



Katodiskt skydd av betongkonstruktioner med termiskt sprutade offeranoder av zink

Erfarenhetsinsamling och fältundersökning med fokus på
långtidsegenskaper – Etapp I

Elforsk rapport 11:55



Bror Sederholm & Anders Selander

December 2011

ELFORSK

Katodiskt skydd av betongkonstruktioner med termiskt sprutade offeranoder av zink

Erfarenhetsinsamling och fältundersökning med fokus på
långtidsegenskaper – Etapp 1

Elforsk rapport 11:55

Förord

Elforsk driver sedan 2007 ett forskningsprogram kring betongkonstruktioner inom kärnkraftverken. Det finns ett behov av att bygga både kompetens och att utveckla teknikbasen för teknisk förvaltning av byggnader och konstruktioner inom kärnkraftindustrin. Det övergripande målet med det betongtekniska programmet är att säkerställa avsedd livslängd och hög tillgänglighet för svenska kärnkraftverk med bibehållen säkerhet. Programmet finansieras av Vattenfall, av kärnkraftverken i Forsmark, Ringhals samt OKG i Oskarshamn, av Strålsäkerhetsmyndigheten, SSM samt av Teollisuuden Voima Oy (TVO) i Finland. Inom programmet har föreliggande projekt, "Katodiskt skydd av betongkonstruktioner med termiskt sprutade offeranoder av zink – fas 1 (Elforsk-projekt BET 102)" genomförts. Projektet syftar till att utvärdera långtidsegenskaperna hos termiskt sprutade zinksikt på befintliga betongkonstruktioner. Projektets första etapp har genomförts som ett samarbetsprojekt mellan Swerea KIMAB, CBI Betonginstitutet, Elforsk och Trafikverket.

Projektet har genomförts av Swerea KIMAB med Bror Sederholm som projektledare och följts av styrgruppen för Elforsks Betongprogram med följande medlemmar;
Kostas Xanthopoulos SSM, Jonas Bergfors EON OKG, Lars-Erik Berglund, Anders Bergkvist och Marcus Edin Vattenfall Forsmark, Patrik Gatter och Manouchehr Hassanzadeh Vattenfall Research and Development AB, Jan Gustavsson och Johanna Spåls Vattenfall Ringhals, Juha Riihimäki TVO samt Lars Wrangensten Elforsk AB. Elforsk tackar styrgruppen för värdefulla kommentarer och synpunkter under projektgenomförandet.

Stockholm i december 2011
Lars Wrangensten
Elforsk AB

Sammanfattning

I föreliggande rapport redovisas resultat från första etappen inom FoU-projektet – Katodiskt skydd av betongkonstruktioner med termiskt sprutade offeranoder av zink. Projektet, som påbörjades maj 2010, har genomförts som ett samarbetsprojekt mellan Swerea KIMAB, CBI Betonginstitutet, Elforsk och Trafikverket. Projektet är indelat i två etapper. Etapp 1 påbörjades under 2010 och avslutades i juni 2011. Etapp 2 förväntas påbörja under hösten 2011 och avslutas under 2013.

I denna rapport redovisas resultat från en litteratur- och erfarenhetsinsamling om användningen av katodiskt skydd av betongkonstruktioner med termiskt sprutade offeranoder av zink. I rapporten redovisas 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 påsprutade zinksikt 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.

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. 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.

Här utförda undersökningar visar att betongens resistivitet (fukthalten i betongen) har stor betydelse för den sprutade zinkanodens skyddsförmåga. Det framgår vidare att zinkanodens livslängd är beroende av de yttre miljöförhållanden som råder intill anoden. Termiskt sprutade offeranoder av zink som exponeras nedsänkt i bräckt vatten har en relativ kort livslängd (< 8 år) 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).

Summary

The present report presents the results from the first part of the project – Cathodic protection of concrete structures with thermally sprayed sacrificial zinc anodes. The project which started in May 2010 has been carried out as a cooperative project between Swerea KIMAB, CBI Betonginstitutet, Elforsk and Trafikverket (Swedish Transport Administration). The project is divided into two parts. Stage 1 started in 2010 and is to be concluded in June 2011. Stage 2 is planned to start in autumn 2011 and will be concluded in 2013.

The report shows the results from a survey of literature and practical experiences of the use of cathodic protection of concrete structures with sprayed zinc sacrificial anodes. Results from investigations of thermally zinc sprayed concrete structures such as concrete walls in the water intake building in the Forsmark III plant and on the edge beam of the Öland Bridge are also presented in the report. A number of drilled concrete cores with sprayed zinc layers from these structures have been examined in the laboratory with respect to the chloride content of the concrete, the zinc content, resistivity, carbonation depth, the penetration depth of zinc in the concrete, the humidity of the concrete, the appearance of the zinc surface, its electrochemical potential and adhesion to the concrete. The cathodic protection capacity of the sprayed zinc layer has also been evaluated.

Experiences of using thermally sprayed sacrificial anodes and impressed current cathodic protection in USA are positive, particularly at the Florida Department of Transportation (DOT). The experiences from DOT, Florida, can be summarized as follows:

1. In exposed localities with strongly corrosive environments preventive protection methods offer great economical advantages when used correctly.
2. Based on 15 years of experience it can be stated that a denser concrete provides slower initiation and deterioration processes.
3. Experiences of various repair methods have proved to be comparatively poor since new damage frequently occurs in adjacent areas.

Based on the three above points it can be concluded that cathodic protection is the only effective method for protecting chloride contaminated concrete constructions. Both systems with impressed current and with sacrificial anodes have proved to be effective for more than 15 years.

In conclusion it can be stated that the prospect of using cathodic protection with thermally sprayed zinc sacrificial anodes is promising.

The present investigations show that the resistivity of the concrete (the humidity of the concrete?) has a great influence on the protective ability of the sprayed-on anode. Further, the life length of the zinc anode depends on the external environmental conditions at the anode. Thermally sprayed zinc sacrificial anodes exposed in brackish water have a comparatively short life length (< 8 years) because of the high rate of corrosion of the anode itself. On concrete surfaces that were thermally sprayed with zinc and subsequently exposed to de-icing salt and spashing of brackish water, the life length of the sprayed zinc anode is judged to be considerably longer (> 11 years).

Innehåll

1	Bakgrund och syfte	1
2	Provobjekt	2
2.1	Ölandsbron	2
2.2	Forsmarksverket III	3
2.3	Essingeleden	4
3	Litteratur- och erfarenhetsinsamling	5
3.1	Betong.....	5
3.2	Armeringskorrosion	5
3.3	Katodiskt skydd	6
3.4	Erfarenheter av termiskt sprutade offeranoder av zink.....	7
4	Experimentell teknik	20
4.1	Elektrokemisk potential.....	20
4.2	Resistivitet	20
4.3	Kloridjonskoncentration/kloridprofil	22
4.4	Vidhäftning.....	23
4.5	Vattenabsorption	23
4.6	Svepelektronmikroskopering av betongkärnor	23
4.7	Svepelektronmikroskopering (FEG-SEM) av zinkskikt.....	23
4.8	Makromikroskopering av zinkskikt.....	24
5	Resultat och diskussion	25
5.1	Ölandsbron	25
5.1.1	Okulärbesiktning av zinkskikt på Ölandsbron.....	25
5.1.2	Mätning av elektrokemisk potential	25
5.1.3	Mätning av resistivitet	26
5.1.4	Undersökning av zinkskikt med makromikroskop och FEG-SEM och EDS-anlys.....	27
5.1.5	Bestämning av kloridhaltsprofil hos uttagna betongkärnor	30
5.1.6	Bestämning av vidhäftning mellan zinkskikt och betongyta	30
5.1.7	Bestämning av vattenabsorption.....	32
5.1.8	Undersökning av betongyta med SEM	32
5.2	Forsmark III.....	34
5.2.1	Okulär inspektion av uttagna betongkärnor.....	34
5.2.2	Mätning av elektrokemisk potential	34
5.2.3	Mätning av elektrokemisk potential	35
5.2.4	Mätning av resistivitet	35
5.2.5	Undersökning av zinkskikt med makromikroskop och FEG-SEM ..	36
5.2.6	Vidhäftning	40
6	Slutsatser och rekommendationer	42
7	Fortsatt arbete	43
8	Referenser	44

1 Bakgrund och syfte

Inom kärnkraftindustrin används 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 på en noggrant rengjord och torr betongyta. De vanligaste sprutmetoderna vid applicering av zinkanod på betongyta är flamsprutning och ljusbågssprutning. Det påsprutade zinkskiktets tjocklek varierar normalt mellan 200 och 500 μm .

Undersökningar utförda år 2000 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 (15). 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.

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 än ett anodsystem med påtryckt ström. Nackdelen med sprutade offeranoder av zink är 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 strömvavgivning till det ingjutna armeringsstålet och genom egenkorrosion. Med egenkorrosion menas "vanlig" korrosion av anoden utan någon strömvavgivning till den korroderande ingjutna stålytan. Eftersom den påsprutade zinkanoden förbrukas genom egenkorrosion blir inte anodens strömutbyte (verkningsgrad) 100 %. Anodens livslängd är sålunda beroende av anodens egenkorrosion och strömvavgivning till den korroderande ingjutna stålarmeringen. Anodens egenkorrosion är beroende av aggressiviteten hos den yttre miljön.

Projektets första etapp har genomförts som ett samarbetsprojekt mellan Swerea KIMAB, CBI Betonginstitutet, Elforsk och Trafikverket. Projektet är indelat i två etapper. Etapp 1 som påbörjats under 2010 och avslutas i juni 2011. Etapp 2 förväntas påbörjas under hösten 2011 och avslutas under 2013. En ny projektansökan kommer att lämnas in under hösten 2011 för etapp 2.

Syftet med Etapp 1 är att utvärdera långtidsegenskaperna hos termiskt sprutade zinkskikt på befintliga betongkonstruktioner.

2 Provobjekt

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. Att dessa objekt valdes ut berodde på att antalet objekt i Sverige är få och att exponeringsmiljön skiljer sig markant mellan objekten.

2.1 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 brobaneplattan, men ej gjutna samtidigt som denna. Kantbalkarna är kontinuerliga mellan övergångskonstruktionerna. Den utvändiga kantbalkshöjden är 0,6 meter, medan den invändiga höjden över brobaneplattan är ca 0,4 meter, varav nuvarande tätskikt och beläggning utgör ca 0,1 meter. Kantbalksbredden är 0,35 meter, se Figur 1.



Figur 1: 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, se Figur 2.



Figur 2: 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 (15). Den elektriska anslutningen mellan zinken och armeringen erhöles genom att spruta ett sammanhängande zinksikt mellan betongen och ett frilagt armeringsstål.

2.2 Forsmarksverket III

Forsmarkverket 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 sprutad zink, Figur 3. Sprutningen genomfördes med flamsprutningsteknik. Före sprutningen rengjordes betongväggarna med högtryckstvätt och sandblåstring. 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 3: Termiskt sprutad vägg vid silgata, Forsmark

2.3 Essingeleden

Essingeleden är en motorväg mellan Solna och Västberga som går längs västra sidan av Stockholms innerstad. Essingeleden är Sveriges mest trafikerade väg. Vägen är en del av E4 och E20. Essingeleden invigdes för trafik september 1967.

Trafikverket planerade under 2010 att installera katodiskt skydd med termiskt sprutade offeranoder av zink på en mindre del av kantbalken. I samband med detta planerades i projektet att installera speciellt framtagna övervakningssonder för mätning av elektrokemisk potential. För att bestämma skyddseffektiviteten hos det termiska sprutade zinkskiktet. Tyvärr har Trafikverket beslutat att flytta fram installationen med termiskt sprutade zinkskikt framåt i tiden, vilket inneburit att denna del har utgått ur projektets etapp I.

3 Litteratur- och erfarenhetsinsamling

3.1 Betong

Färsk betong består i huvudsak av tre delar: cement, ballast och vatten. När cementkornen blandas med vatten startar en reaktion som kallas för cementhydratation. Vatten förbrukas under hydratationen och ett fint porsystem formas. Storleken och mängden av porer beror på flera faktorer, som ingående mängder av vatten och cement, hur homogen betongen är, temperatur, tillsatser för att bara nämna några. Porsystemet spelar en avgörande roll för de flesta processer som sker inuti betongen vilket inkluderar transport av fukt och salter.

Betongens resistivitet är ett mått på betongens förmåga att leda elektrisk ström. Denna ström kan vara en t.ex. en katodisk skyddsström eller en korrosionsström. Ledningsförmågan avgörs i hög grad av hur porsystemet ser ut och om där finns en elektrolyt. Fuktnivån och saltkoncentrationen är de faktorerna som påverkar betongens elektrolyt och därmed dess resistivitet mest.

3.2 Armeringskorrosion

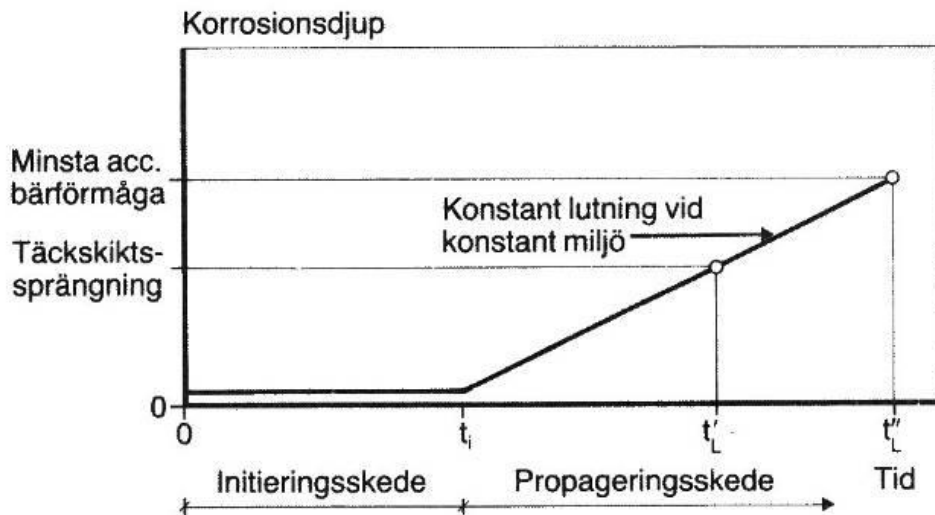
Betongens porvätska som omger en ingjuten armeringsstång är från början mycket alkalisk med ett pH-värde mellan 12,5 och 13,5. I en sådan miljö passiveras stålet. Detta innebär att det bildas svårslösliga järnoxider på metallytan, så täta att korrosionshastigheten blir mycket låg ($< 1 \mu\text{m}/\text{år}$).

Korrosionsskador som uppträder överraskande tidigt i betongkonstruktioner beror ofta på att det förekommer höga halter klorid i betongen. Klorider kan tillföras direkt vid gjutning i form av kloridhaltiga delmaterial och tillsatsmedel eller indirekt som havsvatten och tölsalter. Kloriderna har förmågan att lokalt bryta ned oxidskiktet även om pH-värdet är högt. Stålets potential vid genombrottstället sjunker drastiskt till ett oädelt (mer negativt värde). Den potentialskillnad, spänning, som uppstår mellan genombrottstället (anoden) och oxidtäckt stål (katoden) utgör drivkraften i den uppkomna korrosionscellen.

Korrosionsskador på armeringsstål kan även uppkomma genom att koldioxid från omgivningen reagerar med den alkaliska betongen varvid pH-värdet sjunker från pH 13 till pH 9, sk karbonatisering.

Förloppet vid ett korrosionsangrepp i en osprucken betong kan åskadliggöras med ett livslängdsdiagram, Figur 4. Under ett initieringsskede sker gradvis karbonatisering och kloridinträngning, men ännu är stålet i passivt tillstånd. Vid tidpunkten t_i startar korrosionen genom verkan karbonatisering, av klorider eller av andra korrosiva joner. Därefter sker korrosion med en relativt konstant hastighet så länge miljöbetingelserna runt konstruktionen är någorlunda konstanta. Detta benämns propageringsskedet. När armeringen

angripits så mycket att konstruktionens bärförmåga är oacceptabelt låg, har konstruktionen nått sin maximala livslängd, t_L'' .



Figur 4: Principiellt korrosionsförlopp för ingjuten armering i osprucken betong (1).

3.3 Katodiskt skydd

Katodiskt skydd är en elektrokemisk skyddsmetod som bygger på att man gör metallytan, i detta fall stålarmeringen, som skall skyddas så elektrisk negativ att de elektrokemiska korrosionsreaktionerna hindras. Vad som sker är att stålets korrosionspotential sänks några hundra millivolt så att stålytan blir immun mot korrosion. Vid katodiskt skydd sänks alltså stålets elektrokemiska potentialer från korrosionspotentialen till en mera negativ potential där korrosionen blir praktiskt försumbar, och hålls kvar där. Denna potential kallas skyddspotential.

Potentialsänkningen åstadkommer man genom att koppla stålet som katod i en elektrokemisk cell, varvid det matas en svag elektrisk ström genom elektrolyten (betongen). Likströmmen, den sk skyddsströmmen matas ut i elektrolyten via särskilda hjälpelektroder, sk anoder. Skyddsströmmen alstras på galvanisk väg med hjälp av offeranoder eller på elektrolytisk väg med hjälp av en yttre källa.

Skyddsströmmen på galvanisk väg (även kallat galvaniskt katodiskt skydd) erhålls genom att sammankoppla den metall, t.ex. stål, som skall skyddas med en oädlare metall, t.ex. zink, aluminium eller magnesium. Strömgivningen från anoden medför att anoden med tiden kommer att förbrukas. Anoden "offras" för den skyddade konstruktionen, därav namnet offeranoder. Detta innebär att offeranoderna efter en tid måste ersättas med nya.

Den drivande spänningen, dvs. potentialskillnaden mellan anoden och stålet är normalt liten, endast några 100 millivolt. Skydd med offeranoder används huvudsakligen på konstruktioner som ligger i vatten eller jord. Under senare

år har dock termiskt sprutade offeranoder av zink eller aluminium-zink-indium använts med lyckat resultat för att skydda stålarmeringen mot korrosion.

Vid katodiskt skydd med påtryckt ström (även kallat elektrolytiskt katodiskt skydd) alstras skyddsströmmen av yttre likströmskälla som vanligen är en nätansluten likriktar- och transformatorenhet. Strömmatade anoder är vanligen olösliga och vanliga material kiseljärn, magnetit, grafit elledande polymerer och platinabelagt titan. Även om anoderna kallas olösliga förbrukas de till viss del med tiden på grund av strömväggivning. Anoderna och konstruktionen som skall skyddas ansluts med elkabel till likriktaren. Anoderna kopplas till pluspolen och konstruktionen till minuspolen. Transformatorn ställs in så att en avpassad, lagom stor skyddsström leds från anoderna ut till konstruktion.

Den yttre spänningskällan innebär att katodiskt skydd med påtryckt ström inte begränsas av hög resistivitet i elektrolyten eller av högt totalt strömbehov. Likriktarnas utgående spänning, polspänningen kan regleras efter behov och begränsas av anodtyp, men får inte överstiga 50 V enligt starkströmsföreskrifterna. Till skillnad mot fallet med offeranoder kräver en anläggning med påtryckt ström återkommande tillsyn och övervakning.

3.4 Erfarenheter av termiskt sprutade offeranoder av zink

Den första betongkonstruktion som katodiskt skyddats med termiskt sprutad zink var två pelare under Riehmond-San Raftel bron (år 1983) i Kalifornien, USA. Vid denna installation användes påtryckt ström för att skydda stålarmeringen mot korrosion (2,3).

I slutet av 1980-talet utfördes den första installationen med offeranoder av zink som termiskt sprutats på betongpelare belägna under vägbroar i Florida, USA (5,6). Dessa inledande försök visade att det var möjligt att erhålla galvaniskt skydd med termiskt sprutade zinkanoder på betongkonstruktioner i marinmiljö.

I Tabell 1 och Tabell 2 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 högre zinken är den vanligaste förekommande beläggningen.

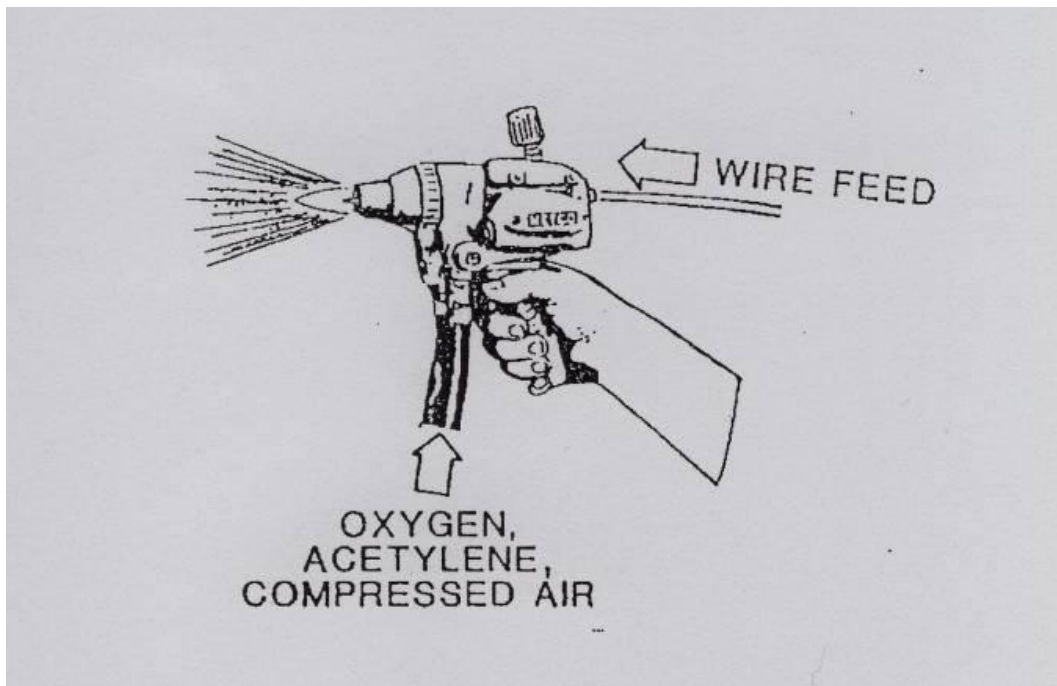
Tabell 1: Termiskt sprutade anoder på betongkonstruktioner (2)

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: 10-26		100 % > 100 mV
Brodäck, pelare, balkar Howard Frankland Bridge, Florida	1992	99 % zink (11148 m ²)	Galvaniskt	Ljusbågssprutning	Pol. Sond 0,4 - 101		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		

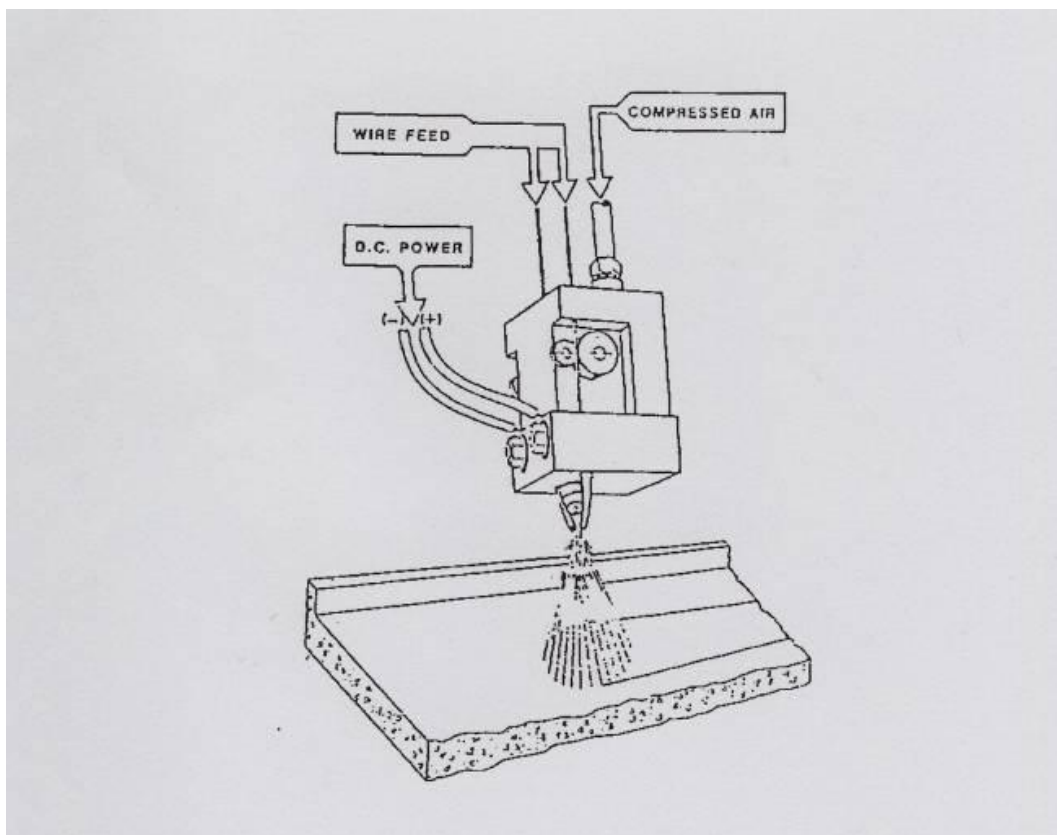
Tabell 2: Termiskt sprutade anoder på betongkonstruktioner i övriga länder (4)

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	Atm. 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 5, används en gaslåga med syre, och acetylen för att smälta anodtråden och vid ljusbågssprutning, Figur 6, används en hög likström för att smälta anodmaterialet. Den flytande metallen slungas ut från sprutan med hjälp av tryckluft.



Figur 5: Sprutpistol för flamsprutning (4).



Figur 6: Sprutpistol för ljusbågssprutning (4).

För att erhålla en god vidhållning 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 3 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, SiO_2 .

Tabell 3: Inverkan av olika blästermedel på vidhäftningen mellan ett påsprutat aluminium-zinkskikt och en betongyta (7).

<i>Effect of Sandblasting Grit on Bond Strength of ZnAl (85:15) Coatings</i>			
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 4.

Tabell 4: Inverkan av betongens yttemperatur på vidhäftningen mellan sprutad beläggning och betong. Betongens yta förvärmades innan sprutning till 120-150 °C (7).

<i>Effect of Surface Temperature on Bond Strength</i>			
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 varierar normalt mellan 200 och 500 µm. Zinkskiktet som innehåller 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 är enligt (8) en kemisk reaktion 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 5 ges ett förslag till fördelning av zink i kontaktytan zink/betong. Av tabellen framgår också vilka möjliga korrosionsprodukter av zink som kan bildas i ett sprutat zinkskikt i kontakt med betong.

Undersökningar utförda på betongprover uttagna från Cape Creek Bridge visade att termiskt sprutat zink som fungerar som en offeranod bildar betydligt mindre korrosionsprodukter än termiskt sprutat zink med påtryckt ström (30).

Tabell 5: 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 strömgivningen (anodisk strömtäthet) från sprutade offeranoder av zink framgår det att den anodiska strömtätheten varierar med yttre förhållanden. De högsta strömtätheterna har uppmätts på betongkonstruktioner 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 $\Delta E \geq 100$ 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 strömgivning är betongytans tillstånd.

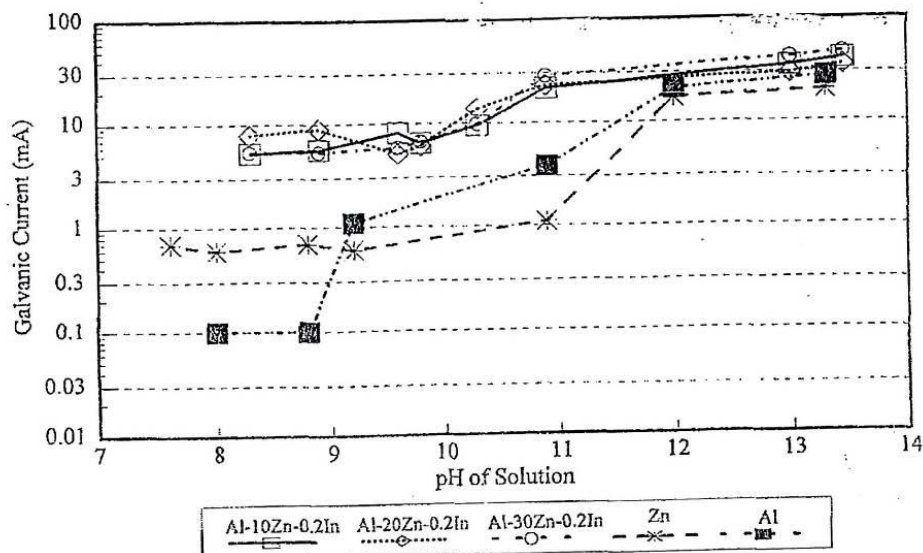
En del forskare menar att zinken kommer att passiveras med tiden i kontakt med betongen, vilket gör att strömgivningen från zinkanoden kommer att avta med tiden.

Betongytans tillstånd torde ha stor betydelse för storleken av strömgivningen hos zinkanoden. Vid en karbonatiserad betongyta (pH < 9) är resistiviteten mycket hög vilket innebär en hög anodisk utbredningsresistans. De låga pH-värden som erhålls vid karbonatiseringen kan leda till att zinkanoden passiveras.

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.

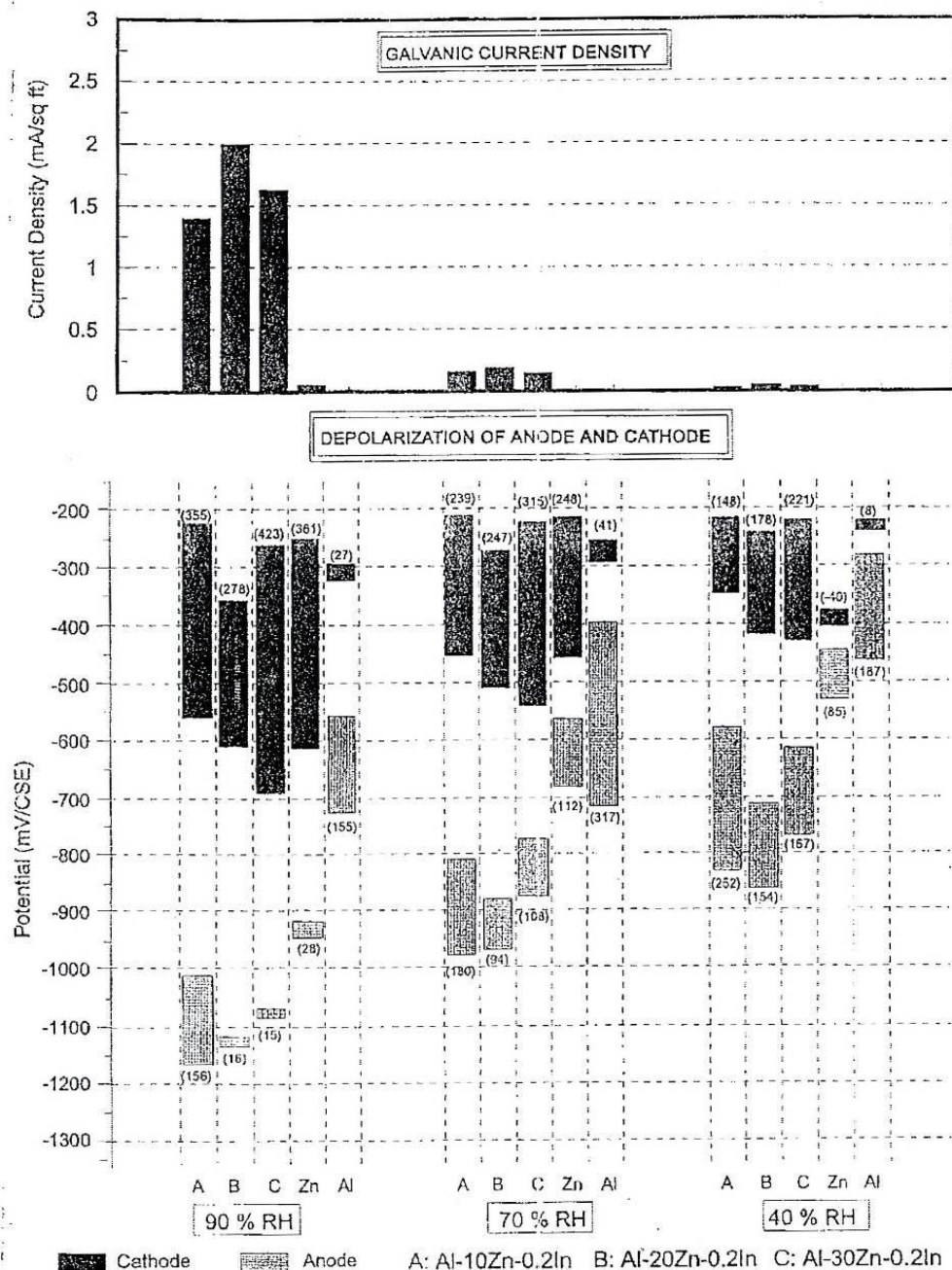
Resultaten av dessa tester visade att offeranoder av aluminium-zink-indiumlegeringar gav den bästa skyddsförmågan. Det var framför allt undersökningarna av anodernas strömgivning i alkaliska porlösningar av olika pH-värden som visade att Al-Zn-In-legeringar gav den högsta ström-

avgivningen i ihopkopplat tillstånd. I Figur 7 visas pH-värdets inverkan på strömvärdet hos fem olika anodlegeringar.



Figur 7: pH-värdets inverkan på strömvärdet hos fem olika anodlegeringar (12)

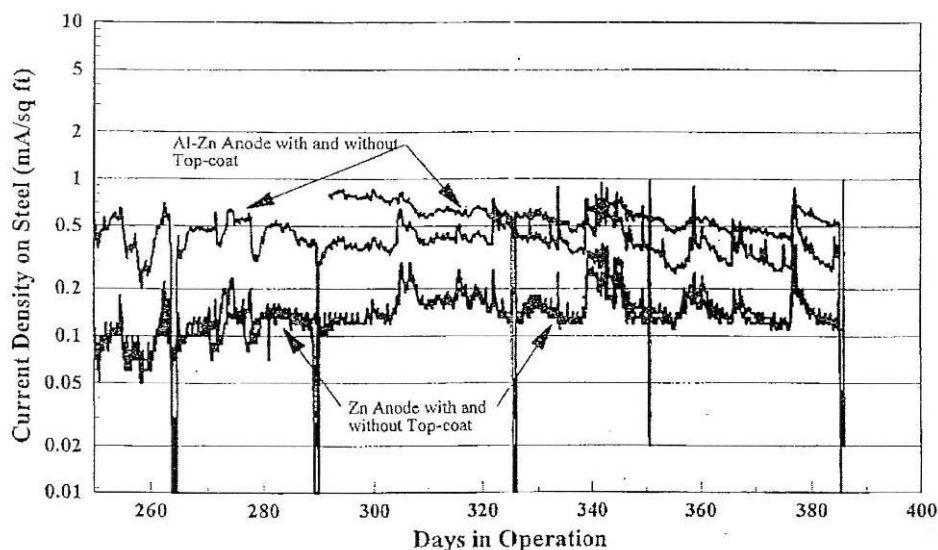
I Figur 8 visas inverkan av den relativa fuktigheten på depolarisationen vid en temperatur av ca 4 °C för fem olika anodlegeringar. Som framgår av resultaten i Figur 8 uppnås depolarisationskriteriet, $\Delta E_{(24h)} \geq 100$ mV för samtliga Al-Zn-In-legeringar vid relativa fuktighet ned till 40 %. 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 8: Inverkan av relativa fuktigheten vid en temperatur av 4 °C på fem olika anodlegeringars strömgivning 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 fuktpremerabel beläggning av polyuretan för att skydda anoderna från atmosfärisk korrosion. I Figur 9 visas den totala strömgivningen för de undersökta offeranoderna som funktion av tiden. Som framgår av resultaten i Figur 9 är strömgivningen betydligt högre för Al-Zn-

In-legeringen än för den högre zinken, I Tabell 6 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 9: Den totala strömgivningen för olika sprutade offeranoder med och utan polyuretanbeläggning som funktion av tiden (12).

Som framgår av Tabell 6 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 6: 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 (4). Ett sådant försök har gjorts på Depoe Bay Bridge i Oregon, USA (4). 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.

I en undersökning utförd av Korrosionsinstitutet (14) visades att efter ett års utomhusexponering i en icke aggressiv miljö att både termiskt sprutade offeranoder av högren zink (99,995 % Zn) och en aluminium-zink-indiumlegering (79,2% Al 20% Zn 0,2% In) gav ett bra korrosionsskydd. Skyddsgraden hos den sprutade zinkanoden var 83 % och för Al-Zn-In-legeringen uppnåddes en skyddsgrad av 79% i en genomkarbonatiserad betong. För en icke genomkarbonatiserad betong var skyddsgraden 29% för den sprutade zinkanoden och 69% för Al-Zn-In legeringen. Det framgick vidare av undersökningen att vidhäftningen för Al-Zn-In-legeringen efter ett års utomhusexponering var mycket dålig och hade helt släppt på flera ställen mot betongytan.

I annan undersökning utförd av Korrosionsinstitutet (15) framgick det att skyddsgraden hos termiskt sprutat zinksikt applicerat på kantbalken vid Ölandsbron gav upp till 95 % skyddsgrad efter två års drift av det termiska sprutade skiktet

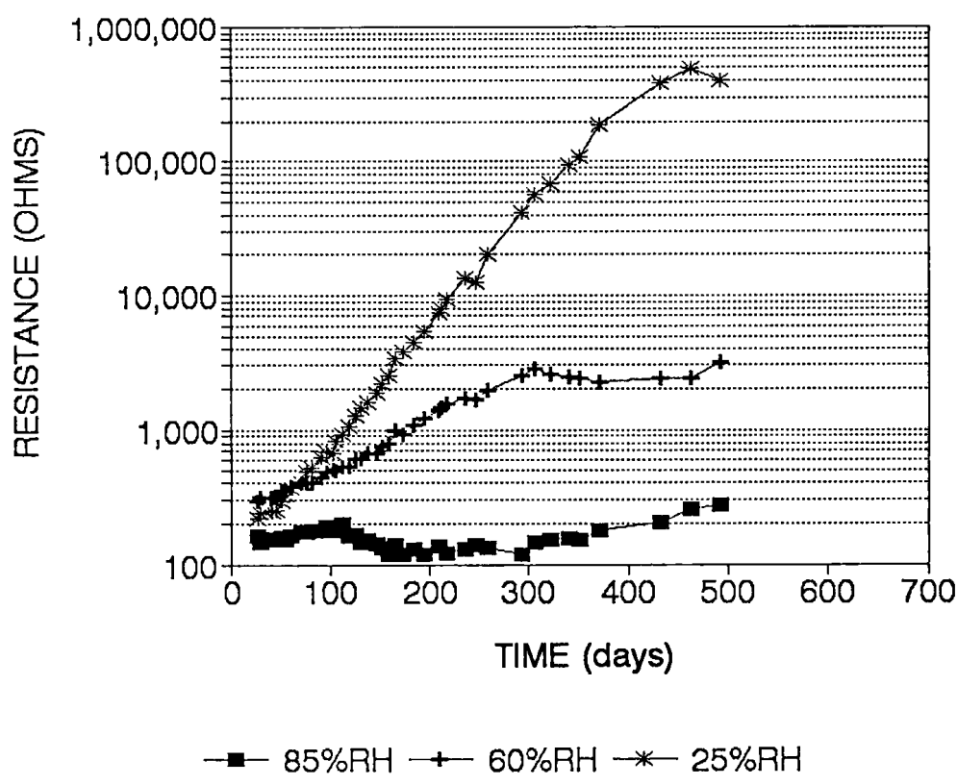
Som tidigare framgått har USA stor erfarenhet av att arbeta med galvaniska skyddssystem för att förlänga livslängden för betongkonstruktioner i utsatta miljöer. Lasa och Powers (16) sammanfattar Floridas vägverk syn på arbetet i fyra punkter.

- (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 påtrycktström. I en artikel från Corpro Inc. (17) 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. (18). Figur 10 visar också tydligt att hur fuktig miljön kommer att påverka funktionen hos det galvaniska skyddet (19). Med lägre fuktighet i betongen minskar strömstyrkan, men som författarna påpekar är behovet av galvanisk skydd mindre då fuktnivån sjunker.

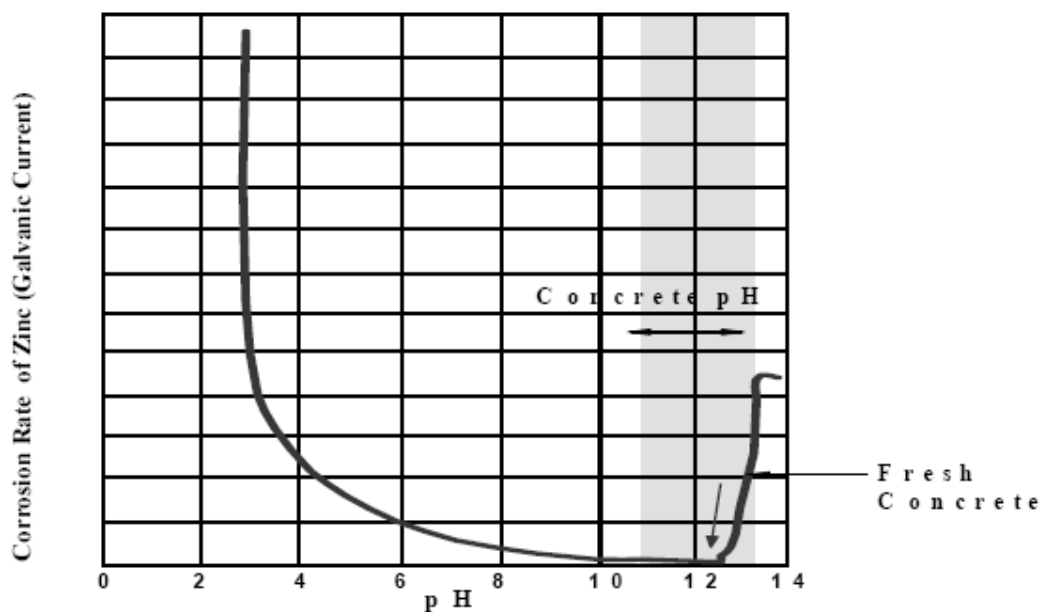
Tabell 7: Sammanställning av för och nackdelar för systemen påtryckt ström och offeranod (17)

	Impressed Current System	Sacrificial (Galvanic) System
Merits	• longer anode life • current can be controlled • extensive track record	• 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	• requires monitoring and maintenance • electrical isolation required between anode and steel • conduit & wiring required • detailed monitoring & control for prestressed concrete	• shorter anode life • anode current delivery is dependent on anode chemistry and surrounding environment • current cannot be adjusted or controlled



Figur 10: 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 (19).

Även pH-värdet har en betydelse för Zn-skiktets funktion då skillnaden mellan karbonatiserad (pH ca 9-10) och icke karbonatiserad (pH ca 12-13) betong kan påverka funktionen vilket bör beaktas. En hög korrosionshastighet kan leda till en snabb passivering. I Figur 11 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 11: Principskiss av zinks korrosionshastighet som funktion av pH (20)

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 (21). Med en accelererad elektrokemisk åldring motsvarande 6-7 år konstateras i stället att förvärmningen inte har någon bestående effekt. Holcomb m.fl. (22) rekommenderar att minska tjockleken på skiktet till 250-500 μm för att minska de inre spänningarna i Zn-skiktet och på så vis stärka vidhäftningen. Författarna framhåller även behovet av att se hur skiktets vidhäftning reagerar på en frostprovning. I (23) poängteras även risker för avtagande vidhäftning då större strömstyrkor krävs för ett gott skydd. Zn-skiktets vidhäftning och beständighet över tid beror enligt Holcomb m.fl. (22). även på om skiktet hålls fuktigt över tid Detta enligt laboratorieförsök där vidhäftningen för ett givet Zn-skikt bedöms vara 27 år då det utsätts för växlande fuktig och torr miljö. I den torra miljön bedöms livslängden vara endast 10 år (22). Detta förklaras med en rekristallisering i de sprickor och hållrum som bildas när zinken reagerar, något som endast sker i fuktig miljö. Av samma skäl diskuteras även fuktbindare så som LiNO_3 och LiBr vilka syftar till att höja fuktnivån i skikten. För sprayade Zn-skikt visade sig LiBr vara den effektivaste (24).

Egenkorrosionen av Zn-skiktet kan i vissa miljöer vara mycket stor. Detta behöver inte ha någon negativ effekt på skyddets funktion men kan medföra att Zn-skiktet konsumeras relativt fort och varvid livslängden förkortas på skyddet. I (25) 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 Zn-legeringar. I (26) 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 (27) noterar att Al-Zn-In givit en bättre effekt än en ren Zn-beläggning 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 Zn-skiktet.

4 Experimentell teknik

4.1 Elektrokemisk potential

Vid bedömning av skyddsförmågan hos ett katodiskt skydd med påtryckt ström mäts den elektrokemiska potentialen hos den skyddade armeringen med ingjutna referenselektroder av mangandioxid (MnO_2) enligt SS-EN 12696 "Katodiskt skydd av stål i betong – Konstruktioner i atmosfär. år 2000".

Det anges i standarden att det erfordras minst 100 mV depolarisering efter 24 timmar, dvs. en ökning av potentialen med minst 100 efter 24 timmars avbrott i förhållande till frånslagspotentialen för att uppnå fullgott katodiskt skydd.

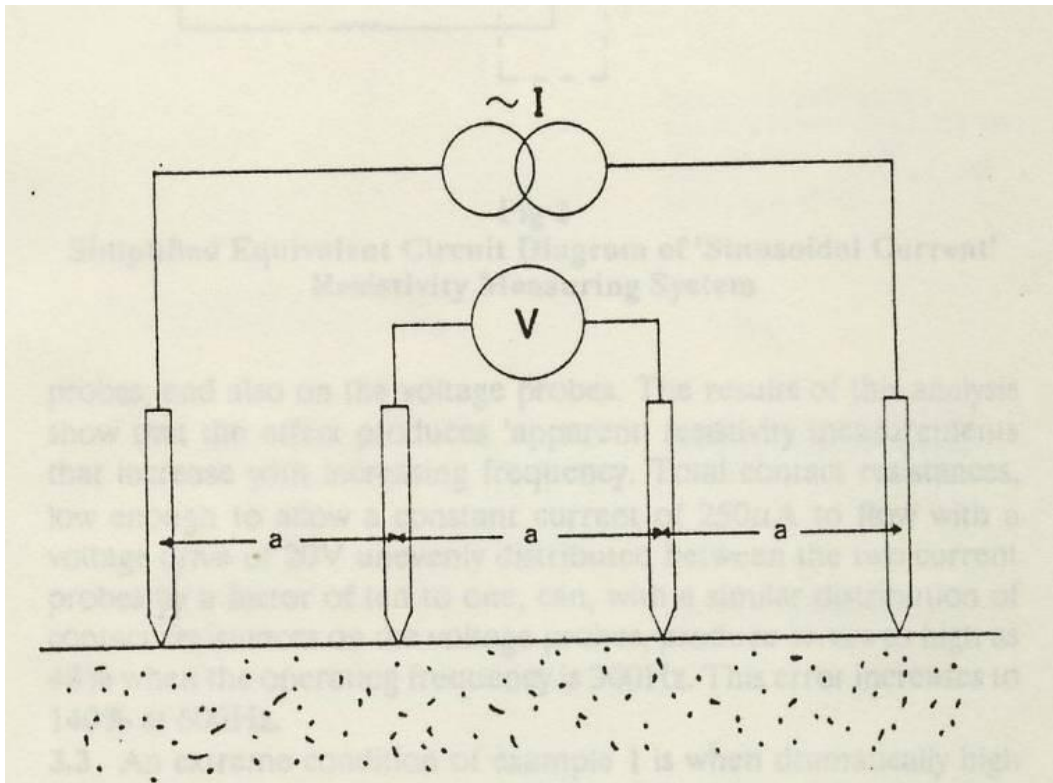
För betongkonstruktioner skyddade med termiskt sprutade offeranoder med zink är det inte möjligt att stänga av skyddet så att en depolarisationsmätning kan utföras.

I föreliggande undersökning görs elektrokemiska potential-mätningar av stålarmeringen och zinkskiktet med en extern referenselektrod av mättad Cu/CuSO_4 . Mätningarna genomförs på uttagna betongkärnor med zinkskikt och kamstänger ihopkopplade och ej ihopkopplade. På Ölandsbron mäts även blandpotentialen mellan kantbalksarmeringens och zinkskiktets. Detta görs genom att trycka referenselektroden mot borrhålets betongyta och mäta blandpotentialen mellan kantbalkens stålarmering och zinkskikt.

4.2 Resistivitet

Resistivitesmätningar i fält

Vid bestämningen av betongens resistivitet användes Wenners 4-elektrodmätmetod. Med denna metod mäts ett medelvärde av resistiviteten i en bestämd betongvolym. Fyra elektroder trycks mot betongytan utefter en rät linje med ett bestämt avstånd, a , mellan elektroderna, Figur 12.



Figur 12: Schematisk skiss för mätprincipen för Wenners 4-elektrodmätod

Via mätledningar ansluts de fyra elektroderna till en resistansmätare så att mätströmmen sänds mellan de två yttre elektroderna och potentialfallet mäts mellan de två inre elektroderna. Mätströmmen breder ut sig mellan de två yttre elektroderna i en betongvolym vars geometriska form liknar en del av en sfär. Den resistivitet som mäts representerar inte ett aritmetiskt medelvärde i denna betongvolym, utan ett vägt medelvärde av betongens resistivitet mellan och under elektroderna. Resistiviteten i betongen närmast betongytan kommer sålunda att i hög grad påverka det uppmätta värdet.

I föreliggande fältundersökningar har en speciell betongresistivitetmätare av beteckningen RM MkII från C.N.S. Electronics Ltd. använts, Figur 13. Fördelen med detta instrument är att avståndet mellan elektroderna kan varieras och mätutrustningen är snabb och enkel att använda.

Betongens resistivitet har identifierats som en av de absolut viktigaste faktorerna för ett galvaniskt skydd med ett sprutat Zn-skikt. Resistiviteten hos betongen beror i sin tur på flera faktorer där fuktnivån i betongens kapillärporsystem antas vara den viktigaste. I samband med denna förstudie genomfördes därför en mätning av resistivitet på några gamla välkonditionerade provkroppar i CBI:s laboratorium.

Resistivitetmätningar på laboratorium

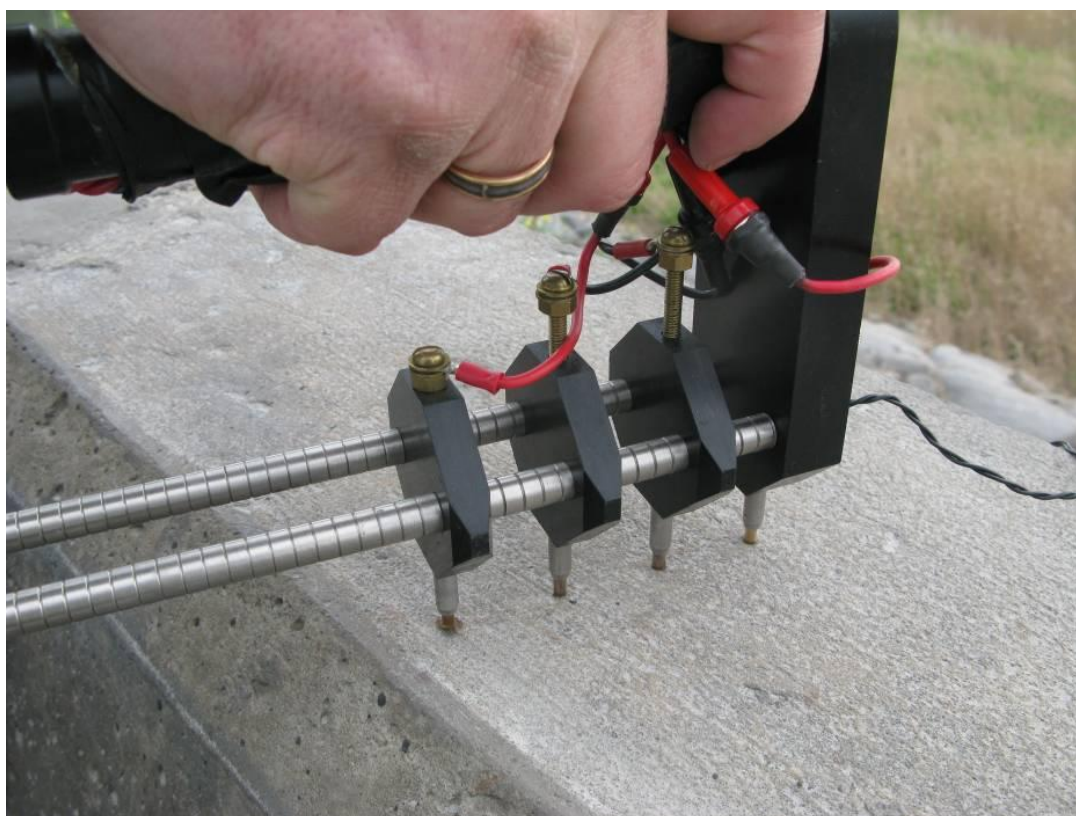
För provningen användes en betong med $v_{ct}=0,6$ (vattencementtal). Detta motsvarar en standardbetong klass C25/30. Provkropparna tillverkades 2005 och har sedan dess konditionerats i speciella klimatboxar på CBI vid 59-97 %

RF (relativ fuktighet) och en temperatur av 20°C. I försöken användes provkroppar med måtten 7,5 x 7,5 x 3 cm.

Tabell 8 visar resultaten från dessa mätningar där det tydligt framgår vilken betydelse fuktnivån i betongen har för dess resistivitet. Dessa värden stämmer väl överens med litteraturen, se till exempel (28).

Tabell 8: Resultat från mätningar av resistivitet på provkroppar i CBI:s laboratorium. Provkropparna har varit konditionerade i samma RF och temperatur sedan 2005.

Konditioneringsmiljö (RF)	33 %	59 %	75 %	85 %	97 %
Resistivitet (kΩcm)	>2000 kΩcm	410 kΩcm	39,7 kΩcm	28,7 kΩcm	8,3 kΩcm



Figur 13: Betongresistivetsmätare RM MkII från C.N.S. Electronics Ltd.

4.3 Kloridjonskoncentration/kloridprofil

Från de utborrade betongkärnorna fräses 2-millimeterskikt av och betongpulvret samlas upp för analys. Pulvret löses sedan upp innan analysen genomförs.

Mätningar av kloridjonskoncentration genomförs med en jonselektiv elektrod. För att relatera kloridjonskoncentrationen till cementhalten genomfördes även en kalciumtitrering med EDTA (EthyleneDiamineTetraAcetate).

4.4 Vidhäftning

Mätning av Zn-skiktets vidhäftning genomförs genom dragprover i CBI:s laboratorium. Från kärnan utsågas en 30 mm lång provcylinder med vidhäftningszonen mellan Zn-skiktet och betongen.

Vidhäftningsprovningen utfördes enligt CBI-metod 6 - Vidhäftningshållfasthet bestämd genom provning av draghållfasthet.

4.5 Vattenabsorption

Zn-skiktet täthet mot vattenabsorption provas genom kapillärsugningsförsök där tre prover som sprutats med Zn jämförts med tre obehandlade. Innan vattenabsorptionsförsöken genomförs torkas proverna i en ugn med 30 °C. Proverna vägdes kontinuerligt tills viktminskningen per tidsenhet var så liten att de bedömdes vara i jämvikt. Proverna placeras därefter med den behandlade ytan alt. referensytan på en "Wettexduk" som står i kontakt med ett vattenbad. Viktändringen registreras enligt ett givet schema och effekten beräknas i procent av referensen.

4.6 Svepelektronmikroskopering av betongkärnor

Mikrostrukturanalys av proverna utförs med hjälp av svepelektronmikroskop (SEM) utrustat med bakåtspridda elektrondetektor (BSE) och energidispersivt röntgenspektroskop (EDS). Analys av kemisk sammansättning utförs med EDS. EDS-analyserna omfattar grundämnen från och med atomnummer 11, dvs natrium eller tyngre. Resultaten från EDS-analyserna är omräknas till oxider och normaliserade till 100 vikt%.

EDS-kartor framställs med hjälp av svepelektronmikroskop (SEM) utrustat med energidispersiv röntgenspektroskop (EDS). En EDS-karta visar fördelningen av ett grundämne som dess relativa halt (ljusare färg = högre halt).

EDS-kartor och kemiska analyser utförs på obehandlade brottytor i betongen. Ett mindre urval av dessa analyser presenteras i resultatdelen.

4.7 Svepelektronmikroskopering (FEG-SEM) av zinkskikt

Zinkskikten undersöks även i hög förstoring (upp till 3000 X) i ett FEG (field emission gun-SEM) av fabrikatet Zeiss Supra 55 med EDS. EDS-analyserna omfattar grundämnen från och med atomnummer 11, dvs natrium eller tyngre. Resultaten från EDS-analyserna omräknas till oxider och normaliserade till 100 vikt%.

4.8 Makromikroskopering av zinkskikt

Zinkskiktets tjocklek, porositet och korrosionstillstånd bestäms med ett makromikroskop i låg förstoring (16-32 ggr) av fabrikatet Leica MZ6. EDS-analyserna omfattar grundämnen från och med atomnummer 11, dvs natrium eller tyngre. Resultaten från EDS-analyserna omräknas till oxider och normaliserade till 100 vikt%.

5 Resultat och diskussion

5.1 Ölandsbron

5.1.1 Okulärbesiktning av zinkskikt på Ölandsbron

Vid uttagning av betongkärnor med termiskt sprutat zinkskikt konstaterades att zinkskiktet var helt intakt utan vidhäftningsförluster. Zinkskiktet utseende framgår av Figur 14. Utanpå zinkskiktet finns ett tunt smutslager och under smutslagret finns ett tunt skikt av vitrost och ren zink.



Figur 14: Termiskt sprutat zinkskikt efter 11 års exponering på Ölandsbron.

5.1.2 Mätning av elektrokemisk potential

I Tabell 9 visas resultat från potentialmätningar på uttagna betongkärnor från kantbalken på Ölandsbron. Det framgår av resultaten i Tabell 9 att armeringens elektrokemiska potential efter ca 30 minuter isärkoppling av zinkskikt och stålarmering 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 isärkoppling bör överstiga 100 mV. Detta skulle innebära att skyddsförmågan är god hos det

sprutade zinkskiktet. Om inte depolarisationen efter 24-timmars isärkoppling inte skulle bli större än 54-60 mV, innebär det enligt europeiska standarden (36) att skyddsförmågan är inte tillräckligt god.

Tabell 9: Resultat från mätningar av elektrokemisk potential hos armeringen i uttagna betongkärnor från Ölandsbron.

Betongkärna Nr.	Blandpotential (zinkskikt och stålarmoring ihopkopplat) rel Cu/CuSO ₄	Armeringens potential efter 30 min isär- koppling rel Cu/CuSO ₄	Zinkskiktets potential efter 30 min isärkoppling rel Cu/CuSO ₄	Armeringens depolar- isation efter 30 min isär- koppling
	mV	mV	mV	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 injutet kolstål med 79 % (15).

5.1.3 Mätning av resistivitet

I Tabell 10 visas resultat från mätningar med Wenners-4-elektrodmätod av resistiviteten hos betongkärnor uttagna från kantbalken vid Ölandsbron. Som framgår av resultaten har det sprutade zinkskiktet ingen inverkan på betongresistiviteten. Anledningen till detta är att zinkskiktet är poröst.

Tabell 10: 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

5.1.4 Undersökning av zinkskikt med makromikroskop och FEG-SEM och EDS-anlys.

I Figur 15 och Figur 16 visas tvärsnitt från två olika delar av en representativ betongkärna med zinkskikt från kantbalken på Ölandsbron. Som framgår av Figur 15 så är zinkskiktet tjocklek ungefär 300-700 μm . Av Figur 16 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.

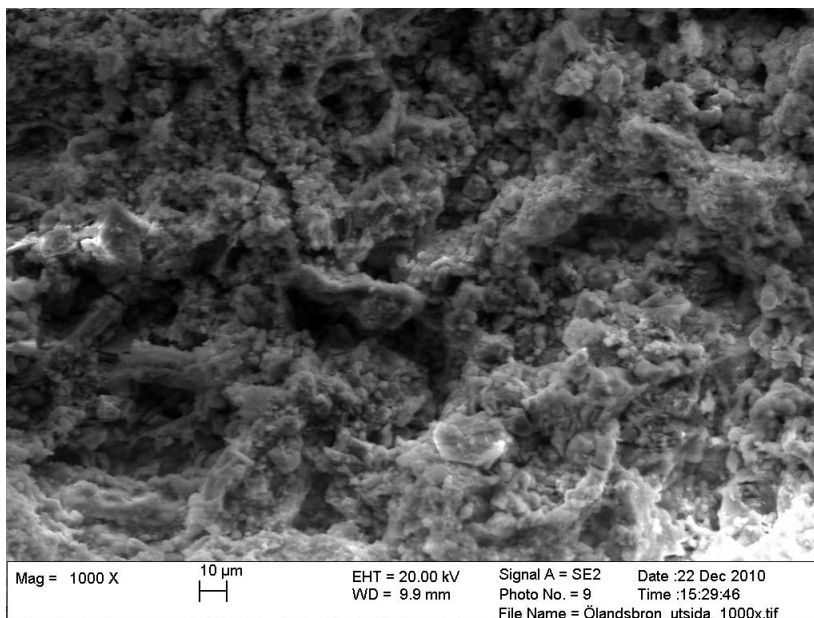


Figur 15: Tvärsnitt av zinkskikt och betongkärna. Zinkens tjocklek varierar mellan 300 och 700 μm . Ingen transport av zinkjoner in i betongen har konstaterats.

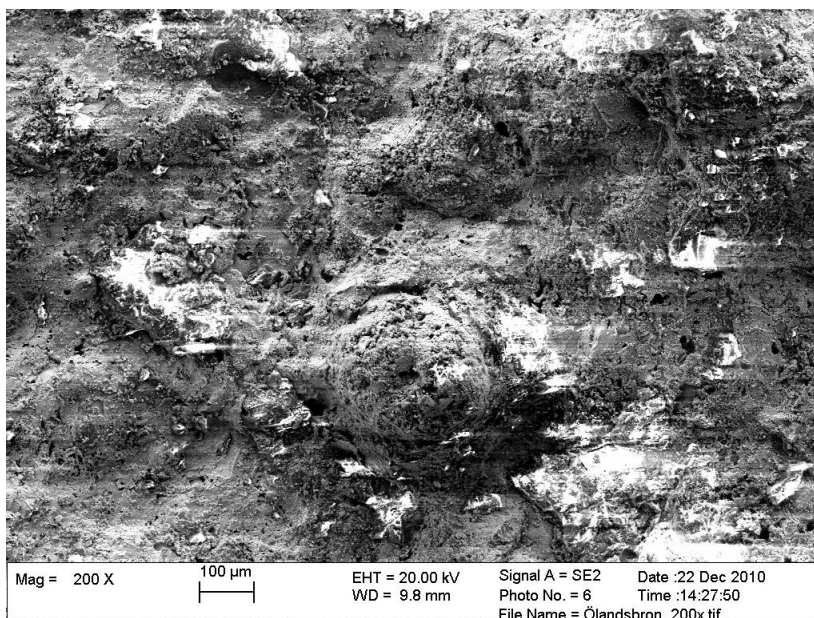


Figur 16: Tvärsnitt av korroderat zinkskikt där zinkjoner transporterats in i betongen ca 3 mm.

Provbitar från zinkskiktet har tagits ut för SEM-undersökning. I Figur 17 och Figur 18 visas utseendet hos zinkytans ut- och insida i hög förstoring. Zinkskiktets utsida har utsatts för stänk från trafiken på Ölandsbron. Zinkens insida har varit i kontakt med betongytan. Det framgår av Figur 18 att de sprutade zinkskiktet är poröst och att det förekommer sfäriska zinkpartiklar på zinkskiktets insida.



Figur 17: Utseendet av zinkytans utsidan. Bilden visar zinkytans utseende i 1000 ggr förstoring (FEG-SEM).

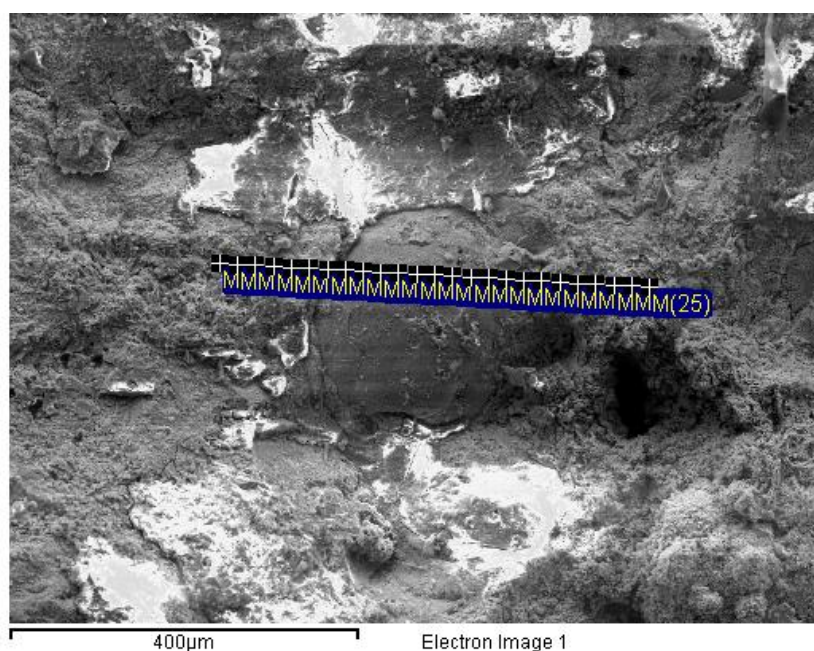


Figur 18: Utseendet av zinkytans insida. Bilden visar zinkytans utseende i 200 ggr förstoring (FEG-SEM)

I Tabell 11 visas resultat från en kvantitativ linjeanalys av zinkytans insida. Zinkytans insida har haft kontakt med betongytan. I Figur 19 visas var de mätningarna har utförts på zinkytans insida.

Tabell 11: Resultat av kvantitativ linjeanalys av zinkskikt och sfärisk partikel

Spect- rum	In stats.	C	O	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Fe	Zn
M(1)	Yes	3.30	27.49		0.59	2.99		0.25	1.94		63.4
M(2)	Yes	3.51	34.02		0.24	1.62			0.20		60.4
M(3)	Yes	7.99	28.60			1.48			2.74		59.2
M(4)	Yes	9.40	31.79		0.71	1.72			4.40		51.9
M(5)	Yes	10.17	29.46		0.46	1.87			2.91		55.1
M(6)	Yes	9.28	19.75			0.67			1.46		68.8
M(7)	Yes	9.80	39.52	0.38	2.46	7.73		1.51	1.89	2.41	34.3
M(8)	Yes	7.13	45.38		0.84	3.49		0.20	0.80	0.54	41.6
M(9)	Yes	10.64	37.05		0.39	1.38	0.25		2.93	0.29	47.0
M(10)	Yes	7.75	31.91		0.42	1.76	0.29		1.91	0.37	55.5
M(11)	Yes	10.35	37.01		0.41	1.36	0.18		2.49	0.29	47.9
M(12)	Yes	4.67	31.01		0.25	2.70	0.24		0.31		60.3
M(13)	Yes	6.47	35.39		0.51	2.41	0.21		0.76	0.45	53.1
M(14)	Yes	4.07	23.94		0.30	1.96			0.43		69.9
M(15)	Yes	11.96	32.27		0.52	2.56		0.17	2.11	0.41	50.2
M(16)	Yes	11.35	28.36			2.52			2.71		55.6
M(17)	Yes	6.35	31.66		0.29	2.21			0.56		58.2
M(18)	Yes	8.49	31.06		0.24	1.96			2.66		55.8
M(19)	Yes	3.12	8.96			1.33			0.93		85.7
M(20)	Yes	3.65	40.54		0.29				0.27		55.5
M(21)	Yes	3.37	21.10		0.32	2.59			0.31		72.2
M(22)	Yes	6.78	45.38		0.39	2.36			0.56		44.2
M(23)	Yes	2.72	23.64			1.18			0.26		72.0
M(24)	Yes	5.64	39.33	0.70	1.15	4.61			0.64		47.3
M(25)	Yes	15.99	50.46		0.36	1.48		0.13	7.96	0.16	23.6



Figur 19: Mätpunkter för kvantitativ linjeanalys av zinkyta och av sfärisk partikel.

5.1.5 Bestämning av kloridhaltsprofil hos uttagna betongkärnor

Tabell 12 visar kloridkoncentrationer till ett djup av 10 mm på ett icke sprutat betongprov respektive Zn-sprutat 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 Zn-sprutat betongprov och det zinksprutade betongprovet kan inte konstateras. Detta visar att Zn-skiktet inte påverkat transporten av kloridjoner. Varken transporten in av nya kloridjoner tycks påverkas och någon omfördelning tycks inte ha skett.

Tabell 12: Kloridkoncentration för referens respektive Zn-sprutat 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

5.1.6 Bestämning av vidhäftning mellan zinkskikt och betongyta

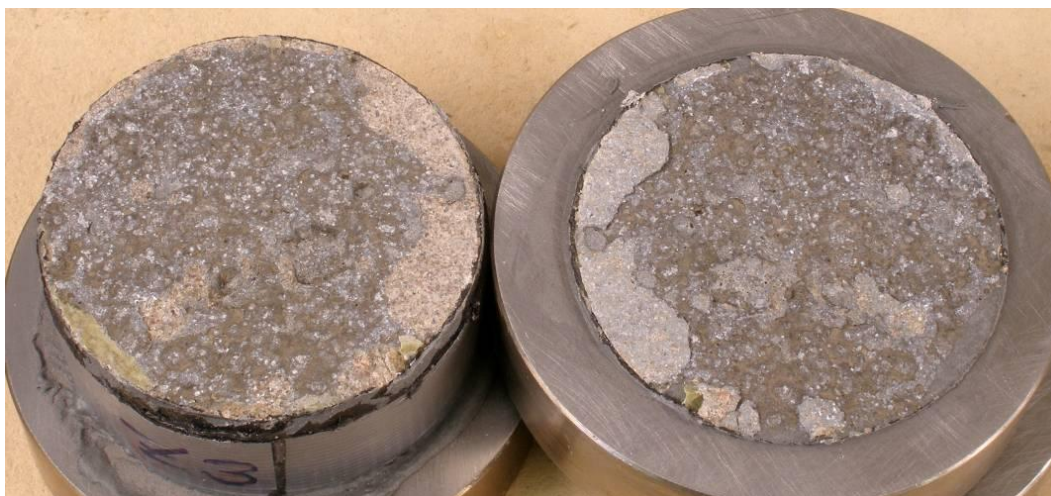
På Ölandsbron borrades tre prover ut för vidhäftningsprovning. Figur 20-22 visar brottytorna från de tre provningarna och prov 1 och 2 har brottet i huvudsak gått mellan Zn-skiktet och betongen medan det tredje brottet skett i Zn-skiktet. Samtliga värden indikerar en mycket god vidhäftning mellan betong och Zn-skikt vilket även stämmer väl med den okulära bedömning som gjordes på plats vid provtagningen. I Tabell 13 redovisas mätresultat från vidhäftningsmätningar av olika uttagna borrkärnor från Ölandsbron.



Figur 20: Brottyta, vidhäftningsprov Z1



Figur 21: Brottyta, vidhäftningsprov Z2



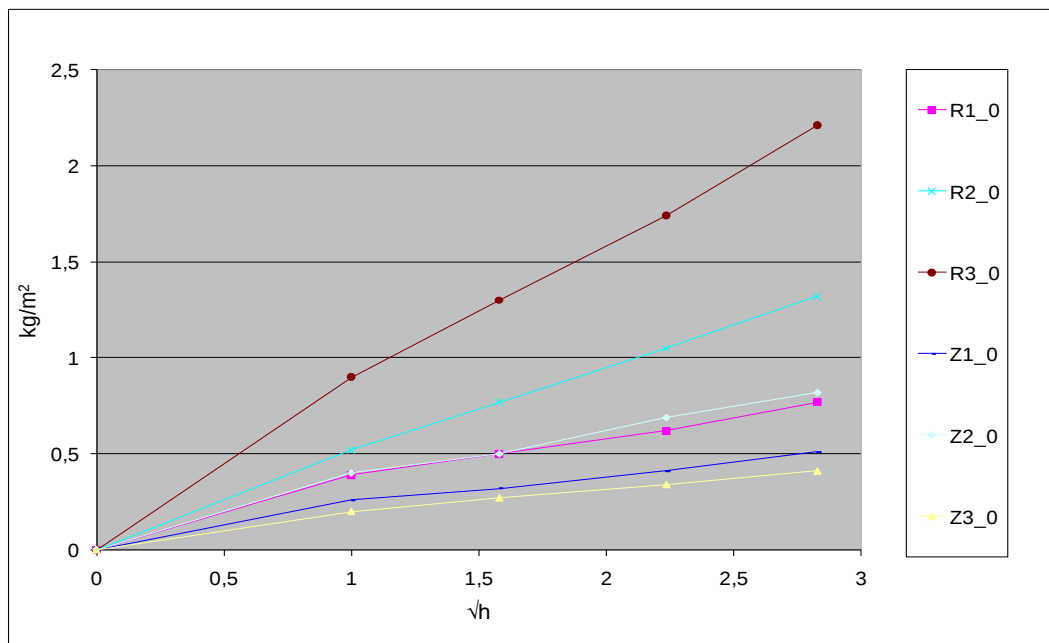
Figur 22: Brottyta, vidhäftningsprov Z3

Tabell 13: Vidhäftning i MPa från de tre proverna Z1-3

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

5.1.7 Bestämning av vattenabsorption

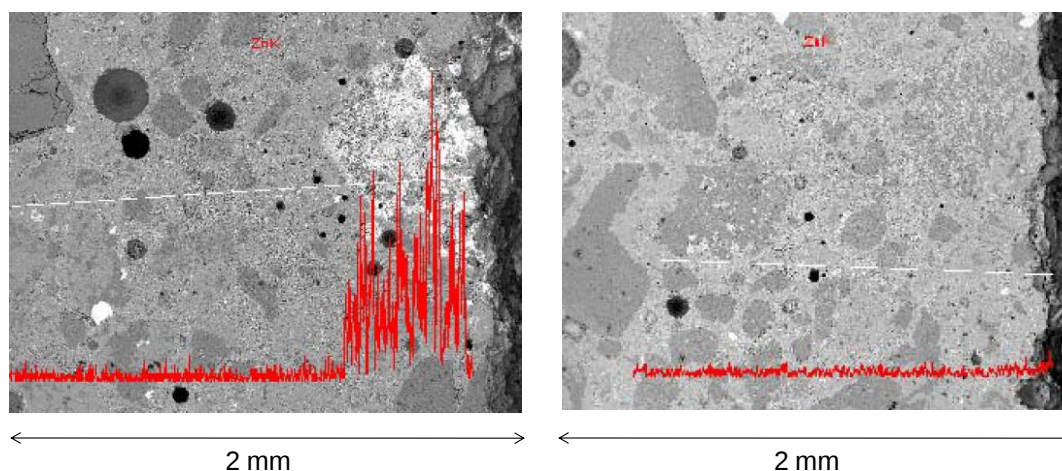
Figur 23 visar vattenabsorption som funktion av tid nedsänkt i vatten för de Zn-sprutade provkropparna och referenserna. Räknas medelvärdena ut för de tre Zn-sprutade och jämförs med medelvärdet för referenserna fås en minskning av vattenabsorptionen på ca 60 procent. Det innebär att Zn-skiktet är poröst och relativt öppet även om det ger en minskad fukttransport. Minskning är så pass liten att skiktet får anses som diffusionsöppet. Risker för instängning av fukt är således liten och bör inte heller påverka betongens frostbeständighet.



Figur 23: Vattenabsorptionsförsök för 6 st provkroppar, referenserna R1-3 respektive de Zn-sprutade Z1-3. På X-axeln presenteras roten ur tiden i timmar och på Y-axeln viktökningen i kg/m².

5.1.8 Undersökning av betongyta med SEM

SEM analysen genomfördes främst för att avgöra om Zn-joner 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 24 visar två exempel på hur det kan se ut. Bilden till vänster visar en por som fyllts med sprutad Zn som korroderat och bildat vitrost, medan bilden till höger visar ett icke korroderat zinkskikt. De röda kurvorna visar Zn-koncentrationen och den streckade vita linjen var linjesvepet gjordes.



Figur 24: SEM-bild som visar en fyllad por respektive ett Zn-skikt.

Tabell 14 och Tabell 15 visar punktanalyser från två olika prover på olika djup från ytan där koncentrationen av zink har undersökts. Det framgår tydligt av tabellerna att höga koncentrationer av zink fås nära ytan men att ingen eller mycket lite zink transporterats in i betongen.

Tabell 14: Kvantitativ analys utan syre (normerat)

w %	Avstånd från ytan				At %	Avstånd från ytan				Mitt i provet	
	0,1	0,2	0,75	1		0,1	0,2	0,75	1	w %	At %
Na K	5,6	7,7	1,8	7,1	Na K	8,4	11,7	2,8	10,6	8,52	12,7
Mg K	3,6	1,6	3,4	2,5	Mg K	5,1	2,4	4,9	3,5	1,7	2,4
Al K	5,3	4,4	13,7	6,1	Al K	6,8	5,7	17,8	7,8	6,6	8,3
Si K	18,2	14,5	17,8	18,7	Si K	22,4	18,0	22,1	22,8	18,9	23,0
K K	2,3	2,1	2,1	2,4	K K	2,1	1,8	1,9	2,1	1,0	0,9
Ca K	61,2	67,0	50,3	58,8	Ca K	53,1	58,5	43,8	50,5	58,1	49,5
Fe K	2,5	1,4	10,3	4,0	Fe K	1,5	0,9	6,5	2,5	5,0	3,1
Ce K	0,1	0,2	0,1	0,1	Ce K	0,1	0,1	0,1	0,1		
Zn K	1,26	1,05	0,44	0,42	Zn K	0,7	0,6	0,2	0,2	0,27	0,14
Kntrl	100,0	99,9	99,9	100,0		100,2	99,7	100,0	100,0		

Tabell 15: Kvantitativ analys utan syre (normerat)

w %	Avstånd från ytan (mm)					At %	Avstånd från ytan (mm)					Mitt i provet	
	0	0,1	0,3	0,5	1		0	0,1	0,3	0,5	1	w %	At %
Na K	33,8	4,8	5,5	5,9	6,0	Na K	49,0	7,7	8,4	9,1	9,0	8,52	12,7
Mg K	0,4	1,7	2,0	2,0	2,2	Mg K	0,6	2,5	2,9	2,8	3,2	1,7	2,4
Al K	1,2	4,0	7,3	5,8	8,1	Al K	1,4	5,4	9,6	7,5	10,4	6,6	8,3
Si K	20,9	10,7	15,2	14,9	15,5	Si K	24,8	13,8	19,1	18,7	19,2	18,9	23,0
K K	0,4	1,4	1,8	1,6	2,7	K K	0,3	1,3	1,6	1,5	2,4	1,0	0,9
Ca K	5,3	74,4	62,4	65,7	60,6	Ca K	4,4	67,5	54,8	57,8	52,7	58,1	49,5
Fe K	0,5	1,9	5,0	3,5	4,8	Fe K	0,3	1,2	3,2	2,2	3,0	5,0	3,1
Zn K	37,6	1,1	0,8	0,5	0,2	Zn K	19,2	0,6	0,4	0,3	0,1	0,27	0,14

5.2 Forsmark III

5.2.1 Okulär inspektion av uttagna betongkärnor

I Figur 25 visas uttagna betongkärnor från intagsbyggnaden vid Forsmark III med termiskt sprutad zink. Betongkärnorna är uttagna 2 meter ovanför normalvattenytan, vid normalvattenytan och 0,5 meter under normalvattenytan. Som framgår av Figur 25 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 25: Utseendet hos uttagna betongkärnor med sprutat zinksikt

I varje betongkärna finns en bit av armeringen, se Figur 26. 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 26: Utseendet hos armeringen i uttagna betongkärnor

5.2.3 Mätning av elektrokemisk potential

I Tabell 16 visas resultat från potentialmätningar på uttagna betongkärnor från väggen till intagsbyggnaden vid silgata 4, Forsmark III. De uttagna betongkärnorna med zinkskikt kopplades ihop elektriskt med armeringen genom att montera en mätsladd mellan armering och zinkskikt.

Tabell 16: Resultat från mätningar av elektrokemisk potential hos armeringen i uttagna betongkärnor från intagsbyggnaden från Forsmark III.

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

Det framgår av mätresultaten i Tabell 16 att potentialen för armeringen efter 30 minuters isärkoppling 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.

5.2.4 Mätning av resistivitet

I Tabell 17 visas resultat från mätningar med Wenners-4-elektrodmätmetod 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 17: 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 17 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.

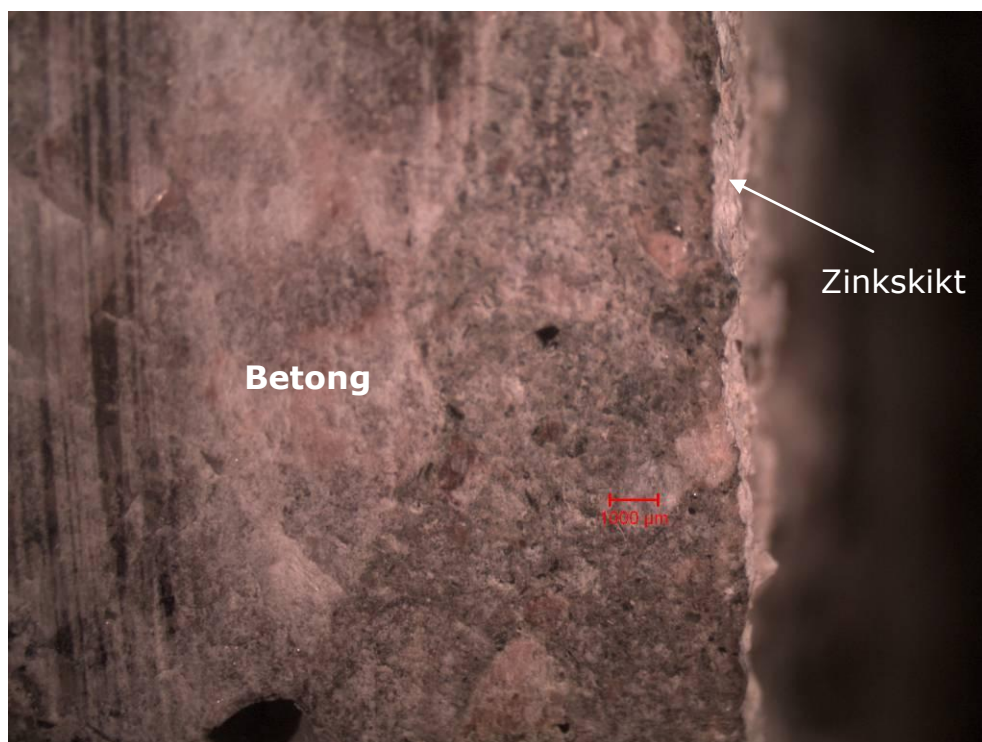
5.2.5 Undersökning av zinkskikt med makromikroskop och FEG-SEM

I Figur 27-29 visas tvärsnitt av tre representativa betongkärnor med zinkskikt från väggen i intagsbyggnaden från silgata 4 Forsmark III.

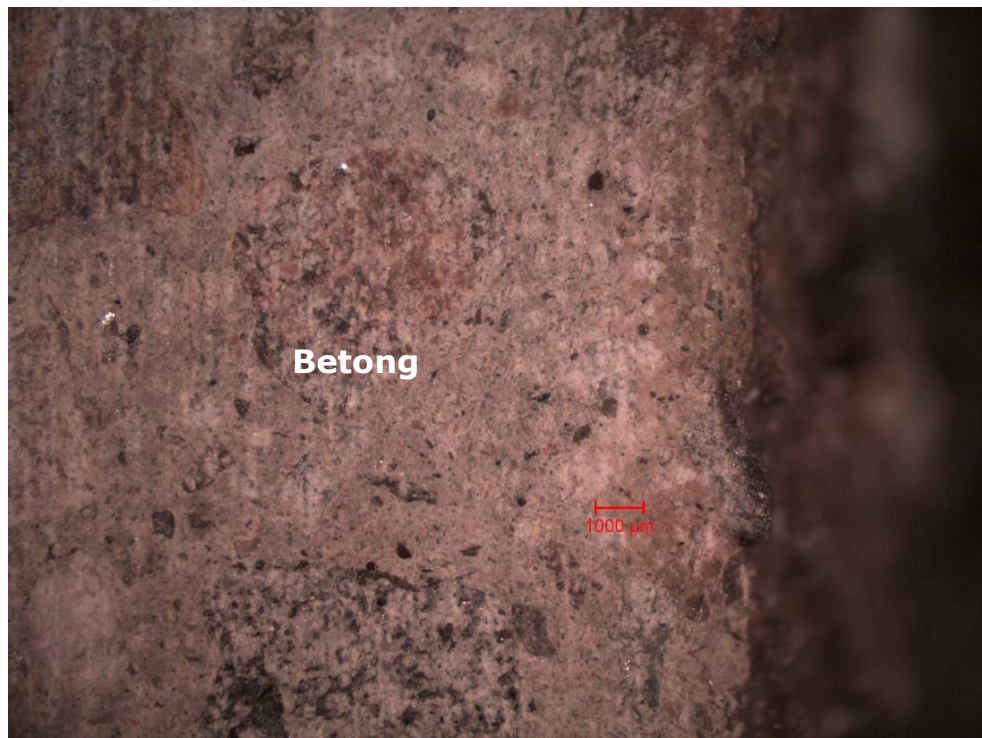
Som framgår av Figur 27 så är zinkskiktets tjocklek 300-500 μm hos betongkärna 1A uttagen ovanför vattenyta. Av Figur 28 framgår det att zinkskiktet i betongkärna 2A som exponerats i vattenytan har omvandlats till vitrost. För betongkärna 3A som exponerats under vattenytan så har zinkskiktet helt korroderat bort, Figur 29.



Figur 27: Tvärsnitt av betongkärna 1A (ovanför vattenyta) med zinkskikt.

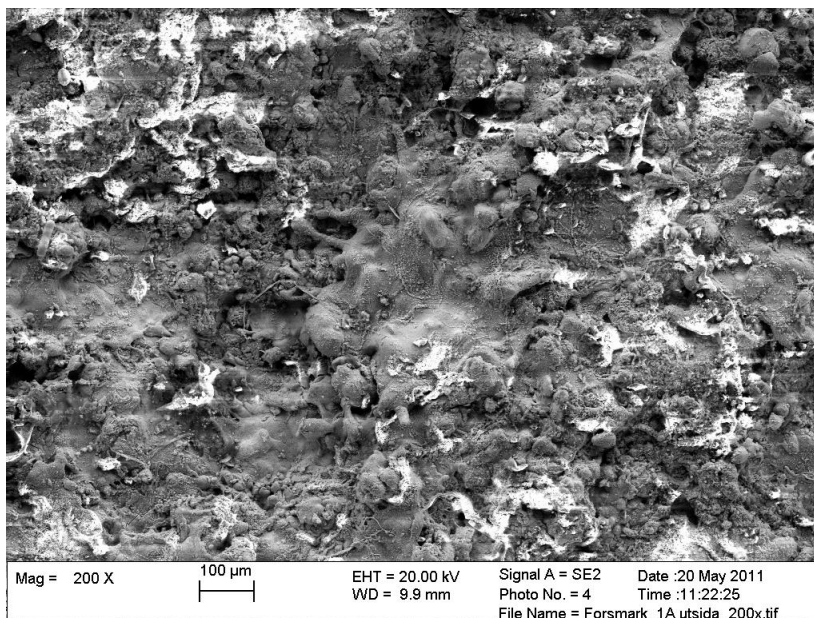


Figur 28: Tvärsnitt av betongkärna 2A (vid vattenyta) med zinkskikt. Zinkskiktet har omvandlats till vitrost.

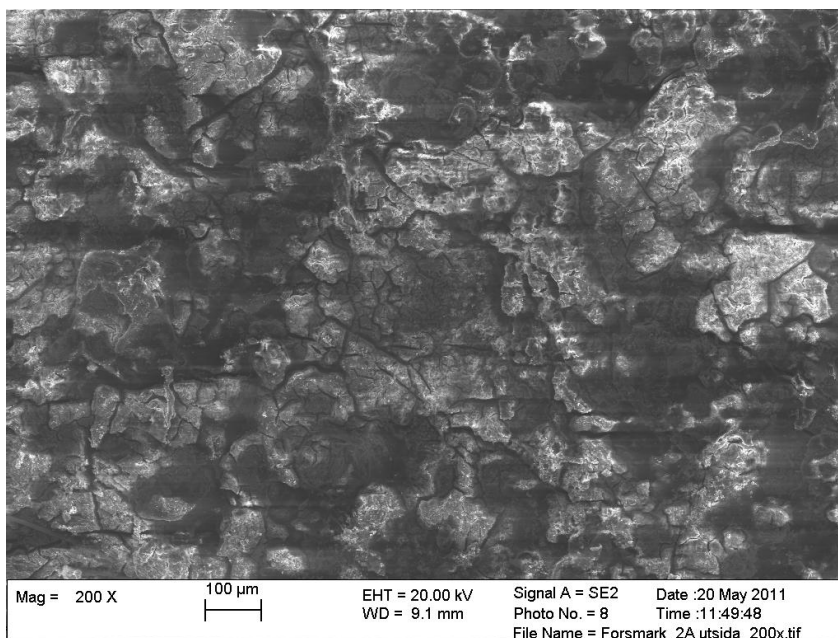


Figur 29: Tvärsnitt av betongkärna 3A (under vattenyta). All zink är bortkorroderad.

I Figur 30 och Figur 31 visas utseendet hos zinkytans utsida i 200 ggr förstoring i FEG-SEM. Det framgår av Figur 30 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.



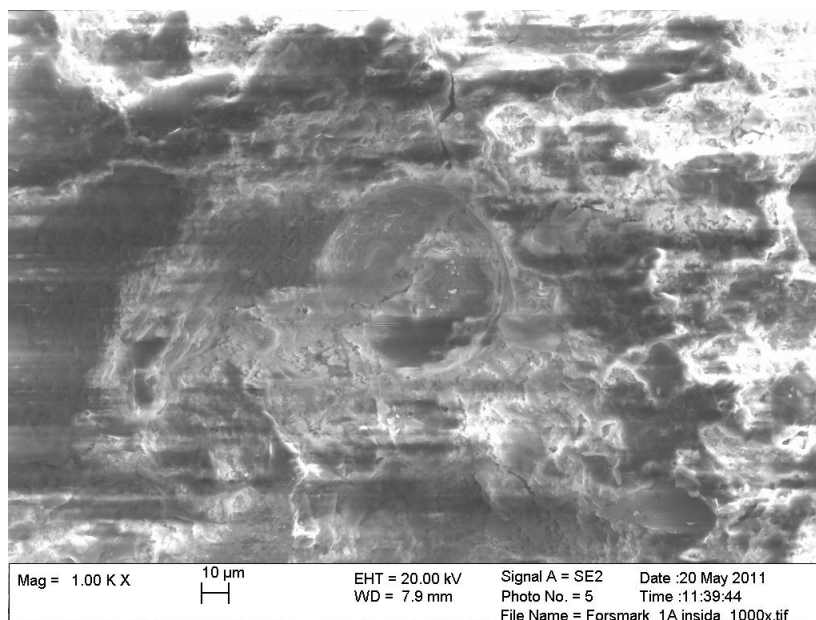
Figur 30: Utseendet hos zinkytans utsida (1A, ovanför vattenyta). Figuren visar zinkytans utsida i 200 ggr förstoring (FEG-SEM).



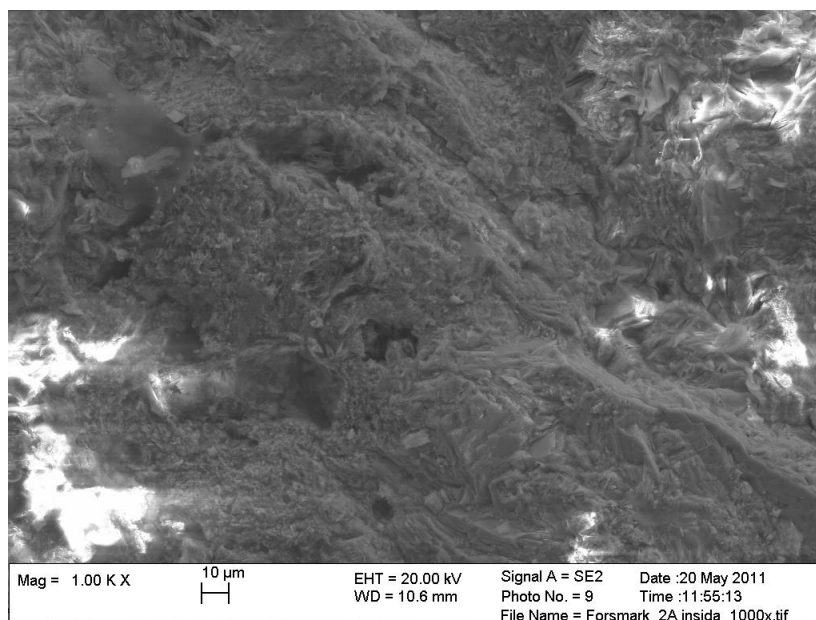
Figur 31: Utseendet hos zinkytans utsida (2A, vid vattenyta). Figuren visar zinkytans utsida i 1000 ggr förstoring (FEG-SEM).

I Figur 32 och Figur 33 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). I Tabell 18 redovisas kvantitativa analyser av zinkskiktets sammansättning.



Figur 32: Utseendet hos zinkytans insida (1A, ovanför vattenyta). Figuren visar zinkytans insida i 1000 ggr förstoring (FEG-SEM).



Figur 33: Utseendet hos zinkskiktets insida (2A, vid vattenyta). Figuren visar zinkytans insida i 1000 ggr förstoring (FEG-SEM).

Tabell 18: Resultat av kvantitativ analys av zinksikt hos olika betongkärnor i mass-%.

Betong-kärna	C	O	Al	Si	Cl	Ca	Fe	Zn	K	Mg	Totalt
1A utsida	15,93	34,62	0,40	2,03	0,25	0,52	0,50	45,00	0,32	0,30	100
1A insida	12,02	30,1	0,42	2,57	0,20	12,06	2,31	39,22	0,52	0,52	100
2A utsida	31,09	36,60	0,54	0,25	2,15	0,82	0,59	21,63	0,21	4,10	100
2a insida	6,02	36,59	0,40	0,60	1,1	0,71	0,55	50,2	0,22	3,41	100

5.2.6 Vidhäftning

I väggen från intagsbyggnaden i silgata 4 i Forsmarks III borrades sex prover ut varav tre användes för vidhäftningsprovning. Figur 34-36 visar brottytorna från de tre provningarna och Tabell 19 ger vidhäftningsvärdena samt en beskrivning av var provet är utborrat. Samtliga värden indikerar en god vidhäftning mellan betong och Zn-skikt även om värdet för 3B bör beaktas med kännedomen att Zn-skiktet nästan är förbrukat genom egenkorrosion.

Tabell 19: 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



Figur 34: Brottyta, vidhäftningsprov 1B



Figur 35: Brottyta, vidhäftningsprov 2B



Figur 36: Brottyta, vidhäftningsprov 3B

6 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.
- Från litteraturgenomgången framgår att betongens resistivitet har en stor betydelse för det galvaniska skyddets funktion. Resistiviteten är i sin tur direkt kopplad till fuktnivån i betongen (28). Hög fuktnivå ger god ledningsförmåga (=låg resistivitet).
- Sammanfattningsvis kan sägas att det finns goda möjligheter att använda katodiskt skydd med termiskt sprutade offeranoder av zink.

Här utförda undersökningar visar att betongens resistivitet har en stor betydelse för den sprutade zinkanodens skyddsförmåga. Det framgår vidare att zinkanodens livslängd är beroende av de yttre miljöförhållanden som råder intill anoden. Termiskt sprutade offeranoder av zink som exponeras nedsänkt i bräckt vatten har en relativ kort livslängd (< 8 år) pga. den höga egenkorrosionen och den höga skyddsströmmen som avges från anoden i det bräckta vattnet (31). 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).

7 Fortsatt arbete

Antalet här undersökta konstruktioner har varit få, men resultaten från undersökningarna visar att det finns goda möjligheter att använda katodiskt skydd med termiskt sprutade offeranoder av zink. Den höga zinkförbrukningen under vattenytan bör i det fortsatta arbetet undersökas mer noggrant.

För att fastställa under vilka miljöförhållanden skyddsmetoden är lämplig krävs ytterligare undersökningar av inverkan av betongens resistivitet (fuktförhållanden), kloridhalt, temperatur ytegenskaper, mm. Detta genomförs lämpligen på befintliga skyddade konstruktioner utsatta för olika miljöpåverkan och genom systematiska och kontrollerade undersökningar på laboratorium. Baserad på en sådan undersökning kan riktlinjer tas fram för under vilka förhållanden termiskt sprutade offeranoder av zink är effektiva.

8 Referenser

1. Tuutti, K: Corrosion of steel in concrete. Thesis Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm (1982).
2. Apostolos, J A: Cathodic protection of reinforced concrete using metalized coatings and conductive paints. Transport research Board, 1984.
3. Apostolos, J A: Cathodic protection using metallized zin 3,5 year. Progress report. Corrosion 97, paper No 137, March 9-13, 1987 San Francisco californien.
4. Sederholm, B: Galvaniskt katodiskt skydd – grundläggande teori samt katodiskt skydd av armerade betongkonstruktioner med nya, enkla och billiga anodsystem. KI Rapport 1998:1. Korrosionsinstitutet, 1998.
5. Kessler, R J: Zinc metalizing for galvanic protection of steel reinforced concrete in a marine environment. Corrosion90, paper No 90, April 23-27, 1990, Las Vegas, Nevada.
6. Sagues, A A: & Powers, R G: Sprayed-zinc sacrificial anodes for reinforced concrete in marine service. Corrosion95, paper No 515, 1995.
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 noodys inlet bridge,. South gippland Highway, Victoria.
9. Bullard, S J 6 & et al : Bond Strenght 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 Coatongs & linings. Vol 13, 1996 No 8, p 23-37.
11. Brousseau, R & et al: Sacrificial catodic 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. Corrosion97, 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. Sederholm, B: Utomhusprovning av galvaniska anodsystem för katodiskt skydd av armerade betongkonstruktioner. KI Rapport 1999:6. Korrosionsinstitutet, 1996.

15. Sederholm, B: Utomhusprovning av enkelt installerade anodsystem för katodiskt skydd av räckesständer och kantbalksarmering på Ölansbron. KI Rapport 2002:3. Korrosionsinstitutet, 2002.
16. Lasa, R & Powers, R G: 2003, "Florida's Approach to Bridge Preservation", Technical Memorandum of Public Works Research Institute, pp 175-188.
17. Daily, S F: Using Cathodic Protection to Control Corrosion of Reinforced Concrete Structures in Marine Environments" Corrpro Companies Inc., Technical Paper 49.
18. 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.
19. 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.
20. Collon, R & Daily S F & Funahashi M: Selection Guidelines for Using Cathodic Protection Systems on Reinforced and Prestressed Concrete Structures" Corrpro Companies Inc., Technical Paper 118.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. Bullard, S J & Cramer, S & Covino, B: 2009, "Final Report-Effectiveness of Cathodic Protection" SPR 345, Oregon Department of Transportation.
25. 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.
26. 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.
27. 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.

28. Betonghandboken material, Svensk Byggtjänst, 1997, ISBN: 9789173327992
29. Europeisk standard SS-EN 12696. Katodiskt skydd av stål – Konstruktioner I atmosfär. SIS, Stockholm 2000.
30. Bernad, S & et al: Interfacial chemistry of zinc anodes for reinforced concrete structures. Corrosion97, paper No 233.1977.
31. Slunder, C.j & Boyd W.K: Zinc: Its Corrosion resistance. International lead Zinc research Organization. New York., 1983

ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS - ELFORSK - AB

Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31
Telefon: 08-677 25 30, Telefax: 08-677 25 35
www.elforsk.se