Anledningen till att potentialen ökade långsamt förklarades av att kloridkoncentrationen minskade under exponeringsperioden.

Pistolesi et al. [15] Rapporterade om en installation av en relativt ny typ av offeranod på undersidan av en bro, **Figur 30**. Denna rapportering beskrev endast hur installationen utfördes och angav inte någon skyddande förmåga av offeranoden.



Figur 30. Undersidan av bron där det katodiska skyddet skall installeras vid fogen.



Figur 31. Potentialkartering av fogen på undersidan av bron.

Det hade tidigare gjorts en potentialkartering av fogen på undersidan av bron, **Figur 31** och konstaterats att armeringen hade fått korrosionsangrepp och därmed behövde bron en reparation. Offeranodsystemet bestod i att först applicera en särskild typ av bruk, EN 1504-9, class R4. Sedan sattes zinkplattor fast på bruket där även zinkplattorna hade en gel på ytan för att förbättra kontaktytan mellan anod och betongyta. För att ytterligare förbättra kontaktytan mellan anod och betongyta skruvades anoderna fast med plastpluggar i bron, **Figur 32** och täcktes sedan av ett bruk, se **Figur 33**.



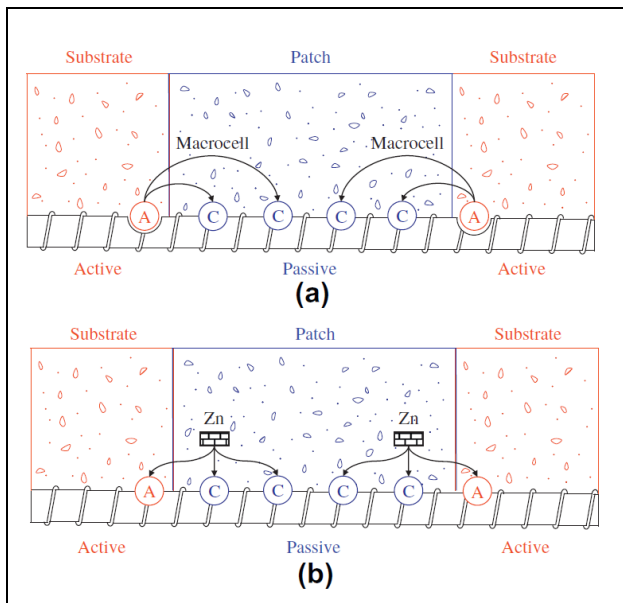
Figur 32. Monterade zinkplattor på betongen.



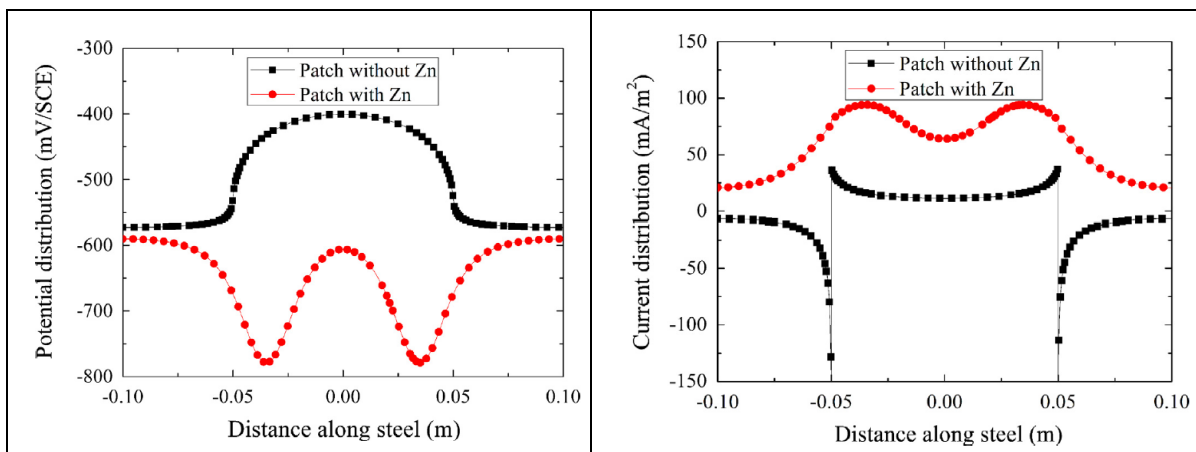
Figur 33. Plattorna täcktes med ett bruk.

2.7 Modelleringsstudier

Cheung et al. [16] Utförde korrosionssimuleringar på armering i reparerad och kloridkontaminerad betong där offeranoder göts in i reparationsbetongen, **Figur 34**. Den simulerade korrosionspotentialen visar att de två offeranoderna effektivt kunde sänka korrosionspotentialen både på armeringen i reparationsbetongen och på armeringen vid gränsen av ursprungliga och nya betongen, **Figur 35** vänsterbild. Makrocellens strömfördelning visas i **Figur 35** högerbild med och utan offeranod.

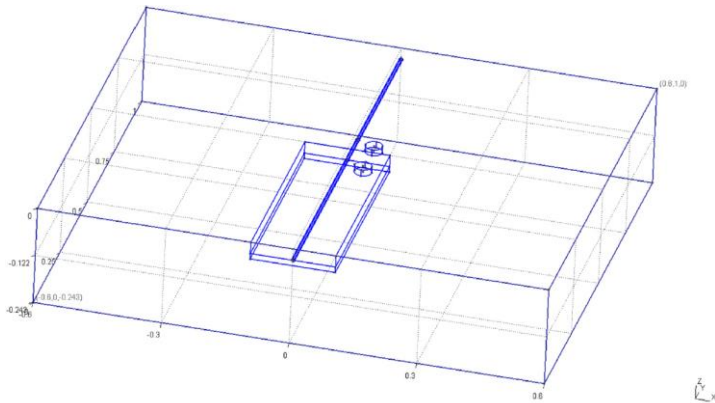


Figur 34. Vänster: Schematisk bild av det simulerade området. Till höger: Den simulerade korrosionspotentialen på armeringen i ursprunglig och ny betong samt med och utan offeranoder.



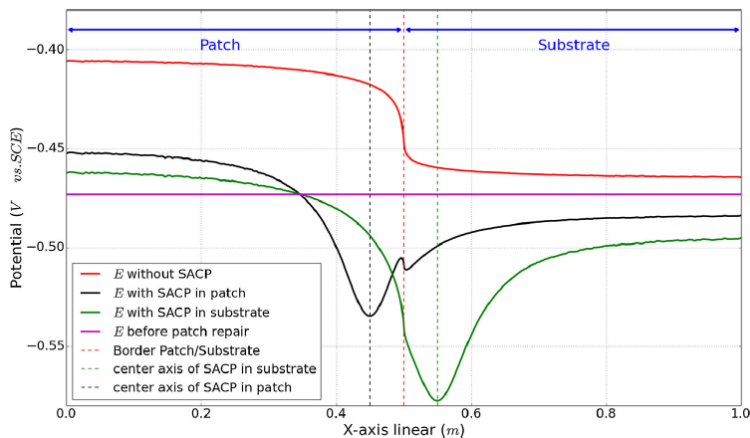
Figur 35. Simuleringsresultat. Vänsterbild: Armeringens potential med och utan offeranod. Till höger: Strömfördelning på armering med och utan offeranod.

Loziguez et al. [17] simulerade hur positionen av en offeranod påverkar skyddsförmågan av armering i en reparation, **Figur 36**. Anoden placerades antingen i reparationsbetongen nära gränsen till den äldre betongen eller i den äldre betongen nära reparationsbetongen. Vidare så simulerades hur skyddsförmågan påverkas vid olika resistivitet på reparationsbetongen samt om armeringen var helt rengjord eller delvis rengjord i reparationsdelen. Följande grafer visar resultat när armeringen var helt rengjord.

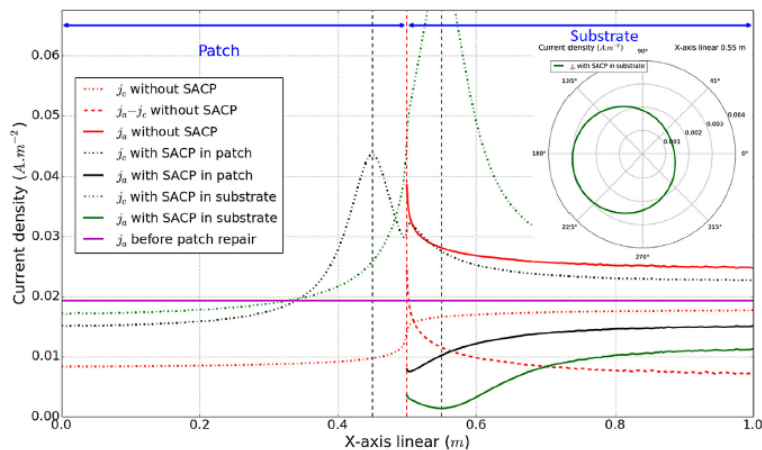


Figur 36. Lagningsbetong i mitten av modellen och där positionen av offeranoden var placerad i lagningsbetong respektive originalbetong.

Figur 37 visar potentialen och **Figur 38** strömmen på armeringen i fyra olika fall. Utan offeranod (röd), offeranod placerad i lagningsbetong (svart), offeranod placerad i ursprunglig betong (grön) samt före lagning (lila). Vid jämförelse mellan före och efter reparation utan offeranod så polariserades armeringen i anodisk riktning samt att den anodiska strömmen ökade på armeringen i den ursprungliga betongen. Korrosionsangreppen kan alltså bli mer omfattande på armeringen i ursprungliga betongen vid reparation. Vid installation av offeranoder så sänktes de anodiska strömmarna dock så blev skyddsförmågan högre när offeranoden placerades i original betongen jämfört med i reparationsbetongen.

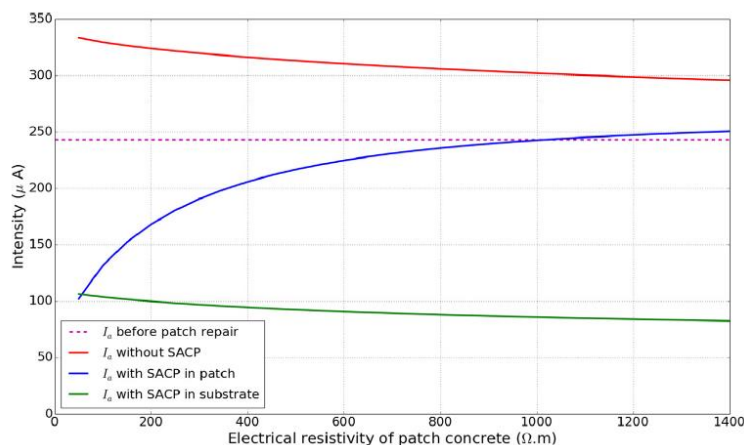


Figur 37. Potentialen på armering när offeranod är placerad i reparationsbetong eller ursprunglig betong.



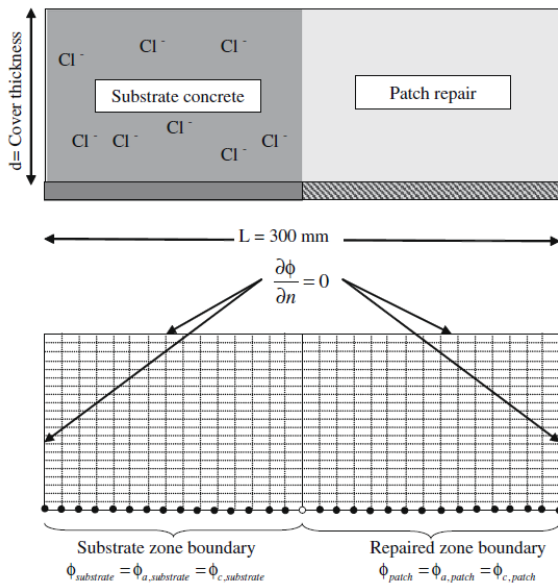
Figur 38. Strömfördelning på armering när offeranod är placerad i reparationsbetong eller originalbetong.

Simulering utfördes även när reparationsbetongen har olika resistivitet, **Figur 39**. Resultaten visar att när offeranoden placeras i reparationsbetongen så blir skyddsförmågan lägre ju högre resistiviteten är. När offeranoden placeras i den ursprungliga betongen så påverkades inte skyddsförmågan nämnvärd vid olika resistiviteter på reparationsbetongen.

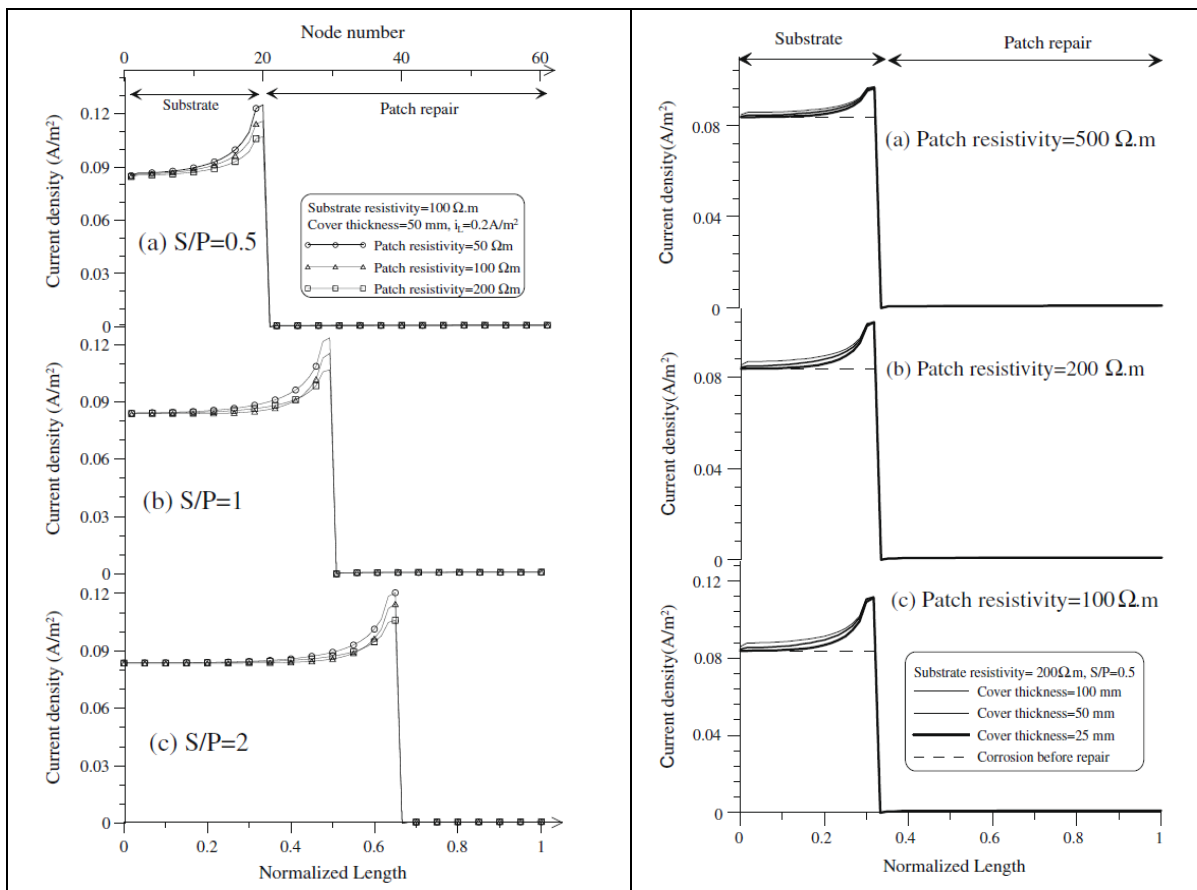


Figur 39. Strömfördelning där reparationsbetongen har olika resistivitet.

Soleimani et al. [18] simulerade aktiv/passivceller (makrocell) i en ursprunglig betong runt ett reparationsområde. Modellen visas schematiskt i **Figur 40** och exempel på resultat i **Figur 41**. Det kunde konstateras att det bildas en makrocell i den ursprungliga betongen nära reparationsområdet. Parametrar som storleken på reparationsområdet eller betongens täckskikt har liten påverkan på storleken av makrocellen. Den parameter som hade störst betydelse var resistiviteten på den ursprungliga betongen. Vid låg resistivitet så blev makrocellströmmen hög oberoende av resistiviteten på reparationsbetongen. Det rekommenderades ändå att välja en reparationsbetong med liknande egenskaper som original betongen för att undvika mekaniska problem vid gränsytan.



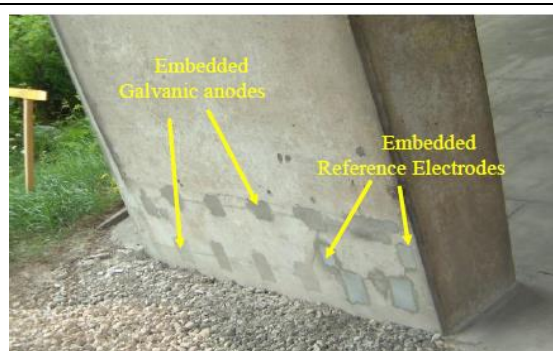
Figur 40. Schematisk bild av modellen där t.ex. olika täcksiktstjocklekar kunde studeras.



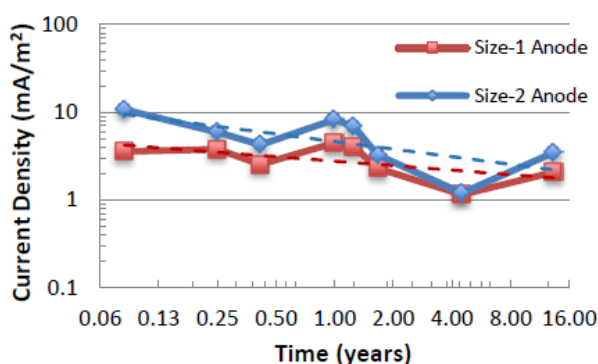
Figur 41. Till vänster: Resultat av simulering där förhållandet av ytorna för reparation och ursprunglig betong ändras samt olika resistiviteter. Till höger: visar effekten av olika resistiviteter av reparationsbetongen och täcksiktstjocklek.

2.8 Offeranoder installerade på broar i England

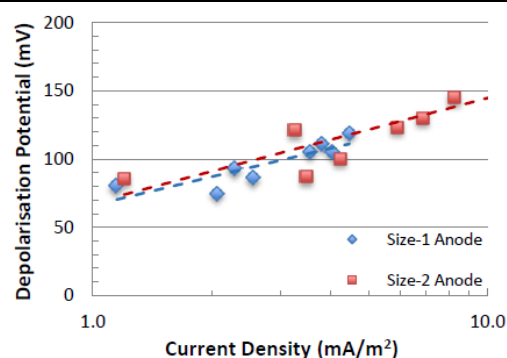
Rathod et al. [10] göt in offeranoder i tre olika vägbroar i England. På bro nr 1 installerades offeranoder och referenselektroder i den nedre delen av två olika bropelare, se **Figur 42**. Den genomsnittliga strömutfästningen från anoderna och depolarisationspotentialen mättes under 16 år, se **Figur 43** och **Figur 44**. Depolarisationen är potentialskillnaden mellan ”instant off” potentialen och potentialen efter 24 timmar efter bortkoppling. Anoderna var cylindriska och hade två olika storlekar, storlek 1 och storlek 2 där den större anoden, storlek 2, gav ungefär dubbelt så stor strömutfästning. Det framgick även att anoden med större yta gav en högre depolarisation.



Figur 42. Bro nr 1. Installerade offeranoder och referenselektroder i en bropelare.



Figur 43. Uppmätta strömmar från anoderna installerade på bro nr 1.

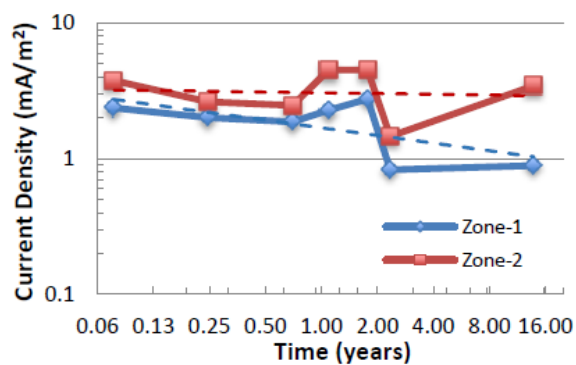


Figur 44. Skillnad i depolarisation, mellan instant off potentialen och potentialen efter 24 timmar.

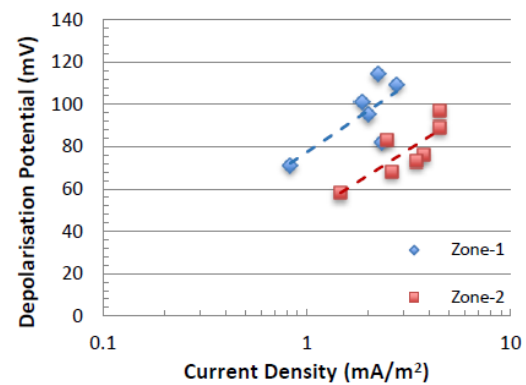
På bro nr 2 installerades offeranoder av storlek 2 med 30 cm mellanrum och referenselektroder i två olika reparationszoner, **Figur 45**. Den genomsnittliga strömutfästningen från anoderna i de två olika zonerna visas i **Figur 46** och depolarisationen i **Figur 47**. Anodernas strömutfästning var något lägre i zon 1 vilket förklarades av en mer torr betong.



Figur 45. Bro nr 2. Installerade offeranoder monitorerades i zon 1 och zon 2.

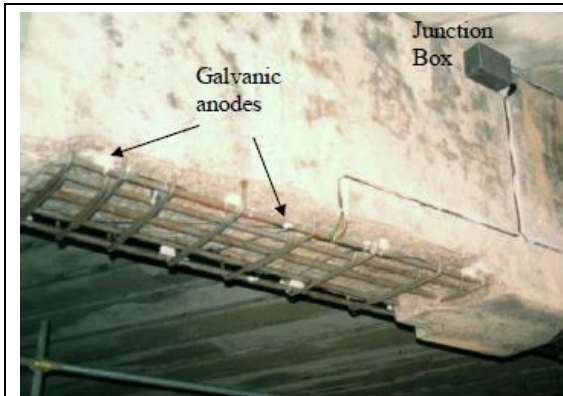


Figur 46. Uppmätta strömmar från offeranoder installerade i zon 1 och zon 2 på bro nr 2.

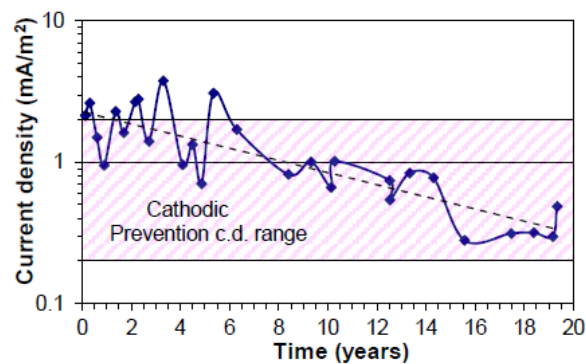


Figur 47. Depolarisation på de två zonerna på bro 2.

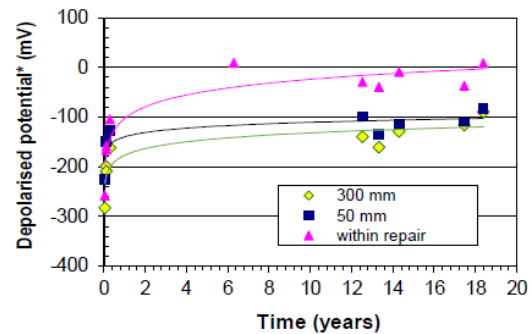
På bro nr 3 installerades offeranoder med 60 cm mellanrum men inga referenselektroder, **Figur 48**. Den genomsnittliga strömutmatningen från anoderna visas i **Figur 49** och korrosionspotentialen efter 24 timmar rel. Ag/AgCl 0,5M KCl i **Figur 50**. Potentialer mättes från betongytan. Gemensamt med alla installationer är att strömutmatningen från anoderna avtar med tiden. Detta sker troligtvis p.g.a. att offeranoderna konsumeras och ytan minskar samt att armeringen passiveras vilket ger ett mindre strömbehov. Sammanfattningsvis kan det konstateras att installationerna med offeranoder gav ett katodiskt skydd på alla tre broar.



Figur 48. Bro nr 3. Installerade offeranoder vid reparation.



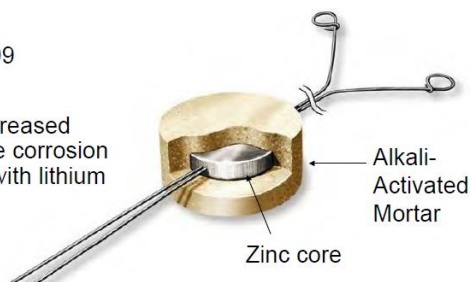
Figur 49. Uppmätta strömmar från anoder som installerats på bro nr 3.



Figur 50. Korrosionspotential efter 24h efter bortkoppling av anoder rel. Ag/AgCl 0.5M KCl

Företaget Vector Construction tillverkar ingjutningsbara offeranoder av zink med cementsluc och här presenteras information från ett webinar som presenterades av George Sergei [11]. **Figur 51** visar en offeranod som Vector utvecklade på 90-talet. Zinkmaterialet är ingjuten i ett bruk med LiOH som har ett pH på ca 14,6. Detta höga pH-värde säkerställer att zinkmaterialet är i ett aktivt tillstånd och att passivering inte sker.

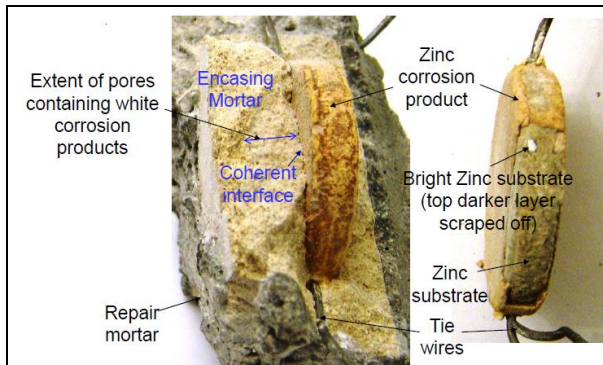
- First field trial was in 1999
- 10-year anode life
- Encasing mortar with increased porosity to accommodate corrosion products and saturated with lithium hydroxide
- pH of Sat. LiOH = 14.6
- Lithium ions inhibit ASR



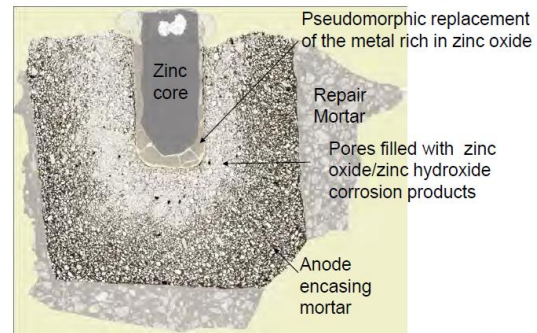
Figur 51. En offeranod som Vector utvecklade på 90-talet.

Figur 52 visar utseendet på en offeranod som varit i drift i 10 år och **Figur 53** samma typ av anod i genomskärning. Inkapslingsbruket har hög porositet där korrosionsprodukter av zink kan samlas. **Figur 54** visar 2:a generationens offeranoder som är utvecklad för betongreparation. Den huvudsakliga skillnaden är att zinkmaterialets yta är större vilket ger

en högre strömutfattning. **Figur 55** visar 2:a generationens offeranod som är utvecklad för att installeras i borrhå.



Figur 52. Utseende av en offeranod som varit i drift i 10 år.



Figur 53. Offeranod som varit i drift i 10 år i genomskärning.

Galvashield® XPT



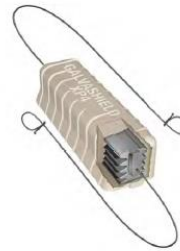
- XPT Essentially replacing XP

Galvashield® XP2



- XP2 = 2 Times the Surface Area

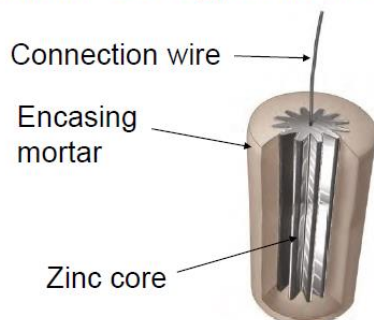
Galvashield® XP4



- XP4 = 4 Times the Surface Area

Figur 54. 2:a generationens offeranoder utvecklade för partiella reparationer. Den huvudsakliga skillnaden är att zinkmaterialets yta är större.

Galvashield® CC-Type Anodes



Figur 55. 2:a generationens offeranod som är utvecklad för installation i borrhå.

3 RISE KIMABs undersökningar av galvaniska anodsystem för katodiskt skydd av betongkonstruktioner

Termiskt sprutade zinkanoder

Under åren 1996 fram till 2015 har RISE KIMAB (fd Korrosionsinstitutet och fd Swerea KIMAB) haft ett flertal forskningsprojekt vars syfte har varit att ta fram underlag och riktlinjer för att använda katodiskt skydd av betongkonstruktioner med olika typer av galvaniska anodsystem, **se bilaga 1**. De flesta undersökningar har genomförts genom kontrollerade fältförsök i olika aggressiva miljöer. Endast en undersökning har genom kontrollerade försök utförts på laboratorium.

Fyra olika offeranoder har ingått i undersökningarna:

- Termiskt sprutad zink (99,995 % Zn) (fyra projekt)
- Termiskt sprutad aluminium-zink-indiumlegering (79,8 % Al, 20 % Zn och 0,2 % In) (ett projekt)
- Zinkfolie (99,995 % Zn) med en jonledande hydrogel (beteckning anod 4724). ett projekt)
- Zinkanoder (Galvashield XP och Galvanode DAS 89) med ett cementhölje innehållande litiumhydroxid (LiOH), ett projekt

Endast zinkanoder (Galvashield XP och Galvanode DAS 89) med ett cementhölje innehållande litiumhydroxid (LiOH) har gjutits in i betongkonstruktionen. De övriga undersökta anodsystemen applicerades direkt på betongytan.

I det första forskningsprojekt utfördes kontrollerade försök i stadsatmosfär av olika galvaniska anodsystem som applicerats på olika förbehandlade betongytor. Av resultaten framgick det att den bästa vidhäftningen mot betongytan uppnåddes med den termiskt sprutade zinkanoden som innehöll 99,5 % zink. Den termiskt sprutade zinkanoden sänkte korrosionshastigheten hos korroderande armeringsstål med ca 83 % i en karbonatiserad betong. Eftersom undersökningarna hade utförts i en icke aggressiv miljö ur korrosionssynpunkt genomfördes ytterligare kontrollerade undersökningar av betongkonstruktioner utsatta för tölsalter med enbart katodiskt skydd med termiskt sprutad zink (99,5 % Zn). Resultaten från undersökningarna visade att den termiskt sprutade zinkanoden sänkte korrosionshastigheten med 95 % jämfört oskyddad stålarmeringen efter två års provning. Den termiskt sprutade zinkanodens vidhäftning mot betongytan efter ca 11 års exponering på Ölandsbron var mycket god (upp till 3,3 MPa).

I de två första undersökningarna användes enbart flamsprutningsteknik för att applicera zinkanoden på betongytan. I de tredje forskningsprojektet var syftet att undersöka möjligheten att använda ljusbågssprutning för att applicera zinkanoden på betongytan.

Ljusbågssprutning har flera fördelar jämfört med flamsprutning, bland annat:

- Högre sprutkapacitet kg/timme
- Billigare process kr/m² betongyta (ingen kostnad för syrgas och bränngas)

- Enklare hantering vid mobila arbeten (inga gastuber)
- Enklare för operatören att spruta.

Från resultaten av undersökningarna med termiskt sprutade zink på armerade betongkonstruktioner kunde följande slutsatser dras:

- Det termiskt sprutade zinkskiktet har en god vidhäftning mot betongen.
- Skyddsförmågan hos zinkskiktet bedöms vara god (gäller Ölandsbron efter 11 års drift). Detta gäller dock inte de zinksprutade betongytorna som exponerats under vattenytan.
- Zinkskiktet är relativt öppet för fukttransport, vilket medför att risken för frostsprängning bedöms vara liten.
- Transporten av klorider in till armering påverkas inte nämnvärt av det sprutade zinkskiktet.
- Betongens resistivitet, dvs fukthalten i betongen, har en stor betydelse för det galvaniska skyddets funktion.
- Både flam- och ljusbågssprutning kan användas för att termiskt spruta zink på betongkonstruktioner

Ingjutningsbara offeranoder av zink med cementshölje innehållande LiOH

I det senaste forskningsprojektet som avslutades 2015 har två olika ingjutningsbara offeranoder av zink har skyddsförmågan hos två olika ingjutningsbara offeranoder av zink med cementshölje (Galvashield XP och Galvanode DAS 89) undersökts. Anoderna placerades i gränsytan mellan ny och gammal betong och syftet var att skydda den äldre och oskadade stålarmeringen mot kloridinitierad korrosion. Parkeringsgaraget som byggdes under åren 1967-1973 renoverades under 2015-2017. Garaget som ligger under markytan uppvisade omfattande skador på betonggolvet till följd av dålig vidhäftning mot armeringen och omfattande armeringskorrosion.

För att undersöka anodernas skyddsförmåga installerades referenselektroder av typen MnO_2/Mn_2O_3 med olika avstånd från anoderna. Mätningar av skyddsförmågan gjordes både med ingjutna referenselektroder och externa referenselektroder. Anoderna galvaniska strömavgivning mättes med en nollresistansamperemeter.

Resultaten från mätningarna visade att Galvanode DAS 89 anoderna hade före ihopkoppling med stålarmeringen en mycket låg egenpotential (korrosionspotential). Potentialen var så låg att det bedömdes att det fanns en risk för vätgasutveckling på anoden innan anslutning till stålarmering.

Strömavgivningen från anoderna var hög initialt (22,7 mA) men avtog med tiden. Efter två års drift var strömavgivningen ca 3,8 mA. En möjlig orsak till den kraftiga sänkningen är att betongen hade torkat och att resistansen hade ökat kraftigt. Mätningarna utfördes sen vår och tidig höst.

Utbredningen av skyddsströmmen från anoderna till armeringen i både nygjuten betong och i en icke reparerad äldre betong var ca 0,2 till 0,3 meter från anoden.

Eftersom betongen var relativt torr vid mätningarna så rekommenderas att utföra mätningar både i torra och mer fuktiga perioder samt under en betydligt längre mätperiod.

4 Slutsatser

Från genomförd litteraturstudie som omfattar användningen av offeranoder vid framförallt partiella reparationer av stora betongkonstruktioner kan följande slutsatser dras:

- Det flesta undersökningar som har publicerats har genomförts genom kontrollerade försök i laboratorium.
- Mätningar på laboratorium och i fält samt datasimuleringar har visat att makroceller (aktiv/passivceller) har bildats mellan armering i ursprunglig betong och armering i reparerad betong.
- När en reparation utförs så är det fördelaktigt om armeringen rengörs innan ingjutning med reparationsbetong och det är också fördelaktigt att välja en reparationsbetong med låg vct.
- För att undvika aktiv/passivceller så kan offeranoder av zink med cementhölje innehållande LiOH användas. De kan installeras både i reparationsbetongen och i en ursprunglig betong men det blir en bättre strömspridning om offeranoderna installeras i en ursprunglig betong nära gränsen till reparationsbetongen.
- Datasimuleringar har visat att aktiv/passivcellen blir störst då resistiviteten i den ursprungliga betongen är låg.

Fält- och laboratorieundersökningar utförda av RISE KIMAB av termiskt sprutade zinkanoder (99,5 % Zn) på betongytor och fältundersökningar av ingjutningsbara offeranoder av zink med cementhölje innehållande LiOH kan följande slutsatser dras:

- Från kontrollerade fältundersökningar av olika termiskt sprutade offeranoder har den bästa vidhäftningen mot betongen uppnåtts med termiskt sprutat zink (99,5 % Zn).
- Skyddsförmågan hos zinkskiktet bedöms vara god (gäller Ölandsbron efter 11 års drift). Detta gäller dock inte de zinksprutade betongytorna som exponerats under vattenytan.
- Det sprutade zinkskiktet är relativt öppet för fukttransport, vilket medför att risken för frostsprängning bedöms vara liten.
- Transporten av klorider in till armering påverkas inte nämnvärt av det sprutade zinkskiktet.
- Betongens resistivitet, dvs fukt- och kloridhalten i betongen, har en stor betydelse för det galvaniska skyddets funktion.
- Både flam- och ljusbågssprutning kan användas för att termiskt spruta zink på betongkonstruktioner.
- Ingjutningsbara offeranoder av zink med ett cementhölje innehållande av litiumhydroxid (LiOH) har initialt en hög strömavgivning, avtar med exponeringstiden. Storleken av strömavgivningen från anoden är beroende av betongens resistivitet. Låg resistivitet i betongen ger en hög strömavgivning från anoden och vice versa.
- Ett fullgott katodiskt skydd (100 mV depolarisation efter 24 timmars frånslag) av stålarmeringen är ofta begränsad till ett nära avstånd från anoden (ca 0,25 m). Anodens placering har betydelse för en effektiv strömspridningen. Om möjligt bör anoden inte placeras direkt på kamstängerna utan i utrymme mellan kamstängerna.

5 Referenslista

- [1] M. S. Ali, E. Leyne, M. Saifuzzaman, and M. S. Mirza, "An experimental study of electrochemical incompatibility between repaired patch concrete and existing old concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 174, pp. 159–172, 2018.
- [2] K. Wilson, M. Jawed, and V. Ngala, "The selection and use of cathodic protection systems for the repair of reinforced concrete structures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 39, pp. 19–25, 2013.
- [3] M. Raupach, "Patch repairs on reinforced concrete structures - Model investigations on the required size and practical consequences," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 28, no. 8, pp. 679–684, 2006.
- [4] J. L. S. Ribeiro, Z. Panossian, and S. M. S. Selmo, "Proposed criterion to assess the electrochemical behavior of carbon steel reinforcements under corrosion in carbonated concrete structures after patch repairs," *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 40–49, 2013.
- [5] K. Wang, P. R. L. Helene, and P. J. M. Monteiro, "Potential use of zinc in the repair of corroded reinforced concrete," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 28, no. 8, pp. 707–715, 2006.
- [6] M. D. Pritzl, H. Tabatabai, and A. Ghorbanpoor, "Laboratory Evaluation of Select Methods of Corrosion Prevention in Reinforced Concrete Bridges," *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 8, no. 3, pp. 201–212, 2014.
- [7] P. Astuti, R. S. Rafdinal, H. Hamada, Y. Sagawa, D. Yamamoto, and K. Kamarulzaman, "Effectiveness of Rusted and Non-Rusted Reinforcing Bar Protected by Sacrificial Anode Cathodic Protection in Repaired Patch Concrete," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 366, no. 1.
- [8] C. Christodoulou, C. I. Goodier, S. A. Austin, G. K. Glass, and J. Webb, "A new arrangement of galvanic anodes for the repair of reinforced concrete structures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 50, pp. 300–307, 2014.
- [9] S. P. Holmes, G. D. Wilcox, P. J. Robins, G. K. Glass, and A. C. Roberts, "Responsive behaviour of galvanic anodes in concrete and the basis for its utilisation," *Corros. Sci.*, vol. 53, no. 10, pp. 3450–3454, 2011.
- [10] N. Rathod, P. Slater, G. Sergi, G. Seveviratne, and D. Simpson, "A fresh look at depolarisation criteria for cathodic protection of steel reinforcement in concrete," *MATEC Web Conf.*, vol. 289, p. 03011, 2019.
- [11] George Sergei. Vector construction, Information från ett webinar "Corrosion Protection and Bridge Concrete Repairs."
- [12] N. Khomwan and P. Mungsantisuk, "Startup Thailand: A new innovative sacrificial anode for reinforced concrete structures," *Eng. J.*, vol. 23, no. 4, pp. 235–261, 2019.

- [13] F. Wang, J. Xu, Y. Xu, L. Jiang, and G. Ma, "A comparative investigation on cathodic protections of three sacrificial anodes on chloride-contaminated reinforced concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 246, 2020.
- [14] G. T. Parthiban, V. Saraswathy, and N. S. Rengaswamy, "Cathodic protection of concrete structures using magnesium alloy anode," *Bull. Electrochem.*, vol. 16, no. 6, pp. 253–257, 2000.
- [15] L. Pistolesi and C. Zaffaroni, "Corrosion protection of embedded steel bars in concrete," in *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 199.
- [16] M. M. S. Cheung and C. Cao, "Application of cathodic protection for controlling macrocell corrosion in chloride contaminated RC structures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 45, pp. 199–207, 2013.
- [17] E. Loziquez, J. F. Barthélémy, V. Bouteiller, and T. Desbois, "Contribution of Sacrificial Anode in reinforced concrete patch repair: Results of numerical simulations," *Constr. Build. Mater.*, vol. 178, pp. 405–417, 2018.
- [18] S. Soleimani, P. Ghods, O. B. Isgor, and J. Zhang, "Modeling the kinetics of corrosion in concrete patch repairs and identification of governing parameters," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 32, no. 5, pp. 360–368, May 2010.

Bilaga 1

Undersökningar av galvaniska anodsystem för katodiskt skydd av betongkonstruktioner utförda av RISE KIMAB - forskningsprojekt 1

I forskningsprojektet *Katodiskt skydd av armerade betongkonstruktioner* som påbörjades under hösten 1996 och avslutades 1999 undersöktes möjligheterna och att skapa förutsättningar för att använda nya, enkla och därmed rationella och kostnadseffektiva lösningar på anodsystem (offeranoder) för katodiskt skydd av armerade betongkonstruktioner.

Inledningsvis i projektet utfördes en litteraturundersökning som omfattade bl. a en grundläggande teoretisk genomgång av galvaniskt katodiskt skydd. Vidare sammanfattades kunskapsläget och erfarenheterna vid användning av nya och enkla anodsystem för att katodiskt skydda stålarmeringen mot korrosion i större betong-konstruktioner utsatta för aggressiva miljöer.

Katodiskt skydd av betongkonstruktioner med offeranoder - teori

När det gäller användningen av katodiskt skydd på betongkonstruktioner med offeranoder så finns det idag i princip två olika sätt att applicera anoderna. Detta görs antingen genom att anoderna placeras på utsidan av betongytan eller gjuts in i betongkonstruktionen. När det gäller betongkonstruktioner som är nedsänkta under vattenytan används oftast anoder som är monterade på betongytan. Under senare år har även ingjutna offeranoder används för betongkonstruktioner både nedsänkta under vatten och i atmosfären. I atmosfärsdelen används offeranoder som påsprutats termiskt eller påklistrade på betongytan eller offeranoder som är helt ingjutna i betongkonstruktionen.

Den skyddsström som erhålls på galvanisk väg genom att sammankoppla stålarmeringen som skall skyddas mot korrosion med en oädlare metall, t ex av zink- eller aluminiumlegeringar. Som drivkraft för skyddsströmmen utnyttjar man den potentialskillnad (galvanisk spänning) som råder mellan anoden och stålarmeringen.

En förutsättning att det galvaniska skyddet skall fungera är att de båda metallerna samtidigt är i kontakt med betongen. Vid galvaniskt katodiskt skydd av ingjuten stålarmering används vanligen offeranoder av zink- eller aluminiumlegeringar. De anodmaterial som för galvaniskt skydd av betongkonstruktioner är i stort sett samma som används på stålkonstruktioner i havs- och bräcktatten samt i jord.

Oberoende av vilken typ av anodmaterial som används till offeranoderna så kommer anoderna att förbrukas på grund av:

- Strömavgivning till det ingjutna armeringsstålet
- egenkorrosion

Med egenkorrosion menas ”vanlig” korrosion av anoden utan någon strömväggning till korroderande stålytor. Eftersom offeranoderna också förbrukas genom egenkorrosion blir inte anodernas strömutbyte (verkningsgrad) 100 %.

Strömväggningen från offeranoderna bestäms eller begränsas av olika faktorer:

- ytan hos det skyddande föremålet, dvs ytan hos stålarmeringen
- betongens resistivitet
- betongens temperatur
- offeranodernas geometriska utformning
- stålarmeringens geometriska utformning

Avgiven ström från offeranoder beräknas enligt ohms lag:

$$I_{\text{avg}} = \Delta U/R$$

där

ΔU = potentialskillnad mellan stålyta och anoden i hopkopplade tillstånd, V

R = total resistans i den elektriska kretsen, Ω

I_{avg} = avgiven strömstyrka, A

Den totala resistansen i den elektriska kretsen består bl a av:

- offeranodens utbredningsresistans
- resistansen i kontaktstället mellan offeranod och skyddsföremålet, i detta fall avses resistansen mellan offeranod och det ingjutna armeringsstålet
- resistansen i betongen
- resistansen pga beläggning på armeringsstålet

Den dominerande resistansen i kretsen för en armerad betongkonstruktion i t ex havsvatten är normalt anodens utbredningsresistans. Vid dimensionering av katodiskt skydd med offeranoder på armerade betongkonstruktioner bör även armeringens utbredningsresistans tas med i den totala resistansen. Vid beräkning av maximal strömväggning hos offeranoder i havsvatten som skall skydda ingjuten stålarmering sätts alla resistanser utom anodens utbredningsresistans till noll. För att erhålla hög effektivitet hos skyddet måste dock resistansen i kontaktstället offeranod och armeringsstålet minimeras. Det rekommenderas att anoden fastsätts i armeringen genom svetsning.

Anodens utbredningsresistans beror på anodens geometri, skyddsföremålets geometri och vattnets /betongens resistivitet.

Utbredningsresistansen för en anod av formen som en cirkelplatta beräknas enligt [4]

$$R_{\text{utb}} = \frac{\rho}{2d}$$

där

R_{utb} = anodens utbredningsresistans, Ω

p = vattnets/betongens resistivitet, Ωm

Utbredningsresistansen för en stavanod inbörad i betong kan beräknas enligt [3]

$$R_{utb} = \frac{p}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}$$

där

R_{utb} = anodens utbredningsresistans, Ω

p = vattnets/betongens resistivitet, Ωm

l = anodens längd, m

d = anodens diameter, m

En kort och tjock offeranod har högre utbredningsresistans än en lång och smal offeranod och därmed blir strömvägningsläget från den korta offeranoden [4].

Vid beräkning av strömvägningsläget från en offeranod används anodens elektropotential vid strömbelastning, dvs anoden är ihopkopplad med armeringsstålet [4].

Vid beräkning av potentialskillnaden mellan skyddsföremål (den ingjutna stålarmeringen) och offeranod måste hänsyn tas till den elektrokemiska polarisationen hos stålets och offeranodernas ytor. Med polarisation avses här elektropotentialens avvikelse vid strömbelastning från den ursprungliga korrosionspotentialen [4].

$$\eta = E(i) - E(korr)$$

Där

η = polarisation, V

$E(i)$ = elektropotential vid en viss strömtäthet i , V

$E(korr)$ = korrosionspotential, V

Den elektrokemiska polarisationen består i huvudsak av:

- aktiveringspolarisation
- koncentrationspolarisation
- resistanspolarisation

Aktiveringspolarisationen beror av kinetiken och reaktionshämningar för elektrodreaktionerna. Om aktiveringspolarisationen kan hänföras till en specifik elektrodreaktion brukar man tala om överspänning. Exempel på överspänningar är väteöverspänning vid vätegasutveckling och syrgasöverspänning vid syrgasreduktion. Koncentrationspolarisation beror på transporthämning för att reagerande eller bildat ämne vid elektrodytan. Om ingen koncentrationspolarisation skall uppstå krävs att transporten av reagerande ämnen (reaktioner) till elektrodytan och borttransporten av bildade ämnen (produkter) från elektrodytan till elektrolytens huvudmassa (bulklösning) sker med samma hastighet som de förbrukas eller bildas i elektrodreaktionen.

Resistanspolarisation innebär att ett skikt eller en beläggning ger upphov till ett resistivt spenningsfall eller på andra resistanser i strömkretsen.

För en betongkonstruktion som ligger under vattenytan har den ingjutna armeringen en elektropotential av ca -600 mV relativt mättad Cu/CuSO₄ och för en aluminiumlegering är elektropotentialen i havsvatten -1150 mV relativt mättad Cu/CuSO₄. Vid hopkoppling av offeranoden med den ingjutna stålarmingen kommer armeringen att polariseras flera hundra millivolt i negativ riktning och aluminiumlegeringen polariseras måttligt, ca 50 mV, i positiv riktning.

Ett bra anodmaterial skall ha en flack anodisk polarisationskurva, dvs elektropotentialen skall ändra lite vid strömbelastning eller man kan säga att anoden skall ha en liten polarisation. Al-In-Zn är ett bra anodmaterial med en låg polarisation vid strömbelastning [4].

Vid beräkning av maximal strömavgivning används armeringsstålets mest positiva elektropotential vid fullständigt katodiskt skydd, dvs den potential då precis fullständigt katodiskt skydd är $E(\text{skydd}) \leq -850$ mV rel. Mättad Cu/CuSO₄. Om man utgår från att korroderande stålarmingen en korrosionspotential på -600 mV relativt mättad Cu/CuSO₄ måste man för att erhålla fullständigt katodiskt skydd förskjuta stålets potential minst 250 mV i negativ riktning.

Om man utgår från att aluminiumanodens potential vid fullständigt skydd av stålet är förskjuten 50 mV i positiv riktning från -1150 mV till -1100 mV relativt mättad Cu/CuSO₄ blir potentialskillnaden mellan stålarmingen och offeranoden i hopkopplat tillstånd $\Delta U = E(\text{skydd}) - E(\text{anod}) = -250$ mV

Initialt vid idrifttagandet är ΔU större än 0,25 V men potentialskillnaden minskar alltmer ju mer armeringen polariseras.

Vid beräkning av maximal strömavgivning från aluminiumanoden vid skydd av betongingjutet stål i havsvatten bör värdet $\Delta U = 0,25$ V användas. Maximal avgiven ström från aluminiumanoder kan beräknas enligt:

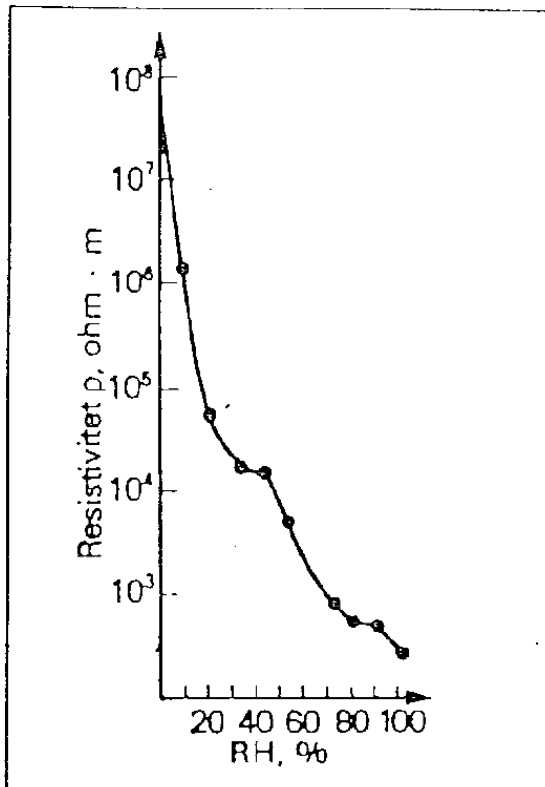
$$I_{avg} = \frac{0,25}{R_{utb}}$$

där

I_{avg} = avgiven strömstyrka från aluminiumanod, A

R_{utb} = utbredningsresistans för anoden, Ω

När det gäller betongens resistivitet bestäms den av en rad faktorer såsom vatten/bindemedelstalet (vbt), fukthalt, kloridhalt, temperatur, cementtyp och eventuellt tillsatsmedel. Betongens resistivitet beror i hög grad av fukthalten i betongen och kan variera inom vida gränser, **figur 1B**. Väderårstidsvariationer i fukthalt och temperatur har således stor inverkan på den aktuella resistiviteten i en betongkonstruktion. I en nygjuten och härdad betongkonstruktion varierar resistiviteten normalt mellan 100 och 150 Ωm . I en karbonatiserad betong kan resistiviteten ligga upp mot ca 5000 Ωm .



Figur 1B. Betongens resistivitet som funktion av relativa fuktigheten [4]

När det gäller ett galvaniskt katodiskt skydd har resistiviteten i den miljö som omger offeranoden stor betydelse hur bra skyddsförmågan är. Undersökningar utförda i Florida, USA har visat att erforderligt katodiskt skydd kan erhållas vid betongresistiviteter upp mot 1000 Ωm . En del forskare menar att offeranoder inte bör användas när resistiviteten i elektrolyten överstiger 20 Ωm [4].

Den yta hos den ingjutna stålarmeringen som erhåller katodiskt skydd kan beräknas utgående från erforderligt strömbehov, i_{erf} för att erhålla fullständigt katodiskt skydd och avgiven maximal strömstyrka från offeranoden.

$$i_{erf} = \frac{I_{avg}}{A_{skydd}}$$

där

i_{erf} = erforderlig skyddsströmtäthet för att erhålla fullständigt katodiskt skydd, A/m^2

I_{avg} = maximalt avgiven strömstyrka från offeranod, A

A_{skydd} = katodiskt skyddad stålyta i betong, m^2

För armeringsstål ingjutet i betong som exponeras i havsvatten kan ett riktvärde på erforderligt strömbehov uppskattas till ca 2,0 mA/m²stålyta för att sänka elektrodpotentialen till skyddspotential. En armeringsstålyta av 1 m² skulle alltså kräva en strömstyrka på 2,0 mA för att erhålla fullständigt katodiskt skydd. I en betongkonstruktion i atmosfären sänks enbart några 100 mV och man eftersträvar inte att sänka skyddspotentialen ned till – 850 mV relativt mättad Cu/CuSO₄ utan man erfordrar en potentialavklingning på minst 100 mV vid 24 timmars isärkoppling av offeranoderna från stålarmeringen. Detta är i princip inte möjligt att utföra eftersom den elektriska kontakten mellan armering och offeranoden inte kan brytas.

Vid beräkning av anodens totala livslängd, dvs tiden till att all anod har förbrukats använd följande samband [4]:

$$L = \frac{Q \cdot \alpha \cdot m \cdot 1,14 \cdot 10^{-6}}{I_{avg}}$$

där

L = anodens totala livslängd, år

m = anodens massa, kg

α = strömutbyte, %

Q = strömkapacitet hos anoden, Ah/kg

I_{avg} = avgiven ström, A

Anodens massa avser endast anodmaterialets massa och inte anodens totala massa som inkluderar fästansordningar etc.

Strömutbytet α definieras enligt [4]:

$$\alpha = 100 \frac{I_{avg}}{I_{avg} + I_{korr}}$$

där

α = strömutbyte, %

I_{avg} = strömgivning från anoden till stålarmering, A

I_{korr} = egenkorrosion uttryckt som korrosionsström, A

När hänsyn tas till den verkliga egenkorrosionen och inget erfarenhetsvärde används på strömutbytet modifieras ekvationen till [4]:

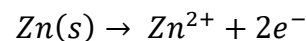
$$L = \frac{Q \cdot m \cdot 1,14 \cdot 10^{-4}}{I_{\text{avg}} + I_{\text{korr}}}$$

För t ex aluminiumanoder med $Q = 2980$ Ah/kg blir

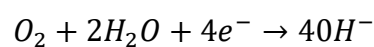
$$L = \frac{0,34 \cdot m}{I_{\text{avg}} + I_{\text{korr}}}$$

Vid egenkorrosion av offeranoden, dvs om den inte kopplas till armeringsstålet, sker anod- och katodreaktionerna på dess yta. I detta fall har reaktionerna samma hastighet, dvs anodreaktionerna producerar lika många elektroner som katodreaktionen konsumerar.

Anodreaktionen (upplösning av anoden) för två olika anoder enligt [4]:

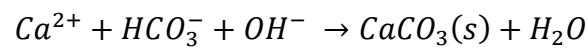


Katodreaktion (syrgasreduktion dvs, syrgas (O_2) löst i betongens porvatten förbrukas och hydroxidjoner OH^- vid denna reaktion):



Vid inkopplat katodiskt skydd med offeranoder sker anodreaktionen på offeranodens yta medan huvuddelen av katodreaktionen sker på den skyddade metallytan. Även vid inkopplat skydd sker egenkorrosion på anodmaterialet.

Vid katodreaktionen sker en syrgasreduktion vilket förbrukar löst syrgas (O_2) i betongporvattnet och hydroxidjoner (OH^-) bildas på metallytan. Bildning av hydroxidjoner på metallytan innebär att det sker en alkalisering (pH-höjning) på metallytan. Denna alkalisering medför att det kan ske sekundära kemiska reaktioner. Vid katodiskt skydd sker alkalisering i huvudsak på den skyddade stålytan, vilket kan ge upphov till t ex bildning av kalciumkarbonat $CaCO_3$ enligt:

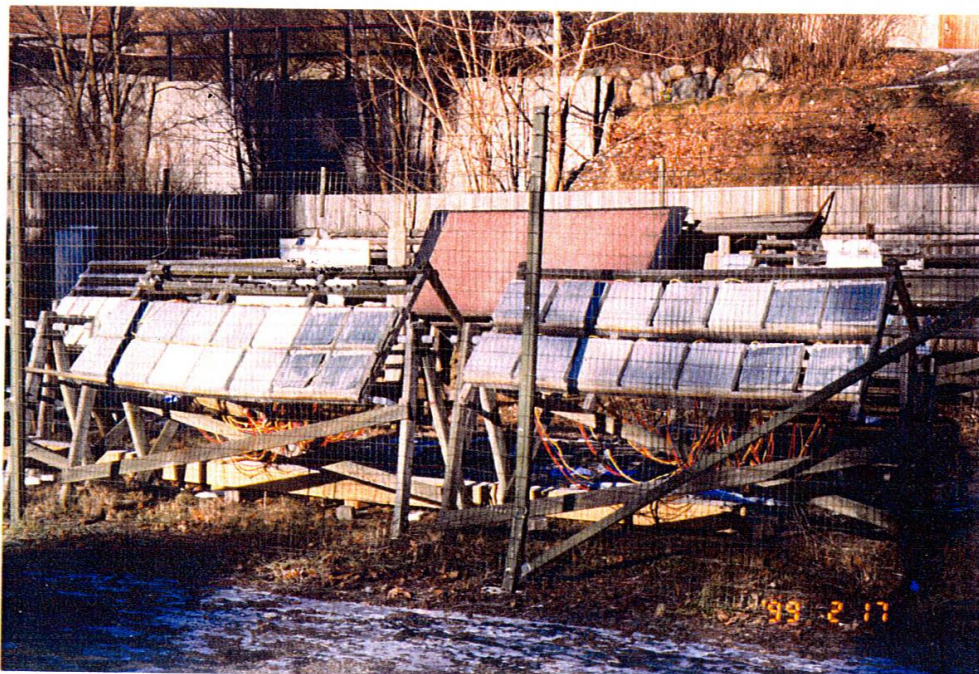


Resultaten från litteraturundersökningen visade att flera intressanta försök hade gjorts med galvaniska offeranoder som termiskt sprutats på betongytan för att skydda armeringsstålen i betongkonstruktion mot korrosion. Några vanliga använda anodsystem var termiskt sprutade offeranoder av zink och aluminiumlegeringar. Det förekom även försök med en zinkfolieanod med en jonledande hydragel på zinkytan som enkelt limmades på betongytan. Några tidigare utförda undersökningar hade visat att dessa enkla och relativt billiga anodsystem fungerade bra på betongkonstruktioner belägna i ett klimat med hög luftfuktighet och höga temperaturer. Eftersom det inte då var klarlagt om dessa anodsystem kunde fungera under skandinaviska klimatförhållanden påbörjades år 1997 kontrollerade experimentella utomhusundersökningar med syfte att söka besvara om tre mest lovande och intressanta galvaniska anodsystem skulle kunna skydda ingjutna armeringsstål mot korrosionsangrepp under skandinaviska klimatförhållanden.

Utomhusprovning av galvaniska anodsystem för katodiskt skydd av armerade betongkonstruktioner – forskningsprojekt II

Genomförande

För att fastställa möjligheterna att under skandinaviska förhållanden använda offeranoder monterade på betongytan för att skydda armeringsstål mot korrosionsangrepp genomfördes en kontrollerad utomhusexponering av speciellt framtagna betongblock applicerade med eller utan offeranoder [5]. Betongblocken, som placerades utomhus vid Korrosionsinstitutets provningsstation i Stockholm, monterades på stativ med en 45 graders lutning i riktning mot söder, **figur 2B**.



Figur 2B. Betongblock placerade utomhus vid Korrosionsinstitutets provningsstation i Stockholm med en 45 graders lutning i riktning mot söder [5]

I varje betongblock (storlek 0,3x0,3x0,05 m) finns tre noggrant vägda provstänger av kolstål (diameter 16 mm och längd 250 mm). I **tabell 1B** framgår den kemiska sammansättningen hos provstängerna.

Tabell 1B. Provstängernas kemiska sammansättning (mass-%) [5].

C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Cu	Mo	Fe
0,17	0,26	0,74	0,02	0,04	0,01	0,09	0,32	0,02	rest

På hälften av betongblocken har olika offeranoder monterats på betongblockens yta. I varje betongblock finns, förutom provstänger, även en ingjuten referenselektrod av MnO_2/Mn_2O_3 (ERE 10). Samtliga provstänger (kamstänger) som ingick i undersökningarna göts in i betongblock med 2 % klorider/torr cementvikt och med ett vattenbindemedelstal (vbt) på 0,6. Provstängernas täckande betongskikt (avstånd mellan provstång och betongyta) var ca 15 mm. Betongblockens sammansättning framgår av **tabell 2B**.

Tabell 2B. Betongblockens sammansättning (recept)[5]

Cement Std P Slite 2,6 kg	2,6 kg
Ballast	
Fraktion med kornstorlek 0-8 mm	9,2 kg
Fraktion med kornstorlek 8 - 16 mm	8,0 kg
Totalt	17,2 kg
Blandvatten	1,56 kg
NaCl, purum	0,086 kg

Före appliceringen av de olika anodsystemen utsattes hälften av betongblocken för en artificiell koldioxidatmosfär (5 % CO_2). Innan appliceringen av de olika anodsystemen kontrollerades de karbonatiserade betongblockens karbonatiseringsdjup. Resultaten från dessa mätningar visade att de karbonatiserade betongblocken var i princip helt genomkarbonatiserade.

Tre olika offeranoder ingick i undersökningarna:

- Termiskt sprutad zink (99,995 % Zn)
- Termiskt sprutad aluminium-zink-indiumlegering (79,8 % al, 20 % Zn och 0,2 % In)
- Zinkfolie (99,995 % Zn) med en jonledande hydrogel (beteckning anode 4724)

Anodmaterialen för de termiskt sprutade anoderna levererades i form av tråd (tråddiameter

3,16 mm). Zinktråden levererades av Sulzermeco (Norden) AB och aluminium-zink-indiumtråden levererades av Corropro Companies, Inc, Ohio, USA.

Vid den termiska sprutningen på den lätt blästrade betongytan användes flamsprutningsteknik. All sprutning av betongblocken utfördes av Sulzermeco (Norden) AB med en utrustning av märket Metco I4E-H. De sprutade anodskiktens tjocklek varierade mellan ca 300 och 500 μm .

Zinkfolieanoden med jonledande hydrogel, levererades av 3M Industrial Tape and Specialities Division. Den består av en tunn zinkfolie (ca 250 μm) som är belagd med en jonledande och en mycket bra vidhäftande akrylat (750 μm). Akrylatet skyddas vid leverans i sin tur mot smuts och föroreningar med en skyddstejp (130 μm). Strax före användning av zinkfolieanoden tas skyddstejpen bort och zinkfolien trycks fast på betongytan och ansluts till armeringen.

Ett flertal mätningar genomfördes under försökets gång eftersom från varje enskild provstång, anod och referenselektrod finns mätkablar monterade för olika mätningar under försökets gång. Mätningarna utfördes antingen manuellt (vid fem olika tillfällen) eller kontinuerligt var sjätte timme.

Följande manuella mätningar utfördes under exponeringen:

- Anodernas elektropotential.
- Provstängernas elektropotential.
- Total strömvärdning från anoderna.
- Depolarisationsmätningar (potentialavklängning efter 24 timmars i särkoppling av anod och provstång).

Följande kontinuerliga mätningar utfördes under utomhusprovet:

- Blandpotential mellan anod och kamstänger.
- Kamstängernas elektropotential utan katodiskt skydd
- Lufttemperatur och luftens relativa fuktighet.

Efter avslutad exponering bestämdes provstängernas (både katodiskt skyddade och oskyddade) korrosionstillstånd genom att betongblocken slogs isär efter olika exponeringstider. Korrosionen (avfrätningen i μm) hos provstängerna efter olika exponeringstider bestämdes genom att provstängerna betades i Clarks lösning (20 g/l Sb_2O_3 och 60 g/l $\text{SnCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ i koncentrerad HCl) vid rumstemperatur med upprepade betning 4x5 minuter. Den uppkomna massförlusten hos provstängerna efter betningen redovisades som en avfrätning uttryckt i μm . Vid första intaget (endast oskyddade provstänger) utvärderades 24 provstänger. Vid det andra intaget (både skyddade och oskyddade provstänger) utvärderades 48 st provstänger.

För att kunna kvantifiera anodernas skyddseffektivitet har korrosionen hos kamstängerna uttrycks som avfrätningen i μm efter en viss tidsperiod.

De olika anodernas skyddseffektivitet fastställdes genom att jämföra korrosionen hos katodiskt skyddade ingjutna kamstänger med korrosionen hos oskyddade ingjutna kamstänger efter ca ett års exponering utomhus. Skyddsgraden, p, efter ett års exponering beräknades

enligt följande:

$$\rho = 100 \cdot (V_0 - V)/V_0$$

där

p = Skyddsgrad i %, dvs. sänkningen av korrosionen vid anslutning av katodiskt skydd.

V_0 = Korrosionen i μm hos icke katodiskt skyddade provstänger efter ett års utomhus-exponering.

V = Korrosionen i μm hos katodiskt skyddade kamstänger efter ett års utomhusexponering.

Anodernas vidhäftningsförmåga till betongblockens yta bestämdes genom att mäta vidhäftningsförlusten av anoden till betongytan efter avslutad exponering. Detta uttryckts i % av den totala anodytan. Vid 100 % vidhäftningsförlust hade hela anoden släpp från betongblockets yta och vid 0 % vidhäftningsförlust hade hela anoden god vidhäftning till betongytan.

Betongens resistivitet mättes före appliceringen av anoderna med Wenners 4-elektrodmätmetod. Med denna metod mäts ett medelvärde av resistiviteten genom att trycka fyra elektroder (med fuktiga träpluggar) mot betongytan. Via mätledningar ansluts elektroderna till en resistivitetmätare (växelström) så att mätströmmen sänds mellan de två yttre elektroderna och potentialfallet mäts mellan de två inre elektroderna.

Från resultaten av mätningar av de olika katodiska skyddsparametrarna under ett års utomhusexponering kan följande slutsatser dras:

De olika anodernas förmåga att minska korrosionen hos korroderande kamstänger är helt beroende av anodernas förmåga att avge skyddsström. Strömavgivningen från anoden var i sin tur beroende av elektropotentialskillnaden mellan kamstänger och anoden, anodens vidhäftning mot betongytan, betongytans karbonatiseringsgrad samt betongens resistivitet (fukt- och kloridhalt).

Resultat och slutsatser

Från resultaten av de återkommande kontrollmätningarna av katodisk skyddseffektivitet framgick det att den *sprutade zinkanoden* gav ett bra skydd i början, både i en karbonatiserad och i en icke karbonatiserad betong. I den icke karbonatiserad betong avtog emellertid skyddsverkan efter tre månaders exponering. Den sprutade *aluminium-zink-indium anoden* gav ett bra skydd i början men dåligt skydd efter fyra månaders av exponeringsperioden i både karbonatiserad och icke karbonatiserad betong. Den pålimmade *zink-folieanoden* med en jonledande hydrogel gav ett bra skydd i både karbonatiserad och i icke karbonatiserad betong under hela exponeringsperioden.

Från resultaten av kvantifieringen av anodernas skyddseffektivitet efter ett års utomhus-exponering av skyddade och icke skyddade kamstänger framgick det att korrosionen (avfrätningen) hos icke skyddade kamstänger efter ett års exponering var ca 6 μm (i en icke karbonatiserad betong) respektive ca 16 μm (i en karbonatiserad betong).

Avfrätningen, hos de ingjutna provstängerna som skyddats under ett år med en *sprutad zinkanod*, minskade med 83 % i en karbonatiserad betong respektive 29 % i en icke

karbonatiserad betong jämfört med avfrätningen hos oskyddade provstänger. Den dåliga skyddseffektiviteten hos den sprutade zinkanoden beror på passivering av zinkytan från den för hårt blåstrade alkaliska betongytan. Anoden hade en bra vidhäftning mot både karbonatiserad och icke karbonatiserad betongyta.

Avfrätningen, hos de ingjutna kamstänger som skyddats under ett år med en sprutad *aluminium-zink-indiumanod*, minskade med 69% i en karbonatiserad betong respektive 79 % i en icke karbonatiserad betong jämfört med avfrätningen hos oskyddade kamstänger. Anoden hade dock mycket dålig vidhäftning mot både karbonatiserad och icke karbonatiserad betongyta.

Avfrätningen, hos de ingjutna kamstänger som skyddats under ett år med en pålimmad *zinkfolieanod med jonledande hydrogel*, minskade med 90% i karbonatiserad betong respektive 78 % i en icke karbonatiserad betong jämfört med avfrätningen hos oskyddade provstänger. Anoden hade dålig vidhäftning mot icke karbonatiserad betongyta efter ett års utomhusexponeringen och anoden var lokalt helt förbrukad.

Sammanfattningsvis visade undersökningarna att efter ett års utomhusexponering i en icke aggressiv miljö att galvaniska anodsystem av *termiskt sprutad zink* mycket väl kan användas på karbonatiserade betongytor under skandinaviska klimatförhållanden får att skydda den ingjutna och korroderande stålarmeringen mot fortsatta korrosionsangrepp. Eftersom provningen pågick endast i ca ett år i en icke aggressiv utomhusmiljö rekommenderades det att provningen bör genomföras under mer verklighetstroga förhållanden i en mer aggressiv miljö.

Katodiskt skydd av kantbalken på Ölandsbron med termiskt sprutad offeranod av zink – forskningsprojekt III

I det nordiska samarbetsprojektet *Tillämpad undersökning av nya anodsystem för katodiskt skydd av armerade betongkonstruktioner – nordiskt samarbetsprojekt* som påbörjades under hösten 2000 och avslutades 2002 undersöktes möjligheterna och att skapa förutsättningar för att använda nya, enkla och därmed rationella och kostnadseffektiva lösningar på olika anodsystem (både elektrolytiska och galvaniska anodsystem) för katodiskt skydd av armerade betongkonstruktioner

Syftet med undersökningarna var bland annat att ta fram ett ekonomiskt och tekniskt underlag för användning av katodiskt skydd med enkla installerade anodsystem som ska skydda kantbalksarmeringen mot kloridinitierad korrosion och räckesståndarna mot galvanisk korrosion.

Genomförande

Följande fyra anodsystem ingick i undersökningarna:

- Infräst trådanod av ädelmetallbelagt titan (skydd med påtryckt ström).
- Inborrad stavanod av ädelmetallbelagt titan (skydd med påtryckt ström)
- Fastmålade ytanoder av grafitduk (skydd med påtryckt ström)

- Påsprutad ytanod av zink (galvaniskt skydd)

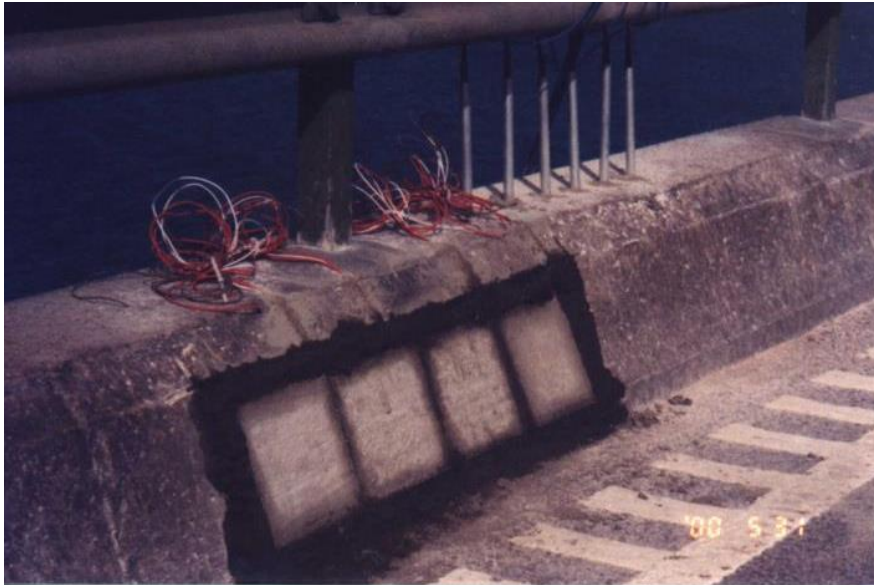
Den termiskt påsprutade zinkanoden innehöll 99,995 % zink. Före flamsprutning rengjordes kantbalkens yta med högtryckstvätt. Därefter torkades kantbalkens yta med en gasolbrännare. Vid sprutningen användes flamsprutningsteknik, **figur 3B**. Anodens skiktjocklek varierade mellan 300 och 500 μm . Anoden anslöt till armeringen genom att blottlägga armeringen i kantbalken och därefter spruta på zink så att ett sammanhängande zinkskikt erhöles mellan armeringen och zinkanoden. Den totala anodens yta som påsprutade var 38 m^2 och den sprutade betongytan var också 38 m^2 . Anodmaterialet levererades av SulzerMetco (Norden) AB. Blästring av betongyta och påsprutning av zinken utfördes av Flamsprutarna AB.



Figur 3B. Termisk påsprutning genom flamsprutningsteknik av zink på kantbalk vid Ölandsbron [5].

För att undersöka möjligheten att under aggressiva förhållanden använda termiskt sprutade zinkanoder för att skydda stålarmingen i kantbalken och delvis ingjutna räcke- och stålpelare mot korrosion utfördes en kontrollerad utomhusprovning på kantbalken vid Ölandsbron.

Fem olika provplatser valdes ut för provning utefter den norra kantbalken på en sträcka av ca 200 meter. Vid fyra av provplatserna installerades olika katodiska skydd med enkla monterade anodsystem. Vid varje provplats finns fyra speciellt framtagna betongblock med provstänger av kolstål som gjutits in i kantbalken samt sex varmförzinkade provstänger som delvis är ingjutna i kantbalken, **figur 4B**. Vid den femte provplatsen installerades inget katodiskt skydd.



Figur 4B. Provplats för inmontering av betongblock med provstänger av kolstål samt delvis ingjutna varmförzinkade provstänger.

Som provstänger av kolstål ingjutna i betongblock användes släta stänger av stålqualiteten Ss 260S av SS-Stål 14 11-10 enligt svensk standard SS 14 14 11. Stängerna som tillverkats av Fundia Armering AB, Halmstad har en diameter av 8 mm och en längd av 100 mm.

Som provstänger, som delvis är ingjutna i kantbalken, användes varmförzinkade provstänger av en diameter av 16 mm och en längd av 300 mm och en zinksiktjocklek av ca 110 µm.

Vid framtagning av betongblock med ingjutna provstänger användes kromtreducerande Portlandscement, Std P Slite med beteckningen CEM I enligt svensk standard 197-1:2000.

Ett flertal olika mätningar genomfördes under försökets gång. Mätningarna utförs antingen manuellt (tre mättillfällen per år) eller kontinuerligt med datalogger var sjätte timme.

Följande manuella mätningar utförs under provningen:

- Depolarisationsmätning (potentialavklingning efter 24 timmars frånslag av det katodiska skyddet).

Följande kontinuerliga mätningar utfördes under provningen:

- De ingjutna provstängernas elektropotential vid drift av katodiskt skydd.
- De ingjutna provstängernas elektropotential utan katodiskt skydd.

Efter både ett och två års utomhusprovning vid Ölandsbron slogs tio stycken betongblock per år isär. De både skyddade och icke skyddade provstängernas korrosionstillstånd bestämdes genom att dels okulärt inspektera provstängerna korrosionsutseende, dels genom att utvärdera den jämna avfrätningen (korrosionen) efter ett och två års drift av de olika katodiska skydden. Avfrätningen (korrosionen) utvärderades genom massförlustbestämning. Tillvägagångssättet är att provstängerna exponeras under en bestämd tid i ett korrosionsmedium, som i detta fall utgjordes av både betong och vägmiljö. Massminskningen (massförlusten) pga korrosionen

bestämdes genom att provstängerna vägs före exponeringen och vid exponeringens slut, efter det att provstängerna rengjorts från korrosionsprodukter, betongrester och vägsmutts. Detta gjordes genom en upprepad betning i ett betmedel, som väljs med hänsyn till metallen. De varmförzinkade stängerna betades i mättad glyciniösning ($\text{CH}_2\text{NH}_2\text{COOH}$ löst i avjoniserat vatten) vid rumstemperatur. Provstängerna av kolstål betades i Clarkes lösning (20 g/l Sb_2O_3 och 60 g/l $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) vid rumstemperatur. Vid beräkningen av avfrätningen hos zinkskiktet på provstängerna av varmförzinkat stål användes densiteten 7200 kg/m^3 och för kolstål användes densiteten 7800 kg/m^3 . För de varmförzinkade provstängerna som delvis varit ingjutna i kantbalken utvärderades den lokala medelavfrätningen genom att jämföra zinkskiktets ursprungliga tjocklek med zinkens skiktjocklek efter ett respektive två års provning. Mätningarna utfördes på tre olika ställen utefter provstängerna.

Skyddseffektiviteten hos de olika anodsystem har utvärderats på två olika sätt:

- Konventionell potentialmätning (indirekt metod).
- Bestämning av korrosionen (den jämna avfrätningen) hos skyddade och oskyddade provstänger (direkt metod).

Vid en konventionell potentialmätning kontrollerades de olika anodsystemens skyddseffektivitet genom att mäta hur många millivolt potentialen förflyttas i positiv riktning under 24 timmar efter brytningen av skyddsströmmen. Skyddsströmmen bryts alltså och potentialen mäts omedelbart, en bråkdel av en sekund efter brytningen ($E_{\text{från}}$), dels efter att strömmen varit frånslagen 24 timmar, ($E_{24 \text{ tim}}$). Skydd har uppnåtts om skillnaden mellan de båda potentialerna ($E_{24 \text{ tim}}$) och ($E_{\text{från}}$) är minst 100 mV. Detta kan även skrivas

$$\Delta E_{(\text{dep}24\text{tim})} = (E_{24 \text{ tim}}) - (E_{\text{från}}) \geq 100 \text{ mV}$$

En kvantifiering av anodsystemens skyddseffektivitet (skyddsgrad) utfördes genom att bestämma avfrätningen hos skyddade och icke skyddade provstänger. Skyddsgraden, p, efter avslutad exponering bestämdes enligt följande:

$$p = 100 (V_0 - V)/V_0$$

där

p = Skyddsgrad i %, dvs den procentuella sänkningen av korrosionen (avfrätningen) efter två års provning.

V_0 = Avfrätning, uttryckt i μm , hos oskyddade provstänger efter två års provning.

V = Avfrätning, uttryckt i μm , hos skyddade provstänger efter två års provning.

En viktig parameter för att bedöma hur bra de olika skydden fungerade var att mäta skyddseffektiviteten. En styrka i undersökningen är att det har varit möjligt att erhålla ett kvantitativt mått på skyddseffektiviteten uttryckt som sänkning av korrosionen (avfrätningen) som följd av inkopplat katodiskt skydd. Även en gradering av de olika katodiska skyddens skyddsförmåga har kunnat fastställas. Att undersökningens uppläggning medgivit att skyddseffektiviteten har kunnat kvantifieras måste vid en jämförelse med andra liknande undersökningar på samma område, betraktas som unikt. Det normala är att skyddseffektiviteten erhålls indirekt, genom mätningar av potentialnivåer. Kvantifiering av skyddseffektiviteten

medger i sin tur att en uppskattning av konstruktionens livslängdsökning, som följd av installerat katodiskt skydd.

Övriga resultat som redovisas är bland annat:

- Skyddspotentialer hos provstänger
- Korrosionspotentialer hos provstänger
- Provstängernas korrosionstillstånd efter två års exponering
- Okulärbesiktning av utseendet hos de olika anodsystemen efter två års drift.

Skyddseffektiviteten hos de olika anodsystemen kontrollerades tre gånger under det första året och tre gånger under det andra året. Detta utfördes genom att mäta depolarisationsgraden (potentialavklingningen) hos samtliga skyddade provstänger efter 24 timmars frånslag av det katodiska skyddet. För att uppnå det gällande depolarisationskriteriet, $\Delta E_{(\text{dep } 24 \text{ tim})} \geq 100 \text{ mV}$, måste provstängernas potentialvärde förflyttas i positiv riktning minst 100 mV när skyddsströmmen slagits ifrån. Hänsyn vid beräkning måste tas till det uppkomna IR-fallet som förfalskar mätvärdet.

Resultat

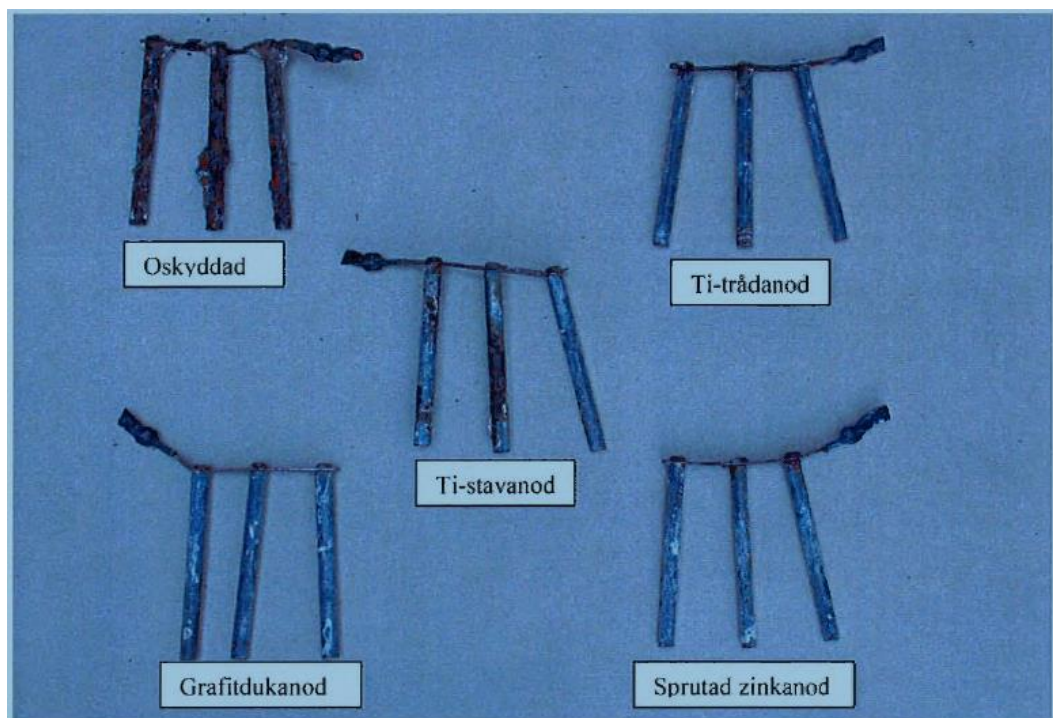
I **tabell 3B** visas resultat från depolarisationsmätningar av ingjutna provstänger av stål som katodiskt skyddats med termiskt sprutad zinkanod. Mätningarna utfördes vid sex olika tillfällen under exponeringen.

Från resultaten av potentialmätningarna i **tabell 3B** framgick det att depolarisationskriteriet, 100 mV depolarisation efter 24 timmar uppnåddes vid 14 av totalt 18 mättillfällen under den tvååriga provningen.

Tabell 3B. Resultat från potentialmätningar av betongingjutna provstänger av kolstål som skyddats av termisk sprutad zinkanod [5]

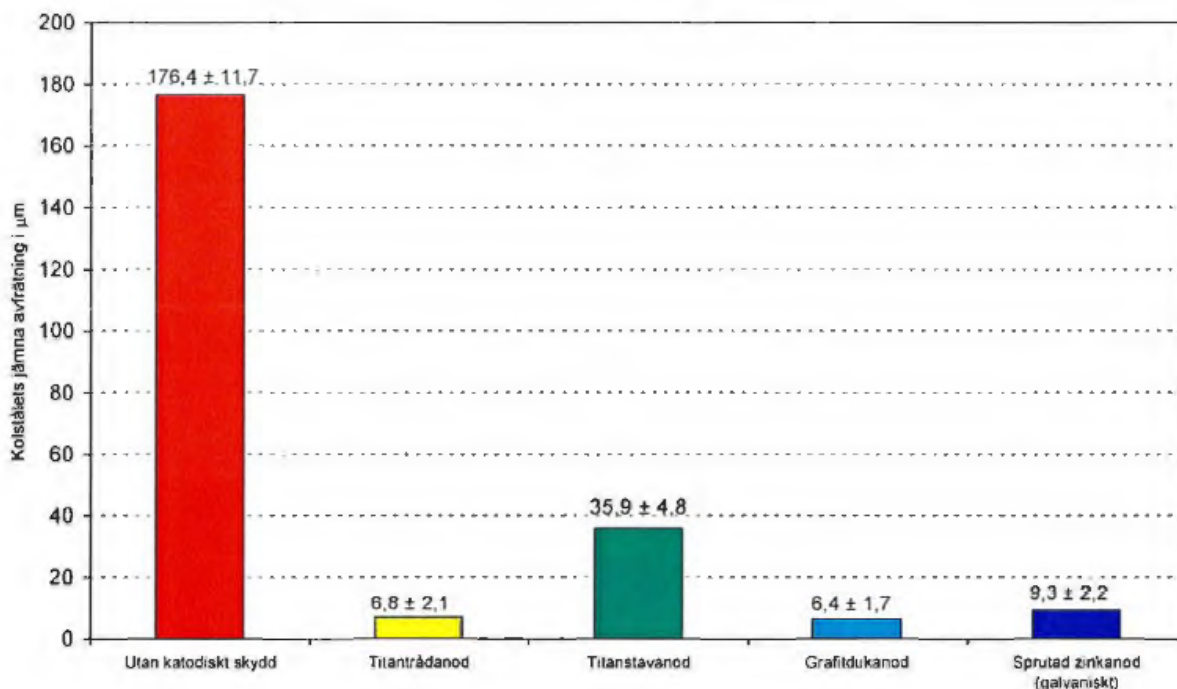
Provblock Nr.	Datum för mätningar	Tillslagspotential, $E_{(till)}$ mV	Frånslagspotential, $E_{(från)}$ mV	Potential efter 24 timmars depolarisation, $E_{(från\ 24\ h)}$ mV	$\Delta E_{(24\ tim)} = E_{(från\ 24\ h)} - E_{(från)} \geq 100\ mV$ mV
13	2000-10-10	-368	-356	-240	116
	2001-03-27	-421	-419	-272	147
	2001-05-29	-435	-420	-262	138
	2001-11-05	-	-	-	-
	2002-04-09	-	-	-	-
	2002-06-11	-	-	-	-
14	2000-10-10	-420	-417	-171	246
	2001-03-27	-416	-409	-201	208
	2001-05-29	-428	-415	-231	184
	2001-11-05	-	-	-	-
	2002-04-09	-	-	-	-
	2002-06-11	-	-	-	-
15	2000-10-10	-490	-489	-348	141
	2001-03-27	-512	-501	-352	149
	2001-05-29	-532	-516	-361	155
	2001-11-05	-375	-368	-348	20
	2002-04-09	-383	-382	-380	2
	2002-06-11	-489	-477	-263	214
16	2000-10-10	-508	-507	-377	130
	2001-03-27	-471	-462	-337	125
	2001-05-29	-480	-472	-380	142
	2001-11-05	-300	-286	-260	26
	2002-04-09	-370	-369	-366	3
	2002-06-11	-494	-453	-268	185

I figur 5B visas korrosionsutseendet hos ingjutna provstänger efter två års exponering på Ölandsbron och som varit både oskyddade och skyddade med olika anodsystem. Provstängerna som skyddats med termiskt sprutat zink är i princip helt oskadade efter två års exponering.

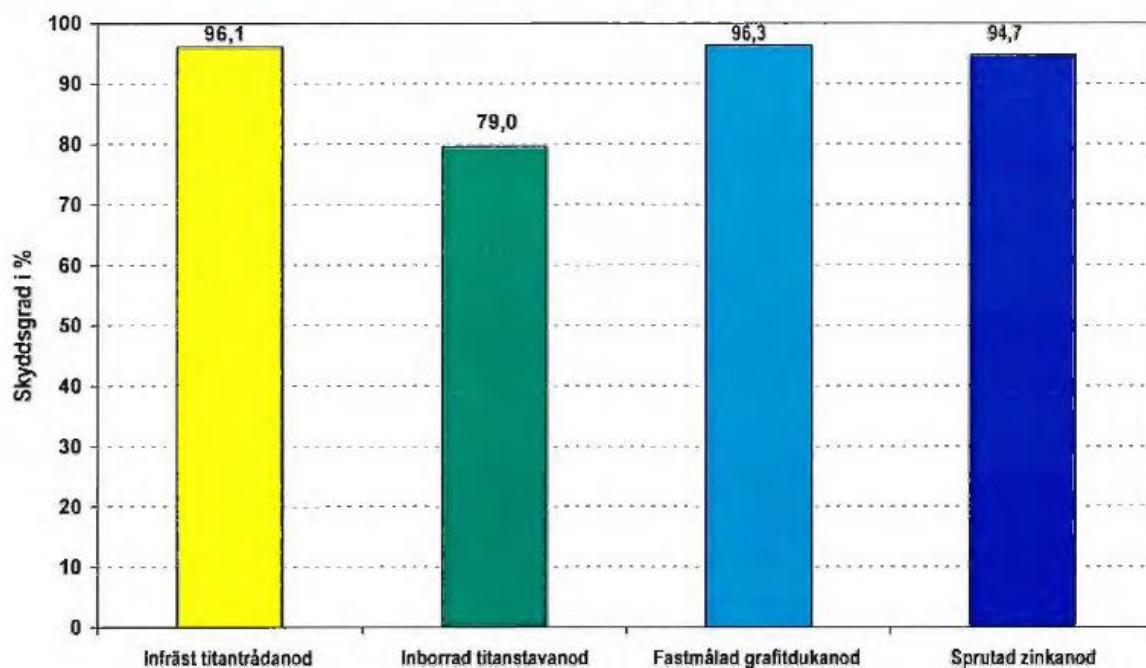


Figur 5B. Korrosionsutseendet efter två års exponering på Ölandsbron, hos både skyddade och icke skyddade provstänger av kolstål som varit ingjutna i betongblock.

Vid utvärderingen av skyddseffektiviteten genom kvantifiering (masförlustbestämning) av korrosionen (avrätningen), **figur 6B**, framgick det att den termiskt sprutade zinkanoden minskade avrätningen hos ingjutna provstänger av kolstål med nästan 95 %, **figur 7B**.



Figur 6B. Medelavrätningen efter två års exponering, uttryckt i µm, hos ingjutna provstänger av kolstål som katodiskt skyddats med olika anodsystem.



Figur 7B. Skyddsgraden hos olika anodsystem efter två års exponering av delvis ingjutna provstänger kolstålsstänger.

Slutsatser och rekommendationer

Den termiskt sprutade zinkanoden gav ett bra korrosionsskydd åt det ingjutna provstängerna av kolstål. Avfrätningen (korrosionen) minskade med närmare 95 % jämfört med oskyddade provstänger av kolstål.

Resultaten från potentialmätningarna av de ingjutna provstängerna visade att gällande depolarisationskriteriet, ΔE (dep 24 tim) ≥ 100 mV uppnåddes vid 15 av totalt 18 mättillfällen för termiskt sprutade zinkanoder.

Den okulära inspektionen av det termiskt sprutade skiktet som sprutats på kantbalken konstaterades enstaka sprickor i zinkskiktet.

Den totala kostnaden per m² betongyta för det termiskt sprutade zinkanoder var 2002 660 SEK. Att byta ut en kantbalk kostade 2002 ca 10000 SEK per löpmetr.

Katodiskt skydd av betongkonstruktioner med termiskt sprutade offeranoder av zink – forskningsprojekt IV

Våren 2010 startades forskningsprojektet *Katodiskt skydd av betongkonstruktioner med termiskt sprutade offeranoder av zink*. I projektet, som varit indelat i två etapper, gjordes i den första etappen (etapp I) en litteratur- och erfarenhetsinsamling om termiskt sprutade zinkanoder på befintliga betongkonstruktioner fram till 2010. Även en tillståndsbedömning genomfördes på sprutade zinkskikt hos silgator i kylvattenvägar i Forsmark och på kantbalken vid Ölandsbron. På de utvalda objekten utfördes okulära undersökningar av zinkskiktens utseende och vidhäftning mot betongyta. Betongkärnor med påsprutat zinkskikt togs ut för undersökning i laboratorium. Resultaten från dessa undersökningar finns redovisade i Elforsk Rapport nr 11:55 - Katodiskt skydd av betongkonstruktioner med termiskt sprutade offeranoder av zink [6]

I rapporten redovisades resultat från en litteratur- och erfarenhetsinsamling (fram till 2010) om användningen av katodiskt skydd av betongkonstruktioner med termiskt sprutade offeranoder av zink. I rapporten redovisades även resultat från undersökningar utförda på termiskt zinksprutade betongkonstruktioner såsom betongväggar i intagsbyggnaden i Forsmark III och på kantbalken på Ölandsbron. Från dessa termiskt sprutade konstruktioner har ett flertal betongkärnor med påsprutate zinkskikt undersökts på laboratorium med avseende på betongens kloridhalt, zinkhalt, resistivitet, karbonatiseringsdjup, inträngningsdjup av zink i betong, betongens fukthalt, zinkytans utseende, elektrokemiska potential och vidhäftning mot betongen. Även en bedömning av den sprutade zinkanodens katodiska skyddsförmåga har utförts.

Litteratur- och erfarenhetsinsamling

Den första betongkonstruktion som katodiskt skyddats med termiskt sprutad zink var två pelare under Richmond-San Rafael bron (år 1983) i Kalifornien, USA. Vid denna installation användes påtryckt ström för att skydda stålarmeringen mot korrosion [6].

I slutet av 1980-talet utfördes den första installationen med offeranoder av zink som termiskt sprutats på betongpelare belägna under vägbroar i Florida, USA [6]. Dessa inledande försök visade att det var möjligt att erhålla galvaniskt skydd med termiskt sprutade zinkanoder på betongkonstruktioner i marinmiljö.

I **tabell 4B** och **5B** redovisas en sammanfattning av de betongkonstruktioner (i USA och övriga länder) som belagts med zink genom termisk sprutning för att skydda armeringen mot korrosion fram till 1995. Av tabellerna framgår det att den högrena zinken är den vanligaste förekommande beläggningen.

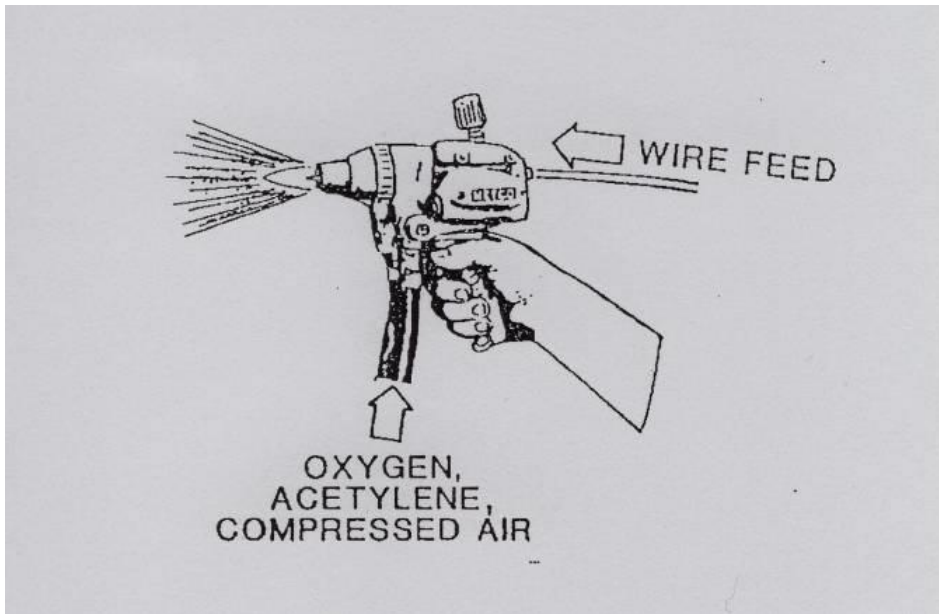
Tabell 4B. Termiskt sprutade anoder på betongkonstruktioner [6]

Typ av konstruktion	Installationsår	Anodmaterial (Anodyta, m ²)	Typ av katodisk skydd	Spruteteknik	Total katodisk strömtäthet, mA/m ²	Beräknad livslängd	Depolarisation efter 24 timmar, ΔE(24 h), mV
Bropelare, San Rafael bridge, Californien	1983	99,9 % zink (ca 20 m ²)	Elektrolytiskt	Flamsprutning	Max: 26 Min: 2,0 Medel: 6,0	ca 10 år	80 % > 100 mV
Brodäck, East Camino UC, Californien	1984	99,9 % zink (ca 480 m ²)	Elektrolytiskt	Flam- respektive Ljusbågssprutning	Max: 27 Min: 2,0 Medel: 5,9	ca 10 år	50 % > 100 mV
Bropelare, Niles Channel Bridge, Florida	1988	99,9 % zink (ca 30 m ²)	Galvaniskt	Ljusbågssprutning	Pol. Sond. Start: 170-507 6 mån: 6-58		100 % > 100 mV
Brodäck, Julia Tuttle Bridge, USA, Florida	1989	99,9 % zink (ca 25 m ²)	Galvaniskt	Ljusbågssprutning	Pol. Sond. Start: 470-1101 1 mån: 10-28		100 % > 100 mV
Brodäck, pelare, balkar Howard Frankland Bridge, Florida	1992	99 % zink (11148 m ²)	Galvaniskt	Ljusbågssprutning	Pol. Sond 0,4 - 10 ¹		90 % > 100 mV
Brospeann och pelare Cape Creek Bridge, Oregon	1992	99 % zink (9476 m ²)	Elektrolytiskt	Ljusbågssprutning		12-15 år	
Brospeann, Yaquina Bay Bridge, Oregon	1994	99 % zink (18116 m ²)	Elektrolytiskt	Ljusbågssprutning		12-15 år	
Brospeann och pelare, Depoe Bay Bridge, Oregon	1995	99 % zink (6038 m ²)	Elektrolytiskt	Ljusbågssprutning		12-15 år	
Del av brospeann, Depoe Bay Bridge, Oregon	1995	100 % Titan (280 m ²)	Elektrolytiskt	Ljusbågssprutning			
Bropelare, Bryant Patton Bridge, Florida	1995	Zn och Al-Zn (ca 16 m ²)	Galvaniskt	Flam- respektive Ljusbågssprutning	Zn: 0,5 - 2,1 Al-Zn: 5,4 - 10,7		

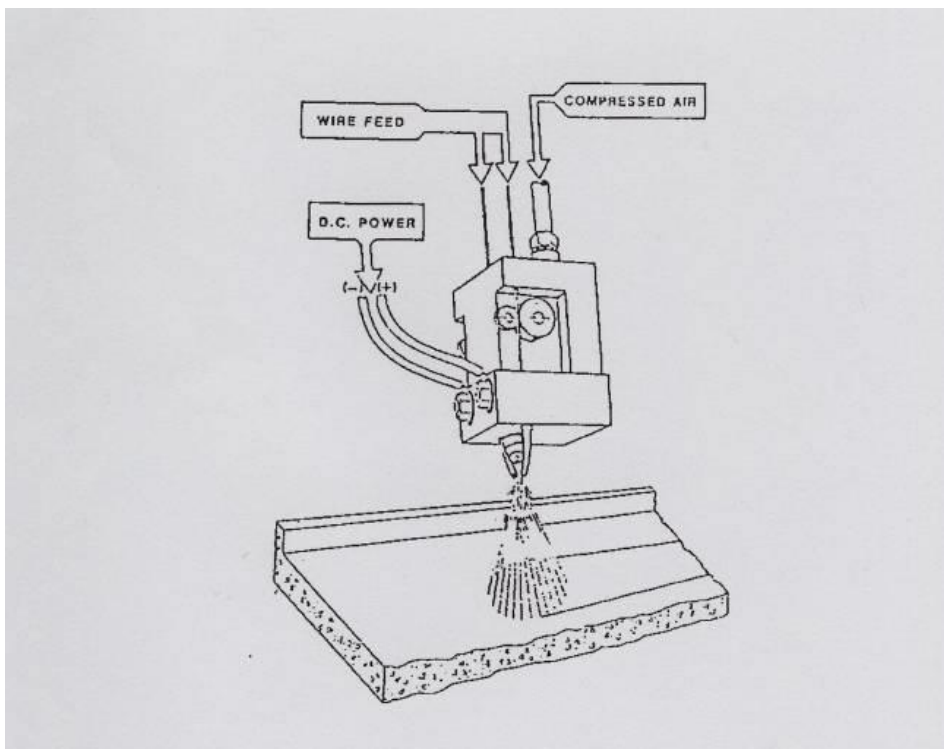
Tabell 5B. Termiskt sprutade anoder på betongkonstruktioner i övriga länder [6]

Typ av konstruktion	Installationsår	Anodmaterial (Anodyta, m ²)	Typ av katodisk skydd	Spruteteknik	Total katodisk strömtäthet, mA/m ²	Beräknad livslängd	Depolarisation efter 24 timmar, ΔE(24 h), mV
Kylkanaler till kärnkraftverk, pumpcell, Sverige	1995	Ren zink (40 m ²)	Galvaniskt	Flamsprutning	Start: 27 - 67 2 mån: 0 - 20	10 år	Atrn. 91 Skvalp. 332 Underv. 429
Bropelare, Montreal, Kanada	1993	Ren zink	Galvaniskt	Flamsprutning	Start: 3,5 - 7,0 1år: 2,2 - 4,1	ca 10 år	10 - 220
Bropelare, Australien	1995	99,9 % zink	Galvaniskt	Ljusbågssprutning	Start: 20 1 år: 2-8	ca 15 år	

Det framgår av tabellerna att två olika spruttekniker har använts, flam- och ljusbågssprutning. Vid flamsprutning, **figur 8B**, används en gaslåga med syre, och acetylen för att smälta anodtråden och vid ljusbågssprutning, **figur 9B**, används en hög likström för att smälta anodmaterialet. Den flytande metallen slungas ut från sprutan med hjälp av tryckluft.



Figur 8B. Sprutpistol för flamsprutning [6].



Figur 9B. Sprutpistol för ljusbågssprutning [6].

För att erhålla en god vidhäftning mellan betongytan och det sprutade skiktet måste betongytan vara torr och fri från smuts. Dessutom måste allt löst sittande betong avlägsnas innan sprutningen. Undersökningar utförda av [7] har visat att vidhäftningen mellan det sprutade skiktet och betongytan kan förbättras genom att betongytan sandblästras lätt.

I **tabell 6B** visas inverkan av två olika blästermedel på vidhäftningen mellan betongen och ett sprutat aluminium-zinkskikt. Den bästa vidhäftningen erhöles med en blästersand som innehöll kvarts, SiO₂.

Tabell 6B. Inverkan av olika blästermedel på vidhäftningen mellan ett termiskt påsprutat zinkskikt-aluminiumskikt och en betongyta [7].

Effect of Sandblasting Grit on Bond Strength of ZnAl (85:15) Coatings

Bond Strength on Samples Sandblasted with Silica		Bond Strength on Samples Sandblasted with Alumina	
kPa	psi	kPa	psi
2069	300	1379	200
2758	400	1379	200
1724	250	1310	190
2896	420	827	120
2069	300	1379	200
4138	600	2620	380
2069	300	1034	150
Avg. 2530	Avg. 367	Avg. 1421	Avg. 206

Det framgår vidare av undersökningen [7] att vidhäftningen mellan betongen och det sprutade skiktet förbättrades med en faktor fem när betongytan förvärmades innan sprutning till 120 - 150 °C, **tabell 7B**.

Tabell 7B. Inverkan av betongens ytemperatur på vidhäftningen mellan sprutad beläggning och betong. Betongens yta förvärmades innan sprutning till 120-150 °C (7).

Effect of Surface Temperature on Bond Strength

Surface Bond Strength at 21°C		Hot Surface Bond Strength	
kPa	psi	kPa	psi
527	75	3103	450
172	25	1862	270
552	80	2069	300
483	70	3448	500
138	20	1586	230
621	90	1724	250
758	110	1931	280
690	100	2414	350
690	100	3379	490
620	90	2483	360
Avg. 524	Avg. 76	Avg. 2400	Avg. 348

Det sprutade zinkskiktets tjocklek varierade i de flesta undersökningar mellan 200 och 500 µm. Skiktet som innehöll både öppna och slutna porer har god vidhäftning mot betongen.

En fråga man ställer sig är vad som händer med vidhäftningen mellan det sprutade zinkskiktet och betongen när zinkskiktet förbrukas vid utmatning av skyddsström? Det normala borde vara att vidhäftningen försämras med tiden. Detta har också observerats i några fall. Det finns dock några andra undersökningar som har visat det motsatta, dvs. att vidhäftningen mellan det sprutade zinkskiktet och betongen förbättrades vid strömutmatning. (8,9).

Av en australiensisk undersökning (8) framgick det att vidhäftningen mellan det sprutade zinkskiktet och betongytan i startögonblicket varierade mellan 0,9 och 2,7 MPa. Efter ett års drift hade vidhäftningen ökat och varierade mellan 2,1 och 5,1 MPa. En möjlig förklaring till ökningen av vidhäftningen var enligt (8) att en kemisk reaktion hade skett mellan zinkens korrosionsprodukter och cementpastan. I en annan undersökning utförd av Bullard (10) har dock visat att zinkens korrosionsprodukter inte reagerar med cementpastan. I **tabell 8B** ges ett förslag till fördelning av zink i kontaktytan zink/betong. Av tabellen framgick också vilka möjliga korrosionsprodukter av zink som skulle kunna bildas i ett sprutat zinkskikt i kontakt med betong.

Tabell 8B. Schematisk skiss av fördelningen av zink i kontaktytan zink/betong (10)

Zinc-Concrete Interfacial Chemistry

Location Zinc Coating	Characteristics Metallic Zinc	Possible Compounds Zn
zone 1	O/Zn ratio roughly one; highly enriched in Cl, S	ZnO ZnSO ₄ ZnCl ₂
zone 2	O/Zn ratio roughly 2.5; enriched in Cl, S; substantial Si, Ca	{Ca, Zn} silicate {Ca, Zn} aluminate ZnSO ₄ ZnCl ₂
cement paste	high Ca, low Cl, S no Zn	Ca silicate Ca aluminate

När det gäller strömavgivningen (anodisk strömtäthet) från sprutade offeranoder av zink framgick det att den anodiska strömtätheten varierade med yttre förhållanden. De högsta strömtätheterna har uppmätts på betong-konstruktioner som är belägna i Florida med hög relativ luftfuktighet och lufttemperaturer upp emot 20 - 30°C.

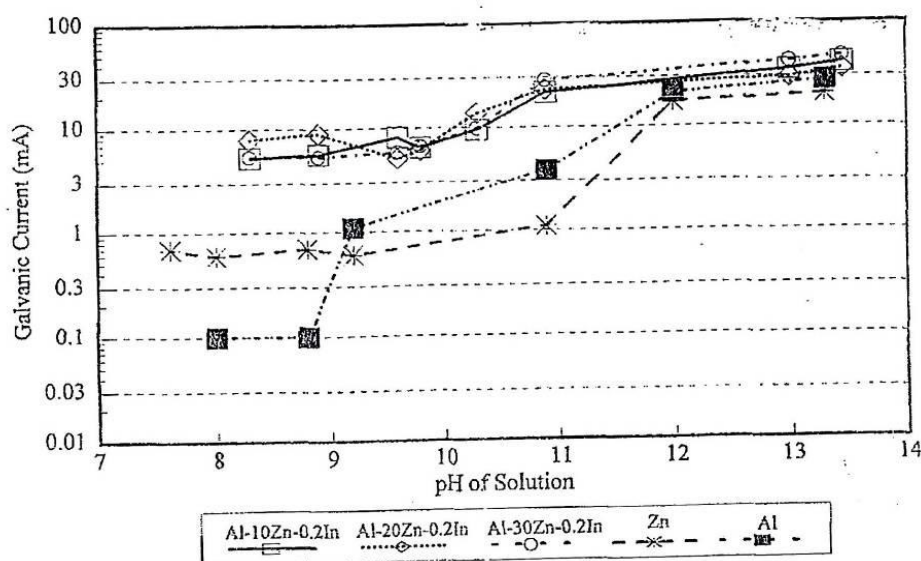
Resultaten från en undersökning utförd i Kanada [11] har visat att den anodiska strömtätheten hos termiskt sprutade zinkanoder var betydligt lägre i Kanada än i Florida. Detta innebär att det uppställda skyddskriteriet, dvs $\Delta E \geq 100\text{mV}$, inte kunde uppnås. Anledningen till de låga anodiska strömtätheterna (2-4 mA/m² anodyta) i Kanada antas bero på hög betongresistivitet, låg relativ fuktighet, låga temperaturer och låg fuktbelastning på konstruktionen. En annan mycket viktig parameter för storleken av den anodens strömavgivning är betongytans tillstånd.

En del forskare menar att zinken kommer att passiveras med tiden i kontakt med betongen, vilket gör att strömavgivningen från zinkanoden kommer att avta med tiden.

Betongytans tillstånd torde ha stor betydelse för storleken av strömavgivningen hos zinkanoden. Vid en karbonatiserad betongyta (pH < 9) är resistiviteten mycket hög vilket innebär en hög anodisk utbredningsresistans. Däremot sker ingen passivering av zinkanodens yta. Vid en icke karbonatiserad betongyta är strömavgivningen hög hos zinkanoden i början men avtar med tiden pga passivering av zinkytan.

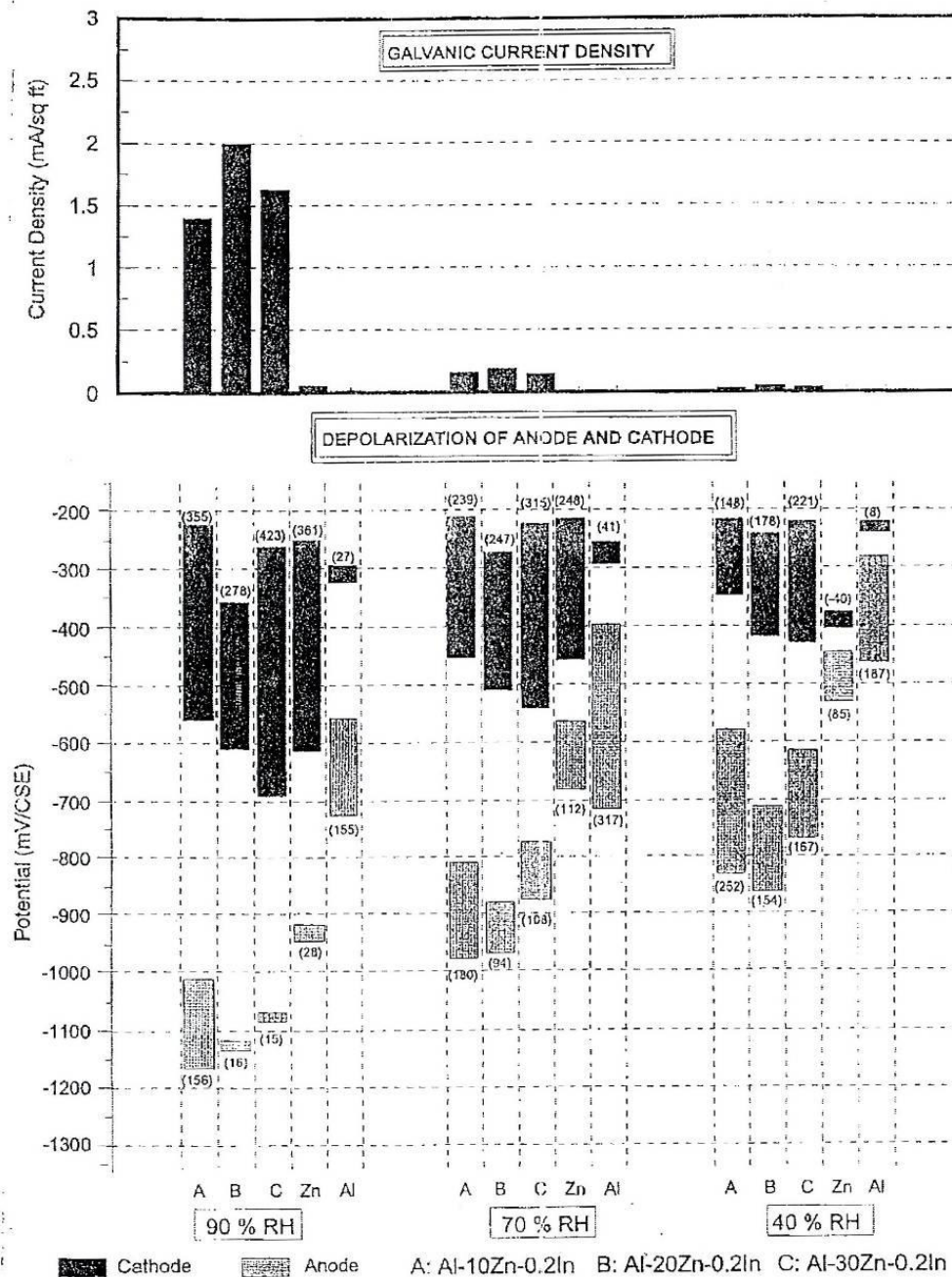
Flera forskare menar att det finns andra termiskt sprutade metallegeringar än ren zink som skulle ge ett effektivare galvaniskt katodiskt skydd för stålarmering i betong. I en stor undersökning utförd av Funahashi et. al. [12] har man undersökt möjligheterna att använda andra metallegeringar än ren zink för termiskt sprutade offeranoder. Ett 15-tal olika zink och aluminiumlegeringar utsattes för olika tester på laboratorium.

Resultaten av dessa tester visade att offeranoder av aluminium-zink-indium-legeringar gav den bästa skyddsförmågan. Det var framför allt undersökningarna av anodernas strömavgivning i alkaliska porlösningar av olika pH-värden som visade att Al-Zn-In-legeringar gav den högsta strömavgivningen i ihopkopplat tillstånd. I **figur 11B** visas pH-värdets inverkan på strömavgivningen hos fem olika anodlegeringar.



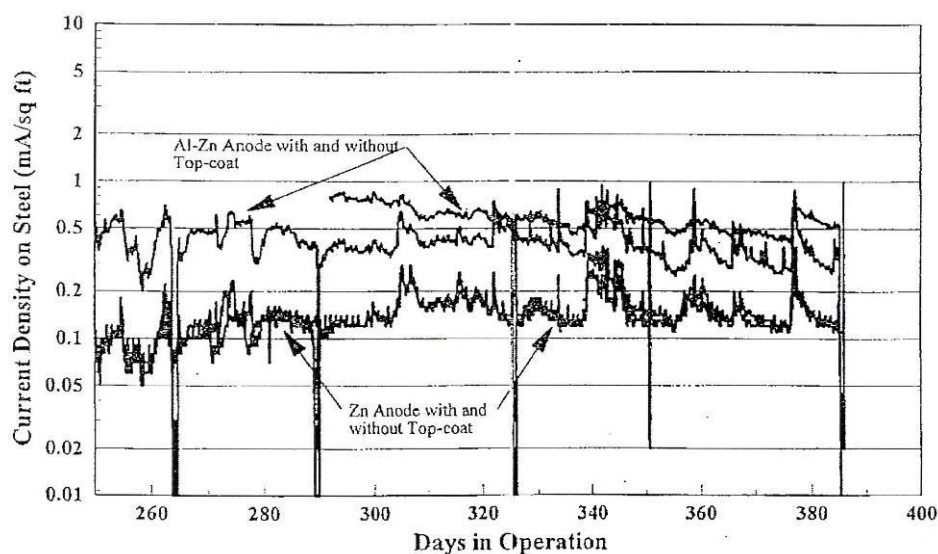
Figur 11B. pH-värdets inverkan på strömavgivningen hos fem olika anodlegeringar (12)

I **figur 12B** visas inverkan av den relativa fuktigheten på depolarisationen vid en temperatur av ca 4 °C för fem olika anodlegeringar. Som framgår av resultaten i **figur 12B** uppnås depolarisationskriteriet, $\Delta E_{(24h)} \geq 100$ mV för samtliga Al-Zn-In-legeringar vid relativa fuktighet ned till 40 %. Depolarisationskriteriet innebär att skillnaden hos armeringens elektrokemiska potential vid strömutfästning och efter 24 timmars frånslag av strömutfästningen ska vara större än 100 mV för att erhålla fullgott katodiskt skydd.



Figur 12B. Inverkan av relativa fuktigheten vid en temperatur av 4 °C på fem olika anodlegeringars strömavgivning och depolarisation efter isärkoppling [12].

Vid ett senare fältförsök sprutades fyra bropelare med en Al-Zn-In-legering och med högren zink. På två av pelarna, en Al-Zn-In-legerad och en med högren zink, applicerades en fuktpermeabel beläggning av polyuretan för att skydda anoderna från atmosfärisk korrosion. I **figur 13B** visas den totala strömavgivningen för de undersökta offeranoderna som funktion av tiden. Som framgår av resultaten i **figur 13B** är strömavgivningen betydligt högre för Al-Zn-In-legeringen än för den högrena zinken. I **tabell 9B** visas resultatet av depolarisationsmätningar för de båda undersökta anoderna med skyddsbeläggning. Som framgår av depolarisationsmätningarna uppmättes den högsta depolarisationen hos Al-Zn-In-legeringen.



Figur 13B. Den totala strömavgivningen för olika sprutade offeranoder med och utan polyuretanbeläggning som funktion av tiden [12].

Som framgår av **tabell 9B** har försök utförts med termiskt sprutat titan för att galvaniskt skydda stålarmeringen i betongen mot korrosion. Resultaten av depolarisationsmätningarna visade att depolarisationen var betydligt högre hos Al-Zn-legeringen (både med och utan beläggning) jämfört med den rena Zn-legeringen.

Tabell 9B. Resultat från depolarisationsmätningar utförda på olika sprutade zinkanoder [12].

Results of depolarization tests conducted on the Bryant Patton Bridge.

Anode System	Magnitude of Depolarization					
	Oct. 1995	Jan. 1996	Feb. 1996	March 1996	May 1996	June 1996
Zinc with top-coat	100	50	48	50	22	28
Zinc without top-coat	53	40	30	25	20	25
Al-Zn with top-coat	250	210	170	180	45*	30*
Al-Zn without top-coat	245	185	130	155	n/a**	22*

Note: * Al-Zn anode was lost in the areas where the embedded reference cells were embedded.
** Instrumentation malfunctioned.

Även försök med termiskt sprutade titanbeläggningar har utförts i USA. Efter sprutningen aktiveras den sprutade titanbeläggningen genom att applicera en speciell katalysatorlösning på titanytan [13]. Ett sådant försök har gjorts på Depoe Bay Bridge i Oregon, USA [13]. Erfarenheterna från Depoe Bay Bridge visade att det var svårt att undvika sprickor i betongen pga. de höga temperaturer som behövs för att spruta smält titan (titanets smältpunkt 1800 °C) på betongytan.

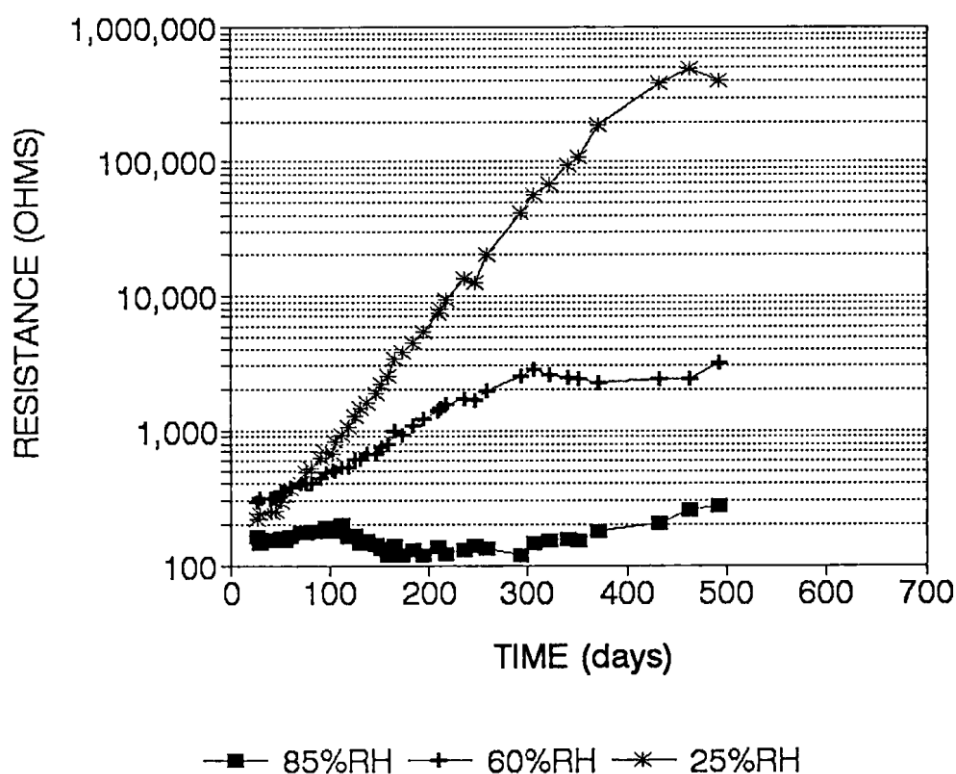
Som tidigare framgått har USA stor erfarenhet av att arbeta med galvaniska skyddssystem för att förlänga livslängden för betongkonstruktioner i utsatta miljöer. Lasa och Powers [14] sammanfattar Floridas vägverk syn på arbetet i fyra punkter.

- (1) I utsatta miljöer med kraftigt korrosiv miljö erbjuder preventiva skyddsmetoder stora ekonomiska fördelar om de används på rätt sätt.
- (2) Med 15 års erfarenhet konstateras att en tätare betong ger en långsammare initiering och nedbrytningsprocess.
- (3) Erfarenheterna från olika former av reparationsmetoder i kloridexponerade miljöer är relativt dåliga då nya skador oftast uppkommer i angränsande områden.
- (4) Katodiskt skydd är den enda effektiva metoden för att skydda kloridkontaminerade konstruktioner. Såväl system med påtryckt ström och offeranoder har visats sig fungera i över 15 år.

Från användarna och tillverkarna av galvaniska skydd framhålls ofta enkelheten och därmed även kostnaden för systemet i jämförelsen med påtryckt ström. I en artikel från Corrpro Inc. [15] går det att läsa just detta. Den största nackdelen är just beroendet av den aktuella miljön i betongen där framförallt fuktnivån spelar en avgörande roll, se t.ex [16]. I **Figur 14B** visas också tydligt att hur fuktig miljön är kommer att påverka funktionen hos det galvaniska skyddet [17]. Med lägre fuktighet i betongen minskar strömstyrkan, men som författarna påpekar är behovet av galvanisk skydd mindre då fuktnivån sjunker. I **tabell 10B** ges en sammanställning av för- och nackdelar för systemen påtryckt ström och offeranod [15].

Tabell 10B. Sammanställning av för och nackdelar för systemen påtryckt ström och offeranod [15].

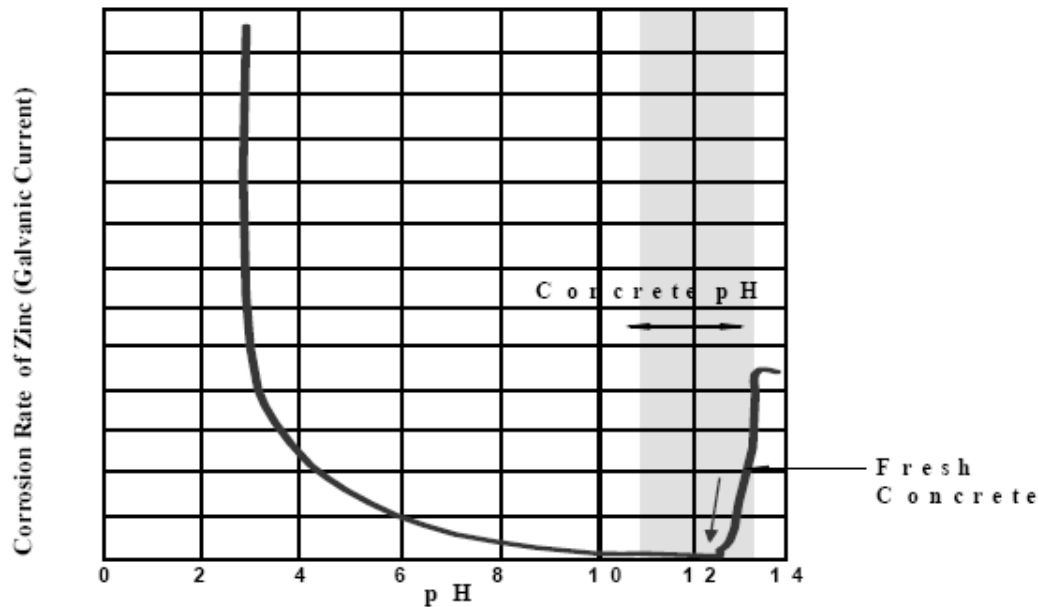
	Impressed Current System	Sacrificial (Galvanic) System
Merits	<ul style="list-style-type: none"> longer anode life current can be controlled extensive track record 	<ul style="list-style-type: none"> inherently simple no monitoring & maintenance no requirement for electrical isolation risk of hydrogen embrittlement on high strength steel is minimal saw cutting & concrete encapsulation for anodes is not required
Demerits	<ul style="list-style-type: none"> requires monitoring and maintenance electrical isolation required between anode and steel conduit & wiring required detailed monitoring & control for prestressed concrete 	<ul style="list-style-type: none"> shorter anode life anode current delivery is dependent on anode chemistry and surrounding environment current cannot be adjusted or controlled



Figur 14B. Medelresistans mellan anod och stål för galvaniska provkroppar placerad i olika relativ fuktighet. Provkropparna hade samma fuktnivå initialt och förvarade därefter i olika relativ fuktighet [17].

Även pH-värdet har en betydelse för zinksiktets funktion då skillnaden mellan karbonatiserad (pH ca 9-10) och icke karbonatiserad (pH ca 12-13) betong kan påverka funktionen vilket bör beaktas. Vid höga pH-värden (pH ca 12-13) fås en hög korrosionshastighet (vätgasutveckling)

kan leda till en snabb passivering. I **figur 15B** visas en principskiss av zinks korrosionshastighet som funktion av pH i vätska (innan betongen har härdat). Normalt sett är detta dock inget större problem eftersom betongen oftast är gammal då ett galvaniskt skydd kan komma ifråga, ytan är då redan karbonatiserad, även i en fuktig miljö.



Figur 15B. Principskiss av zinks korrosionshastighet som funktion av pH [18]

Vidhäftningen har diskuterats tidigare och är en viktig del i det galvaniska skyddets funktion. Vidhäftningen är mekanisk och en ren och torr yta krävs. En förvärmning av betongen förespråkas ofta för att ge bättre vidhäftning, upp till 80% bättre initialt enligt [19]. Med en accelererad elektrokemisk åldring motsvarande 6-7 år konstateras i stället att förvärmningen inte har någon bestående effekt. Holcomb m.fl. [20] rekommenderar att minska tjockleken på skiktet till 250-500 μm för att minska de inre spänningarna i zinksiktet och på så vis stärka vidhäftningen. Författarna framhåller även behovet av att se hur skiktets vidhäftning reagerar på en frostprovning. I [21] poängteras även risker för avtagande vidhäftning då större strömstyrkor krävs för ett gott skydd. Zinksiktets vidhäftning och beständighet över tid beror enligt Holcomb m.fl. [20], även på om skiktet hålls fuktigt över tid. Detta enligt laborieförsök där vidhäftningen för ett givet zinksikt bedöms vara 27 år då det utsätts för växlande fuktig och torr miljö. I den torra miljön bedöms livslängden vara endast 10 år. Av samma skäl diskuteras även fuktbindare så som LiNO_3 och LiBr vilka syftar till att höja fuktnivån i skikten. För sprayade zinksikt visade sig LiBr vara den effektivaste [22].

Egenkorrosionen av zinksiktet kan i vissa miljöer vara mycket stor. Detta behöver inte ha någon negativ effekt på skyddets funktion men kan medföra att zinksiktet konsumeras relativt fort och varvid livslängden förkortas på skyddet. I [23] undersöks möjligheterna med att använda en organisk beläggning för att förhindra egenkorrosionen och författarna uppskattar för det aktuella fallet att livslängden på skyddet kan fördubblas. Författarna påpekar dock att vidhäftningen också måste beaktas när en beläggning väljs. Ett annat alternativ är olika varianter på zinklegeringar. I [24] undersöks en legering bestående av Al-Zn-In som visade sig effektiv med en lägre egenkorrosion och längre livslängd. Författarna rekommenderar denna i skvalpzonen av framförallt ekonomiska skäl. Även [25] noterar att Al-Zn-In givit en bättre effekt än en ren zinkbeläggning vid en utvärdering efter 5 år på en förspänd bro norr om

Montreal. Resultatet förklaras med en bättre förmåga att bibehålla en hög negativ potential under sommarmånaderna. Samtidigt konstaterar författaren att det är mer sprickformationer i Al-Zn-In-legeringen än i det rena zinkskiktet.

Slutsatser

Erfarenheterna att använda termiskt sprutade offeranoder och katodiskt skydd med påtryckt ström för att förlänga livslängden hos betongkonstruktioner är goda i USA och då framför allt hos vägmyndigheten i Florida [6]. Detta kan sammanfattas i tre punkter med synpunkter från Floridas vägmyndighet:

1. I utsatta miljöer med kraftigt korrosiv miljö erbjuder preventiva skyddsmetoder stora ekonomiska fördelar om de används på rätt sätt.
2. Med 15 års erfarenhet konstateras att en tätare betong ger en långsammare initiering och nedbrytningsprocess.
3. Det har kunnat konstateras att erfarenheterna från olika former av reparationsmetoder i kloridexponerade miljöer är relativt dåliga då nya skador oftast uppkommer i angränsande områden.

Baserat på de tre ovanstående punkterna konstaterades att katodiskt skydd är den enda effektiva metoden för att skydda kloridkontaminerade konstruktioner. Såväl system med påtryckt ström och offeranoder har visats sig fungera i över 15 år.

Sammanfattningsvis kan sägas att det finns goda möjligheter att använda katodiskt skydd med termiskt sprutade offeranoder av zink.

Undersökningar utförda i USA visade att betongens resistivitet (fukthalten och kloridhalten i betongen) har stor betydelse för den sprutade zinkanodens skyddsförmåga [6]. Det framgår vidare att zinkanodens livslängd är beroende av de yttre miljöförhållanden som råder intill anoden.

Undersökning av termiskt sprutade zinkanoder på betongkonstruktioner efter långtidsexponering i olika miljöer – forskningsprojekt V

I slutrapporten för etapp I [6] redovisas, förutom en erfarenhets- och en litteraturstudie, även resultat från undersökningar utförda 2011 på termiskt zinksprutade betongkonstruktioner såsom betongväggar i intagsbyggnaden i Forsmark III (sprutades år 2003) och på kantbalken på Ölandsbron (sprutades år 2000). Ett flertal betongkärnor med påsprutade zinkskikt undersöktes på laboratorium med avseende på betongens kloridhalt, zinkhalt, resistivitet, karbonatiseringsdjup, inträngningsdjup av zink i betong, betongens fukthalt, zinkytans utseende, elektrokemiska potential och vidhäftning mot betongen. Även en bedömning av den sprutade zinkanodens katodiska skyddsförmåga har utfördes 2011.

Genomförande

För att undersöka långtidsegenskaperna hos termiskt sprutade offeranoder av zink valdes två termiskt zinksprutade betongkonstruktioner: 30 meter kantbalk på Ölandsbron och 85 m² betongväggyta i Forsmarksverket III i intagsbyggnaden vid silgata 4, för undersökningar.

Ölandsbron

Ölandsbron är 6072 m och öppnades för trafik 1972. Bron är en betongbalkbro med 155 spann. Bron kan indelas i tre huvuddelar:

- En 801 meter lång lågbro med 23 spann, som till större delen ligger på Svinö. Underbyggnaden består av ett landfäste och 23 stöd.
- En högbro över farleden i Kalmarsund bestående av 8 spann 7 stöd och längden 910 meter.
- En 4361 meter lång lågbro med 124 spann mellan norra Skallö och Öland . underbyggnaden består av ett landfäste och 124 stöd.

Kantbalkarna på Ölandsbron är utförda med slakarmerad betong och sammangjutna med brobanepattan, men ej gjutna samtidigt som denna. Kantbalkarna är kontinuerliga mellan övergångskonstruktionerna. Den utvändiga kantbalkshöjden är 0,6 meter, medan den invändiga höjden över brobanepattan är ca 0,4 meter, varav nuvarande tätskikt och beläggning utgör ca 0,1 meter. Kantbalksbredden är 0,35 meter, **figur 16B**.



Figur 16B. Kantbalk Ölandsbron

År 2000 installerades katodiskt skydd med termiskt sprutad zink på en längd av ca 30 meter av den norra kantbalken. Sprutningen genomfördes med flamsprutningsteknik, **figur 17B**.



Figur 17B. Termisk sprutning av kantbalken med flamsprutningsteknik, Ölandsbron.

Före flamsprutning rengjordes kantbalkens yta med högtryckstvätt. Därefter torkades kantbalkens yta med en gasolbrännare. Det sprutade zinksiktets tjocklek uppskattades till 300-500 μm . Den elektriska anslutningen mellan zinken och armeringen erhöles genom att spruta ett sammanhängande zinksikt mellan betongen och ett frilagt armeringsstål.

Forsmarksverket III

Forsmarksverket III är beläget invid Bottenhavet i norra Uppland i Östhammars kommun. Verket som har en effekt av 1050 MW är av sk kokartyp (BWR) och konstruerat av ABB Atom. Verket byggdes under perioden 1976-1985.

År 2003 i samband med avställningen av silgata 4 i intagsbyggnaden till Forsmark III genomfördes installation av katodiskt skydd av betongväggar med termiskt sprutat zink, **figur 18B**. Sprutningen genomfördes med flamsprutningsteknik. Före sprutningen rengjordes betongväggarna med högtryckstvätt och sandblästring. Vid behov torkades våta betongytor med en gasolbrännare före sprutning. Det sprutade zinksiktets tjocklek uppskattades till 300-500 μm . Den totala sprutade betongytan var ca 85 m^2 . Den elektriska anslutningen mellan zink och armering erhöles genom att spruta ett sammanhängande zinksikt mellan betongen och ett frilagt armeringsstål. Detta gjordes vid fyra olika ställen jämnt fördelade över den totala sprutade ytan.



Figur 18B. Termiskt sprutad vägg vid silgata, Forsmark.

Resultaten från undersökningarna visade att termiskt sprutade offeranoder av zink som exponeras nedsänkt i bräckt vatten har en relativ kort livslängd (< 8år) pga av den höga egenkorrosionen hos anoden. På betongytor som termiskt sprutats med zink och utsatts för stänk av vägsalt och bräckt vatten bedöms livslängden hos den sprutade zinkanoden vara betydligt längre (> 11 år) [6].

Resultat

Ölandsbron

Vid uttagning av betongkärnor med termiskt sprutat zinksikt konstaterades att zinksiktet var helt intakt utan vidhäftningsförluster. Zinksiktet utseende framgår av **figur 19B**. Utanpå zinksiktet finns ett tunt smutslager och under smutslagret finns ett tunt skikt av vitrost och ren zink.



Figur 19B. Termiskt sprutat zinkskikt efter 11 års exponering på Ölandsbron.

I **tabell 11B** visas resultat från potentialmätningar på uttagna betongkärnor från kantbalken på Ölandsbron. Det framgår av resultaten i **tabell 11B** att armeringens elektrokemiska potential efter ca 30 minuter isärkoppling av zinkskikt och stålarmring blivit mindre negativ (54 mV (Betongkärna nr 1) och 60 mV (betongkärna nr. 3). Att den elektrokemiska potentialen hos armeringen redan efter ca 30 minuter har ökat (mindre negativ) med 54-60 mV torde innebära att depolarisationen efter 24 timmars i särkoppling bör överstiga 100 mV. Detta skulle innebära att skyddsförmågan är god hos det sprutade zinkskiktet. Om inte depolarisationen efter 24-timmars i särkoppling inte skulle bli större än 54-60 mV, innebär det enligt europeiska standarden att skyddsförmågan är inte tillräckligt god.

Tabell 11B. Resultat från mätningar av elektrokemisk potential hos armeringen i uttagna betongkärnor från Ölandsbron.

Betongkärna Nr.	Blandpotential (zinksikt och stålarmoring ihopkopplat) rel Cu/CuSO ₄ mV	Armeringens potential efter 30 min isär- koppling rel Cu/CuSO ₄ mV	Zinksiktets potential efter 30 min isärkoppling rel Cu/CUSO ₄ mV	Armeringens depolar- isation efter 30 min isär- koppling mV
1	-383	-329	-623	54
2	-392	-335	-596	57
3	-396	-336	-623	60

Av tidigare undersökningar utförda på katodiskt skyddad kantbalk på Ölandsbron med påtryckt ström har framkommit att depolarisationen efter 24 timmar isärkoppling varierade för ett visst anodsystem mellan 30 och 50 mV. Denna depolarisering gav dock en sänkning av korrosionshastigheten hos ingjutet kolstål med 79 %.

I **tabell 12B** visas resultat från mätningar med Wengers-4-elektrodmeter av resistiviteten hos betongkärnor uttagna från kantbalken vid Ölandsbron. Som framgår av resultaten har det sprutade zinksiktet ingen inverkan på betongresistiviteten. Anledningen till detta är att zinksiktet är poröst.

Tabell 12B. Resultat från mätningar av resistiviteten hos betongkärnor uttagna på kantbalken Ölandsbron.

Betongkärna Nr.	Resistivitet Ωm
1	190
2	183
3	201
Ej termiskt sprutad yta	191

I **figur 19B** och **20B** visas tvärsnitt från två olika delar av en representativ betongkärna med zinksikt från kantbalken på Ölandsbron. Som framgår av **figur 19B** så är zinksiktet tjocklek ungefär 300-700 µm. Av **figur 20B** framgår det att i denna del av betongkärnan har zinken transporterats in i betongen och vitrost har bildats. Det framgår av figuren att zinkens korrosionsprodukter har trängt in ca 3 mm in i betongen. Orsaken till detta är för närvarande inte känt.

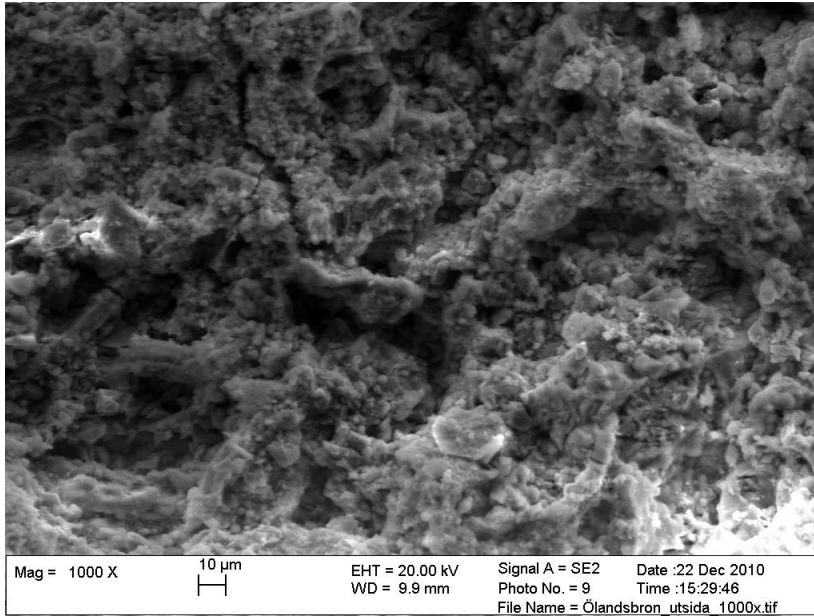


Figur 19B. Tvärsnitt av zinksikt och betongkärna. Zinkens tjocklek varierar mellan 300 och 700 μm. Ingen transport av zinkjoner in i betongen har konstaterats.

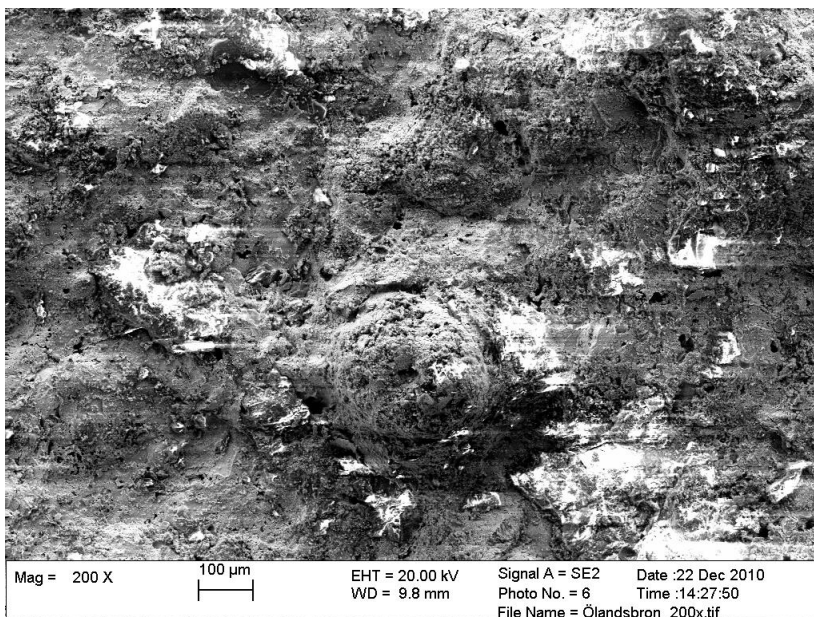


Figur 20B. Tvärsnitt av korroderat zinksikt där zinkjoner transporterats in i betongen ca 3 mm.

Provbitar från zinksiktet har tagits ut för SEM-undersökning. I **figur 21B** och **22B** visas utseendet hos zinkytans ut- och insida i hög förstoring. Zinksiktets utsida har utsatts för stänk från trafiken på Ölandsbron. Zinkens insida har varit i kontakt med betongytan. Det framgår av **figur 22B** att de sprutade zinksiktet är poröst och att det förekommer sfäriska zinkpartiklar på zinksiktets insida.



Figur 21B. Utseendet av zinkytans utsida. Bilden visar zinkytans utseende i 1000 ggr förstoring (FEG-SEM).



Figur 22B. Utseendet av zinkytans insida. Bilden visar zinkytans utseende i 200 ggr förstoring (FEG-SEM)

Tabell 13B visar kloridkoncentrationer till ett djup av 10 mm på ett icke sprutad betongprov respektive zinksprutad betongprov från Ölandsbrons kantbalk. Den i många fall kritiska kloridkoncentrationen för armeringskorrosion på 0,4 viktsprocent kloridjoner per cementvikt överskrids i samtliga punkter. Någon signifikant skillnad i kloridhalt mellan icke zinksprutad betongprov och det zinksprutade betongprovet kan inte konstateras. Detta visar att zinksiktet inte påverkat transporten av kloridjoner. Varken transporten in av nya kloridjoner tycks påverkas och någon omfördelning tycks inte ha skett.

Tabell 13B. Kloridkoncentration för referens respektive zinksprutat betongprov på Ölandsbron.

	djup	kloridjoner/cement	totalklorid	cement	cementhalt
	mm	vikt-%	mg/l	mg	vikt-%
Referens	2	0,71	200,88	284,88	19,6
	4	0,44	117,86	267,09	19,9
	6	1,09	313,27	286,64	21,7
	8	0,98	274,17	280,40	20,2
	10	0,99	274,17	275,99	20,6
Zn	2	0,52	140,78	271,50	19,3
	4	0,74	200,88	271,50	19,4
	6	0,79	219,55	276,34	20,0
	8	1,06	229,53	215,90	15,3
	10	1,17	286,63	244,79	18,1

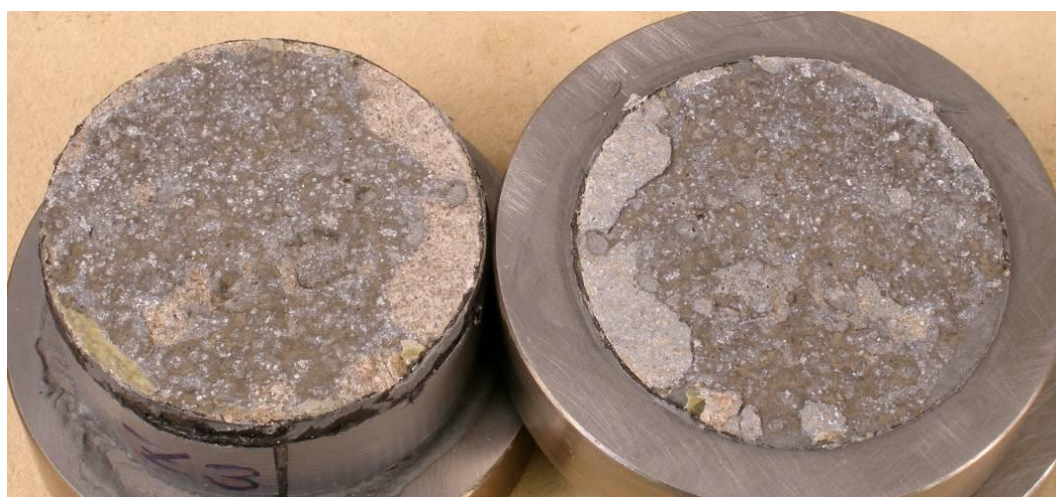
På Ölandsbron borrades tre prover ut för vidhäftningsprovning. **Figur 23B-25B** visar brottytorna från de tre provningarna och prov 1 och 2 har brottet gått mellan zinkskiktet och betongen medan det tredje brottet skett i zinkskiktet. Samtliga värden indikerar en mycket god vidhäftning mellan betong och zinkskikt vilket även stämmer väl med den okulära bedömning som gjordes på plats vid provtagningen. I **tabell 14B** redovisas mätresultat från vidhäftningsmätningar av olika uttagna borrkärnor från Ölandsbron.



Figur 23B. Brottyta, vidhäftningsprov Z1



Figur 24B. Brottyta, vidhäftningsprov Z2

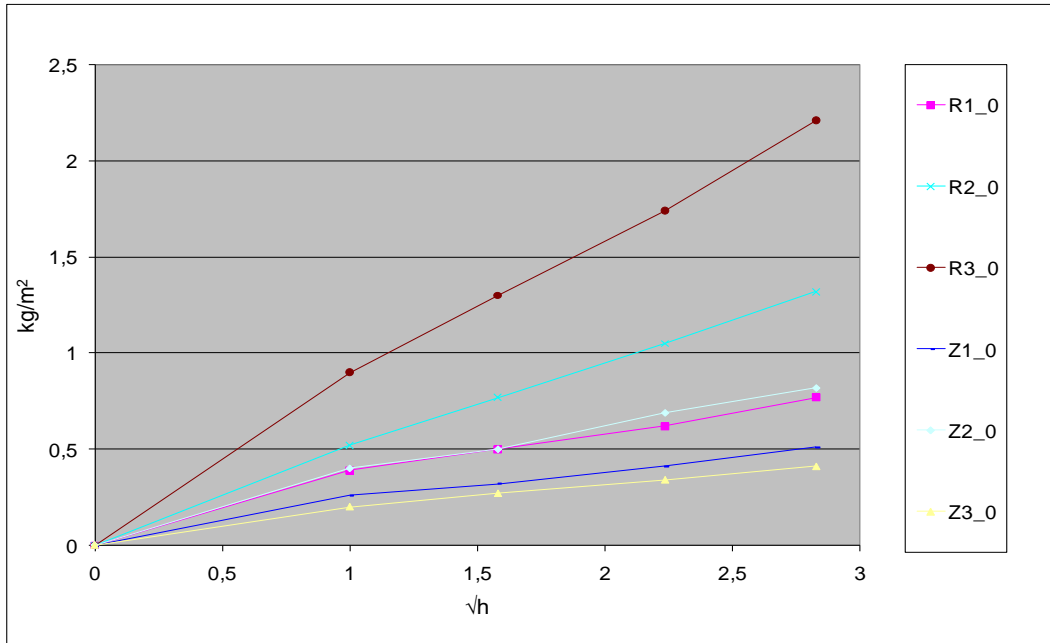


Figur 25B. Brottyta, vidhäftningsprov Z3

Tabell 14B. Vidhäftning i MPa från de tre proverna Z1-Z3

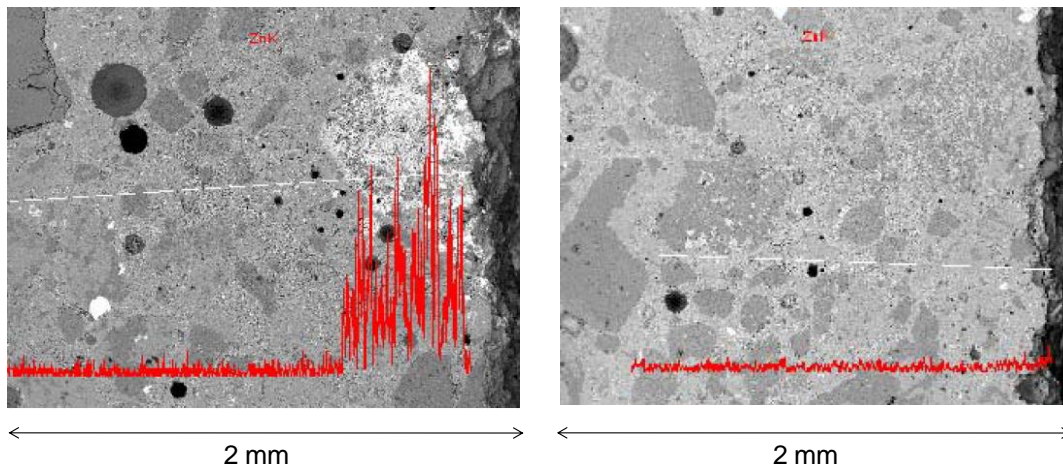
Z1	3,35 MPa
Z2	2,60 MPa
Z3	3,05 MPa

Figur 26B visar vattenabsorption som funktion av tid nedsänkt i vatten för de zinksprutade provkropparna och referenserna. Räknas medelvärdena ut för de tre zinksprutade och jämförs med medelvärdet för referenserna fås en minskning av vattenabsorptionen på ca 60 procent. Det innebär att zinksiktet är poröst och relativt öppet även om det ger en minskad fukttransport. Minskning är så pass liten att skiktet får anses som diffusionsöppet. Risken för instängning av fukt är således liten och bör inte heller påverka betongens frostbeständighet.



Figur 26B. Vattenabsorptionsförsök för 6 st provkroppar, referenserna R1-R3 respektive de zinksprutade Z1-Z3. På X-axeln presenteras roten ur tiden i timmar och på Y-axeln viktökningen i kg/m².

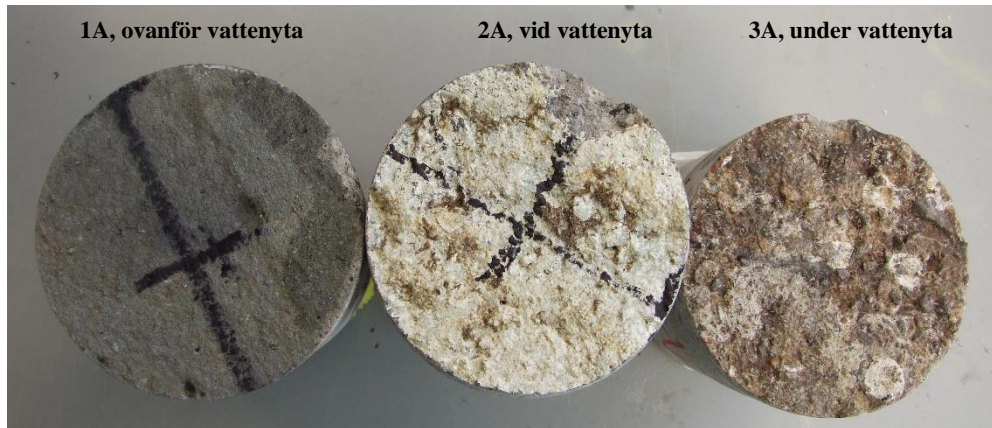
SEM analysen genomfördes främst för att avgöra om zinkjoner gått i lösning och om så är fallet avgöra om de har transporterats in i betongen genom kapillärkrafter och diffusion. Ett flertal linjesvep genomfördes och **figur 27B** visar två exempel på hur det kan se ut. Bilden till vänster visar en por som fyllts med sprutad zink som korroderat och bildat vitrost, medan bilden till höger visar ett icke korroderat zinksikt. De röda kurvorna visar zinkkoncentrationen och den streckade vita linjen var linjesvepet gjordes.



Figur 27B. SEM-bild som visar en fylld por respektive ett zinksikt.

I **figur 28B** visas uttagna betongkärnor från intagsbyggnaden vid Forsmark III med termiskt sprutat zink. Betongkärnorna är uttagna 2 meter ovanför normalvattenytan, vid normalvattenytan och 0,5 meter under normalvattenytan. Som framgår av **figur 29B** så är zinksiktet (gråfärgad) helt intakt för den betongkärna som tagits ut från en betongyta placerad 2 meter ovanför vattenytan. Vid normalvattenytan har zinken korroderat och bildat vita

korrosionsprodukter, sk vitrost. Under vitrosten finns ett oangripet skikt av zink (gråfärgad). Zinksiktet på betongkärnan som uttagits 2 meter under normalvattenytan är helt bortkorroderat.



Figur 28B. Utseendet hos uttagna betongkärnor med sprutat zinksikt

I varje betongkärna finns en bit av armeringen, **figur 29B**. Som framgår av figuren så är armeringen i borrkärna 3A (under vattenytan) utsatt för korrosion. Armeringen i betongkärnorna 1A och 2A är helt oangripna av korrosion. En trolig orsak är att zinksiktet ger ett katodiskt skydd åt armeringen. I borrkärna 3A så är all zink bortkorroderat.



Figur 29B. Utseendet hos armeringen i uttagna betongkärnor

I **tabell 15B** visas resultat från potentialmätningar på uttagna betongkärnor från väggen till intagsbyggnaden vid silgata 4, Forsmark III. De uttagna betongkärnorna med zinksikt kopplades ihop elektriskt med armeringen genom att montera en mätsladd mellan armering och zinksikt.

Tabell 15B. Resultat från mätningar av elektrokemisk potential hos armeringen i uttagna betongkärnor från intagsbyggnaden från Forsmark III.

Betongkärna Nr.	Blandpotential (zinkskikt och stålarmoring ihopkopplat) rel. Cu/CuSO ₄ mV	Armeringens potential efter 30 min isärkoppling rel. Cu/CuSO ₄ mV	Zinkskiktets potential efter 30 min isärkoppling rel. Cu/CuSO ₄ mV	Armeringens depolarisering efter 30 min isärkoppling från zinkskikt mV
1A	-368	-283	-510	85
2A	-392	-300	-490	92
3A3	-	-270	-	-

Det framgår av mätresultaten i Tabell att potentialen för armeringen efter 30 minuters i särkoppling ökade med 60 mV (betongkärna nr 1A) och 92 mV (betongkärna 2A). Detta innebär att skyddsförmågan är något bättre för termiskt sprutade zinkskiktet i Forsmark III jämfört med Ölandsbron. Eftersom zinkskiktet är helt bortkorroderat hos betongkärna 3A har inga potentialvärden för zink kunnat mätas.

I **tabell 16B** visas resultat från mätningar med Wengers-4-elektrodmeter av resistiviteten hos betongkärnor uttagna från intagsbyggnaden vid silgata 4 i Forsmark III. Betongkärnorna levererades till Swerea KIMAB inslagna i plast. Mätningarna utfördes tre dagar efter provuttag.

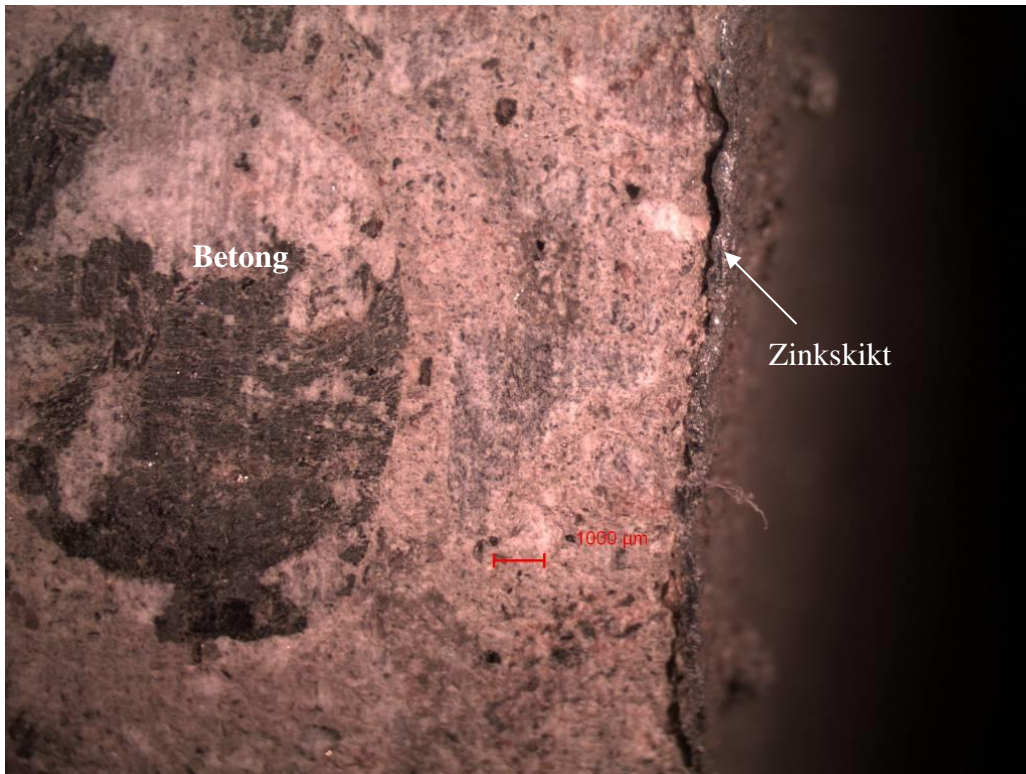
Tabell 16B. Resultat från mätningar av resistiviteten hos uttagna betongkärnor från intagsbyggnaden i silgata 4 vid Forsmark III. Mätningar utfördes tre dagar efter provuttag.

Betongkärna Nr.	Resistivitet Ωm
1A	230
2A	153
3A	89
Ej termiskt sprutad yta	Ej uppmätt

Som framgår av resultaten i **tabell 16B** så minskar resistiviteten i betongen ju mer fukt betongen innehåller. Betongkärna nr. 1A är uttagen 2 meter ovanför normal vattenytan, betongkärna 2A är uttagen vid normalvattenytan och betongkärna 3A är uttagen 0,5 meter under normalvattenytan.

I **figur 30B-32B** visas tvärsnitt av tre representativa betongkärnor med zinkskikt från väggen i intagsbyggnaden från silgata 4 Forsmark III.

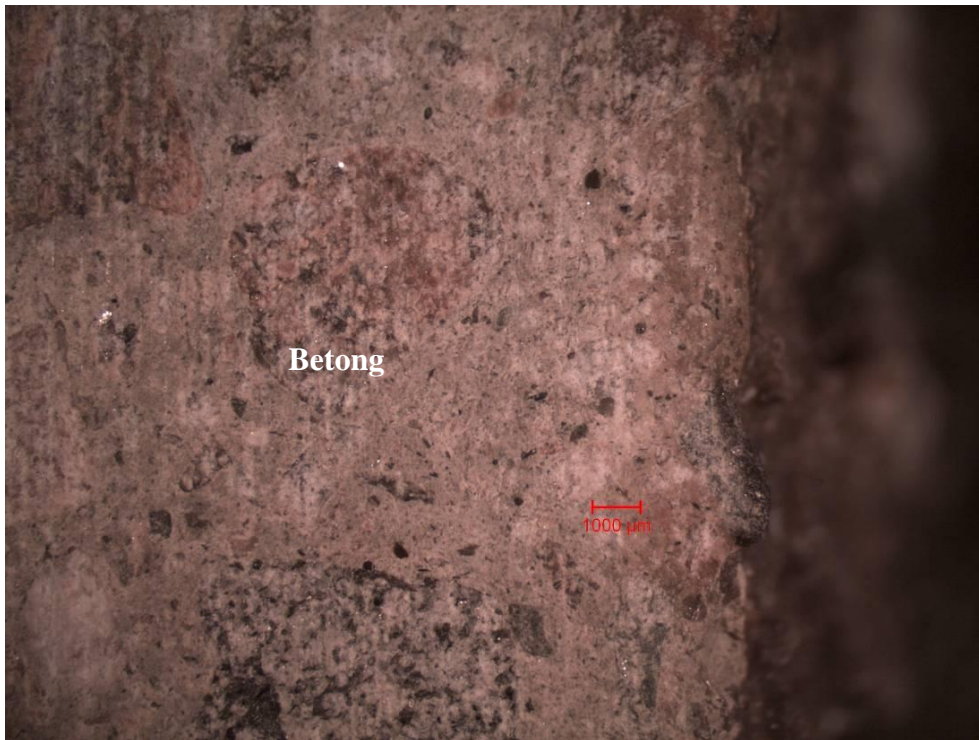
Som framgår av **figur 30B** så är zinkskiktets tjocklek 300-500 µm hos betongkärna 1A uttagen ovanför vattenyta. Av **figur 31B** framgår det att zinkskiktet i betongkärna 2A som exponerats i vattenytan har omvandlats till vitrost. För betongkärna 3A som exponerats under vattenytan så har zinkskiktet helt korroderat bort, **figur 32B**.



Figur30B. Tvärsnitt av betongkärna 1A (ovanför vattenyta) med zinkskikt.

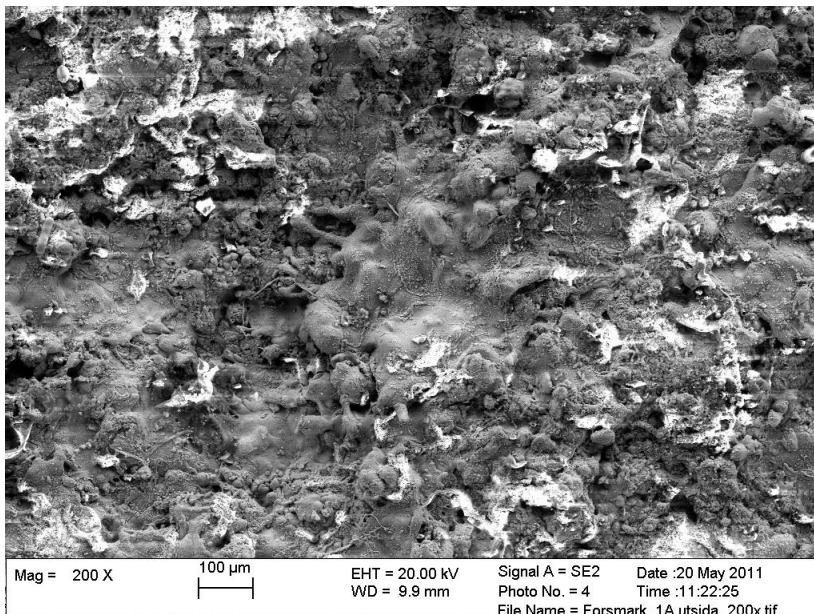


Figur 31B. Tvärsnitt av betongkärna 2A (vid vattenyta) med zinkskikt. Zinkskiktet har omvandlats till vitrost.

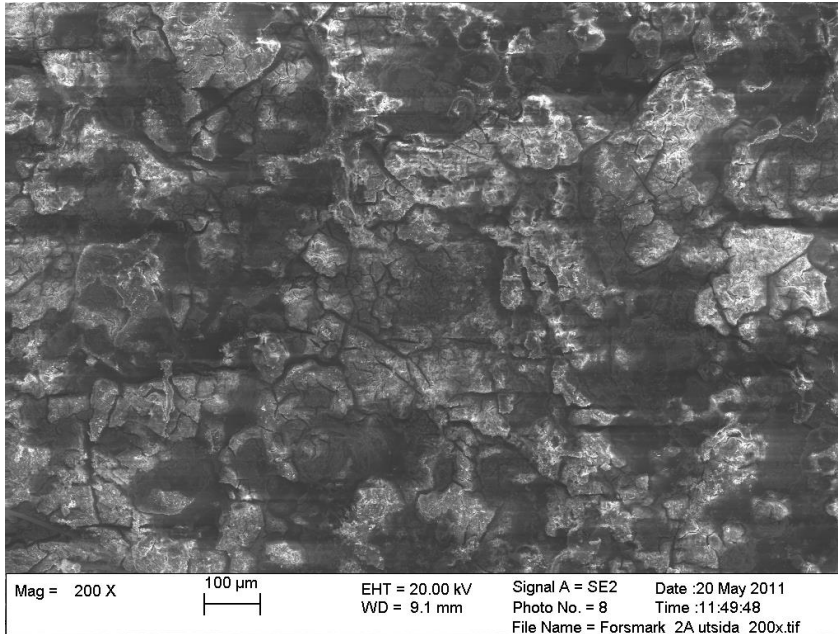


Figur 32B. Tvärsnitt av betongkärna 3A (under vattenyta). All zink är bortkorroderad.

I **figur 33B** och **34B** visas utseendet hos zinkytans utsida i 200 ggr förstoring i FEG-SEM. Det framgår av **figur 33B** att zinkskiktet (betongkärna 1A) är i princip helt intakt på utsidan ovanför vattenytan. Vid vattenytan (betongkärna 2A) har det bildats vitrost (ljusa partier) på zinkskiktet, **figur 34B**.

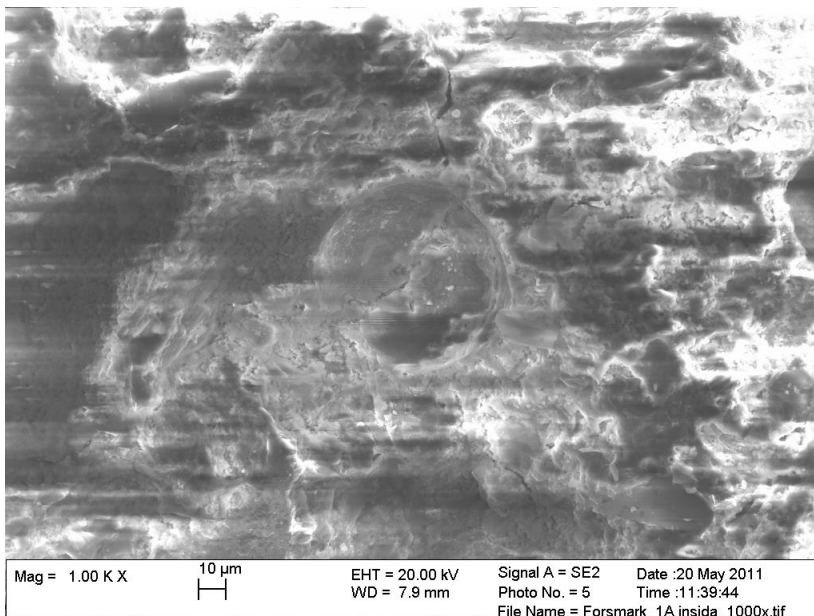


Figur 33B. Utseendet hos zinkytans utsida (1A, ovanför vattenyta). Figuren visar zinkytans utsida i 200 ggr förstoring (FEG-SEM).

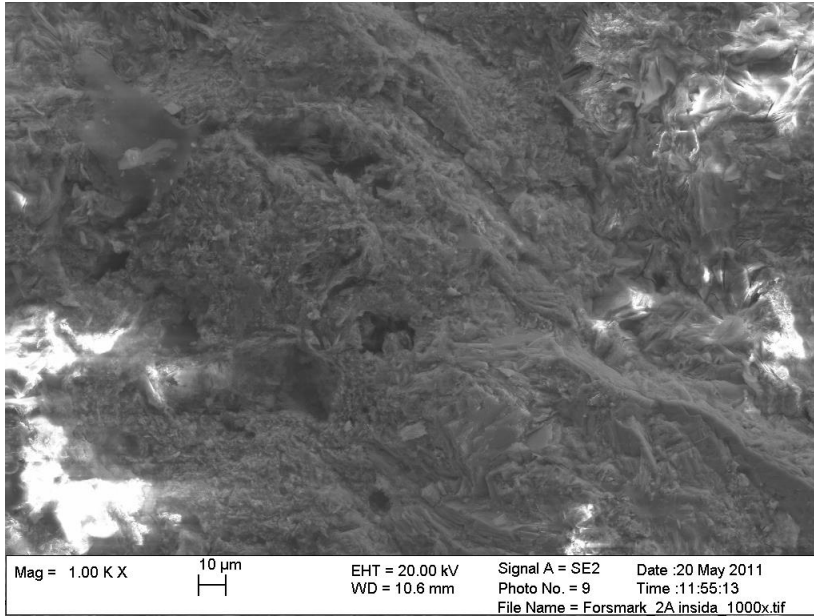


Figur 34B. Utseendet hos zinkytans utsida (2A, vid vattenyta). Figuren visar zinkytans utsida i 1000 ggr förstoring (FEG-SEM).

I **figur 35B** och **36B** visas zinkytans insida i 1000 ggr förstoring i FEG-SEM. Zinkytan är porös och innehåller flera håligheter. Ingen större skillnad i utseende mellan zinkyta som exponerats vid vattenytan (betongkärna 2A) eller ovanför vattenytan (betongkärna 1A).



Figur 35B. Utseendet hos zinkytans insida (1A, ovanför vattenyta). Figuren visar zinkytans insida i 1000 ggr förstoring (FEG-SEM).



Figur 36B. Utseendet hos zinkskiktets insida (2A, vid vattenyta). Figuren visar zinkytans insida i 1000 ggr förstoring (FEG-SEM).

I väggen från intagsbyggnaden i silgata 4 i Forsmarks III borrades sex prover ut varav tre användes för vidhäftningsprovning. **Figur 37B-39B** visar brottytorna från de tre provningarna och **tabell 17B** ger vidhäftningsvärdena samt en beskrivning av var provet är utborrat. Samtliga värden indikerar en god vidhäftning mellan betong och zinkskikt även om värdet för 3B bör beaktas med kännedomen att zinkskiktet nästan är förbrukat genom egenkorrosion.



Figur 37B. Vidhäftningsprov 1B i atmosfären.



Figur 38B. Vidhäftningsprov 2B i skvalpzon.



Figur 39B. Vidhäftningsprov 3B under vattenytan.

Tabell 17B. Vidhäftning i MPa från de tre proverna 1-3B

1B	Över normalvattenytan (2 meter)	1,65 MPa
2B	Vid normalvattenytan	1,40 MPa
3B	Under normalvattenytan (-0,5 meter)	1,25 MPa

Slutsatser och rekommendationer

Från resultaten av undersökningar i intagsbyggnaden i Forsmark III (efter 8 års drift) och på kantbalken på Ölandsbron (11 års drift) kan följande slutsatser dras:

- Det termiskt sprutade zinkskiktet har en god vidhäftning mot betongen.
- Skyddsförmågan hos zinkskiktet bedöms vara god. Detta gäller dock inte de zinksprutade betongytorna från Forsmark III som exponerats under vattenytan.

- Zinkskiktet är relativt öppet för fukttransport, vilket medför att risken för frostsprängning bedöms vara liten.
- Transporten av klorider in till armering påverkas inte nämnvärt av det sprutade zinkskiktet.
- Betongens resistivitet, dvs fukthalten i betongen, har en stor betydelse för det galvaniska skyddets funktion.
- Sammanfattningsvis kan sägas att det finns goda möjligheter att använda katodiskt skydd med termiskt sprutade offeranoder av zink.
-

Katodiskt skydd av betongkonstruktioner med termiskt sprutade zinkanoder – Utomhus- och laboratorieprovning – forskningsprojekt VI

I slutrapporten, *Katodiskt skydd av betongkonstruktioner, Elforsk rapport 2015:134[26]*, som avslutade Etapp II, redovisades både resultat från kontrollerade laboratorieundersökningar av termiskt zinksprutade betongblock med ingjutna provstänger av kolstål som exponerats i olika relativa fuktigheter (75, 85, 97 och 100 %) samt resultat från kontrollmätningar av skyddsförmågan hos tre olika katodiskt skyddade betongkonstruktioner med termiskt sprutade offeranoder av zink. Vid termiska sprutningen av zink på betongkonstruktionerna har både ljusbågs- och flamsprutningsteknik använts.

Genomförande

I fältundersökningarna ingår tre olika provobjekt:

- Kantbalk (ca 400 m²) och stödmur på Essingeleden vid avfarten till Aspudden i Stockholm (Trafikverket), **figur 40B**.
- En mindre del (ca 60 m²) av norra kantbalken mellan stöd 7 och 8 samt in- och utsida av brolåda mellan stöd 7 och 8 vid vägbro 14-884-3, (Trafikverket), **figur 41B**.
- Betongvägg (ca 120 m²), i utrymme intill korgbandsil vid silgata 30 i intagsbyggnad för Forsmark 1 och 2.

I denna rapport redovisas inte resultaten från betongväggen i kärnkraftverket Forsmark III.



Figur 40B. Stödmur på Essingeleden vid avfart Aspudden, Stockholm.



Figur 41B. Vägbro nr 14-884-3, Hjalmar Brantings väg.

Vid en normal installation av katodiskt skydd med termiskt sprutade offeranoder på betongkonstruktioner görs inga mätningar av skyddseffektivitet.

I föreliggande fältundersökning har referenselektroder av titan belagda med ett ädelmetallskikt (MMO) och polarisationssonder av kolstål gjutits in i förborrade hål i betongen för att kontrollmäta zinkskiktets skyddande förmåga, **figur 42B**.



Figur 42B. Inmonterade mätelektroder i stödmurens kantbalk (Essingeleden). Utstickande kablar skyddas av ett utvändigt plaströr.

I **figur 43B** visas utseendet av en referenselektrod av titan med ädelmetallskikt och en av polarisationssonderna av kolstål som använts i undersökningarna. Mätkablar har anslutits till mätelektroden för mätning av skyddseffektiviten hos det sprutade zinkskiktet.



Figur 43B. Utseendet hos titanelektrod (höger) och mätelektrod av kolstål (vänster)

Vid kontrollmätning av skyddsförmågan mättes även betongens relativa fuktighet och temperatur, **figur 44B**. Efter kontrollmätningen avlägsnades temperatur- och fuktgivarna.



Figur 44B. Inmontering av temperatur- och fuktgivare i förborrade hål, undersida broåda, Göteborg.

Innan zinksprutning av betongytor rengörs betongytorna från smuts genom en lätt blästring av betongytan. Lösa betongbitar avlägsnas från de ytor som skall sprutas. Betongytan måste vara torr vid sprutningen för att få en god vidhäftning mellan zinken och betongytan. All armeringen som skall skyddas måste ha elledande förbindelse med varandra. Detta kontrolleras genom att mäta armeringskontinuitet i några punkter hos den armering som skall skyddas. Armeringskontinuiteten kontrolleras genom att mäta antingen resistansen eller spänningsfallet mellan olika armeringsdelar. Vid resistansmätning mellan olika armeringsjärn bör resistansen vara ca 0 ohm. Vid mätning av spänningsfallet mellan olika armeringsjärn bör spänningsfallet vara ca 0 mV. Om det inte föreligger elledande kontakt mellan olika armeringsstänger finns risk för läckströmskorrosion vid utmatning av den galvaniska skyddsströmmen från zinksiktet till armeringen. Risken för läckströmskorrosion är dock betydligt mindre jämfört med ett katodiskt skydd med påtryckt ström

För att det påsprutade zinksiktet skall kunna mata ut en galvanisk skyddsström till den ingjutna armeringen måste zinksiktet anslutas elektrisk med armeringen. En tumregel som används inom kärnkraften är en anslutningspunkt är 10 m² betongyta. Vid Trafikverket används en anslutningspunkt per 30 m² skyddad betongyta.

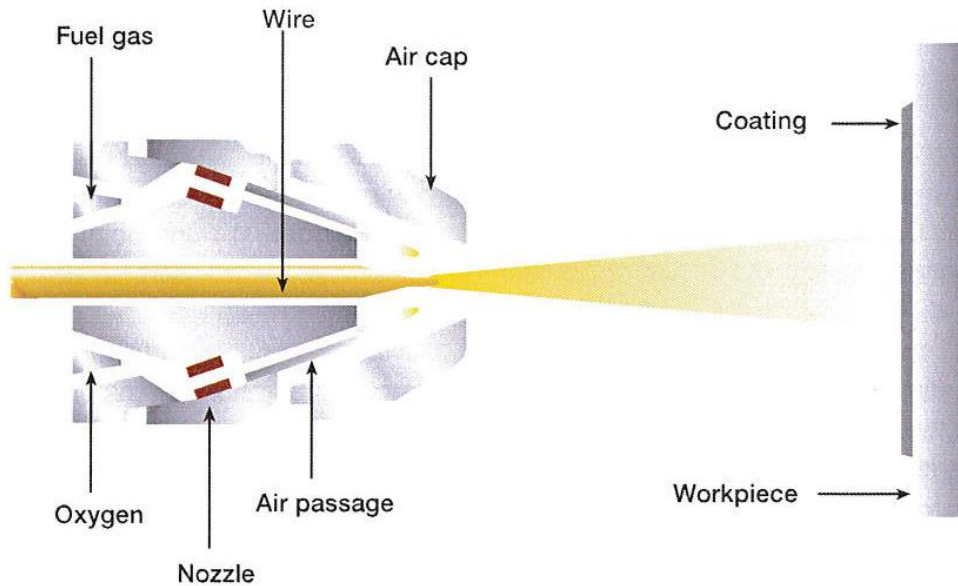
Modellering genom FEM-analys utförda av Swerea KIMAB [26] visade att spänningsfallet i ett sprutat zinksikt (zinktjocklek ca 100 µm) är i princip försumbart oberoende av avståndet mellan kontaktanslutningspunkterna. Det största spänningsfallet ligger i kontaktanslutningspunkten mellan zinksikt och armering.

Om det är möjligt bör anslutningspunkterna placeras i så icke aggressiv miljö som möjligt för att minska den korrosiva påverkan på kontaktanslutningen mellan armering och zinksikt. Antalet anslutningar mellan armering och zinksikt bör vara minst tre i en konstruktion.

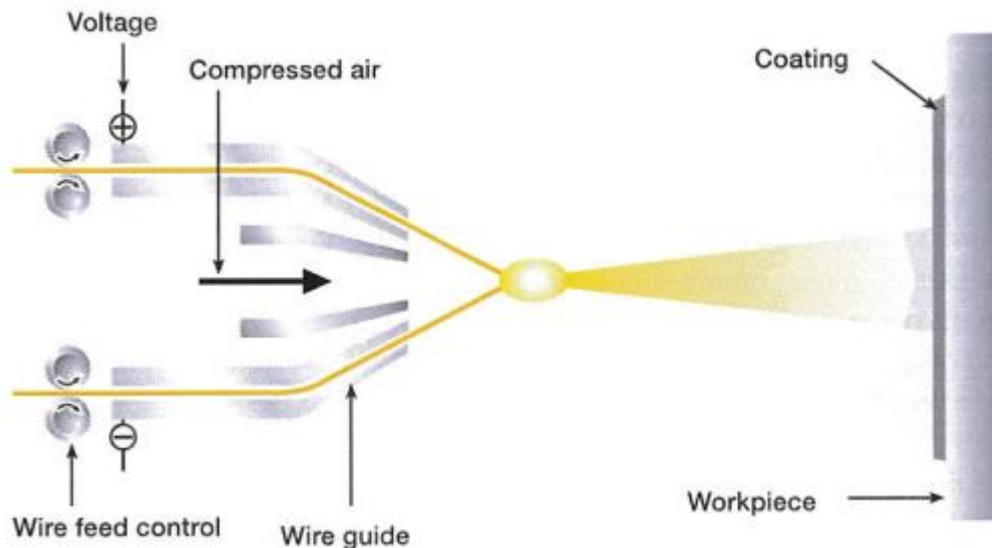
Vid påsprutning av smält zink på betongytan används idag princip två metoder:

- Flamsprutning
- Ljusbågssprutning

Vid flamsprutning, **figur 45B**, används en gaslåga med syre och acetylen (ibland även propan och vätgas) för att smälta anodtråden och vid ljusbågssprutning, **figur 46B**, används en hög likström för att smälta anodmaterialet. Den flytande metallen slungas ut från sprutan med hjälp av tryckluft.



Figur 45B. Schematisk skiss av flamsprutningsprocessen.



Figur 46B. Schematisk skiss av ljusbågssprutningsprocessen

Den helt dominerande sprutmetoden som används hittills i Sverige vid termisk zinksprutning är flamsprutning. På senare år har även ljusbågssprutning börjat användas.

De främsta fördelarna med ljusbågssprutning jämfört med flamsprutning vid termisksprutning av zink på betongytor är:

- Högre sprutkapacitet kg/timme
- Billigare process kr/m² betongyta (ingen kostnad för syrgas och bränningsgas)
- Enklare hantering vid mobila arbeten (inga gastuber)
- Enklare för operatören att spruta.

I fältundersökningen ingår två provobjekt som sprutats med ljusbåge, kantbalkar till en stödmur på Essingeleden samt kantbalkar, utsida och insida brolåda vid vägbro 14-884-3 i Göteborg.

I **figur 47B** visas termisk ljusbågssprutning med zink av undersida brolåda för vägbro 14-884-3 i Göteborg.



Figur 47B. Termisk ljusbågssprutning av zink på undersida brolåda för vägbro 14-884-3 i Göteborg

I **figur 48B** visas termisk sprutning med ljusbågsteknik av kantbalken till stödmur på Essingeleden Stockholm

Före påsprutning med ren zink (99,995 mass-%) utfördes en mätning av armeringskontinuitet och en lätt blästring av betongytorna. Löst sittande betong avlägsnades före sprutning. Kraftigt korroderad armering avlägsnades och ersattes med ny armering.

För att kontrollera de sprutade zinksskiktens skyddseffektivitet installerades referenselektroder av titan med ett ädelmetallskikt (MMO) och en stålektrod av kolstål. Antalet anslutningskontaktorna mellan zinkskikt och armering var minst tre hos de undersökta objekten.



Figur 48B. Ljusbågssprutning av kantbalk till stödmur vid Essingeleden Stockholm.

För vägbron i Göteborg bilades armeringen fram och en gängstång av rostfritt stål med en påskruvad varmförzinkad stålplatta svetsades fast i armeringsjärnet. För stödmurens kantbalk på Essingeleden, Stockholm användes den frilagda armeringen som anslutningskontakter mellan armering och zinkskikt.

Vid bedömning av skyddsförmågan hos det termiskt sprutade zinkskiktet har den elektrokemiska potentialen hos armeringen i de olika konstruktionerna uppmätts med ingjutna referenselektroder av titan belagda med ett ädelmetallskikt (MMO) enligt SS-EN 12696:2012 ”Katodiskt skydd av stål i betong – Konstruktioner i atmosfär”. Det framgår av standarden att det fordras minst 100 mV depolarisering (potentialavklingning) efter 24 timmar, dvs. en ökning av potentialen med minst 100 mV efter 24 timmars driftavbrott i förhållande till frånslagspotentialen (Off-potential), för att uppnå fullgott katodiskt skydd. Detta skrivs enligt formeln:

$$\Delta E_{(\text{från}, 24 \text{ tim})} = E_{(\text{från}, 24 \text{ tim})} - E_{(\text{från}, 0 \text{ tim})} \geq 100 \text{ mV}$$

Eftersom den elektriska kontakten mellan det termiska sprutade zinkskiktet och stålarmeringen inte kan brytas har vid varje referenselektrod installerades en polarisationssond av stål som är elektriskt ihopkopplad med armeringen via en kopplingsdosa. Vid kontrollmätningen av det termiska sprutade zinkskiktets skyddsförmåga bryts polarisationssondens elledande kontakt med stålarmeringen och det sprutade zinkskiktet. Polarisationssondens elektrokemiska potential mäts direkt efter brytning och efter 24 timmars brytning av den elledande kontakten mellan polarisationssond och stålarmering och zinksskikt.

Tidigare utförda undersökningar vid Ölandsbron visade att vid en potentialavklingning var större än 100 mV sänktes korrosionshastigheten med 96 %.

Vid bedömning av skyddsförmågan hos det katodiska skyddet har följande bedömning av potentialvärden efter 24 timmars frånslag av det katodiska skyddet använts, **tabell 19B**.

Tabell 19B. Bedömning av det katodiska skyddets skyddsförmåga i betongkonstruktioner görs enligt SS-EN 12696:2012.

Depolarisering efter 24 timmars fränslag av det katodiska skyddet (mV)	Skyddsförmåga
< 100	Dålig
≥ 100	God

Laboratorieundersökning

Laboratorieundersökningens syfte har varit att undersöka under vilka miljöförutsättningar termiskt sprutade offeranoder av zink kan vara användbara och även identifiera eventuella begränsningar i metoden. Utgångspunkten i laboratoriestudien var att betongens resistivitet spelar en avgörande roll för skyddets funktion. Utifrån litteraturgenomgången och resultaten i Etapp 1 i detta projekt identifierades fyra stycken olika parametrar för undersökningen som är viktiga för betongen och hela systemets resistivitet.

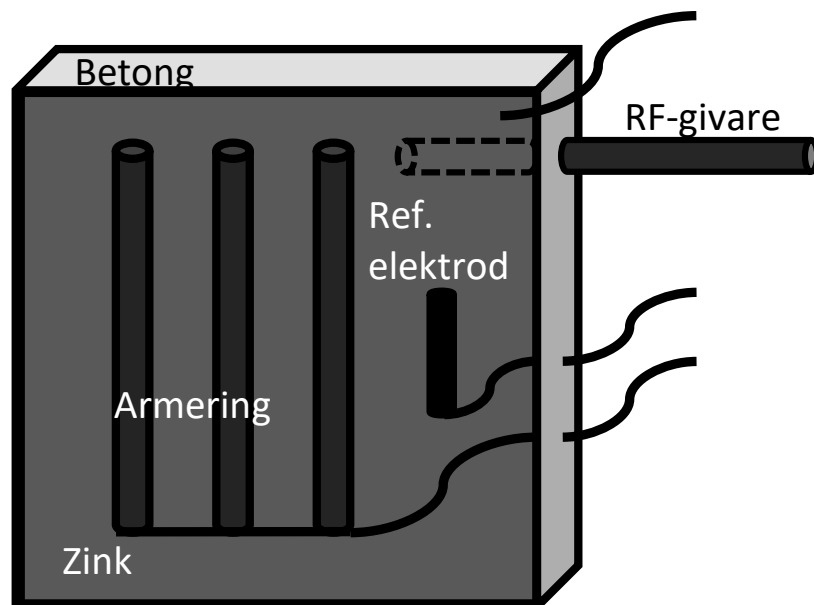
- **Fuktnivån:** Fukten i betongen är central för betongens ledningsförmåga och även för armeringens korrosionshastighet. Fuktnivån varierar mellan 75 % och 100 % där 100 % representeras genom att provkropparna är halvt nedsänkta i vatten. På detta sätt säkras även syretillförseln så att denna inte blir begränsande.
- **Täckande betongskikt:** Avståndet mellan offeranoden och armeringen har en inverkan på skyddets funktion och här valdes två olika täckande betongskikt för att se om och i så fall hur mycket tjockleken på det täckande betongskiktet betyder för funktionen.
- **Porositeten:** Med två olika vct varierades porositeten för att försöka efterlikna både gamla konstruktionen som kan vara aktuella att skydda idag och nyproducerade som kan bli aktuella att skydda i framtiden.
- **Ingjutna klorider:** Här valdes att gjuta in kloriderna i provkropparna av två skäl. För det första medgav inte projektets längd att driva in kloriderna och för det andra är det mycket svårt att få samma koncentration vid armeringsjärnen vid indrivning. Två olika koncentrationer valdes, 1 respektive 3 % av cementvikten. Den första för att representera ett rimligt och vanligt värde vid armeringskorrosion och det andra för att forcera armeringskorrosionen.

Utöver dessa ovan nämnda fyra parametrar tillverkades ett referensblock för varje kombination som inte sprutades med zink. Detta för att kunna jämföra korrosionen mellan skyddad och oskyddad. I ett tidigt skede diskuterades även möjligheten att undersöka karbonatiseringens inverkan på funktionen men försöksmatrisen riskerade att växa för mycket och bedömningen gjordes att det var bättre att karbonatisera samtliga provkroppar i ytan då denna skyddsmetod framförallt är aktuell på äldre konstruktioner där ytan redan är karbonatiserad. Att skydda en helt okarbonatiserad yta ansågs därför vara av mindre vikt i denna studie. För betongen användes anläggningscement med $D_{max}=16$ mm.

Utifrån detta togs en försöksmatris med sammanlagt 32 block fram där 16 stycken skyddades av ett termiskt sprutat skikt av zink.

Figur 49B visar en skiss av provblocken som användes i laboratoriestudien. De ingående komponenterna är följande:

- Tre stycken kontrollvägda stålstänger används för att efterlikna armering.
- En referenselektrod av titan med ett ädelmetallskikt (MMO) används för att kunna mäta den elektrokemiska potentialen hos stålstångerna och hos det sprutade zinkskiktet.
- Foderröret för RF-givaren som placerades på samma djup som stålstångerna var inte planerat från början utan något som adderades i ett sent skede för att vid en eventuell förflyttning av provblocken mellan olika miljöer kunna mäta RF på stålets djup om en fuktgradient skapades. Detta har ännu inte varit aktuellt vilket kommer att diskuteras senare i rapporten.
- Zinkskiktet sprutades på framsidan av provblocken i skissen.
- Mantelytan och baksidan förseglades med tejp för att efterlikna en verklig konstruktion och säkerställa en endimensionell fukttransport.

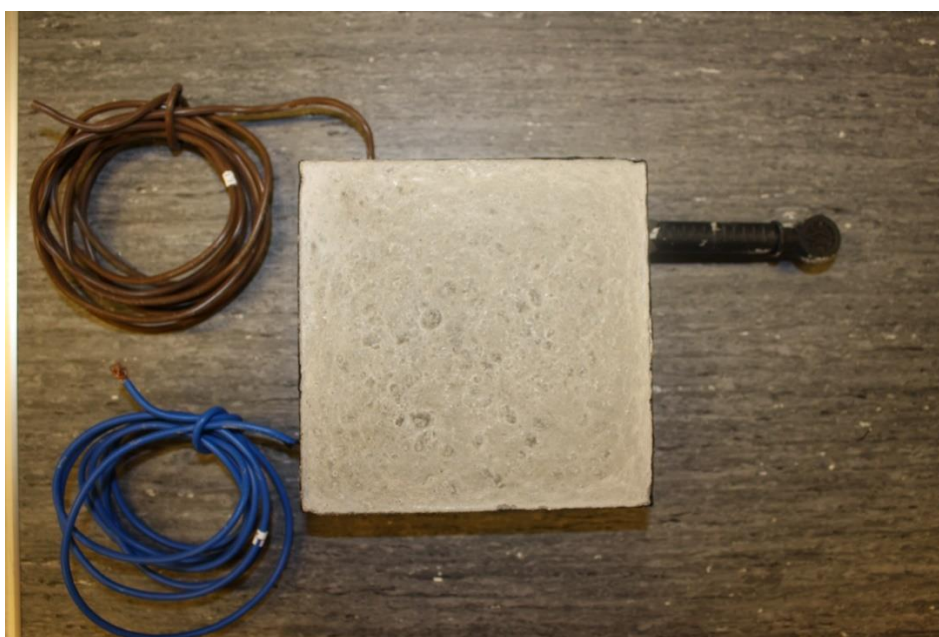


Figur 49B. Schematisk skiss av provblocket med armeringsstänger, foderrör för fuktgivare och referenselektrod. Måtten är 150x150x50mm (HxBxD).

Figur 50B visar ett foto av ett provblock innan gjutning där armeringsklossar användes för att säkerställa önskat täckskikt och för att undvika att referenselektrod och stål kom i kontakt med varandra. Djupet på provblocket säkerställdes genom att en kontrollerad volym betong användes vid varje gjutning. **Figur 51** visar ett foto av det färdiga provblocket efter avformning och försegling men innan sprutningen av zink.



Figur 51B. Foto av provblocket innan gjutning. Frigolitformar som normalt används för att gjuta 150mm kuber användes för tillverkningen.



Figur 51B. Provblock efter gjutning och avformning. Den blå kabeln ansluter till stålstångena och den bruna till referenselektroden av titan med ädelmetallskikt.

Prepareringen av provblocken innefattade flera steg:

- Gjutning och avformning.
- En veckas konditionering i 100 % RF.
- Tre månaders konditionering i 65 % RF för att möjliggöra karbonatiseringen av ytskiktet.
- En månad med förhöjd koldioxidhalt i CBI:s ”CO₂-box” med ca 15 % koldioxidhalt.
- Transport till Kållerød för ljusbågs-sprutning med zink.
- Hemtransport och inkoppling av zinksiktet i provblocken.
- Placering i respektive RF-miljö och start av mätningar.

Nedan följer foton från prepareringen av provblocken. **Figur 52** visar utrustningen (CO₂-boxen) som användes för att karbonatisera ytan på provblocken inför sprutningen. I boxen doseras koldioxiden manuellt vilket medför att det är svårt att hålla en konstant nivå. Omrörning av luften sker för att koldioxiden inte skall sjunka till botten och halten läses av med två stycken givare. Samtliga provblock kördes samtidigt receptvis så även om exponeringen kan skilja mellan de olika recepten så är den densamma för jämförbara provblock. Fukt tillförs vid behov genom en mättad saltlösning för att luften inte skall bli för torr.



Figur 52B. CBI:s CO₂-box som användes vid karbonatiseringen av provblocken.

Efter karbonatiseringen fraktades de 16 block som skulle sprutas till Kållerøds Målning och Blästring AB för ljusbågs-sprutning. På blockens framsida placerades anslutningen för kabeln vilken sprutades fast vid ytan. Denna anordning visade sig vara lite problematisk då anslutningen i vissa fall lett till glapp i kontakten. **Figur 53B** och **54B** visar betongblocken

inför sprutningen och under sprutningen. Mantelytan och kablarna skyddades med ramen som syns på bilderna.

Vid ljusbågs-sprutning används en hög likström för att smälta zinktrådarna. Den flytande metallen slungas ut från sprutan med hjälp av tryckluft. Vid sprutning av betongblocken användes en utrustning av beteckningen Castolin EuTronic spray 4. Zinkskiktets tjocklek som eftersträvades var ca 300-400 μm tjockt. De zinktrådar som användes vid sprutningen innehöll 99,995 zink. Eftersom karbonatiseringsskiktet antogs vara relativt tunt utfördes ingen blästring av betongytan innan sprutning genomfördes.



Figur 53B. Provblocken innan sprutning. Den röda kabeln ansluts till zinkskiktet i samband med sprutningen.

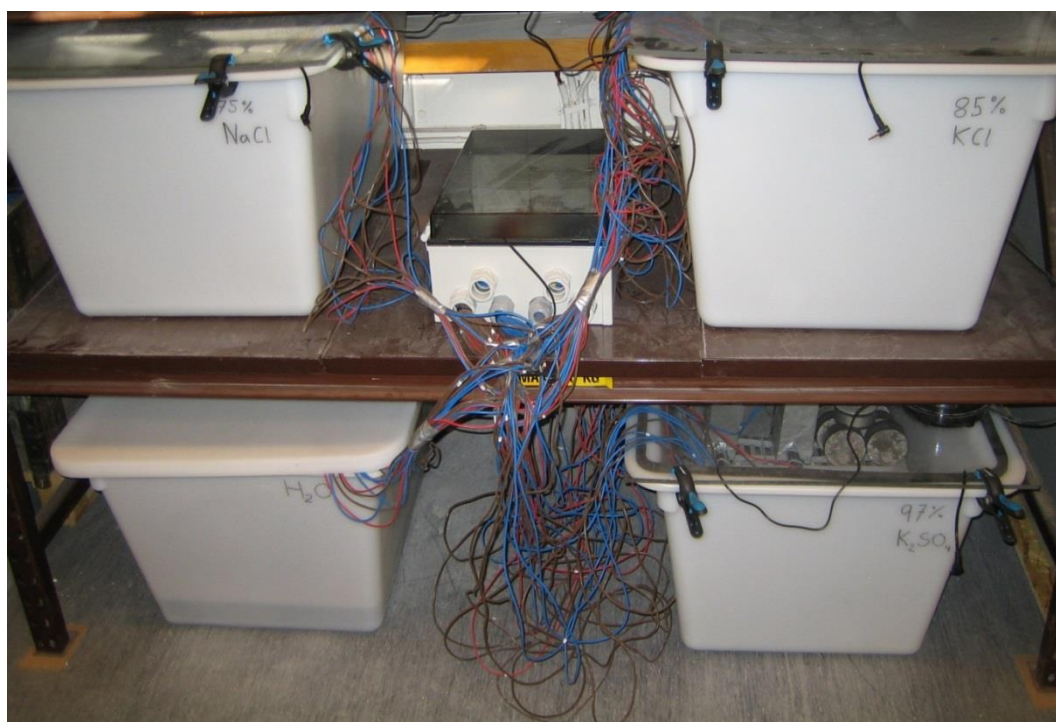


Figur 54B. Ljusbågs-sprutning av provkropparna.

Efter sprutningen kopplades provblocken in och placerades i sina olika klimatboxar. Dessa regleras genom mättade saltlösningar till 75% RF (NaCl), 85% RF (KCl), 97% (K₂SO₄) samt 100% (halvt nedsänkt i vatten). Luften cirkuleras med fläktar i klimatboxarna.

Initialt fanns en tanke om att flytta provkropparna mellan klimatboxarna för att skapa en fuktgradient med olika RF vid ytan (zinksiktet) och inuti (stålet) för att se om skyddspotentialen från zinksiktet blev för svag. Detta skulle i så fall simulera den miljö som kan uppkomma under sommarhalvåret då en betongkonstruktion kan vara fuktig inuti medan ytan är torr. Här har dock skyddspotentialen även i den torra (75 % RF) miljön varit så god, vilket senare beskrivs i resultatdelen, att möjligheten att skapa fuktgradienter ännu aldrig använts.

I **figur 55B** visas utrustningen med de fyra klimatboxarna kabeldragningen och elcentralen där i och urkoppling av skyddet kan ske.



Figur 55B. Klimatboxarna som använts vid konditioneringen av provblocken under försöken.

För att kontrollera och bedöma skyddsförmågan hos det sprutade zinksiktet hos varje enskilt provblock användes den europeiska standarden SS-EN 12696:2012 ”Katodiskt skydd av stål i betong – Konstruktioner i atmosfär”. Det framgår av standarden att det fordras minst 100 mV depolarisering (potentialavklingning) efter 24 timmar, dvs. en ökning av potentialen med minst 100 mV efter 24 timmars isärkoppling i förhållande till frånslagspotentialen, $E_{(\text{från}, 0 \text{ tim})}$, för att uppnå fullgott katodiskt skydd. Detta skrivs enligt formeln:

$$\Delta E_{(\text{från}, 24 \text{ tim})} = E_{(\text{från} 24 \text{ tim})} - E_{(\text{från}, 0 \text{ tim})} \geq 100 \text{ mV}$$

Vid mätningarna av den elektrokemiska potentialen användes en höghögsmig multimeter. Potentialen mäts både vid ihop- och isärkoppling av zinkskiktet från de ingjutna provstängerna. Potentialvärdena relateras till en referenselektrod av titan belagd med ett ädelmetallskikt som är ingjuten i blocken. Denna referenselektrod ger inte ett helt stabilt värde vid mätning av en absolutpotential. Däremot passar titanelektroden utmärkt till att användas för mätning av potentialförändringar enligt den europeiska standarden, SS-EN 12696:2012.

Mätningen utförs genom att mäta stålets elektrokemiska potential mot referenselektrod medan zinkskiktet är inkopplat, $E_{(ihop)}$. Detta är en så kallad blandpotential där zink och stål har samma potential när dessa är ihopkopplade. Därefter mäts stålets elektrokemiska potential mot referensen i brytögonblicket, $E_{(från,0\ tim)}$, samt efter att de kopplats isär i 24 timmar varvid den elektrokemiska potentialen mäts igen efter 24 timmars fränkoppling, $E_{(från\ 24\ tim)}$. Potentialmätningar utfördes även på zinkskikt.

Provstängerna och zinkskiktets korrosionsutseende undersöktes okulärt efter avslutad exponering. Även en bedömning av zinkskiktets vidhäftning mot betongen gjordes efter exponering.

Provstänger av stål (både skyddade och icke skyddade) av storleken 100 mm och en diameter av 10 mm användes för att undersöka zinkskiktets förmåga att galvaniskt skydda stålstängerna mot korrosion i en kloridhaltig miljö. I **tabell 20B** anges provstängernas kemiska sammansättning.

Tabell 20B. Provstängernas kemiska sammansättning uttryckt i vikt-%

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

Korrosionshastigheten utvärderades genom massförlustbestämning. Mass-minskningen (massförlusten) på grund av korrosion bestäms genom att provstängerna vägs före exponeringen och vid exponeringens slut, efter det att provstängerna rengjorts från korrosionsprodukter och betongrester. Rengöringen görs genom upprepad betning. För stålstängerna användes Clarkes lösning (20g/l Sb_2O_3 och 60 g/l $SnCl_2 \cdot 2H_2O$ i koncentrerad HCl) vid rumstemperatur. Vid beräkning av stålstängernas korrosionshastighet användes densiteten $7800\ kg/m^3$.

För att upptäcka eventuella lokala korrosionsangrepp (gropfrätning) undersöktes efter betningen samtliga stålstänger i låg förstoring (20 gångers förstoring). Vid upptäckt av frätgropar mättes groparnas maximala frätgropsdjup med ett metalljuskroskop.

Resultat och diskussion

Fältundersökningar

Vid bedömning av skyddsförmågan hos det termiskt sprutade zinkskiktet har kontrollmätningar av skyddseffektivitet utförts hos samtliga skyddade konstruktioner. Mätningar har utförts minst en gång per år under projektets gång.

I **tabell 22** visas resultaten från kontrollmätningar av skyddsförmågan hos det termiska sprutade katodiska skyddet på Essingeleden. Kontrollmätningar har utförts tre gånger under perioden maj 2013 till september 2014.

Som framgår av resultaten från potentialmätningarna i **tabell 21B** uppnås fullgott katodiskt skydd, dvs $\Delta E_{(från, 24tim)} \geq 100$ mV, i samtliga mätfällen förutom hos polarisationssond nr 3 vid kontrollmätning den 23 september 2014. Som framgår av tabellen så är potentialavklingningen negativ. Detta fenomen har även kunna konstaterats vid kontrollmätningar utförda i Göteborg. En möjlig förklaring skulle kunna vara att polarisationssonden har fått en oavsiktlig kontakt med zinkskiktet. En sådan kontakt skulle innebära att när polarisationssonden kopplas ifrån stålarmeringen och om det föreligger elektrisk kontakt mellan polarisationssonden och zinkskiktet kommer den elektrokemiska potentialen att inta zinkskiktets potential, dvs potentialen kommer att bli mer negativ. Vid de första mätningarna så kunde inte detta fenomen konstateras. Frågan är hur det möjligt att det sprutade zinkskiktet får med tiden elektrisk kontakt med polarisationssonden. En möjlig förklaring skulle kunna vara att de zinkjoner bildas från zinkskiktet kommer att transporteras in mot armeringen och bilda korrosionsprodukter av zink. Om dessa korrosionsprodukter når polarisationssondens stålyta fås en elledande förbindelse mellan polarisationssond och zinkskikt. En annan möjlighet och mer trolig, är att polarisationssonden som från brytögonblicket inte är i elektrisk kontakt med armeringen och zinkskiktet, kommer att utsättas för en läckström från zinkskiktet. Storleken på denna läckström beror dels betongens ledningsförmåga och övergångsmotståndet mellan polarisationssond och betong. Även polarisationssondens avstånd till den ingjutna armeringen och betongens fukthalt påverkar hur stor läckström som kommer att passera polarisationssonden. Vid lokala variationer i betongens fukthalt (varierande resistivitet) kommer den läckström som tas upp i polarisationssonden att variera med resistiviteten mellan polarisationssonden och zinkskiktet/armeringen.

Tabell 21B. Kontrollmätningar av skyddsförmågan hos det termiskt sprutade zinkskiktet som applicerats på kantbalk och stödmur på Essingeleden. Mätningarna utfördes den 13 maj 2013, 23 september 2013 och 23 september 2014.

Polarisations- sond (nr) (datum)	$E_{(ihop)}$ (mV)	$E_{(från, 0\ tim)}$ (mV)	$E_{(från, 24\ tim)}$ (mV)	$\Delta E_{(från, 24\ tim)}$ (mV)	Skydds- förmåga
(1) (130513)	-328	-327	-166	161	God
(1) (130923)	-265	-263	-144	119	God
(1) (140923)	-200	-199	-81	118	God
(2) (130513)	-286	-286	-173	113	God
(2) (130923)	-261	-258	-107	154	God
(2) (140923)	-217	-215	-79	136	God
(3) (130513)	-315	-314	-156	158	God
(3) (130923)	-249	-246	-127	122	God
(3) (140923)	-216	-226	-296	-70	Dålig
(4) (130513)	-301	-301	-143	158	God
(4) (130923)	-220	-219	-105	115	God
(4) (140923)	-198	-197	-70	137	God

I **tabell 22B** redovisas mätningar av resistansen mellan olika polarisationssonder och zinkskikt/armering på Essingeleden. Det framgår av mätresultaten i **tabell 23** att resistansen mellan zinkskikt/armering och mellan olika polarisationssonder är betydligt lägre för de polarisationssonder som uppvisar en negativ depolarisation.

Den lägre uppmätta resistansen zinkskiktet och polarisationssonden innebär en större läckströmspåverkan på polarisationssonden.

Tabell 22B. Resultat från mätningar av resistans mellan polarisationssond och zinkskikt i Essingeleden. Mätningarna utfördes den 23 september 2014.

Polarisations- sond (nr)	Mätning av resistans mellan polarisationssond och zink- skikt (MΩ)	Depolarisation efter 24 timmars brytning
(1)	17,0	118
(2)	14,0	136
(3)	0,079	-70
(4)	11,0	137

I **tabell 23B** visas resultaten från kontrollmätningar av skyddsförmågan hos det termiska sprutade katodiska skyddet på bro 14-884-3 i Göteborg. Kontrollmätningar har utförts tre gånger under perioden februari 2012 och mars 2014.

Som framgår av resultaten från potentialmätningarna i **tabell 23B** så uppnås fullständigt katodiskt skydd vid två mättillfällen, den 12 oktober 2012 och 7 februari 2013 vid samtliga mätpunkter. Vid mätningarna den 3 mars 2014 konstaterades dock en negativ (depolarisation) potentialavklingning för polarisationssond nr 1, 2 och 6.

I **tabell 24B** redovisas mätningar av resistansen mellan olika polarisationssonder och zinkskikt/armering i Göteborg. Det framgår av mätresultaten i **tabell 25B** att resistansen mellan zinkskikt/armering och olika polarisationssonder är lägre för de polarisationssonder som uppvisar en negativ depolarisation. Den lägre uppmätta resistansen mellan zinkskiktet och polarisationssonden innebär en större läckströmspåverkan på polarisationssonden.

Tabell 23B. Kontrollmätningar av skyddsförmågan hos det termiskt sprutade zinksiktet som applicerats på kantbalk och undersida brolåda, Göteborg. Mätningarna utfördes den 7 oktober 2012, 7 februari 2013 och 10 mars 2014.

Polarisations- sond	$E_{(ihop)}$	$E_{(från, 0\ tim)}$	$E_{(från, 24\ tim)}$	$\Delta E_{(från, 24tim)}$	Skydds- förmåga
(nr) (datum)	(mV)	(mV)	(mV)	(mV)	
(1) (121007)	-227	-226	-119	107	God
(1) (130207)	-235	-233	-117	114	God
(1) (140310)	-313	-315	-572	-257	Dålig
(2) (121007)	-272	-270	-116	154	God
(2) (130207)	-276	-275	-159	116	God
(2) (140310)	-424	-427	-552	-125	Dålig
(3) (121007)	-156	-154	-37	117	God
(3) (130207)	-154	-152	-32	120	God
(3) (140310)	-154	-150	-18	132	God
(4) (121007)	-169	-168	-59	109	God
(4) (130207)	-169	-166	-64	102	God
(4) (140310)	-156	-155	-52	103	God
(5) (121007)	-322	-322	-119	203	God
(5) (130207)	-302	-300	-126	174	God
(5) (140310)	-248	-246	-117	129	God
(6) (121007)	-267	-264	-102	162	God
(6) (130207)	-243	-243	-120	123	God
(6) (140310)	-213	-216	-339	-123	Dålig

Tabell 24B. Resultat från mätningar av resistans mellan polarisationssond och zinkskikt i Göteborg. Mätningarna utfördes den 10 mars 2014.

Polarisations- sond (nr)	Mätning av resistans mellan polarisationssond och zink- skikt (MΩ)	Depolarisation efter 24 timmars brytning av polarisationssond (mV)
(1)	1,2	-21
(2)	1,4	-13
(3)	18,0	154
(4)	8,3	117
(5)	7,8	121
(6)	3,4	-233

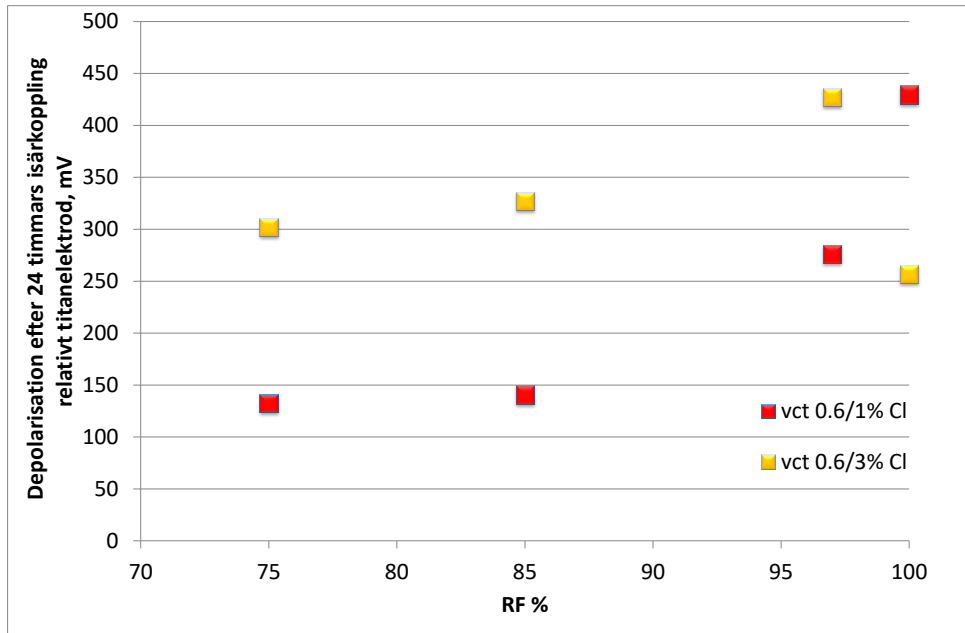
I **tabell 26** visas resultat från mätningar av betongens fukthalt med och utan sprutat zinkskikt. Det framgår att den relativa fuktigheten i betongen är något lägre för sprutade betongtyor jämfört med ej sprutade betongtyor. Den lägre fukthalten i betongen under det sprutade zinkskiktet beror sannolikt på att dessa betongtyor är regnskyddade.

Tabell 25B. Resultat från mätningar betongens fukthalt under termiskt sprutat zinkskikt vid Hjalmar Brantingsmotet i Göteborg. Datum för mätning var den 7 februari 2013.

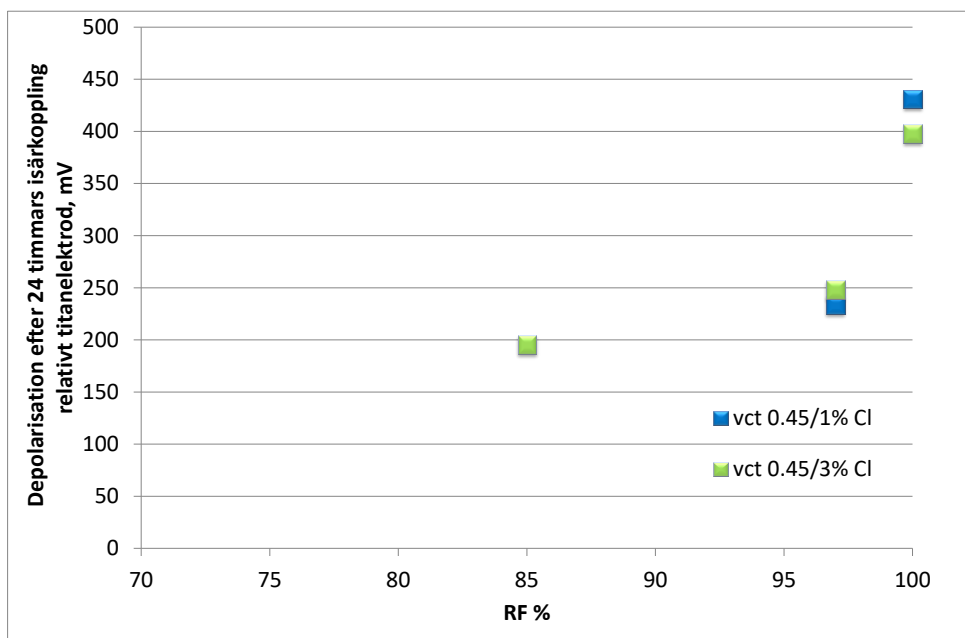
Fuktgivare nr.	Placering	Rel. Fukt %	Temperatur °C
1	Undersida brolåda (under zinkskikt)	77,2	-6,1
2	Undersida brolåda (under zinkskikt)	82,9	-5,6
3	Sida kantbalk landfäste (ej zinkskikt)	85,4	-6,4
4	Sida kantbalk landfäste (ej zinkskikt)	91,9	-6,0
5	Sida kantbalk landfäste (ej zinkskikt)	90,6	-6,1

Laboratorieundersökningar

I **figur 56B** och **57B** redovisas resultat från depolarisationsmätningar på de ingjutna provstängerna hos de zinksprutade provblocken.



Figur 56B. Medelvärden från mätperioden 13-05-21 till 14-04-03 för provblocken med vct 0.45.



Figur 57B. Medelvärden från mätperioden 13-05-21 till 14-04-03 för provblocken med vct 0.55.

I **figur 56B** och **57B** kan följande noteras:

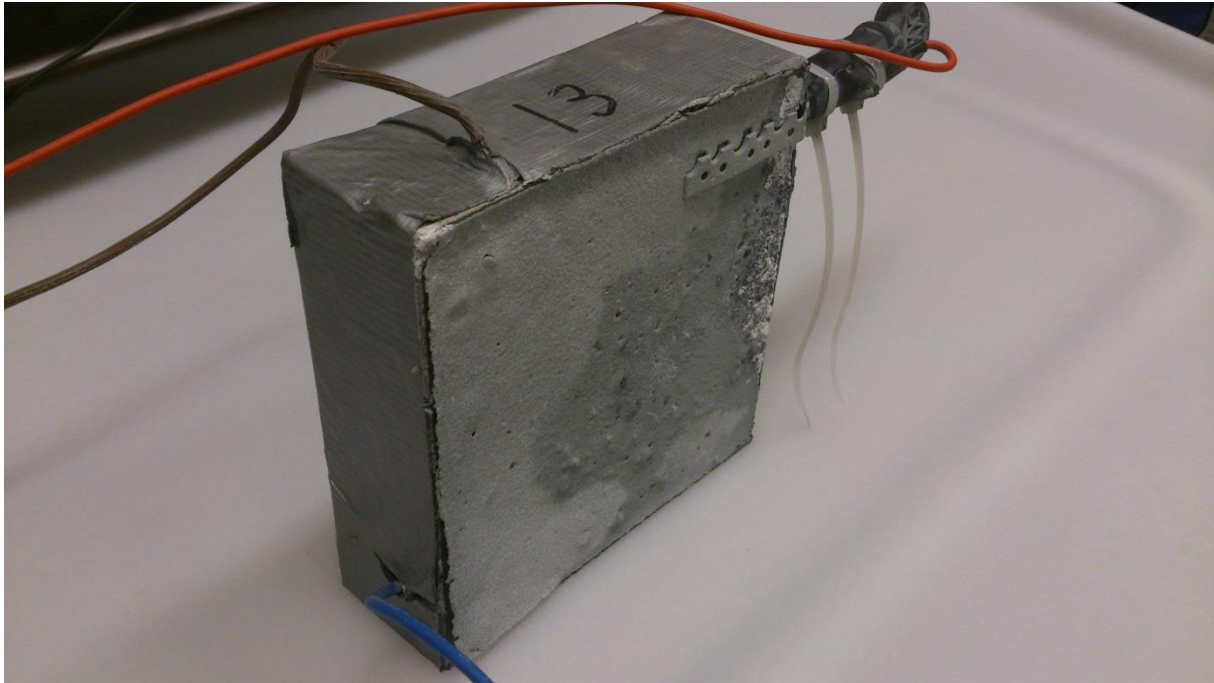
- Samtliga provblock klarar 100 mV kriteriet med god marginal. Detta gäller även för de torraste miljöerna. Som tidigare har nämnts innebär detta att skyddspotentialen även i den torra (75 % RF) miljön varit så god att möjligheten att skapa fuktgradienter ännu aldrig använts. Troligtvis krävs betydligt lägre fuktnivåer än vad som är rimligt utomhus i Sverige.
- En högre fuktnivå ger en högre matning av skyddsström. Detta är tydligt för både vct 0.45 och vct 0.55.
- Den ökade kloridhalten ger en mycket tydlig effekt för provblocken med vct 0.55. Effekten är dock inte lika tydlig för vct 0.45.

I övrigt kunde ingen effekt av täcksiktets tjocklek konstateras. Detta innebär inte att avståndet mellan anod och katod är betydelselöst men med dessa små variationer som ett täcksikt ger så kan ingen effekt konstateras.

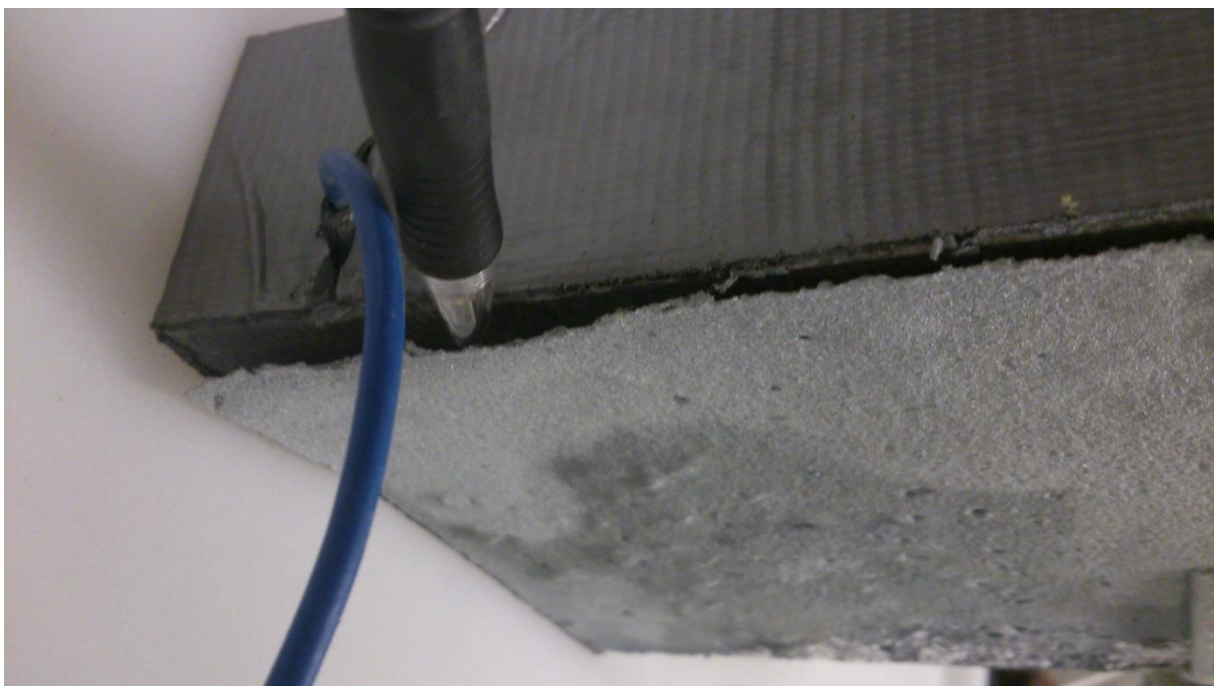
Efter drygt ett års exponering gjordes en okulär besiktning av samtliga provkroppar. Observationerna kan sammanfattas i följande punkter:

- Inga tecken på armeringskorrosion i form av rostutfällningar eller sprickbildning kunde noteras. Samtliga referensblock såg ut att vara intakta.
- I de fuktigare miljöerna noterades vitrost (ZnO) på flera zinksprutade block vilket tyder på en viss mängd egenkorrosion.
- I de fall glapp konstaterats har det varit relativt lätt att åtgärda med undantag av provblock 5.
- Flera fall av delaminering av zinksiktet har noterats varav det på provblock 13 har den sämsta vidhäftningen, se **figur 58B** och **59B**
- Även provblock 1, 2, 5, 7, 8 och 10 har mindre ytor av delaminering.

Delamineringen är intressant av flera skäl då vi inte noterat något motsvarande på våra fältstationer oberoende om de flamsprutats eller sprutats med ljusbåge. Anledningen till den dåliga vidhäftningen antas bero på att betongytorna inte blästrades före sprutning. Skyddsförmågan är dock fortfarande hög då depolarisationen efter 24 timmar fortfarande överstiger 100 mV.

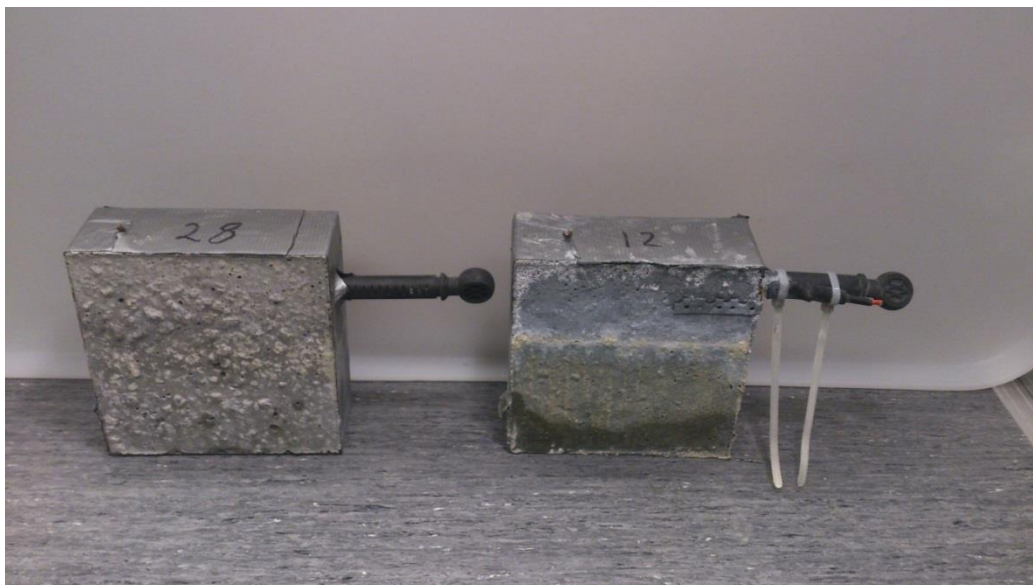


Figur 58B. Foto på provblock 13 där den ljusare ytan indikerar delaminering



Figur 59B. Närbild på provblock 13 som illustrerar delamineringen

I **figur 60B** visas utseendet hos två provblock som varit delvis nedsänkta i vatten. Det framgår att zinksiktet har bildat vitrost på den del som legat över vattennivån. I undervattensdelen har zinkens korrosionsprodukter transporterats bort från zinkytan.



Figur 60B. Provblock 12 med tillhörande referens 28. Dessa provkroppar har varit halvt nedsänkta i vatten under provningstiden.

I **figur 61B** visas utseendet hos två betongblock efter ett års exponering i en klimatbox med en relativ fuktighet av 97 %. Zinkytan hos det sprutade betongblocket är i princip oskadad.



Figur 61B. Provblock 11 med tillhörande referens 27. Dessa provblock har varit placerade i 97 % RF

I **tabell 26B** redovisas resultat från mätningarna av provstängernas (både skyddade och oskyddade) korrosionshastighet efter ett års exponering i olika relativa fuktigheter. Som framgår av resultaten i **tabell 26B** så är korrosionshastigheten mycket låg hos både skyddade och icke skyddade provstänger. Detta gäller dock inte för den oskyddade provstäng nr 81 som har en något högre korrosionshastighet än hos övriga provstänger. Denna provstäng har

även utsatts för lokal korrosion (maximalt gropfrättningsdjup uppmättes till ca 525 µm), **tabell 26B**.

Tabell 26B. Resultat från utvärdering av korrosionshastighet hos kolstål ingjutna i betong med och utan katodiskt skydd.

Provblock nr	Provstång nr	Korrosionshastighet µm/år, medelvärde, µm/år		Skyddsgrad (%)
11 (med zinkskikt) RF 97 %	31	0,9570	0,9701	86,6
	32	1,0826		
	33	0,8708		
12 (med zinkskikt) RF 100 %	34	1,0014	1,0368	3,7
	35	1,0577		
	36	1,0514		
27 (utan zinkskikt) RF 97 %	79	0,9922	1,8103	-
	80	1,2756		
	81	3,1632		
28 (utan zinkskikt) RF 100 %	82	1,2010	1,0771	-
	83	1,1195		
	84	1,1018		

I **tabell 27B** visas resultaten från mätning av maximalt frätgropsdjup för skyddade och oskyddade provstänger. Som framgår resultaten i **tabell 27B** är det endast den oskyddade provstängningen nr 81 som har fått gropfrätning. Det maximala frätgropsdjupet mättes till 525 µm. För de övriga provstängerna kunde inga frätgropar konstateras.

Tabell 27B. Resultat från mätning av maximal frätgropsdjup för skyddade och icke skyddade provstänger

Provblock nr	Provstång nr	Maximal frätgropsdjup μm
11 (med zinkskikt) RH 97 %	31	0
	32	0
	33	0
12 (med zinkskikt) RH 100 %	34	0
	35	0
	36	0
27 (utan zinkskikt) RH 97 %	79	0
	80	0
	81	525
28 (utan zinkskikt) RH 100 %	82	0
	83	0
	84	0

Sammanfattningsvis kan sägas att korrosionen hos provstängerna efter ca ett års exponering i klimatboxar med olika relativa fukthalter i betongen har i princip varit försumbar för både skyddade och oskyddade provstänger förutom den oskyddade provstäng nr 81. Skillnaden i korrosionshastighet mellan skyddade och oskyddade provstänger är mycket liten förutom hos den oskyddade provstäng nr 81. Eftersom provstängerna i de sex undersökta provblocken (både skyddade och oskyddade) var i princip helt oskadade efter ett års exponering sparades övriga block för en senare utvärdering. Maximal skyddsgraden (86,6 %) uppmättes vid provstänger som exponerats vid en relativ fuktighet av 97 %.

Slutsatser – laboratorieprovning och fältförsök

Efter ett års laboratorieexponering, i olika klimatboxar med en varierande relativ fuktighet av 75, 85, 97 och 100 %, av termiskt zinksprutade betongblock med ingjutna klorider och provstänger av stål samt fältexponering upp till två år av tre olika betongkonstruktioner i verklighetstroga miljöer kan följande slutsatser dras:

Laboratorieundersökning

- Vid kontroll av skyddsförmågan hos provstänger ingjutna i en kloridhaltig betong framgick det att vid ett RF hos betongen mellan 75 och 100 % uppnåddes skyddskriteriet, $\Delta E_{(från, 24\ tim)} \geq 100\text{ mV}$, i samtliga fall.
- Korrosionshastigheten hos provstänger av kolstål efter ett års exponering var mycket låg hos både skyddade och oskyddade provstänger förutom en oskyddad provstång som hade fått en hög korrosionshastighet av 3,1 $\mu\text{m}/\text{år}$ och en kraftig gropfrätning (uppmätt maximalt gropfrättningsdjup var 525 μm .)
- Den genomsnittliga skyddsgraden vid ett RF av 97 % och en total kloridhalt av 3 % per cementvikt är ca 87 %.
- Vidhäftningen av zinkskiktet har försämrats något vid provblockens kanter. Anledningen till detta antas bero på att provblocken inte blästrades före den termiska sprutningen.

- Eftersom korrosionshastigheten hos de flesta oskyddade provstängerna fortfarande efter ett års exponering är låg rekommenderas en betydligt längre exponeringstid för att få igång korrosionen och därmed kunna utvärdera skyddseffektiviteten hos det termiskt sprutade zinkskiktet vid olika RF i betongen.

Slutsatser - Fältundersökning

- Vid kontroll av skyddsförmågan efter ca ett års exponering av tre olika betongkonstruktioner som katodiskt skyddats med ett termiskt sprutat zinkskikt framgick det att skyddskriteriet, $\Delta E_{(\text{från, 24 tim})} \geq 100 \text{ mV}$ uppnåddes i samtliga mätpunkter.
- Vid kontroll av skyddsförmågan hos kantbalken för stödmuren på Essingeleden efter 1½ års drift och efter 2 års drift i betongbron i Göteborg konstaterades en negativ depolarisation vid en av fyra mätpunkter vid Essingeleden och vid tre av sex mätpunkter vid vägbron i Göteborg.
- Den negativa polarisationen som konstaterade både på Essingeleden och på vägbron i Göteborg beror på att när mätsonden kopplas isär från armeringen kommer den isolerade mätsonden att utsättas för läckströmmar från det sprutade zinkskiktet.
- Mätningar av resistansen mellan polarisationssond och zinkskikt/armering visar att resistansen är betydligt lägre vid en negativ depolarisation än vid en positiv depolarisation.
- För att kunna kontrollera skyddsförmågan, med en ingjuten mätsond, hos ett galvanisk katodiskt skydd med t ex ett anodsystem av termiskt sprutat zink måste den elektriska kontakten mellan zinkskiktet och stålarmingen helt kunna brytas vid kontrollmätning.

Katodiskt skydd av ingjutna offeranoder av zink – forskningsprojekt VII

Vintern 2013 startades forskningsprojektet - *Optimalt skydd av parkeringsdäck vid nybyggnad och renovering* och som avslutades under 2016 med rapporten SBUF Rapport 13212:2016 [28]

Syftet med projektet var att ta fram underlag för hur ett parkeringsdäck bör utformas (med avseende på beläggning och katodiskt skydd), skyddas och underhållas på ett optimalt och ekonomiskt hållbart sätt.

Inom den del av projektet som behandlar ar katodiskt skydd av parkeringsdäck har en installation och utvärdering av skyddsförmågan hos ingjutna offeranoder av zink med ett pågjutet cementhölje innehållande litiumhydroxid (LiOH) utförts.

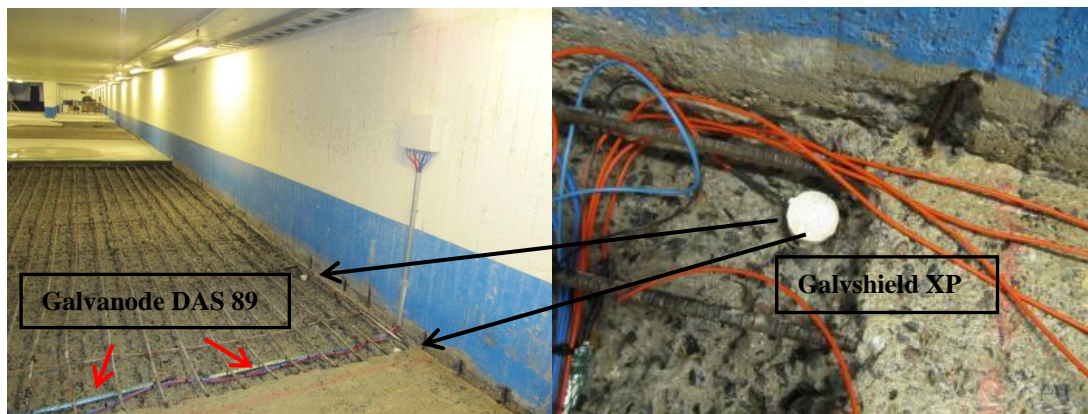
Genomförande

I södra Stockholm byggdes mellan åren 1967-73 ett stort bostadsområde med flera bostadsfastigheter med tillhörande garage. Fastigheterna med tillhörande garage renoverades under perioden 2015-17. Garaget ligger under markytan och uppvisade före renovering omfattande skador på betonggolvet till följd av dålig vidhäftning mot armering samt armeringskorrosion. I **figur 61B** visas exempel på armeringskorrosion i parkeringsgaragets betonggolv.



Figur 61B. Delaminerad betong p g a armeringskorrosion i betonggolv

I samband med renoveringen utfördes en provinstallation med två olika typer av offeranoder av zink med cementshölje innehållande LiOH. Anoderna placerades i närheten av en oskadad äldre betong för att kunna undersöka strömspridningen från anoderna till både den nygjutna armeringen och armeringen i den äldre betongen, **figur 62B**.



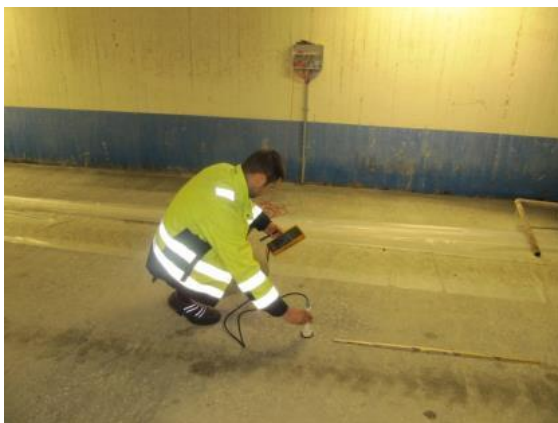
Figur 57B. Provinstallation med två typer av offeranoder av zink med cementshölje

Från varje enskild anod (totalt 6 st) och referenselektrod av ERE20, $MnO_2/Mn_2O_3/NaOH$ (totalt 3 st) drogs anslutningskablar till ett apparatskåp som placerades på garagets vägg. Syftet var att möjliggöra kontrollmätningar av det katodiska skyddets skyddsförmåga och anodernas strömgivning till armeringen.

Armeringens elektrokemiska potential (skyddsförmågan) hos det katodiska skyddet bestämdes med hjälp av ingjutna referenselektroder ($\text{MnO}_2/\text{Mn}_2\text{O}_3/\text{NaOH}$) som placerades med olika avstånd (0,02, 0,15 och 0,5 meter) från anoderna. I **figur 63B** visas en monterad referenselektrod av $\text{MnO}_2/\text{Mn}_2\text{O}_3/\text{NaOH}$ (ERE20). En ytterligare kontroll av skyddsförmågan gjordes med hjälp av extern referenselektrod (Ag/AgCl) som trycks mot betongytan, **figur 64B**.



Figur 63B. Monterad referenselektrod av MnO_2 före ingjutning. Referenselektroden används för bestämning av det katodiska skyddets skyddsförmåga.



Figur 64B. Kontrollmätning av skyddsförmågan med extern referenselektrod, Ag/AgCl. (t v) och mätning av de ingjutna anodernas strömavgivning med nollresistans-ampremeter (t h)

Resultat

Inledningsvis utfördes mätningar av offeranodernas elektrokemiska potential i betongen. Mätresultaten visar att den elektrokemiska potentialen hos anoderna 1, 2 och 4 är mycket negativ. Vid en elektrokemisk potential på mer negativ än -1350 mV rel. MnO₂/Mn₂O₃/NaOH hos zinkanoden ökar risken för vätgasutveckling vilket innebär en ökad egenkorrosion hos anoden. Det framgår vidare av **tabell 29** att anod 5 hade fått elektrisk kontakt med armeringen i betongen.

Tabell 28B. Resultat från mätningar av anodernas elektrokemiska potential före hopkoppling med armeringen. Anod 1-4 är Galvanode DAS 89 och Anod 5-6 är Galvashield XP

Ingjuten referens-elektrod	Anod 1 Elektrod-potential rel. MnO ₂	Anod 2 Elektrod-potential rel. MnO ₂		Anod 3 Elektrod-potential rel. MnO ₂		Anod 4 Elektrod-potential rel. MnO ₂		Anod 5 Elektrod-potential rel. MnO ₂		Anod 6 Elektrod-potential rel. MnO ₂	
		(nr) (avst.)	(mV)	(mV)	(mV)	(mV)	(mV)	(mV)	(mV)	(mV)	(mV)
R1 (0,02 m)	-1375	-1557	-1338	-1620	-674	-952					
R2 (0,15 m)	-1370	-1553	-1334	-1616	-670	-948					
R3 (0,50 m)	-1361	-1544	-1325	-1606	-661	-938					

Resultaten från kontrollmätningarna av skyddsförmågan hos det katodiska skyddet visas i **tabell 29B** och **30B**. Av resultaten framgår att fullgott katodiskt skydd uppnås på armeringen cirka 0,15 meter från anoden. Vid fullgott katodiskt skydd måste potentialavklingningen vara minst 100 mV efter 24 timmars fränslag enligt europeisk standard.

Tabell 29B. Resultat från mätningar av elektrokemisk potential och bestämning av skyddsförmåga hos armering ingjuten i golv och pelare efter 2 och 38 dygns drift. Observera att mätvärdena är uppmätta med ingjutna mangandioxidelektroder

Ingjuten referens-elektrod	Armeringens elektrod-potential rel. MnO ₂	Armeringens on-potential rel. MnO ₂ efter i hopkoppling		Armeringens off-potential rel. MnO ₂ efter fränslag		Armeringens potential rel. MnO ₂ efter 24 timmars fränslag		Potentialavklingning efter 24 timmars fränslag	
		(meter)	Före start (mV)	2dygn (mV)	38dygn (mV)	2dygn (mV)	38dygn (mV)	2dygn (mV)	38dygn (mV)
0,02	-638	-819	-777	-797	-773	-660	-667	137	106
0,15	-637	-764	-738	-754	-736	-650	-634	100	102
0,5	-630	-649	-700	-649	-698	-645	-692	4	6

Tabell 30B. Resultat från mätningar av elektrokemisk potential och bestämning av skyddsförmåga hos äldre armering ingjuten i golv. Observera att mätvärdena är uppmätta med en extern Ag/AgCl-elektrod och omräknade till mangandioxidelektrod

Avstånd från anod (meter)	Armeringens elektrod-potential rel. MnO ₂ Före start (mV)	Armeringens on-potential rel. MnO ₂ efter i hopkoppling		Armeringens off-potential rel. MnO ₂ efter fränslag		Armeringens potential rel. MnO ₂ efter 24 timmars fränslag		Potentialavklingning efter 24 timmars fränslag	
		2dygn (mV)	38dygn (mV)	2dygn (mV)	38dygn (mV)	2dygn (mV)	38dygn (mV)	2dygn (mV)	38dygn (mV)
0	-625	-786	-620	-763	-618	-655	-516	108	102
0,1	-622	-770	-618	-760	-617	-659	-517	101	100
0,2	-615	-764	-615	-754	-617	-659	-525	95	92
0,3	-604	-751	-609	-711	-614	-654	-560	57	54
0,4	-612	-700	-604	-690	-610	-653	-580	37	30
0,5	-617	-671	-602	-660	-601	-654	-596	6	5
1,0	-610	-660	-562	-656	-583	-652	-579	4	4
2,0	-580	-589	-519	-583	-514	-580	-513	3	1

Resultaten från mätningar av anodens strömavgivning med en noll-resistans-meter visas i **tabell 31B**. Här framgår att den totala strömavgivningen var 22,7 mA efter en timmes drift och därefter sjönk till 6,2 mA efter totalt 38 dygns drift. Efter ca två år efter installationen utfördes kontrollmätningar av det katodiska skyddet skyddsförmåga. Som framgår av resultaten från mätningarna har den totala strömavmatningen minskat till 3,8 mA.

Den låga strömavgivningen från anoderna innebär att anoden inte ger ett fullgott skydd. Detta avstånd kan dock variera beroende av fuktförhållandena i parkeringsgaraget. Anodernas egenpotential var emellertid mycket negativ (<-1350 mV) rel. MnO₂/Mn₂O₃.

Vid ingjutning av zinkanoden i ett cementshölje sker inledningsvis vätgasutvecklande korrosion. Hur länge vätgasutvecklande korrosion pågår på zinkanoden då cementen innehåller LiOH är för närvarande inte känt. Den vätgasutvecklande korrosionen kommer att pågå så länge anoden inte är ansluten till stålarmeringen. Zink ingjuten i en vanlig anläggningsbetong pågår vätgasutveckling i ca 1-2 dygn.

Tabell 31B. Total strömgivning från installerade anoder till stålarmeringen efter 1 timme, 2 dygn, 38 dygn och 2 års drift

Anod nr	Strömgivning från anod			
	mA 1 tim	mA 2 dygn	mA 38 dygn	mA 2 år
A1 (Galvanode DAS 89)	6,7	1,8	1,4	1,7
A2 (Galvanode DAS 89)	2,1	2,0	1,2	0,9
A3 (Galvanode DAS 89)	2,2	2,0	1,5	0,5
A4 (Galvanode DAS 89)	11,5	4,0	1,2	0,6
A5 (Galvashield rund)	0	0	0	0
A6 (Galvashield rund)	0,2	0,1	0,1	0,1
Total strömgivning	22,7	9,9	6,2	3,8

I **tabell 32B** visas Resultat från mätningar av elektrokemisk potential och bestämning av skyddsförmåga hos armering ingjuten i golv och pelare efter 2 års drift.

Tabell 32B. Resultat från mätningar av elektrokemisk potential och bestämning av skyddsförmåga hos armering ingjuten i golv och pelare efter 2 års drift. Observera att mätvärdena är uppmätta med ingjutna mangandioxidelektroder.

Referenselektrod (nr) (avstånd fr. anod, m)	Armeringens elektrodpotential före start av katodiskt skydd rel. MnO ₂ (mV)	Armeringens on-potential rel. MnO ₂ efter i hopkoppling (mV)	Armeringens off- potential rel. MnO ₂ efter fränslag (mV)	Armeringens off- potential rel. MnO ₂ efter 24 timmars fränslag (mV)	Potentialavklingning efter 24 timmar fränslag (mV)
Ref 1 0,02 meter	-638	-608	-607	-547	60
Ref 2 0,15 meter	-637	-552	-551	-524	27
Ref 3 0,5 meter	-630	-533	-532	-519	14

Som framgår av resultaten i **tabell 32B** så är inte strömutmatningen från anoderna tillräcklig för att uppnå fullgott katodiskt skydd.

Slutsatser

Sammanfattningsvis kan sägas att utförda kontrollmätningar av det katodiska skyddet med offeranoder av zink med cementhölje innehållande LiOH visade efter ca två års drift att strömutmatningen från anoderna hade kraftigt minskat jämfört med när det katodiska skyddet startades. Hur långt ifrån anoden som skyddsströmmen kan nå stålarmeringen är beroende av framförallt betongens ledningsförmåga (fukthalt och kloridhalt). Mätningarna efter två års drift utfördes i augusti vilket innebar att betongen var relativt torr och hade en hög resistivitet. Mätningarna visade att den nyingjutna armeringen erhöll mer skyddsström än den äldre armeringen i den oreparerade betongen.

Referenser

1. Camitz, G: Korrosionsskydd av stål i betongkonstruktioner – Handbok. Swerea KIMAB 2011, Stockholm.
2. Sederholm, B & Trägård, J & Ahlström, J & Boubitas, D & Luping, T: Ny provningsmetodik för betong av bindemedlets korrosionsskyddande förmåga. KIMAB Rapport 2018:162, Swerea KIMAB, 2018 Stockholm.
3. Sederholm, B: Galvaniskt katodiskt skydd – grundläggande teori samt katodiskt skydd av armerade betongkonstruktioner med nya, enkla och billiga anodsystem: KI Rapport 1998:1. Korrosionsinstitutet, Stockholm 1998.
4. Sederholm, B: Utomhusprovning av galvaniska anodsystem för katodiskt skydd av armerade betongkonstruktioner. KI Rapport nr 1999:6. Korrosionsinstitutet, Stockholm 1999.
5. Sederholm, B. Utomhusprovning av enkelt installerade anodsystem för katodiskt skydd av räcketståndare och kantbalksarmering på Ölandsbron. KI Rapport 2002:3. Korrosionsinstitutet 2002.
6. Sederholm, B & Selander, A: Katodiskt skydd av betongkonstruktioner med termiskt sprutade offeranoder av zink – Erfarenhetsinsamling och fältundersökning med fokus på långtisegenskaper. Elforsk Rapport nr 11:55. Elforsk 2011.
7. Brousseau, R: Factors affecting adhesion on concrete of arc-sprayed zinc. Corrosion Engineering, vol 48, No 11, November 1992.
8. Andrews-Phaedonos, F & et al: Sprayed zinc galvanic anode system for the cathodic protection of noody's inlet bridge. South gippland Highway, Victoria.
9. Bullard, S J 6 & et al: Bond Strength of thermal-sprayed zinc on concrete during early electrochemical aging. Corrosion 97, paper No 232, 1997.
10. Bullard, S J & et al: Factors affecting the bonding of arc-sprayed zinc to concrete. Journal of Protective Coatings & Linings. Vol 13, 1996 No 8, p 23-37.
11. Brousseau, R & et al: Sacrificial cathodic protection of concrete overpass using metallized zinc. Corrosion 97, paper No 239, 1997.
12. Funahashi M & et al: Performance of newly developed sprayed anode cathodic protection system. Corrosion 97, paper No 254, 1997.
13. Bennet, J E & Schue, T J: A thermal sprayed titanium anode for cathodic protection of reinforced concrete structures. Corrosion 95, paper no 504, 1995.
14. Lasa, R & Powers, R G: 2003, "Florida's" Approach to Bridge Preservation", Technical Memorandum of Public Works Research Institute, pp 175-188.
15. Daily, S F: Using Cathodic Protection to Control Corrosion of Reinforced Concrete Structures in Marine Environments" Corpro Companies Inc., Technical Paper 49.
16. Funahashi, M & Young, W, T: 1995, Development of New Sacrificial Anode Reinforced and Prestressed Concrete Structures, Second CANMET/ACI International Symposium on Advances in Concrete Technology, Las Vegas.
17. Sagüés, A A & Powers, R G: 1994, "Sprayed Zinc Galvanic Anodes for Concrete Marine Bridge Substructures", National Research Council, Washington DC, SHRP-S-405, ISBN 0-309-05819-8.

18. Collon, R & Daily S F & Funahashi M: Selection Guidelines for Using Cathodic Protection Systems on Reinforced and Prestressed Concrete Structures” Corpro Companies Inc., Technical Paper 118.
19. Holcomb, G R & Bullard, S J & Covino, Jr, B S & Cramer, S D & Cryer, C B & McGill, B G: 1996, “Electrochemical Aging of Thermal-Sprayed Zinc Anodes on Concrete”, Proceedings in Thermal Spray Conference, pp. 185-192.
20. Holcomb, G R & Covino, Jr, B S & Cramer, S D & Bullard, S J & McGill, G E: 1997, “Thermal-Spray Coatings for Coastal Infrastructure”, Proceedings in Tri-Service Corrosion Conference, Section 7A, 17 pp.
21. Brousseau, R J & Arnott, M R & Baldock, B: 1996, “Long-term factors influencing the adhesion of metallized zinc to Concrete”, Journal of Thermal Spray Technology, 5, (1), pp. 49-52.
22. Bullard, S J & Cramer, S & Covino, B: 2009, “Final Report-Effectiveness of Cathodic Protection” SPR 345, Oregon Department of Transportation.
23. Spriestersbach, J & Melzer, A & Wisniewski, J & Winkels, A & Knepper, A: 1999, “Lifetime Extension of Thermally Sprayed Zinc Anodes for Corrosion Protection of Reinforced Concrete Structures by Using Organic Topcoatings” Proceedings Eurocorr 99.
24. Clemeña, G G & acksson, D R: 1999, “Evaluation of Anodes for Galvanic Cathodic Prevention of Steel Corrosion in Prestressed Concrete Piles in Marine Environments in Virginia” Virginia Transportation Research Council, VTRC 00-R3.
25. Chagnon, N & Lounis, Z: 2006, “Field Performance of Prestressed Concrete Bridge Girders Protected by Cathodic Protection and Concrete Surface Treatment”, 7th International Conference on Short and Medium Span Bridges, Montreal, pp. 1-10.
26. Sederholm, B & Selander A: Katodiskt skydd av betongkonstruktioner, Elforsk rapport 2015:134. Elforsk 2015.
27. Taxén C: PM-Sprutad zinkanod för katodisk skydd av armering i betong – effekt av avståndet mellan kontaktpunkter, november 2012
28. Edwards Y & Sederholm B: Optimalt skydd av parkeringsdäck vid nybyggnad och renovering. SBUF Rapport 13212. Stockholm 2016.

RISE KIMAB AB
Box 7047, 164 07 Kista
Besöksadress: Isafjordsgatan 28 A, 164 40 Kista
08 440 48 00, risekimab@ri.se, www.ri.se





Statens vegvesen
Pb. 1010 Nordre Ål
2605 Lillehammer

Tlf: (+47)22073000
firmapost@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

Trygt fram sammen