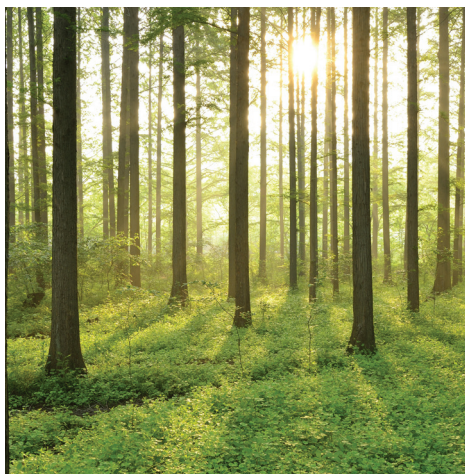


KATODISKT SKYDD AV BETONGKONSTRUKTIONER

RAPPORT 2015:134



Katodiskt skydd av betongkonstruktioner

Termiskt sprutade offeranoder av zink – Etapp 2

BROR SEDERHOLM, SWEREA KIMAB SAMT ANDERS SELANDER, CBI

ISBN 978-91-7673-134-5 | © 2015 ENERGIFORSK

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

Förord

Detta projekt har drivits i samverkan mellan Energiforsk Betongprogram Kärnkraft, Swerea KIMAB, CBI Betonginstitutet och Trafikverket. Intressenterna bakom Energiforsk Betongprogram Kärnkraft är Vattenfall, Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM), Teollisuuden Voima Oy (TVO), E.ON, Fortum, Skellefteå Kraft och Karlstads Energi.

Projektet har följts av en referensgrupp bestående av Adriano Maglica, Trafikverket, Joachim Jacobsson, Trafikverket, Manouchehr Hassanzadeh, Energiforsk (Vattenfall AB) och Jan Trägårdh, CBI Betonginstitutet. Energiforsk tackar referensgruppen för värdefulla synpunkter.

Sammanfattning

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 en litteratur- och erfarenhetsinsamling om termiskt sprutade zinkanoder på befintliga betongkonstruktioner. 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, Ref 1.

I föreliggande rapport, som avslutar Etapp II, redovisas 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 betong konstruktionerna har både ljusbågs- och flamsprutningsteknik använts. Följande skyddade betongkonstruktioner ingick i undersökningarna:

- Kantbalkar till stödmur på Essingeleden, Stockholm (ljusbågssprutning).
- Betongvägg vid silgata 3, intagsbyggnaden vid Forsmark kärnkraftverk 1 och 2 (flamsprutning).
- Kantbalk, under- och insida brolåda, utefter Hjalmar Brantings väg, Göteborg (ljusbågssprutning).

Skyddsförmågan hos det termiskt sprutade zinkskiktet har utvärderats både på laboratorium och i fält genom potentialmätningar (enligt SS-EN 12696:2012 "Katodiskt skydd av stål i betong – Konstruktioner i atmosfär").

Resultat - laboratorieundersökning

Resultaten från potentialmätningar utförda på betongingjutna provstänger av stål som exponerats på laboratorium i klimatboxar med olika relativa fukthalter (75, 85, 97 och 100 %) visade att skyddsförmågan hos det termiskt sprutade zinkskiktet var god i samtliga miljöer.

Resultaten från utvärderingen av korrosionshastighet och maximalt frätgropsdjup av skyddade och oskyddade provstänger av stål exponerade ett år på laboratorium i klimatboxar med en relativ fukthalt av 97 och 100 % visade att korrosionshastigheten var låg ($< 1,3 \mu\text{m}/\text{år}$) hos både skyddade och icke skyddade provstänger förutom en provstång (ca $3,1 \mu\text{m}/\text{år}$ och ett maximalt frätgropsdjup av $525 \mu\text{m}$) som varit oskyddad och exponerats i en klimatbox med en relativ

fuktighet av 97 %. Övriga provstänger var helt oangripna av korrosion och detta gäller både skyddade och oskyddade provstänger.

Sammanfattningsvis kan sägas att för att kunna bestämma skyddsförmågan mer noggrant genom att utvärdera korrosionshastigheten hos skyddade och oskyddade provstänger som exponerats i olika klimatboxar på laboratorium rekommenderas en betydligt längre exponeringstid så att korrosion kan initieras på samtliga oskyddade provstänger.

Resultat - fältundersökning

Potentialmätningar utförda under det första året visade att samtliga termiskt zinksprutade betongkonstruktioner gav ett fullgott katodiskt skydd enligt den europeiska standarden, SS-EN 12696:2012 "Katodiskt skydd av stål i betong – Konstruktioner i atmosfär").

Efter ca 1½ års drift framgick det av resultaten från potentialmätningarna som utförts vid Essingeleden och vid vägbron i Göteborg att depolarisationen, ($\Delta E_{(från, 24\ tim)}$), efter 24 timmars isärkoppling, var negativ vid en av fyra mätpunkter vid Essingeleden och vid tre av sex mätpunkter hos vägbron i Göteborg. Orsaken till den negativa depolarisationen som uppmäts vid fränkoppling av mätsond från armeringen är att mätsonden utsätts för läckströmmar från zinkskiktet vid mätningen. Hur stor denna påverkan blir är beroende av framför allt hur stor resistansen är mellan mätsond och armering/zinkskikt vid fränkoppling av mätsond.

Att använda termiskt sprutad zink för att katodiskt skydda armerade betongkonstruktioner mot korrosionsangrepp för betongytor som är placerade under vattenytan rekommenderas inte eftersom zinkens egenkorrosion är normalt mycket hög i kloridhaltigt vatten. Detta ger en allt för hög förbrukning av zinkskiktet vid anslutning till stålarmeringen, vilket förkortar det sprutade zinkskiktet livslängd.

För att kunna mäta skyddsförmågan hos ett galvaniskt katodiskt skydd så måste armeringen kunna elektriskt avskiljas från zinkskiktet vid en kontrollmätning av skyddsförmågan. Detta innebär att det inte får förekomma andra elektriska kontakter mellan armering och zinkskikt än via en t ex kopplingsplint som möjliggör att den elektriska kontakten mellan armering och det sprutade zinkskiktet kan brytas vid mättillfället.

Sammanfattningsvis kan sägas att samtliga hittills utförda undersökningar inom projektet visade att katodiskt skydd av betongkonstruktioner med termiskt sprutad zink ger ett fullgott katodiskt skydd så länge zinkskiktet finns kvar på betongytan.

Summary

The research project *Cathodic protection of concrete structures with thermally sprayed sacrificial zinc anodes* was initiated in spring 2010. The project was divided into two phases; the first contain a survey of literature and practical experiences of thermally sprayed zinc anodes on existing concrete structures. The condition of sprayed zinc layers in the channels in cooling water ducts in Forsmark and on the edge beam of the Öland Bridge was also evaluated. On the selected objects the appearance of the zinc layer and the adhesion of the zinc to the concrete surface were visually evaluated. Concrete cores with sprayed zinc layers were drilled for laboratory examination including measurements of adhesion and protective ability. ~~for example~~. The results from these investigations are reported in Elforsk Rapport nr 11:55 - Katodiskt skydd av betongkonstruktioner med termiskt sprutade offeranoder av zink – Cathodic protection of concrete structures with thermally sprayed sacrificial zinc anodes.

In the present report that concludes Phase II, results are reported from a controlled laboratory investigation with thermally zinc sprayed concrete blocks with cast-in carbon steel test bars. The sprayed blocks were exposed at different humidity levels (75, 85, 97 and 100 %) and compared to unprotected blocks. These results from the laboratory are compared with field measurements of the protective ability of thermally sprayed sacrificial zinc anodes in three different cathodically protected concrete structures. Arc as well as flame spraying technique was used for the thermal spraying of zinc on the concrete structures. The following protected concrete structures were included in the survey:

- Edge beam of a retaining wall at Essingeleden, Stockholm (arc sprayed).
- Concrete wall at channel 3, cooling water intake building in Forsmark nuclear power plants 1 and 2 (flame sprayed).
- Edge beam, bottom and inside of bridge, along Hjalmar Brantings väg, Gothenburg (arc sprayed).

The protective efficiency of the thermally sprayed zinc layers has been evaluated both in ~~the~~ laboratory and in the field by potential measurements (according to SS-EN 12696:2012 "Katodiskt skydd av stål i betong – Konstruktioner i atmosfär" – Cathodic protection of steel in concrete – Structures in atmosphere).

Results – laboratory investigations

The results of the potential measurements on test bars of steel cast in concrete and exposed in the laboratory in climate boxes at different relative humidity (75, 85, 97 and 100 %) showed that the protective ability of the thermally sprayed zinc layer was good in all environments.

The evaluation of the corrosion rate and the maximum pitting depth was performed on protected and unprotected steel bars exposed in climate boxes for

one year with a relative humidity of 97 and 100 % respectively. The results showed that the corrosion rate was low ($< 1,3 \mu\text{m}/\text{year}$) on protected as well as unprotected test bars with one exception. One reference that was exposed in a climate box with a relative humidity of 97 % showed a corrosion rate of approximately $3,1 \mu\text{m}/\text{year}$ and a maximum pitting depth of $525 \mu\text{m}$.

In summary, it can be stated that a considerably longer exposure period is required to enable corrosion to be initiated on all unprotected test bars. This is essential in order to determine the protective capacity by means of the corrosion rate in the laboratory.

Results – field investigation

Potential measurements performed during the first year showed that all thermally sprayed zinc coatings on concrete structures provided a fully adequate cathodic protection according to the European standard SS-EN 12696:2012 "Katodiskt skydd av stål i betong – Konstruktioner i atmosfär" – Cathodic protection of steel in concrete – Structures in atmosphere).

After about $1 \frac{1}{2}$ years of operation the results from the measurements of the potential on Essingeleden and at the road bridge in Gothenburg showed that the depolarisation ($\Delta E_{(\text{off}, 24 \text{ hrs})}$), after 24 hours of disconnection was negative at one out of four measuring points on Essingeleden and at three out of six measuring points on the road bridge in Gothenburg. The cause is that the probe is exposed to leak currents from the zinc layer during the measurement. How large this effect will be depends primarily on how large the resistance is between the probe and the reinforcement/zinc layer when disconnecting.

The use of thermally sprayed zinc for cathodic protection of reinforced concrete structures from corrosion is not recommended for submerged concrete surfaces, since the corrosion rate of zinc itself normally is very high in chloride-containing water. This leads to a high total consumption of the zinc layer when connected to the steel reinforcement and shortens the lifetime of the sprayed zinc coating.

In order to determine the protective ability of a galvanic cathodic protection it must be possible to disconnect the reinforcement from the zinc layer when the measurement is taking place. This means that no electrical contacts between the reinforcement and the zinc layer may be present other than by way of e.g. a connection block that makes it possible to break the electrical contact between the reinforcement and the sprayed-on zinc layer.

In summary, all investigations performed within the project to date have shown that cathodic protection of concrete structures with thermally sprayed zinc provides a fully adequate cathodic protection as long as the zinc layer remains on the concrete surface.

Innehåll

1	Inledning	1
2	Bakgrund	2
3	Syfte	4
4	Experimentell teknik	4
4.1	Fältundersökning.....	4
4.1.1	Provobjekt.....	4
4.1.2	Provningsmetodik.....	7
4.1.3	Installation av katodiskt skydd med termisk sprutade zinkanoder - allmänt.....	8
4.1.4	Installation av katodiskt skydd med termiskt sprutade offeranoder av zink på provobjekt.....	10
4.1.5	Bedömning av skyddsförmåga hos katodiskt skyddade betongkonstruktioner	12
4.2	Laboratorieundersökning.....	13
4.2.1	Tillverkning av provblock.....	15
4.2.2	Konditionering och förkarbonatisering av provblock	18
4.2.3	Termisk sprutning av provblock	19
4.2.4	Konditionering i klimatboxar.....	21
4.2.5	Kontroll av skyddsförmågan hos sprutat zinksikt	21
4.2.6	Utvärdering av korrosionsutseende hos provstänger och zinksikt efter exponering	24
4.2.7	Utvärdering av provstängernas korrosionshastighet och gropfrättningsdjup efter exponering	24
5	Resultat och diskussion	24
5.1	Fältundersökningar	24
5.2	Laboratorieundersökning	31
5.2.1	Bedömning av skyddseffektivitet enligt SS-EN 12696.....	34
5.2.2	Okulär bedömning av termiskt sprutat zinksikt	36
5.2.3	Bestämning av provstängernas korrosionsutseende, korrosionshastighet med och utan sprutat zinksikt	39
6	Slutsatser	41
7	Referenser	43

1 Inledning

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 en litteratur- och erfarenhetsinsamling om termiskt sprutade zinkanoder på befintliga betongkonstruktioner. 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.

I föreliggande rapport redovisas både resultat från laboratorieundersökningar av termiskt sprutade betongblock med ingjutna provstänger av kolstål som exponerats i olika relativa fuktigheter och resultat från undersökningar utförda på tre olika katodiskt skyddade betongkonstruktioner med termiskt sprutade offeranoder av zink. Följande skyddade betongkonstruktioner ingick i undersökningarna:

- Kantbalkar till stödmur på Essingeleden, Stockholm
- Betongvägg vid silgata 3, intagsbyggnaden vid Forsmark kärnkraftverk 1 och 2
- Kantbalk, under- och insida brobalk, utefter Hjalmar Brantings väg, Göteborg.

I samband med installationerna av de katodiska skydden med termiskt sprutad zink gjordes noggranna mätningar med speciellt utvecklade mätelektroder för mätning av elektrokemisk potential och ström samt kontinuerliga registreringar av betongens relativa fukthalt och temperatur.

Projektet katodiskt skydd av betongkonstruktioner med termiskt sprutade offeranoder av zink finansieras av anslag från:

CBI Betonginstitutet

Energiforsk

Swerea KIMAB

Trafikverket

Den till projektet knutna referensgruppen ingår följande medlemmar:

Marcus Edin, Forsmarks Kraftgrupp

Joachim Jacobsson, Trafikverket

Adriano Maglica, Trafikverket

Bror Sederholm, Swerea KIMAB

Jan Trägårdh, CBI Betonginstitutet

Anders Selander, CBI Betonginstitutet

Ett stort tack skall ges till Anders Eriksson, A. E Korrosionskonsult som medverkat vid installationer av mätelektroder, referenselektroder och kontrollmätningar av skyddseffektivitet hos de olika katodiska skydden.

2 Bakgrund

Inom kärnkraftindustrin i Sverige används sedan mitten av 1990-talet katodiskt skydd med termiskt sprutade offeranoder av zink för att lokalt skydda stålarmeringen i betong mot korrosionsangrepp. Zinkanoden appliceras på betongen genom att den smälta zinken sprutas med flamsprutningsteknik på en noggrant rengjord och torr betongyta.

Trafikverket har under åren 2012 och 2013 utfört två installationer med termiskt sprutade offeranoder av zink (Stödmur, Essingeleden, Stockholm (2013) och kantbalk, under- och insida i brobalk på vägbro utefter Hjalmar Brantings väg, Göteborg (2012). Zinkanoden som applicerats på betongen genom att den smälta zinken sprutats med ljusbågsteknik på en lättblästrad betongyta.

Tidigare undersökningar utförda på kantbalken på Ölandsbron visade att användningen av termiskt sprutad offeranod av zink på kantbalken minskade korrosionshastigheten hos stålarmeringen med 95 % jämfört med oskyddad armering (2). Den goda skyddsförmågan antogs bero på betongens låga resistivitet på grund av höga kloridhalter (bräckt vatten från Kalmarsund användes som blandvatten vid gjutning av kantbalken) i betongen.

Katodiskt skydd av armerade betong är en metod som skyddar när armeringskorrosionen redan startat och när alternativet hade varit att reparera eller i värsta fall riva konstruktionen. De ekonomiska och miljörelaterade vinsterna av att kunna förlänga en konstruktions livslängd i det läget är ofta stora.

Fördelen med att använda ett galvaniskt katodiskt skydd med termiskt sprutade offeranoder av zink, jämfört med ett katodiskt skydd av påtryckt ström, är att den sprutade zinkanoden är betydligt enklare och billigare att installera.

Något övervakningssystem behövs inte heller vilket krävs med påtryckt ström. Nackdelen med sprutade offeranoder av zink är dock att den galvaniska skyddsströmmen från anoden inte kan regleras utan är helt beroende av anodskiktets kemiska sammansättning, skiktjocklek, sprutmetod och vidhäftning samt betongens resistivitet. Fuktinnehåll, karbonatisering och kloridhalt misstänks ha en avgörande betydelse för den senare.

Det är sålunda viktigt att ta fram och kvantifiera både zinkanodens egenskaper, sprutparametrar och de betongparametrar som har stor betydelse för utmatningen av galvanisk skyddsström för att uppnå ett fullgott katodiskt skydd med termiskt sprutade offeranoder av zink.

Termiskt sprutade zinkanodskikt förbrukas med tiden på grund av strömväggning till det ingjutna armeringsstålet och genom egenkorrosion. Med egenkorrosion menas "vanlig" korrosion av anoden utan någon strömväggning till den korroderande ingjutna stålytan. Eftersom den påsprutade zinkanoden förbrukas genom egenkorrosion blir inte anodens strömbyte (verkningsgrad) 100 %. Anodens livslängd är sålunda beroende av anodens egenkorrosion och strömväggning till den korroderande ingjutna stålarmeringen. Anodens egenkorrosion är beroende av aggressiviteten hos den yttre miljön.

I etapp 1 gjordes en litteratur- och erfarenhetsinsamling om termiskt sprutade zinkanoder på befintliga betongkonstruktioner. 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. Följande parametrar undersöktes:

- Resistivitet
- Kloridhaltsprofil
- Zinkhaltsprofil
- Karbonatiseringsdjup
- Inträngningsdjup av zinkskikt i betong
- Zinkskiktets tjocklek och täthet

Resultaten från dessa undersökningar finns redovisade i rapporten från Etapp 1 (1) och de viktigaste slutsatserna sammanfattas i följande punkter:

- 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, 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 för att förlänga livslängden och minska reparationsbehovet på befintliga konstruktioner.

3 Syfte

Styrkan med ett termiskt sprutat zinkanodskikt jämfört med alternativen är enkelheten och ekonomin. Det finns dock flera osäkerheter kring metodens funktionsområde vilka behöver undersökas. Syftet med projektets etapp 2 är att:

- Ta fram en mätmetodik för bestämning av skyddsförmågan hos termiskt sprutade offeranoder av zink på betongkonstruktioner.
- Definiera de parametrar som är viktiga för ett lyckat resultat och utifrån dessa, om möjligt, ta fram riktlinjer för användning av termiskt sprutade offeranoder av zink på betongkonstruktioner.

4 Experimentell teknik

4.1 Fältundersökning

4.1.1 Provobjekt

I fältundersökningarna ingår tre olika provobjekt:

- Kantbalk (ca 400 m²) och stödmur på Essingeleden vid avfarten till Aspudden i Stockholm (Trafikverket), **figur 1**.
- 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 2**.
- Betongvägg (ca 120 m²), i utrymme intill korgbandsil vid silgata 30 i intagsbyggnad för Forsmark 1 och 2, **figur 3**.



Figur 1 Stödmur på Essingeleden vid avfart Aspudden, Stockholm.



Figur 2 Vägbro nr 14-884-3, Hjalmar Brantings väg.



Figur 3 Silgata placerad i intagsbyggnaden för Forsmark 1 och 2

4.1.2 Provningsmetodik

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 kontrollera zinksiktets skyddande förmåga, **figur 4**.



Figur 4 Inmonterade mätelektroder i stödmurens kantbalk (Essingeleden). Utstickande kablar skyddas av ett utvändigt plaströr.

I **figur 5** visas utseendet av en referenselektrod av titan med ädelmetallskikt och en av polarisationssonderna av kolstål som använts i undersökningarna. Mätkablar har anslutits till mätelektroderna för mätning av skyddseffektiviteten hos det sprutade zinksiktet.



Figur 5 Utseendet hos titanelektrod (höger) och mätelektrod av kolstål (vänster)

Vid kontrollmätning av skyddsförmågan mättes även betongens relativa fuktighet och temperatur, **figur 6**. Efter kontrollmätningen avlägsnades temperatur- och fuktgivarna.



Figur 6 Inmontering av temperatur- och fuktgivare i förborrade hål, undersida brolåda, Göteborg.

4.1.3 Installation av katodiskt skydd med termisk sprutade zinkanoder - allmänt

Innan zinksprutning av betongytorna 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 zinkskiktet till armeringen. Risker för läckströmskorrosion är dock betydligt mindre jämfört med ett katodiskt skydd med påtryckt ström

För att det påsprutade zinkskiktet skall kunna mata ut en galvanisk skyddsström till den ingjutna armeringen måste zinkskiktet 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.

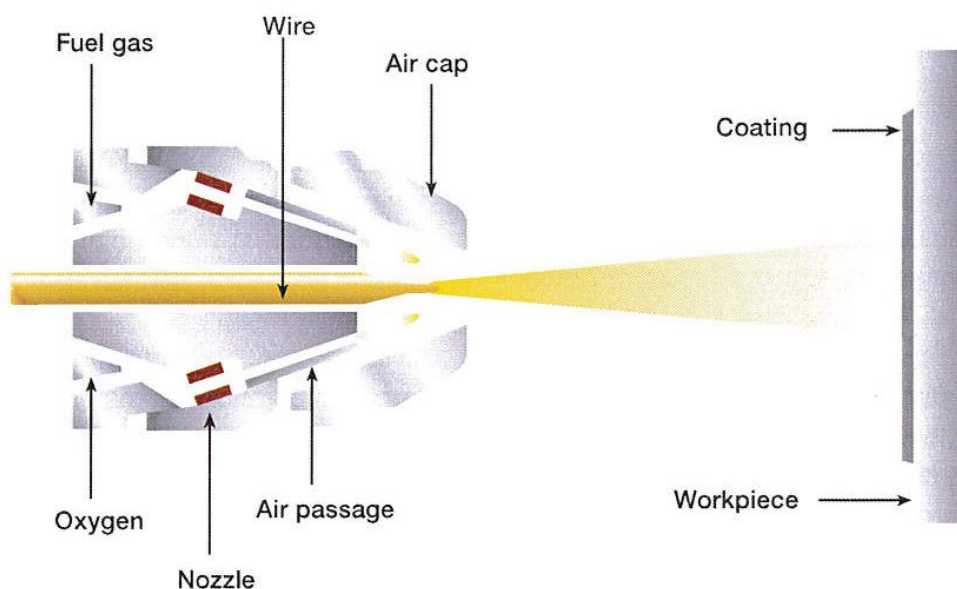
Modellering genom FEM-analys utförda av Swerea KIMAB (Ref 2) visade att spänningsfallet i ett sprutat zinkskikt (zinktjocklek ca 100 µm) är i princip försumbart oberoende av avståndet mellan kontaktanslutningspunkterna. Det största spänningsfallet ligger i kontaktanslutningspunkten mellan zinkskikt och 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 zinkskikt. Antalet anslutningar mellan armering och zinkskikt bör vara minst tre i en konstruktion.

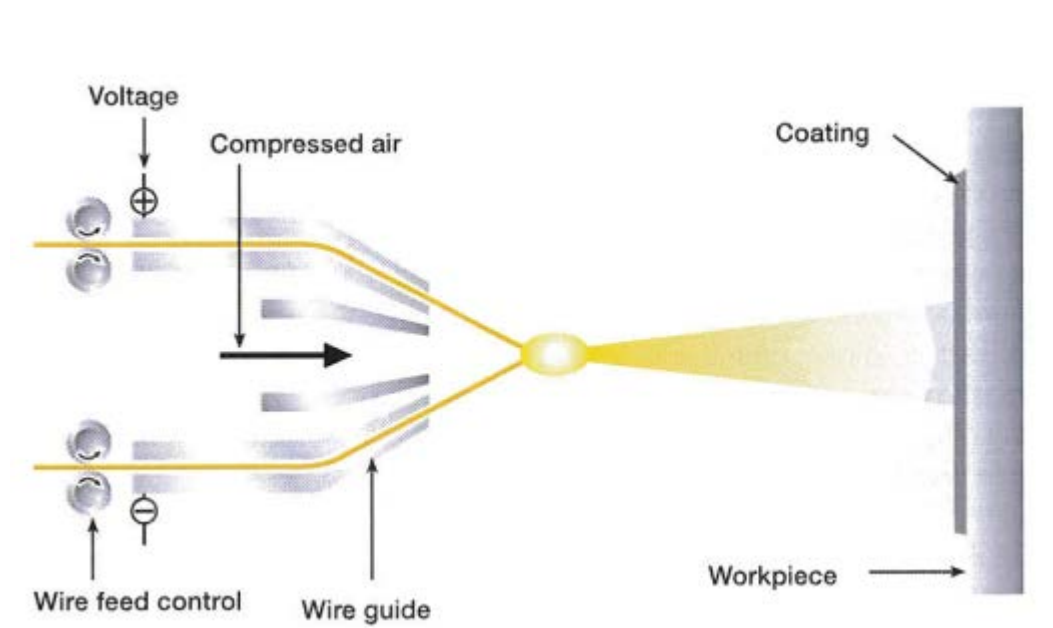
Vid påsprutning av smält zink på betongytan används idag princip två metoder:

- Flamsprutning
- Ljusbågssprutning

Vid flamsprutning, **figur 4**, används en gaslåga med syre och acetylen (ibland även propan och vätgas) för att smälta anodtråden och vid ljusbågssprutning, **figur 5**, används en hög likström för att smälta anodmaterialet. Den flytande metallen slungas ut från sprutan med hjälp av tryckluft.



Figur 7 Schematisk skiss av flamsprutningsprocessen (ref)



Figur 8 Schematisk skiss av ljusbågssprutningsprocessen (ref)

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

4.1.4 Installation av katodiskt skydd med termiskt sprutade offeranoder av zink på provobjekt

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. Flamsprutning har utförts på betongväggar i utrymme vid silgata 30 i intagsbyggnaden för Forsmark 1 och 2.

I **figur 9** visas termisk ljusbågssprutning med zink av undersida brolåda för vägbro 14-884-3 i Göteborg.



Figur 9 Termisk ljusbågssprutning av zink på undersida brolåda för vägbro 14-884-3 i Göteborg

I **figur 10** 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. Kraftig korroderad armering avlägsnades och ersattes med ny armering.

För att kontrollera de sprutade zinksskiktens skyddseffektivitet installerades referenselektroder av titan med ett ädelmetall skikt (MMO) och en stålelektrod av kolstål figur. Antalet anslutningskontakterna mellan zinkskikt och armering var minst tre hos de undersökta objekten.



Figur 10 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 zinksikt. För betongväggarna i utrymmet vid silgata 3 i intagsbyggnaden för Forsmark 1 och 2 bilades armering fram för påsprutning av zink.

4.1.5 Bedömning av skyddsförmåga hos katodiskt skyddade betongkonstruktioner

Vid bedömning av skyddsförmågan hos det termiskt sprutade zinksiktet 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 zinksiktet 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 zinksiktets

skyddsförmåga bryts polarisationssondens elledande kontakt med stålarmingen och det sprutade zinkskiktet. Polarisationssondens elektrokemiska potential mäts direkt efter brytning och efter 24 timmars brytning av den elledande kontakten mellan polarisationssond och stålarming och zinksskikt.

Tidigare utförda undersökningar vid Ölandsbron visade att vid en potential-avklingning var större än 100 mV sänktes korrosionshastigheten med 96 %, **Ref 3**

Vid bedömning av skyddsförmågan hos det katodiska skyddet har följande bedömning av potentialvärden efter 24 timmars frånslag av det katodiska skyddet använts, **tabell 1**.

Tabell 1 Bedömning av det katodiska skyddets skyddsförmåga i betongkonstruktioner görs enligt SS-EN 12696:2012.

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

4.2 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 laboriestudien 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 skyddsметод 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. **Tabell 2** visar en sammanställning av dessa 32 block.

Tabell 2 De 32 prokropparna som ingick i laboratoriestudien med förklaring av konditioneringsmiljö, täckande betongskikt, vct, kloridhalt samt skyddad eller oskyddad. *Halvt nedsänkt benämns som 100% RF.

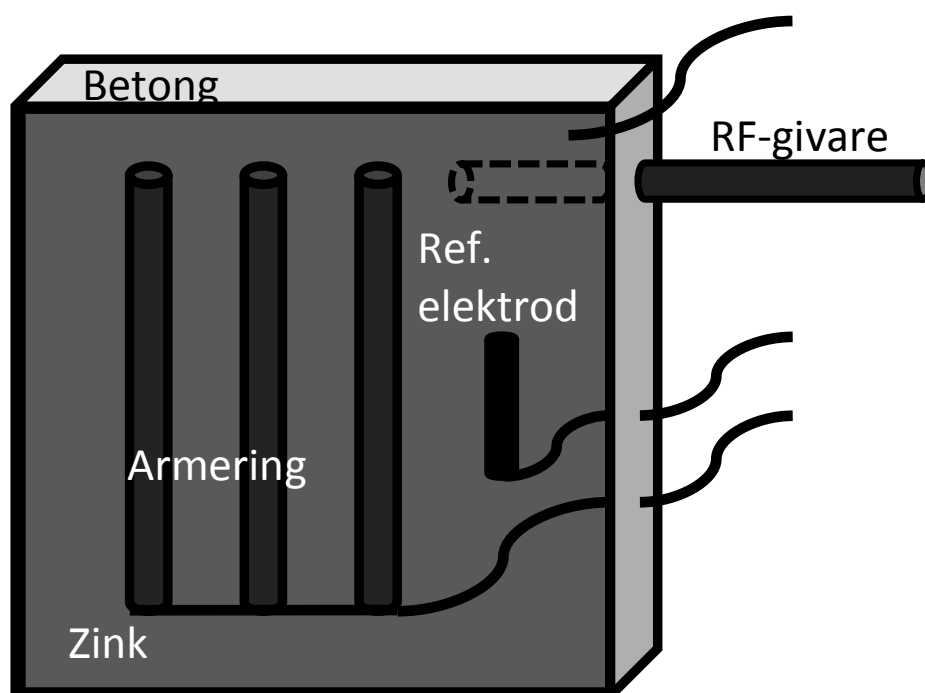
	RF (%)				Täckskikt. (mm)		vct		[Cl ⁻] (%)		Zinkskikt	
Numrering	75	85	97	100*	15	30	0.45	0.55	1	3	Ja	Nej
1	x				x			x	x		x	
2		x			x			x	x		x	
3			x		x			x	x		x	
4				x	x			x	x		x	
5		x			x		x		x		x	
6				x	x		x		x		x	
7			x			x	x		x		x	
8			x			x		x	x		x	
9	x				x			x		x	x	
10		x			x			x		x	x	
11			x		x			x		x	x	
12				x	x			x		x	x	
13		x			x		x			x	x	
14				x	x		x			x	x	
15			x			x	x			x	x	
16			x			x		x		x	x	
17	x				x			x	x			x
18		x			x			x	x			x
19			x		x			x	x			x
20				x	x			x	x			x
21		x			x		x		x			x
22				x	x		x		x			x
23			x			x	x		x			x
24			x			x		x	x			x
25	x				x			x		x		x
26		x			x			x		x		x
27			x		x			x		x		x
28				x	x			x		x		x
29		x			x		x			x		x
30				x	x		x			x		x
31			x			x	x			x		x
32			x			x		x		x		x

4.2.1 Tillverkning av provblock

Figur11 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 zinksiktet.
- 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.
- Zinksiktetsiktet som sprutades på framsidan av provblocken i skissen.
- Mantelytan och baksidan förseglades med tejp för att efterlikna en verklig konstruktion och säkerställa en endimensionell fukttransport.

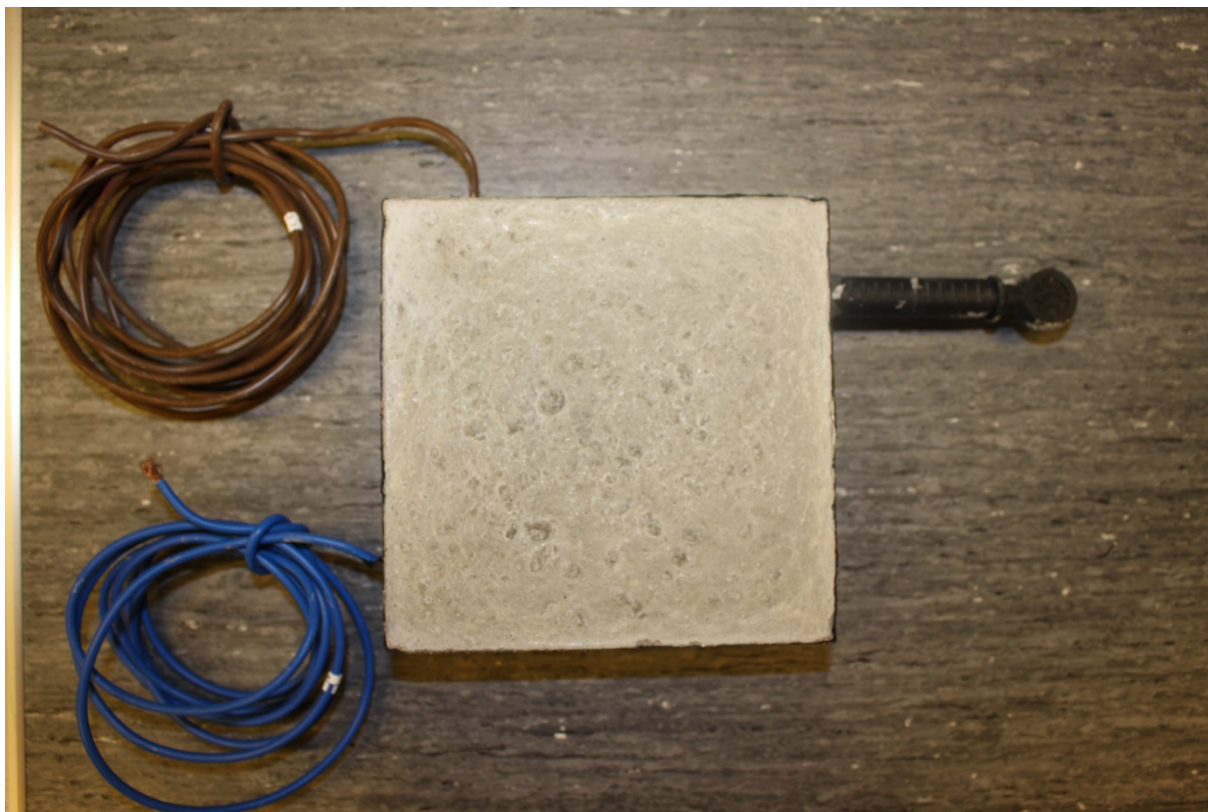


Figur 11 Schematisk skiss av provblocket med armeringsstänger, foderrör för fuktgivare och referenselektrod. Måtten är 150x150x50mm (HxBxD).

Figur 12 visar ett foto av ett provblock innan gjutning där armeringsklossar användes för att säkerställa önskat täcksikt 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 13** visar ett foto av det färdiga problocket efter avformning och försegling men innan sprutningen av zink.



Figur 12 Foto av provblocket innan gjutning. Frigolitformar som normalt används för att gjuta 150mm kuber användes för tillverkningen.



Figur 13 Provblock efter gjutning och avformning. Den blåa kabeln ansluter till stålstängena och den bruna till referenselektroden av titan med ädelmetallskikt.

4.2.2 Konditionering och förkarbonatisering av provblock

Prepareringen av provblocken innefattar 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 ljusbågssprutning med zink.
- Hemtransport och inkoppling av zinkskikten i provblocken.
- Placering i respektive RF-miljö och start av mätningar.

Nedan följer foton från prepareringen av provblocken. **Figur 14** 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 sjuka 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 14 CBI:s CO₂-box som användes vid karbonatiseringen av provblocken.

4.2.3 Termisk sprutning av provblock

Efter karbonatiseringen fraktades de 16 block som skulle sprutas till Kållereds Målning och Blästring AB för ljusbågssprutning. 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 15** och **16** visar betongblocken inför sprutningen och under sprutningen. Mantelytan och kablarna skyddades med ramen som syns på bilderna.

Vid ljusbågssprutning används en hög likström för att smälta zinktrådarna. Den flytande metallen slungas ut från sprutan med hjälp av tryckluft, se avsnitt 4.1.3. 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 15 *Provblocken innan sprutning. Den röda kabeln ansluts till zinkskiktet i samband med sprutningen.*



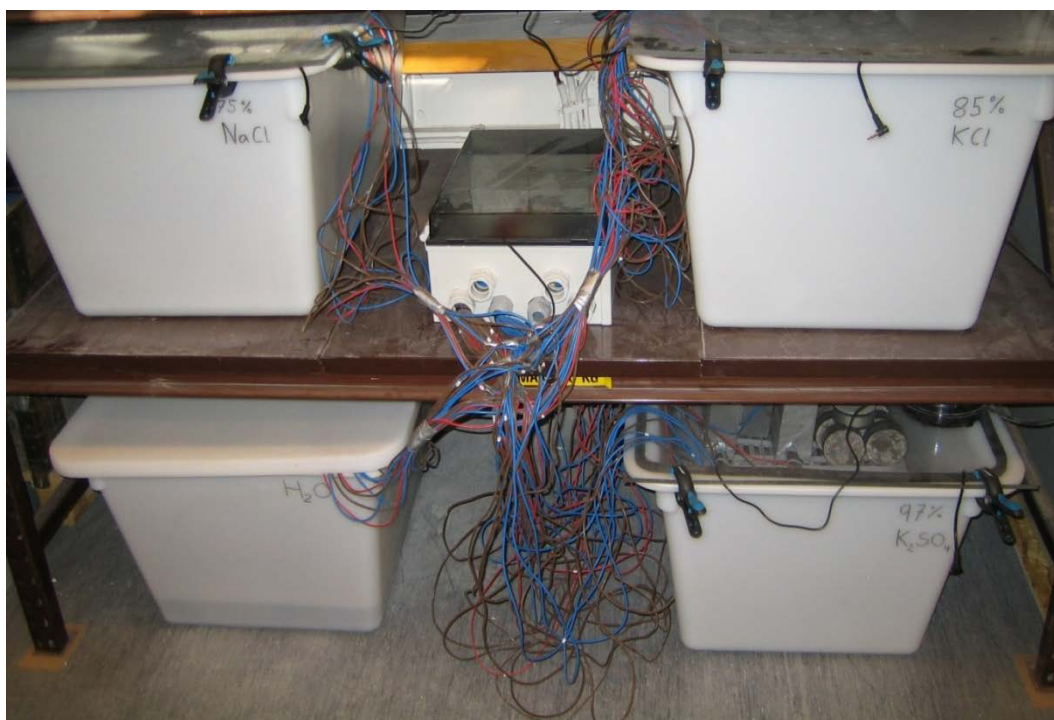
Figur 16 *Ljusbågssprutning av provkropparna.*

4.2.4 Konditionering i klimatboxar

Efter sprutningen kopplades provblocken in och placerades i sina olika klimatboxar. Dessa regleras genom mättade saltlösningar till 75% RF (NaCl), 85% RF (KCl), 97% (K_2SO_4) 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 (zinkskiktet) och inuti (stålet) för att se om skyddspotentialen från zinkskiktet 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 17** visas utrustningen med de fyra klimatboxarna kabeldragningen och elcentralen där i och urkoppling av skyddet kan ske.



Figur 17 Klimatboxarna som använts vid konditioneringen av provblocken under försöken.

4.2.5 Kontroll av skyddsförmågan hos sprutat zinkskik

För att kontrollera och bedöma skyddsförmågan hos det sprutade zinkskiktet 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 höghögmultimeter. Potentialen mäts både vid ihop- och isärkoppling av zinksiktet från de ingjutna provstängerna. Potentialvärdena relateras till en referenselektrod av titan belagd med ett ädelmetallsikt 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 zinksiktet är inkopplat, $E_{(\text{ihop})}$. 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, $E_{(\text{från}, 0 \text{ tim})}$, samt efter att de kopplats isär i 24 timmar varvid den elektrokemiska potentialen mäts igen efter 24 timmars fränkoppling, $E_{(\text{från} 24 \text{ tim})}$. Potentialmätningar utfördes även på zinksiktet.

Tabell 3 visar exempel på hur mätprotokollen som använts ser ut.

För att beräkna depolarisationen, $\Delta E_{(\text{från}, 24 \text{ tim})}$ enligt SS EN-12696 som sker vid isärkoppling tas differensen mellan $E_{(\text{från}, 24 \text{ tim})}$ och $E_{(\text{från}, 0 \text{ tim})}$ i **tabell 3** och det är denna som senare redovisas i resultatdelen.

Referensblocken 17-32 används även för att få en siffra på miljön och provstängernas korrosionstillstånd i provningsblocken. Stålets potential kan eventuellt ger oss information om risken för om korrosion kan pågå.

Tabell 3 Exempel på mätprotokoll från 5 februari 2014. Samtliga värden är uppmätta med en referenselektrod av titan belagt ett ädelmetallskikt och potentialvärdena anges i mV.

Datum	2014-02-05		2014-02-06	
	E _(ihop)	E _(från, 0 tim)	E _(från, 24 tim)	E _(från, 24 tim)
	Fe rel. Ti	Fe rel. Ti	Fe rel. Ti	Zn rel. Ti
Tid	10:00		10:00	
1	-296	-294	-177	-405
2	-366	-361	-231	-500
3	-518	-502	-266	-822
4	-703	-678	-273	-915
5	-328	-325	-294	-415
6	-759	-744	-294	-892
7	-496	-492	-283	-808
8	-495	-485	-262	-794
9	-525	-483	-237	-910
10	-524	-487	-212	-878
11	-692	-655	-299	-867
12	-791	-781	-581	-844
13	-467	-448	-270	-819
14	-739	-716	-356	-807
15	-507	-493	-284	-718
16	-752	-732	-321	-952
17			-196	
18			-301	
19			-395	
20			-321	
21			-286	
22			-445	
23			-357	
24			-322	
25			-396	
26			-290	
27			-482	
28			-602	
29			-326	
30			-609	
31			-451	
32			-459	

4.2.6 Utvärdering av korrosionsutseende hos provstänger och zinkskikt efter exponering

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

4.2.7 Utvärdering av provstängernas korrosionshastighet och gropfrättningsdjup 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 4** anges provstängernas kemiska sammansättning.

Tabell 4 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. Massminskningen (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 $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ i koncentrerad HCl) vid rumstemperatur. Vid beräkning av stålstängernas korrosionshastighet användes densiteten 7800 kg/m³.

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 metalljums mikroskop.

5 Resultat och diskussion

5.1 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.

Kantbalk och stödmur, Essingeleden

I **tabell 5** 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 5** uppnås fullgott katodiskt skydd, dvs $\Delta E_{(\text{från, 24tim})} \geq 100 \text{ mV}$, i samtliga mättillfällen 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 stållyta 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 polarisationsond 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 5 Kontrollmätningar av skyddsförmågan hos det termiskt sprutade zinkskiktet som applicerats på kantbalk och stöddmur på Essingeleden. Mätningarna utfördes den 13 maj 2013, 23 september 2013 och 23 september 2014.

Polarisations- sond (nr) (datum)	$E_{(ihop)}$ (mV)	$E_{(från, 0 \text{ tim})}$ (mV)	$E_{(från, 24 \text{ tim})}$ (mV)	$\Delta E_{(från, 24 \text{ tim})}$ (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 6** redovisas mätningar av resistansen mellan olika polarisationssonder och zinkskikt/armering på Essingeleden. Det framgår av mätresultaten i **tabell 6** 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 6 Resultat från mätningar av resistans mellan polarisationssond och zinkskikt i Essingeleden. Mätningarna utfördes den 23 september 2014.

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

Kantbalkar och undersida brobanepatta, Göteborg

I **tabell 7** 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 7** 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 8** redovisas mätningar av resistansen mellan olika polarisationssonder och zinkskikt/armering i Göteborg. Det framgår av mätresultaten i **tabell 8** 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 7 *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	$E_{(ihop)}$	$E_{(från, 0 \text{ tim})}$	$E_{(från, 24 \text{ tim})}$	$\Delta E_{(från, 24 \text{ tim})}$	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 8 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 9** 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 betongtytor jämfört med ej sprutade betongtytor. Den lägre fukthalten i betongen under det sprutade zinkskiktet beror sannolikt på att dessa betongtytor är regnskyddade.

Tabell 9 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

Betongvägg i silgata 3 i intagsbyggnad för Forsmark 1 och 2

I **tabell 10** visas resultaten från kontrollmätningar av skyddsförmågan hos det termiska sprutade katodiska skyddet på betongvägg i intagsbyggnaden i silgata 3 för Forsmark 1 och 2.

Som framgår av resultaten från potentialmätningarna i **tabell 10** så uppnås fullständigt katodiskt skydd vid samtliga mättillfällen.

För att skydda korgbandsilarna mot korrosion finns ett katodiskt skydd med påtryckt ström i närheten av det sprutade zinksiktet. Detta katodiska skyddet stängdes av och på ett flertal gånger samtidigt som potentialmätningar utfördes på det termiskt sprutade zinksiktet. Ingen påverkan på det sprutade zinksiktet från det katodiska skyddet med påtryckt ström kunde konstateras.

Tabell 10 *Kontrollmätningar av skyddsförmågan hos det termiskt sprutade zinksiktet som applicerats på betongvägg i intagsbyggnaden i silgata 3 för Forsmark 1 och 2. Mätningarna utfördes den 20 november 2012, 6 juni 2013 och 14 april 2014.*

Polarisations- sond (nr) (datum)	E _(ihop) (mV)	E _(från, 0 tim) (mV)	E _(från, 24 tim) (mV)	$\Delta E_{(från, 24tim)}$ (mV)	Skydds- förmåga
(1) (121120)	-145	-143	+17	160	God
(1) (130604)	-120	-118	+36	154	God
(1) (140414)	-106	-106	+12	118	God
(2) (121120)	+74	+75	-96	171	God
(2) (130604)	-830	-828	-719	109	God
(2) (140414)	-815	-812	-515	406	God
(3) (121120)	-757	-755	-653	101	God
(3) (130604)	-735	-735	-621	124	God
(3) (140414)	-627	-627	-430	197	God
(4) (121120)	-403	-400	-162	238	God
(4) (130604)	-418	-416	-143	273	God
(4) (140414)	-440	-439	-171	268	God

5.2 Laboratorieundersökning

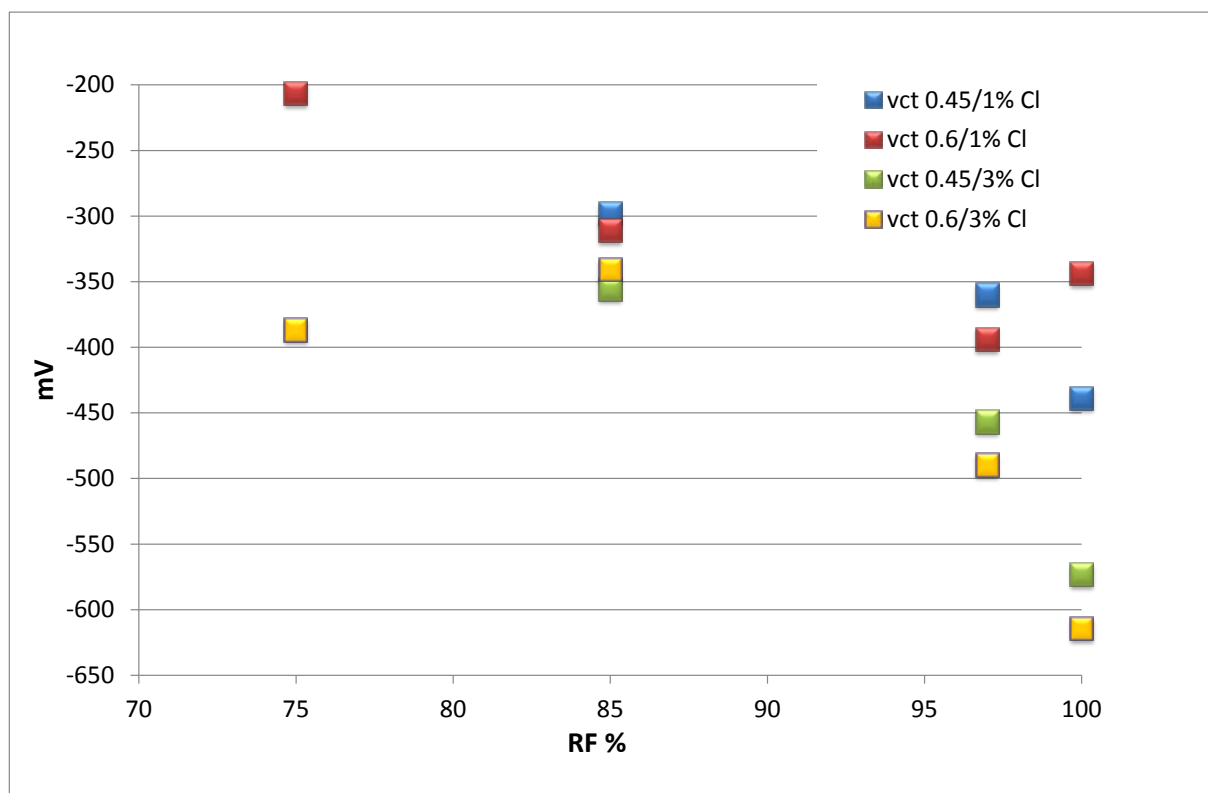
Resultaten från laboratorieprovningen redovisas under fyra stycken punkter:

- Referensblocken 17-32 används för att ge en bild av korrosionspotentialen i de olika miljöerna. Detta ger information om var det är störst risk för korrosion. Här syns t.ex. tydligt skillnaden på de olika fuktnivåerna och kloridhalterna.
- SS-EN 12696 säger att stålets potential skall stiga minst 100 mV på 24 timmar efter zinksiktet kopplats bort för att ge ett fullgott skydd. Detta krav används för att bedöma den skyddande effekten hos zinksiktet men även jämföra hur olika parametrar påverkar.
- Okulär bedömning görs för att se hur zinksiktet ser ut efter drygt ett års exponering.
- Bestämning av korrosionshastighet och maximalt gropfrättningsdjup för både galvaniskt skyddade och oskyddade provstänger samt bestämning provstängernas korrosionstillstånd genom okulär undersökning och mätning av provstängernas elektrokemiska potential

I **tabell 11** redovisas resultat från potentialmätningar av de ingjutna och oskyddade provstängerna. Utifrån dessa har ett medelvärde beräknats som används i **figur 18**. I beräkningen har första mätningen exkluderats då fuktnivåerna i provkropparna ännu inte stabiliserats fullt ut.

Tabell 11 Resultat från potentialmätningar av provstängernas elektrokemiska potential (mV) ingjutna referensblock 17-32. Mätningar har utförts vid sju olika mättillfällen.

RF	Prov nr	Datum						
		130307	130521	130909	140124	140205	140228	1404-03
75	17	-199	-252	-202	-212	-196	-199	-179
85	18	-191	-314	-332	-279	-301	-310	-332
97	19	-227	-410	-409	-363	-395	-391	-397
100	20	-327	-442	-339	-318	-321	-322	-321
85	21	-216	-307	-311	-270	-286	-294	-322
100	22	-500	-568	-359	-426	-445	-437	-399
97	23	-233	-362	-358	-358	-357	-364	-362
97	24	-180	-313	-307	-326	-322	-322	-293
75	25	-372	-436	-373	-383	-396	-386	-348
85	26	-355	-447	-392	-291	-290	-286	-340
97	27	-327	-501	-477	-480	-482	-494	-505
100	28	-585	-658	-596	-601	-602	-609	-622
85	29	-370	-461	-387	-336	-326	-314	-311
100	30	-515	-556	-465	-568	-609	-627	-615
97	31	-335	-463	-469	-442	-451	-450	-467
97	32	-332	-438	-430	-471	-459	-458	-459



Figur 18 Medelvärden från mätperioden 13-05-21 till 14-04-03.

Gällande miljöns inverkan på provstängernas elektrokemiska potential och risken för korrosion hos provstängerna i referensprovblocken kan följande noteras:

- En högre fuktnivå ger en lägre potential hos stålet vilket ökar risken för korrosion.
- En högre kloridhalt ger en lägre potential hos stålet vilket ökar risken för korrosion.
- En porösare betong ger en lägre potential hos stålet vilket ökar risken för korrosion.

Detta är samtliga intuitiva resultat men samtidigt ett kvitto på att boxarna gett de önskade skillnaderna i miljö även inuti provblocken. Spridningen i resultaten för de halvt nedsänkta blocken är dock noterbare och det är oklart vad som gör detta men referenselektroden kan hamna lite olika i blocken och detta har ingen betydelse i de tre övriga klimatboxarna men när provkroppen är halvt nedsänkt kan detta eventuellt påverka resultatet.

Vid användning elektrokemiska potentialmätningar för att bestämma sannolikheten för pågående korrosion visar erfarenheterna att vid höga fukthalter i betongen fås oftast låga potentialvärden. Dessa potentialvärden kan inte särskiljas från de potentialvärden som uppmätts vid pågående korrosion.

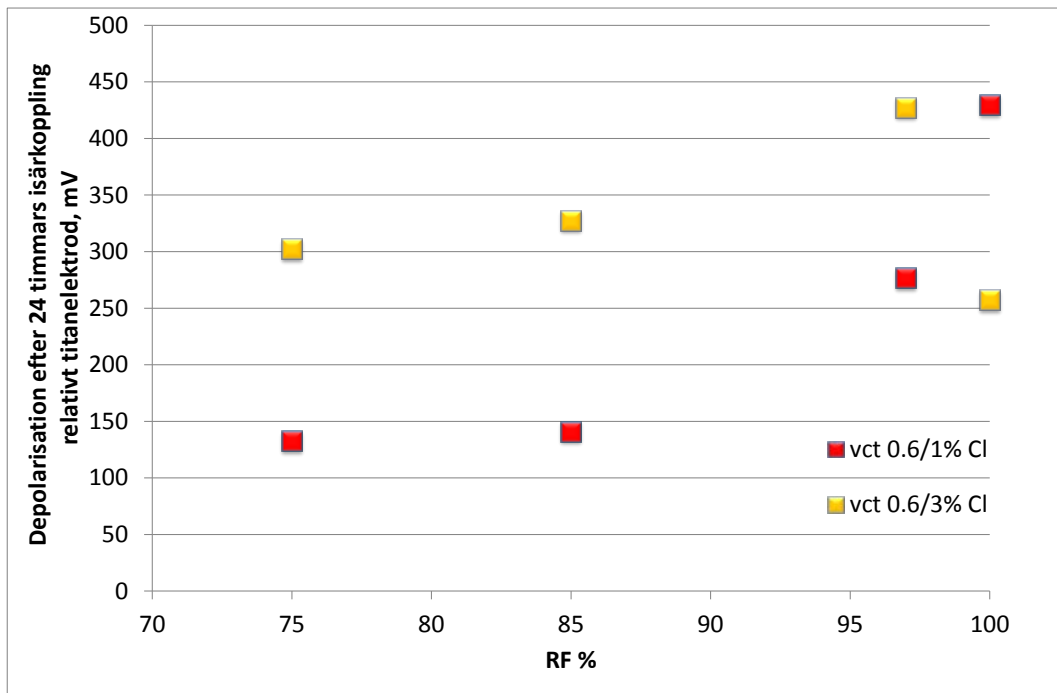
5.2.1 Bedömning av skyddseffektivitet enligt SS-EN 12696

I **tabell 12** redovisas resultat från depolarisationsmätningar på de ingjutna provstängerna hos de zinksprutade provblocken. Utifrån dessa har ett medelvärde beräknats som används i **figur 19** och **20**. I beräkningen har första mätningen exkluderats då zinken initialt har en betydligt större matning av skyddsström initialt. I de fall då glapp (dålig kontakt med zinkskiktet) konstaterats har även dessa värden exkluderats.

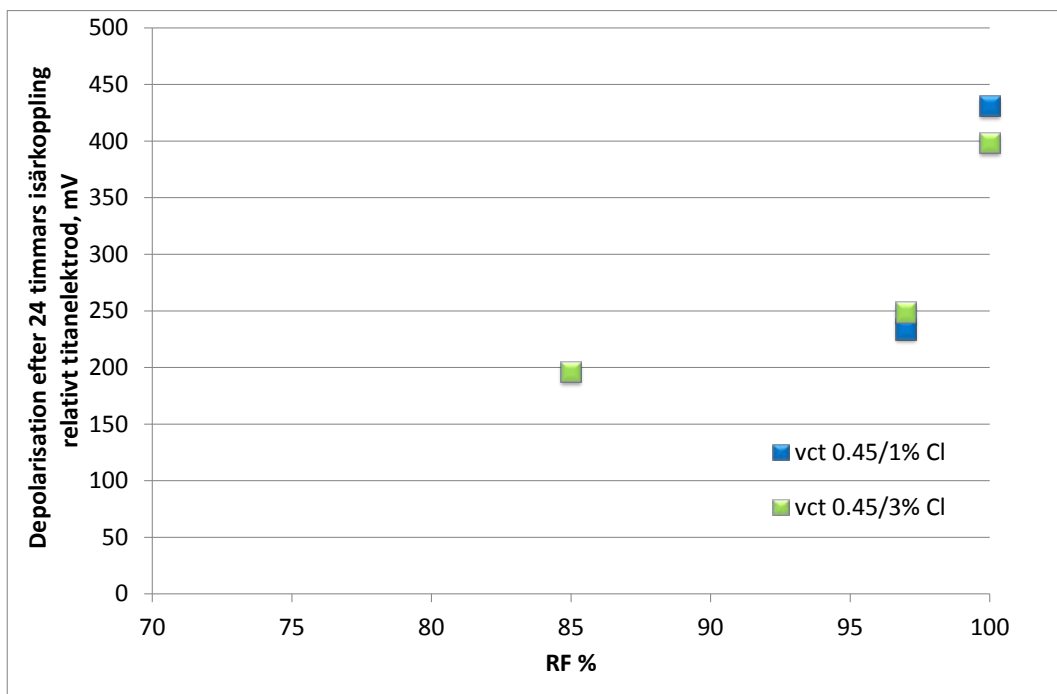
Tabell 12 Mätvärden uttryckt i mV enligt SS-EN 12696 från mätperioden 13-05-21 till 14-04-03. Mätvärdena anger hur stor depolarisationen är efter 24 timmars isärkoppling av provstänger stål och zinkskikt,

Prov nr	Datum						
	130307	130521	130909	140124	140205	140228	140403
1	232	142	135	121	119	150	128
2	315	232	163	79	135	94	141
3	3*	411	292	150	252	277	276
4	537	496	429	386	430	407	8
5	65*	29*	24*	10*	34*	10*	14*
6	410	445	433	400	465	418	424
7	195	301	238	136	213	257	256
8	351	390	277	158	233	265	279
9	399	352	311	300	288	283	279
10	410	446	398	241	312	268	299
11	507	552	468	370	393	397	383
12	448	364	247	244	210	244	232
13	177	280	252	120	197	150	175
14	527	501	424	363	383	365	352
15	343	385	255	191	223	222	215
16	499	571	420	418	431	429	415

*Zinkskiktet har dålig elektrisk kontakt med provstängerna, vilket ger dålig strömutmatning.



Figur 19 Medelvärden från mätperioden 13-05-21 till 14-04-03 för provblocken med vct 0.45.



Figur 20 Medelvärden från mätperioden 13-05-21 till 14-04-03 för provblocken med vct 0.55.

I **figur 19** och **20** 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. Det är svårt att finna en förklaring till detta.

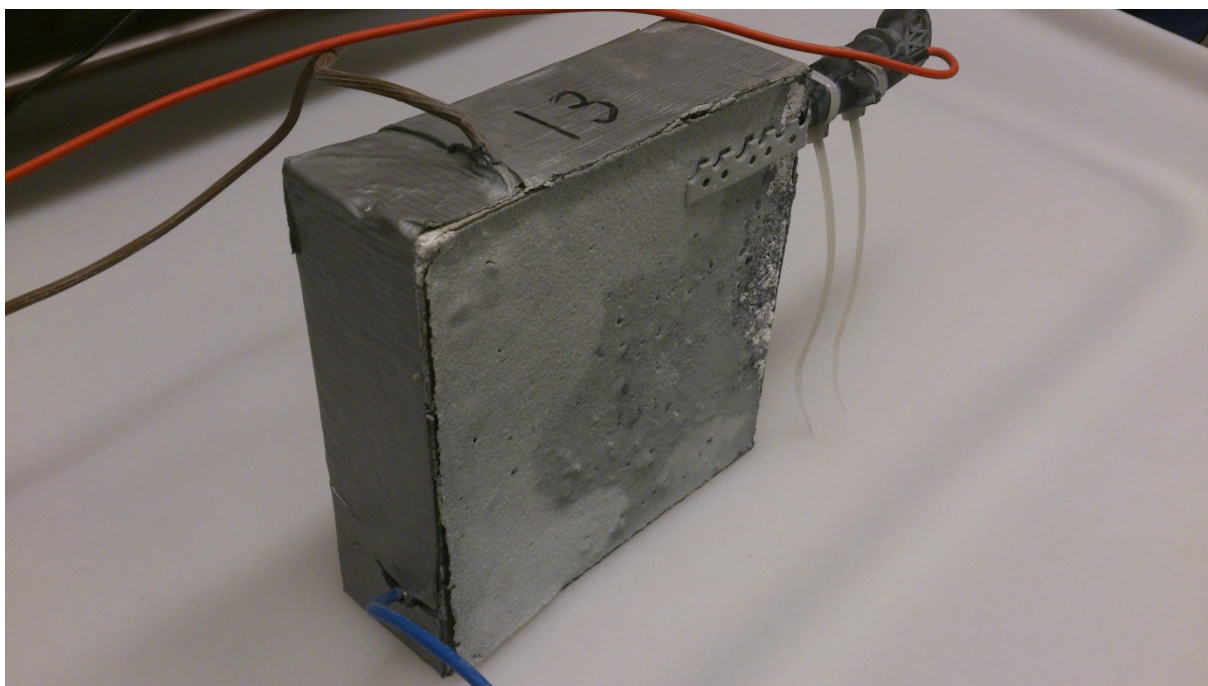
I övrigt kunde ingen effekt av täckskiktets tjocklek konstateras. Detta innebär inte att avståndet mellan anod och katod är betydelselöst men med dessa små variationer som ett täckskikt ger så kan ingen effekt konstateras.

5.2.2 Okulär bedömning av termiskt sprutat zinkskikt

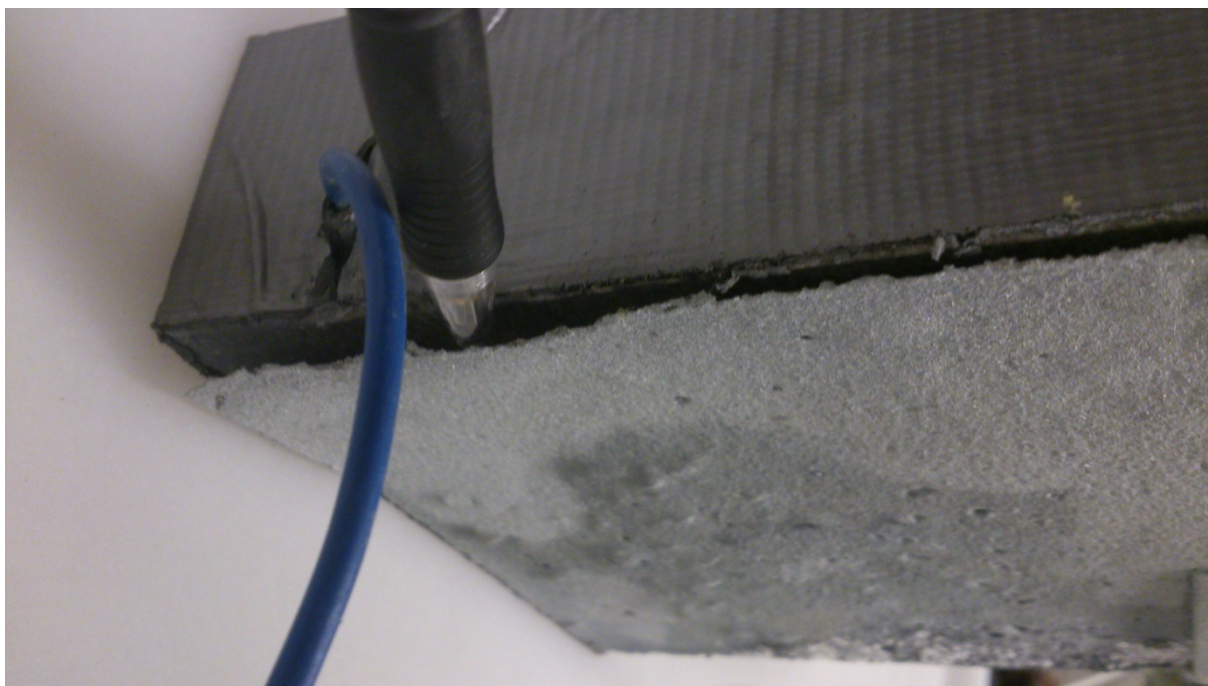
Efter drygt ett års exponering gjordes en okulär besiktning av samtliga provkroppar. Observationerna kan sammanfattas i följande punkter:

- 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 zinkskiktet har noterats varav det på provblock 13 har den sämsta vidhäftningen, se **figur 21** och **22**
- 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.

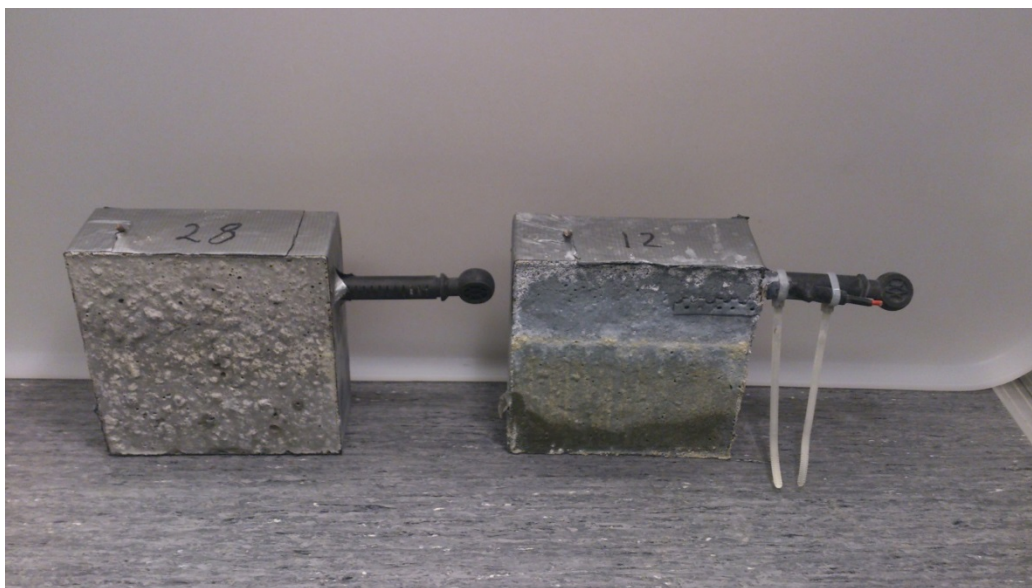


Figur 21 Foto på provblock 13 där den ljusare ytan indikerar delaminering



Figur 22 Närbild på provblock 13 som illustrerar delamineringen

I **figur 23** 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 23 Provblock 12 med tillhörande referens 28. Dessa provkroppar har varit halvt nedsänkta i vatten under provningstiden.

I **figur 24** 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 24 Provblock 11 med tillhörande referens 27. Dessa provblock har varit placerade i 97 % RF

5.2.3 Bestämning av provstängernas korrosionsutseende, korrosionshastighet med och utan sprutat zinkskikt

I **tabell 13** 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 13** 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 13**.

Tabell 13 Resultat från utvärdering av korrosionshastighet hos kolstål ingjutna i betong med och utan katodiskt skydd.

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

I **tabell 14** visas resultaten från mätning av maximalt frätgropsdjup för skyddade och oskyddade provstänger. Som framgår resultaten i **tabell 14** är det endast den oskyddade provstäng nr 81 som har fått gropfrätning. Det maximala frätgropsdjupet mättes till 525 µm. För de övriga provstängerna kunde inga frätgropar konstateras.

Tabell 14 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 provstången nr 81. Skillnaden i korrosionshastighet mellan skyddade och oskyddade provstänger är mycket liten förutom hos den oskyddade provstången 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 %.

6 Slutsatser

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, $\Delta E_{\text{(från, 24 tim)}} \geq 100 \text{ mV}$, 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 gropfrätningdjup var $525 \mu\text{m}$.)
- Den genomsnittliga skyddsgraden vid ett RF av 97 % och en total kloridhalt av 3 % per cementvikt är ca 87 %.
- Vidhäftningen av zinksiktet 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 zinksiktet vid olika RF i betongen.

Fältundersökning

- Vid kontroll av skyddsförmågan efter ca ett års exponering av tre olika betongkonstruktioner som katodiskt skyddats med ett termiskt sprutat zinksikt 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 $1\frac{1}{2}$ års drift och efter 2 års drift 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.

7 Referenser

- Ref 1. Sederholm, B & Selander, A., ”Katodiskt skydd av betongkonstruktioner med termiskt sprutade offeranoder av zink - Erfarenhetsinsamling och fältundersökning med fokus på långtidsegenskaper – Etapp I” Elforsk BET 102, 2011, 53 sidor.
- Ref 2. Taxén C: PM-Sprutad zinkanod för katodisk skydd av armering i betong – effekt av avståndet mellan kontaktpunkter, november 2012.
- Ref 3. Sederholm, B & Selander, A., ”Termiskt sprutade offeranoder av zink förlänger livslängden för broar” CBI:s Informationsdag 17 mars 2013.
- Ref 4. Sederholm, B, Selander, A & Trägårdh J., Cathodic protection of concrete structures with thermally sprayed sacrificial zinc anodes – critical parameters for the protective ability of the sprayed-on anode, ICCRRR, Capetown, South Africa, Taylor & Francis Group, 2012
- Ref 5. Selander, A., & Sederholm, B, ”Termiskt sprutade offeranoder av zink – fungerar det?” CBI-nytt 2-2012.
- Ref 6. Sederholm, B & Selander, A., ”Katodiskt skydd av betongkonstruktioner med termiskt sprutade offeranoder av zink” Bygg & Teknik, No 7, 2011, pp. 25-28.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se

