

Forskningsrapport  
[Öppen]

## Ny provningsmetodik för bestämning av bindemedlets korrosionsskyddande förmåga i betong.

Bror Sederholm, Swerea KIMAB, Jan Trägårdh, RISE CBI, Johan Ahlström,  
Swerea KIMAB, Dimitrios Boubitas, RISE CBI, Tang Luping, Chalmers

Rapportnummer: KIMAB 2018-162

Titel Ny provningsmetodik för bestämning av bindemedlets korrosionsskyddande förmåga i betong.

Författare Bror Sederholm, Swerea KIMAB, Jan Trägårdh, RISE CBI, Johan Ahlström, Swerea KIMAB, Dimitrios Boubitas, RISE CBI, Tang Luping, Chalmers

Publiceringsdatum September 2018

Rapportnummer KIMAB 2018-162

Status Öppen

Projektnummer 12401

Avdelning Korrosion

Forskningsområde Korrosionsskydd av byggnadskonstruktioner

2018-09-18

X 

---

Signerat av: Andrew Gordon

Godkänd av Andrew Gordon, Gruppchef

[Klicka här för att ange text.](#)

# Sammanfattning

Denna rapport omfattar slutrapporteringen av forskningsprojektet - *Ny provningsmetodik för bedömning av bindemedlets korrosionsskyddande förmåga i betong – Underlag till LCA och livslängdsbedömning*. I rapporten redovisas resultat från elektrokemiska undersökningar utförda på laboratorium och korrosionsprovningar i fält. Undersökningarna har genomförts av Swerea KIMAB, RISE CBI Betonginstitutet (väst och öst) samt Chalmers. Projektets mål har varit att genom en nationell samling av expertis ta fram en ny provningsmetodik som på ett enkelt och tillämpbart sätt ska utvärdera olika bindemedels korrosionsskyddande förmåga i betong. I denna undersökning har framför allt tiden till initiering av korrosion (gropfrätning) från det att kloriderna har nått stålytan och tills gropfrätning har initieras på stålytan undersökts. Tre olika accelererade elektrokemiska mätmetoder har använts och jämförts:

- Potentiostatisk mätmetod
- Potentiodynamisk mätmetod
- Galvanostatisk mätmetod

Den framtagna provningsmetodiken med framställning av provkroppar har visat sig fungera väl. För att minska spridningen är det emellertid viktigt att använda en homogen och rengjord stålyta utan glödskalet. Glödskalet avlägsnas lämpligast genom slipning eftersom betning kan bygga upp ett passivskikt på stålytan. För att undvika att betongrester fastnar på stålytan ska släta provstänger användas.

Sammanfattningsvis kan sägas att resultaten från laboratorie- och fältmätningarna samt analyser av bindemedlets korrosionskänslighet genom TG- och XRD-analyser visade att denna kombination av mätningar ger ett bra verktyg att bedöma den korrosionsskyddande förmågan hos olika bindemedel. En sammanställning av rangordningen för bindemedlets korrosionsskyddande förmåga redovisas i tabellen nedan.

Den korrosionsskyddande förmågan hos de undersökta bindemedlen rangordnas från en sammanvägning av de olika provningsmetoderna:

- bra  $< 1,5$  och
- $1,5 \geq$  mindre bra  $\leq 2,5$  och
- dåligt  $> 2,5$ .

Bindemedel	Potentio- statisk metod	Potentio- dynamisk metod	Galvano- statisk metod	Fält- provning	Korrosions- känslighets- faktor	Rangordning av korrosions- skyddande förmåga (medelvärde)
CEM II A-V, LA	3	3	3	3	3	<b>3,0</b>
CEM II A-V, LA+5 % silika	3	3	3	3	Ingår ej	<b>3,0</b>
CEM II A-V 52,5 N+18 % FA	2	stor spridning	2	3	Ingår ej	<b>2,3</b>
CEM I 42,5 N - SR 3 MH/LA	2	stor spridning	2	2	3	<b>2,3</b>
CEM I 52,5 R	1	saknas	saknas	1	2	<b>1,3</b>
CEM II/B-S 52,5 N	1	1	1	1	2	<b>1,2</b>
CEM III/B 42,5 N- LH/SR	1	1	1	1	1	<b>1,0</b>

Som rangordningen visar i tabellen så har bindemedel med slagg och portlandcement med hög  $C_3A$  en bra korrosionsskyddande förmåga. Detta beror till största delen på kapaciteten att bilda Friedels salt från monosulfat under härdningsprocessen. Bindemedel som har en låg korrosionsskyddande förmåga har ett lågt  $C_3A$ -innehåll och en inblandning av flygaska och/eller silika. Det medför dessutom en utspädningseffekt på förmågan att bilda Friedels salt.

# Innehållsförteckning

1.	Inledning .....	1
2.	Syfte och mål .....	2
3.	Bakgrund.....	2
4.	Genomförande .....	4
4.1	Elektrokemisk potentiostatiskt mätmetod .....	5
4.1.1	Provmaterial för stål- och betongprover .....	5
4.1.2	Framtagning av betongprover med ingjutna provstänger .....	5
4.1.3	Experimentell uppställning för potentiostatisk mätmetod .....	7
4.1.4	Resultat från mätningar med potentiostatiskt mätmetod .....	8
4.2	Elektrokemisk potentiodynamisk mätmetod (RISE CBI Betonginstitutet väst) .....	13
4.2.1	Provmaterial för stål- och betongprover .....	13
4.2.2	Framtagning av betongprover med ingjutna provstänger för potentiodynamisk mätmetod .....	13
4.2.3	Experimentell uppställning för potentiodynamisk mätmetod	15
4.2.4	Resultat från mätningar med potentiodynamisk mätmetod ..	16
4.3	Elektrokemisk galvanostatisk mätmetod .....	20
4.3.1	Betongprover med ingjutna provstänger .....	20
4.3.2	Experimentell uppställning för galvanostatisk mätmetod ...	20
4.3.3	Resultat från mätningar med galvanostatisk mätmetod.....	21
4.4	Fältexponering .....	24
4.4.1	Framtagning av betongprover för korrosionsprovning i fält	24
4.4.2	Fältexponering av provstänger ingjutna i betongblock med olika bindemedel .....	25
4.4.3	Resultat från ett års fältexponering av ingjutna provstänger i betongblock med olika bindemedel.....	25
5.	Bedömning av bindemedlens relativa korrosionskänslighet - TG och XRD analyser .....	27
5.1	Bakgrund .....	27
5.2	Genomförande .....	28
5.3	Resultat .....	31
5.4	Rangordning av korrosionskänsligheten .....	34
5.4.1	Uppskattning av den relativa fria kloridjonskoncentrationen i bindemedlens porlösningar .....	34
5.4.2	Korrosionskänslighetsfaktor .....	34
6.	Diskussion.....	36
7.	Slutsatser.....	38
8.	Fortsatta undersökningar.....	39

9. Referenser och bibliografi .....	41
-------------------------------------	----

# 1. Inledning

Denna rapport omfattar slutrapporteringen av forskningsprojektet - *Ny provningsmetodik för bedömning av bindemedlets korrosionsskyddande förmåga i betong – Underlag till LCA och livslängdsbedömning*. Projektet har till största del finansierats av Trafikverkets branschprogram för forskning och innovation avseende byggnadsverk för transportsektorn (BBT) och Svenska Byggbranschens utvecklingsfond (SBUF). Övriga finansiärer har varit Stiftelsen för Cement och Betonginstitutets A-forskning och Swerea KIMAB. Projektet påbörjades i juni 2014 och avslutas i september 2018.

I rapporten redovisas resultat från elektrokemiska undersökningar utförda på laboratorium och korrosionsprovningar i fält. Undersökningarna har genomförts av Swerea KIMAB, RISE CBI Betonginstitutet (väst och öst) samt Chalmers.

Projektets mål har varit att genom en nationell samling av expertis ta fram en ny provningsmetodik som på ett enkelt och tillämpligt sätt ska utvärdera olika bindemedels korrosionsskyddande förmåga i betong. De framtagna provningsmetodikerna är inte baserade på att utvärdera kloridtröskelvärden för olika bindemedel utan istället rangordna den korrosionsskyddande förmågan hos olika bindemedel med olika elektrokemiska mätmetoder på laboratorium och genom korrosionsprovningar i fält. Korrosionsskyddsegenskaperna för nya alternativa bindemedel jämförs med Std Portlandcement av anläggningstyp (CEM –I 42,5 N BV/SR/LA).

I projektets referensgrupp har följande medlemmar medverkat:

Hans Hedlund	SBUF (Skanska Sverige AB)
Arvid Hejll	Trafikverket
Joakim Jeppsson	Skanska Sverige AB
Ingemar Löfgren	Thomas Concrete Group AB
Nilla Olsson	NCC Construction Sverige AB
Mikael Westerholm	Cementa AB

För att kunna nå det övergripande målet med en utvärdering av hela den korrosionsskyddande förmågan hos ett bindemedel har ett samarbete med Trafikverkets BBT-projekt *Betongs motstånd mot kloridinträngning och frostangrepp som kalibreras med verkligheten vid Riksväg 40 (Rv40)* genomförts under projektets gång.

## 2. Syfte och mål

Syfte med projektet är att genom en nationell samling av expertis skapa en ny innovativ provningsmetod som på ett enkelt och tillämpbart sätt kan utvärdera olika bindemedels korrosionsskyddande förmåga i betong.

Ett delmål har varit att metodiken resulterar i beräkningsvärden för framtida LCA-analyser och livslängdsberäkningar.

De här undersökta olika provningsmetoderna kommer till skillnad från tidigare undersökningar och angreppsätt inte fokusera på att utvärdera kloridtröskelvärden för olika bindemedel utan istället rangordna bindemedlens korrosionsskyddande egenskaper. Behov av en enkel och tillförlitlig metod har aktualiserats i takt med att nya alternativa bindemedel introduceras på marknaden.

För att kunna nå målet med en utvärdering av hela den korrosionsskyddande förmågan hos ett bindemedel var tanken att resultat hämtas från två olika projekt rörande livslängden:

1. Föreliggande BBT-projekt: ”Ny provningsmetodik för bedömning av bindemedlets korrosionsskyddande förmåga hos betonger”.
2. BBT-projektet: ”Betongs motstånd mot kloridinträngning och frostangrepp som kalibreras med verkligheten”.

Tanken var att resultaten från de båda projekten skulle komplettera varandra och ge ett underlag till livslängdsberäkningar och LCA-analyser för att uppnå hållbart byggande i framtiden. Projekt 1 undersöker initierings- och propageringsskedet medan projekt 2 undersöker transportskedet, *figur 1*. Eftersom användningen av alternativa bindemedelstyper har ökat under de senaste åren på grund av krav på minskat koldioxidutsläpp, ökar också behovet av att utvärdera den korrosionsskyddande förmågan hos dessa alternativa bindemedelstyper.

Angreppssättet har inte helt kunna fullföljas av olika anledningar. En anledning är att inte alla bindemedelstyper överensstämmer mellan de båda projekten. Detta gäller bindemedelstyper som innehöll slagg och flygaska i proportioner i projekt 1 som inte fanns representerade i projekt 2.

## 3. Bakgrund

För att kunna underlätta användningen av alternativa bindemedel i anläggningskonstruktioner och därmed minska koldioxidbelastningen, måste osäkerheten utredas angående kloridinitierad korrosion hos betong med material som ersätter det rena portlandcementet. Exempel på alternativa bindemedel som kan vara aktuella i en nära framtid är flygaska och slagg samt för vissa applikationer även silika. I framtiden kan man tänka sig att även nya bindemedel är aktuella, t ex kalcinerade leror.

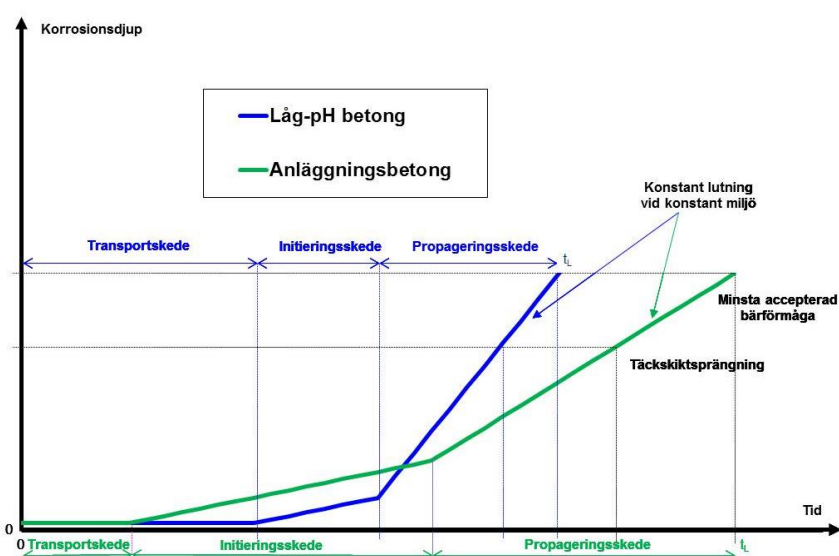
Sedan decennier har forskningen inom området till stor del fokuserats på bestämning av kloridtröskelvärden, dock med stora variationer i framtagna tröskelvärden (Angst et al., 2009) vilket medför stora svårigheter att förutsäga livslängden för en armerad betongkonstruktion. Vid bedömning av en konstruktions livslängd hänvisas oftast till Tuutti's livslängdsdiagram



(Tuutti, 1982), där korrosionen presenteras som en funktion av en initiering- och propageringsperioden, och där initieringsperioden omfattar kloridernas transporttid i betongen fram till armeringen och den tid det tar för kloriderna att initiera lokala angrepp. Här föreslås en modifiering av Tuutti's livslängdsmodell vilket innebär en mer detaljerad utvärdering av olika perioders inverkan vid kloridinitierad korrosion, *figur 1*. Detta synsätt medför att man lättare kan särskilja och mäta olika skeden i livslängdsförloppet. I figuren visas en schematisk beskrivning av livslängden hos armering i två olika skilda betongkvaliteter med anläggningsbetong och låg-pH betong som exempel.

Konstruktionens livslängd kan indelas i tre olika skeden:

1. Transportskedet (tiden för kloridjoner att nå armeringsstålet).
2. Initieringsskedet (tiden för nedbrytning av passivskiktet hos armeringsstålet).
3. Propageringsskedet (tiden då korrosion sker på armeringsstålet).



Figur 1. Schematisk beskrivning av korrosionsförloppet hos armering i två olika betongkvaliteter (anläggningsbetong och låg-pH betong).

**Transportskedet**, dvs kloridinträngningsperioden, varierar kraftigt beroende på betongens täthet, (vct, vbt, täckskikt, typ av bindemedel, etc.). Kloridtransport i betong beror till största delen av kapillärugning och diffusionsstyrda mekanismer, där de senare dominerar. Forskning om kloridtransport i betong utgår därför ofta från diffusionsstyrda modeller (Tang et al., 2012). En sådan modell som visats sig stämma ganska väl med verkligheten är ClinConc (Boubitsas et al., 2014).

**Initieringsskedet**, början och fortsatta förlopp kan mätas genom att använda olika elektrokemiska mätmetoder (Boubitsas et al, 2014). Initieringsskedets längd varierar kraftigt beroende på egenskaperna hos stålets passivskikt (tjocklek, porositet, hydroxidjonskoncentrationen i porlösningarna, glödskalets struktur hos armeringen, etc.). Stålets och glödskalets mikrostruktur och dess inverkan på korrosionsförloppet undersöks för närvarande i ett av Formas beviljat doktorandprojekt 2013-1080 (samarbetsprojekt mellan Swerea KIMAB, Chalmers och RISE CBI Betonginstitutet). ”Hållbarare och grönare betongkonstruktioner genom förbättring av egenskaper i gränsytan mellan stål och betong”. I detta projekt utförs grundläggande studier av korrosionsmekanismer på modellprover från armeringsstål från olika leverantörer.

Inledande undersökningar har visat att glödskalets mikrostruktur och hos armeringen varierar kraftigt mellan olika leverantörer (Ahlström, 2013). Även armeringens ytegenskaper såsom defekter i glödskalet varierar kraftigt mellan olika leverantörer. Det innebär att armeringens korrosionsskyddande egenskaperna också varierar kraftigt. Initieringsskedet startar när en tillräcklig hög halt av klorider fås vid armeringsytan så att passivskiktet och glödskalet börjar brytas ned. Hur snabbt detta sker är beroende av bindemedlets kemiska sammansättning vilket påverkar hydroxidkoncentrationen omkring armeringsstålet. Detta medför att den kritiska kloridjonskoncentrationen för korrosion och därmed initieringsskedets början varierar kraftigt för olika bindemedel. Det innebär svårigheter att använda kloridtröskelvärden som en utvärderingsparameter i olika provningsmetoder.

**Propageringsskedet** definieras som perioden när en kraftig korrosionsström har startat som inte avtar på grund av återpassivering av stålytan. Korrosionshastigheten (korrosionsströmmens styrka) varierar med yttre miljöfaktorer såsom relativ fuktighet (RF), temperatur, kloridkoncentrationen, ytförhållandet mellan anod- och katodytor (oädlade och ädlade stålytor), etc.

## 4. Genomförande

Tidigare använda metoder för att bestämma kloridtröskelvärden har haft en dålig reproducerbarhet bland annat beroende på att stålytans egenskaper varierar (Hansson & Sörensen, 1988; Treadaway et al., 1989; Mohammed & Hamada, 2006). Stålytans egenskaper beror till stor del på förekomsten av defekter i glödskalet. För att nå framgång med en ny provningsmetodik är det viktigt att stålytans egenskaper inte varierar från fall till fall. För att nå god reproducerbarhet i metodiken får heller inte provkroppens egenskaper variera, t.ex. kapade provstänger som i snittytan saknar glödskalet, skadade ytor på stålets mantelyta och variationer i fukthalt och defekter i form av hålrum i betongen mot stålytan. Det är också viktigt att nå en konstant miljö i mätområdet, dvs. att temperatur och relativ fuktighet inte varierar i mätområdet.

För att bestämma olika bindemedels förmåga att hindra kloridinitierad korrosion har bindemedlets förmåga att passivera stålytan och därmed hindra initiering av lokala korrosionsangrepp undersökts med tre olika accelererade elektrokemiska mätmetoder:

- Potentiostatisk metod (utförs av Swerea KIMAB)
- Potentiodynamisk metod (utförs av RISE CBI Betonginstitutet väst)
- Galvanostatisk metod (utförs av Chalmers)

För att få med både initierings- och propageringsskedet (*figur 1*) exponerades i fält ingjutna provstänger av kolstål i betongblock. Betongblocken innehöll upp till sju olika bindemedel innehållande 2 % klorider per bindemedelsvikt. Korrosionshastigheten hos de ingjutna provstängerna utvärderas efter ett års fältexponering med en gravimetrisk metodik (massförlustbestämning). Denna undersökning utfördes av Swerea KIMAB.

Laboratoriemiljön där de elektrokemiska mätmetoderna används är en kontrollerad och konstant miljö som går att reproducera. Fältexponeringen representerar verkliga förhållanden. De två miljöerna bör visa samma rangordning av provade material för att laboratoriemetodiken skall vara relevant.

För att förklara resultaten från de olika accelererade elektrokemiska mätmetoderna genomfördes också en bedömning av de olika bindemedlens korrosionskänslighet. I denna delundersökning användes termogravimetrisk analys (TGA) och röntgendiffraktion (XRD). Dessa undersökningar kompletterades med en litteraturstudie där analysdata från porlösningsskemi hämtades. Denna undersökning genomfördes av RISE CBI Betonginstitutet öst.

## 4.1 Elektrokemisk potentiostatiskt mätmetod

### 4.1.1 Provmaterial för stål- och betongprover

Som provmaterial för den potentiostatiska mätmetoden användes släta provstänger av varmvalsat kolstål med beteckningen S235JR. Provstängernas längd var 100 mm med en diameter av 12 mm. Provstängernas glödskal avlägsnades före provning genom att slipa proverna med ett slippapper av kornstorleken 180 grit. På ena kortsidan hos varje provstång borrades ett hål med diametern 4,5 mm för anslutning av en mätsladd.

I den accelererade mätmetoden ingick betongprover med sju olika typer av bindemedel, *tabell 1*.

*Tabell 1. Bindemedelstyper som utvärderades i den elektrokemiska mätmetoden och i fältförsöket.*

<b>ID nr</b>	<b>Bindemedelstyp</b>
1:	CEM I 42,5 N - SR 3 MH/LA (låg C <sub>3</sub> A halt)
2:	CEM I 52,5 R (hög C <sub>3</sub> A halt)
3:	CEM II A-V, LA (14 % FA)
4:	CEM II A-V 52,5 N + 18 % FA
5:	CEM II A-V, LA + 5 % silika
6:	CEM II/B-S 52,5 N (24 % slagg)
7:	CEM III/B 42,5 N-LH/SR (67 % slagg)

Den kemiska sammansättningen hos de olika bindemedlen framgår av avsnitt 5.2 (*tabell 6 och 7*).

### 4.1.2 Framtagning av betongprover med ingjutna provstänger

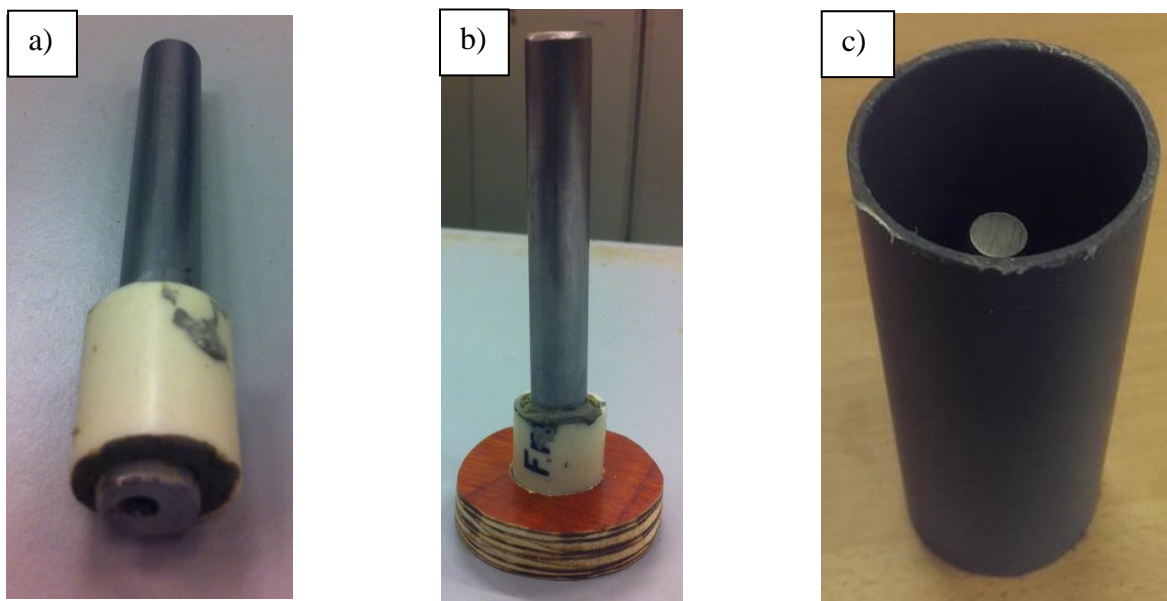
För varje bindemedelstyp tillverkades tre betongprover med en ingjuten provstång i varje betongprov. Totalt tillverkades sammanlagt 21 betongprover med ingjutna provstänger. Varje provstång göts in i betong i två omgångar. Vid den första ingjutningen skapades ett passivskikt på stålytan eftersom inga klorider användes i betongen. Efter två veckors härdning slogs betongproverna isär och provstängerna togs ut från de kloridfria betongproverna med olika bindemedel. Provstängerna var i princip helt rena från fastsittande betongrester. Vid den

andra ingjutningen med de nu passiverade provstångarna tillsattes natriumklorid (NaCl) till blandningsvattnet så att 2 vikt-% Cl<sup>-</sup> per bindemedelsvikt uppnåddes i betongen. Betongproverna med 2 vikt-% per bindemedelsvikt klorider härdades i två veckor.

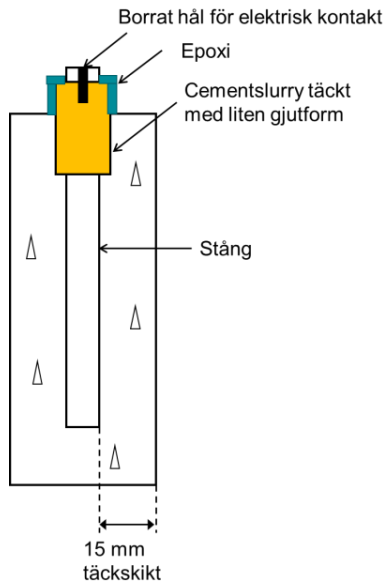
Betongproverna, som består av tre delar ballast, två delar bindemedel och en del vatten har ett vattenbindemedelstal (vbt) på 0,5. Som ballast användes ”Normensand” DIN EN 196-1 där den största sandkornstorleken var 2 mm.

Före den andra ingjutningen av ett stålprov så täcktes den nedre delen av stången med en cementslamma med hjälp av en liten plastform (plaströr), *figur 2(a)*. Detta gjordes för att förhindra att korrosion uppstår vid skarven mellan betong och luft. I *figur 2(b)* visas en distans av plywood runt stålstången som ger ett 15 mm avstånd mellan stålprov och gjutform. I *figur 2(c)* visas gjutformen med provstången centrerat i mitten.

Det sista steget som gjordes på en provkropp var att applicera ett skikt av epoxi för att täcka skarven mellan betong och det gula röret och den övre delen av cementslamman vilket visas i den schematiska bilden av en provkropp i *figur 3*.



*Figur 2. Slipad stång med borrarat hål på kortsidan(a). Den nedre delen av stången är belagd med en härdad cementslamma med en plastform runt slamman. (b) Stålprov med en distans av plywood. (c) Gjutformen där stålprovet syns i mitten av formen.*

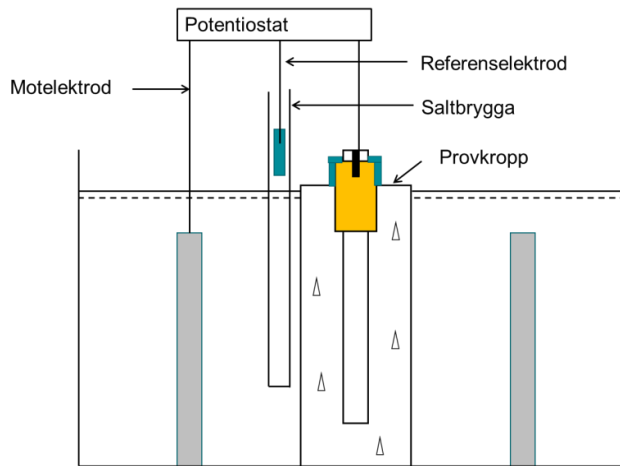


Figur 3. En schematisk bild av ingjuten provstång vid användning av potentiostatiskt mätmetod.

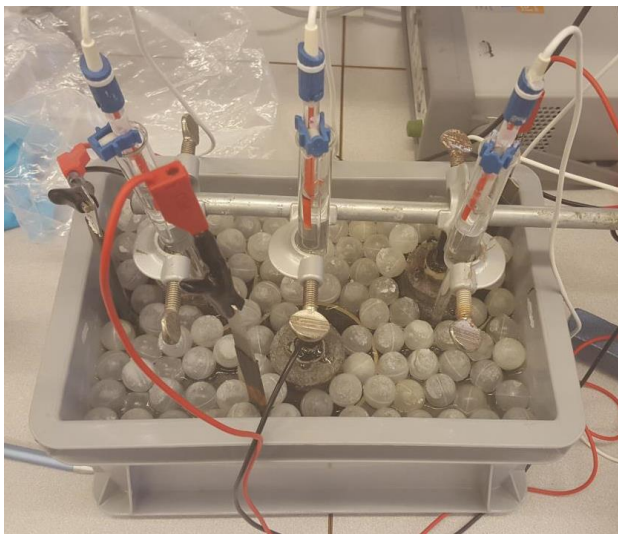
#### 4.1.3 Experimentell uppställning för potentiostatisk mätmetod

Den experimentella uppställningen visas i *figur 4* där ett rostfritt rör av stålqualiteten EN 1.4401 användes som motelektrod och som referenselektrod användes en Ag/AgCl-elektrod. Elektrodena och de ingjutna provstängerna var nedsänkta i ett kärl med saltvatten (2-vikt % NaCl). Anledningen till att saltvatten användes i badvattnet var att minska urlakning av det ingjutna saltet i betongproverna. En referenselektrod av typen Ag/AgCl kan vara känslig för höga pH-värden under långa exponeringsperioder och därför var referenselektroden nedsänkt i en saltbrygga fylld med mättad  $K_2SO_4$  lösning för att skydda elektroden. I *figur 5* visas ett exponeringskärl för provning av tre betongprover med likadant bindemedel. För att hindra avdunstning användes små plastkolor på vattenytan. Elektrodena var kopplade till en potentiostat (Sycopel Scientific, Ministat) och korrosionsströmmen mättes genom att mäta spänningsfallet över en resistans av  $10 \Omega$ . Registrerade mätdata sparades med en datalogger (Agilent 34972A).

De elektrokemiska mätningarna startades med att polarisera de ingjutna provstängerna till  $-200 \text{ mV}$  rel. Ag/AgCl. Den resulterande korrosionsströmmen mättes kontinuerligt under en sjudagars period. Om ingen kraftig strömökning inträffade under denna period ökades strömutmatningen till stålet så att stålets elektrokemiska potential ökade i positiv riktning med  $100 \text{ mV}$ . Potentialökningen med  $100 \text{ mV/vecka}$  fortsatte tills en stor korrosionsströmökning kunde konstateras. Om ingen kraftig korrosionsströmökning kunde konstateras vid en potential upp till  $+500 \text{ mV}$  relativ Ag/AgCl avslutades mätningarna. Detta innebar att ingen groppfrätning hade uppkommit under provningsperioden.



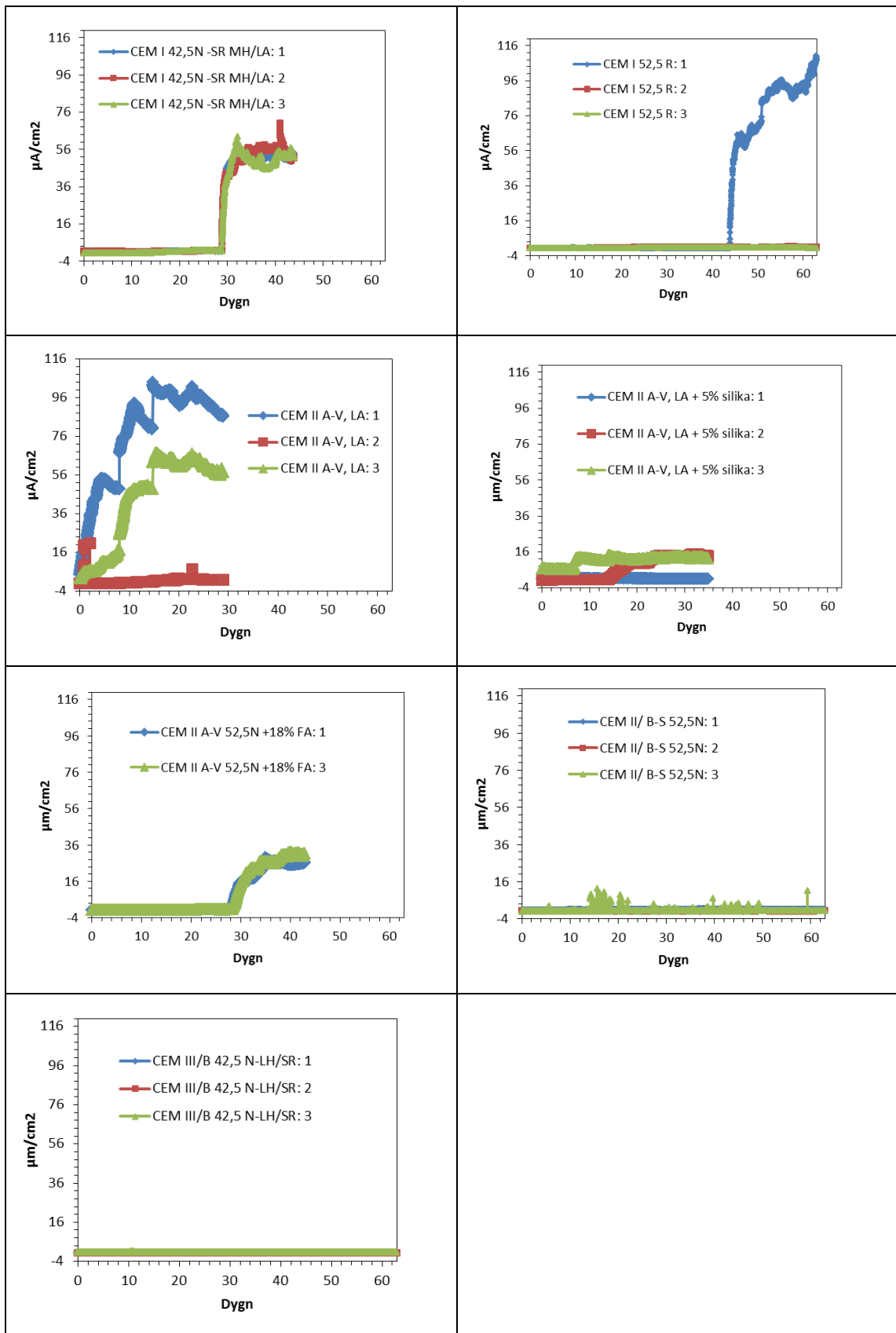
Figur 4. Den experimentella uppställningen där motelektroden var ett rör av rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4401 och referenselektroden var en mättad Ag/AgCl-elektrod.



Figur 5. Exponeringskärl för provning av tre betongprover med ingjutna provstänger. På vattenytan syns små plastkuler som används för att minska avdunstning.

#### 4.1.4 Resultat från mätningar med potentiostatiskt mätmetod

Resultaten från kontinuerliga mätningarna av korrosionsström vid olika potentialer som funktion av exponeringstiden på ingjutna provstänger i betong med olika bindemedel visas i figur 6. Som framgår av figuren visas diagram där y-axeln har enheten  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  och x-axeln har enheten antal dygn som betongproverna har exponerats. När gropfrätning initieras så visas detta genom en stor korrosionsströmsökning. När detta inträffar så noteras hur länge betongprovet har exponerats och vid vilken potential detta inträffade.



Figur 6. Resultat från kontinuerliga mätningar av korrosionsström för olika bindemedel vid olika elektrokemiska potentialer som funktion exponeringstiden

Som framgår av resultaten i *figur 6* så kunde ingen gropfrätning (korrosionsströmsökning) konstateras för provstänger ingjutna i betongprover med bindemedel innehållande:

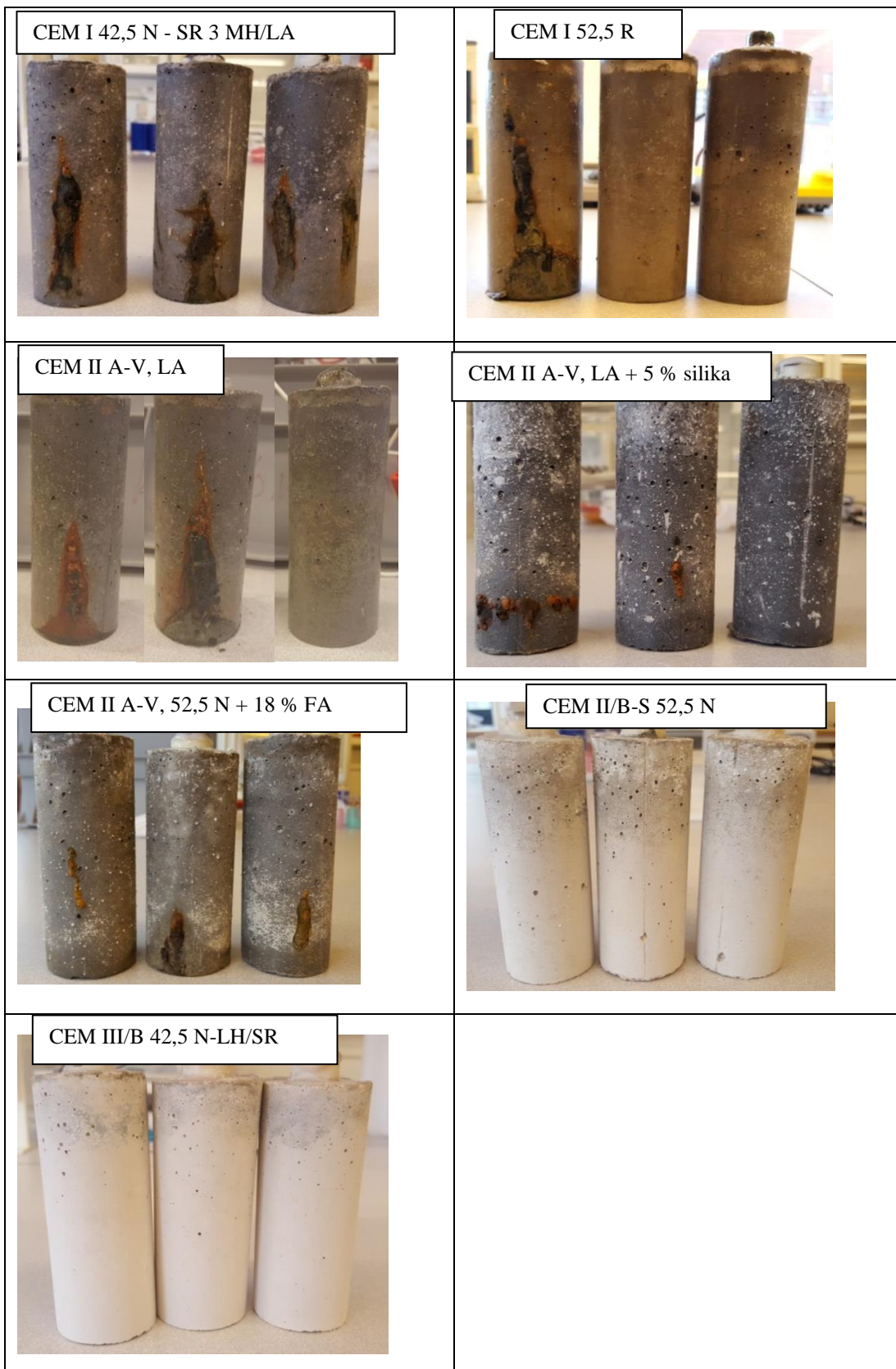
- CEM II/B-S 52,5 N (24 % slagg)
- CEM III/B 42,5 N-LH/SR (67 % slagg)
- CEM I 52,5 R (hög C<sub>3</sub>A halt), en provstång visade gropfrätning efter 44 dygn.

Gropfrätning konstaterades för provstänger ingjutna i betongprover med bindemedel innehållande:

- CEM I 42,5 N - SR 3 MH/LA (låg C<sub>3</sub>A halt), (gropfrätning på samtliga provstänger efter 30 dygn)
- CEM II A-V, 52,5 N + 18 % FA (gropfrätning på samtliga provstänger efter 28 dygn)
- CEM II A-V, LA (14 % FA), (gropfrätning på två av tre provstänger efter 0 dygn)
- CEM II A-V, LA + 5 % silika, (gropfrätning på två av tre provstänger efter 8-12 dygn)

Den gropfrätningen som fås med den potentiostatiska mätmetoden för provstänger ingjutna i betongprover resulterade i en rostutfällning på betongprovernas yta. För de provstänger som inte uppvisade någon kraftig korrosionsströmsökning (gropfrätning) kunde inga rostutfällningar på betongprovernas yta konstateras, *figur 7*.





Figur 7. Utseendet hos betongprover med olika bindemedel som utsatts för en polarisering tills gropfrätning initierats.

En sammanställning av samtliga mätresultat från den potentiostatiska mätmetoden visas i *tabell 2*. Av resultaten så framgår det att bindemedeltyperna CEM II/B-S 52,5 N, CEM III/B 42,5 N-LH/SR och CEM I 52,5 R hade de bästa korrosionsskyddande egenskaperna (rangordning 1 i *tabell 2*).

Sämst korrosionsskyddande egenskaper hade CEM II A-V, LA och CEM II A-V, LA + 5 % silika (rangordning 3 i *tabell 2*).

Bindemedel CEM II A-V, LA+18 % FA CEM I 42,5 N - SR 3 MH/LA hade en korrosionsskyddande förmågan ligger mellan ytterligheterna (rangordning 2, *tabell 2*).

Den korrosionsskyddande förmågan rangordnas enligt *tabell 2*: 1=bra, 2=mindre bra, 3=dåligt.

*Tabell 2. Sammanställning av resultat från de elektrokemiska mätningarna med potentiostatisk mätmetod. Den korrosionsskyddande förmågan rangordnas enligt: 1=bra, 2=mindre bra, 3=dåligt*

<b>Bindemedel</b>	<b>Tid till gropfrätning (dygn)</b>	<b>Antal prov med gropfrätning</b>	<b>Polarisering [mV]</b>	<b>Rangordning</b>
CEM II A-V, LA	0	3 av 3	-200	3
CEM II A-V, LA+5 % silika	0-14	2 av 3	-200 till 0	3
CEM II A-V 52,5 N+18 % FA	28	2 av 2	+200	2
CEM I 42,5 N - SR 3 MH/LA	28	3 av 3	200	2
CEM I 52,5 R	45	1 av 3	>400	1
CEM II/B-S 52,5 N	-	0 av 3	>400	1
CEM III/B 42,5 N-LH/SR	-	0 av 3	>400	1

## 4.2 Elektrokemisk potentiodynamisk mätmetod (RISE CBI Betonginstitutet väst)

### 4.2.1 Provmaterial för stål- och betongprover

Som provmaterial för den potentiodynamisk mätmetoden användes provstänger i form av kamstål (varmvalsat, seghärdat stål med beteckningen K500C-T). Provstängernas längd var 120 mm med en diameter av 12 mm. Provstängernas glödskal avlägsnades före provning genom betning. Stängerna placerades i ett kärl med utspädd saltsyra (HCl: avjoniserat vatten, 1:1) med en tillsats av inhibitor (3 g/l hexametyltetramin). Kärlet med provstänger sänktes ned i ett ultraljudsbad i 2-3 minuter. Därefter sköljdes provstängerna med avjoniserat vatten och torkades med tryckluft. På ena kortsidan hos varje provstång borrades ett hål med diametern 4 mm för anslutning av en mätsladd.

I provningsmatrisen för den potentiodynamiska mätmetoden ingick betongprover med sex olika typer av bindemedel, *tabell 3*. Bindemedlens kemiska sammansättning framgår avsnitt 4.5, *tabell 6* och 7.

Tabell 3. Bindemedelstyper som utvärderades i den potentiodynamiska mätmetoden.

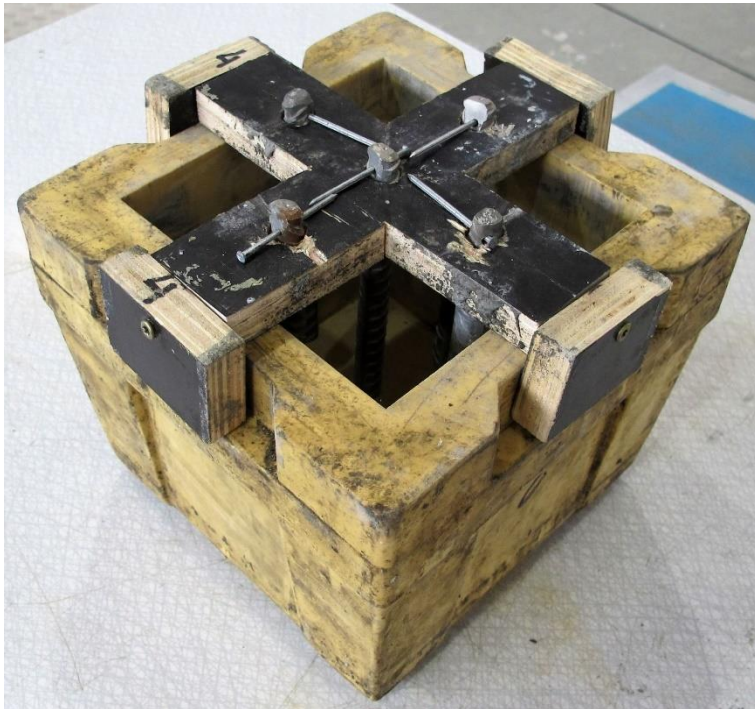
ID nr	Bindemedelstyp
1:	CEM I 42,5 N - SR 3 MH/LA
2:	Saknas
3:	CEM II A-V, LA
4:	CEM II A-V 52,5 N + 18 % FA
5:	CEM II A-V, LA + 5 % silika
6:	CEM II/B-S 52,5 N
7:	CEM III/B 42,5 N-LH/SR

### 4.2.2 Framtagning av betongprover med injutna provstänger för potentiodynamisk mätmetod

För bindemedelstyp 3 och 4 (*tabell 3*) tillverkades två betongprover med en injuten provstång i varje betongprov. För bindemedelstyp 1, 5, 6 och 7 (*tabell 3*) tillverkades tre betongprover med en injuten provstång i varje betongprov. Totalt tillverkades 16 stycken betongprover med en provstång i varje betongprov.

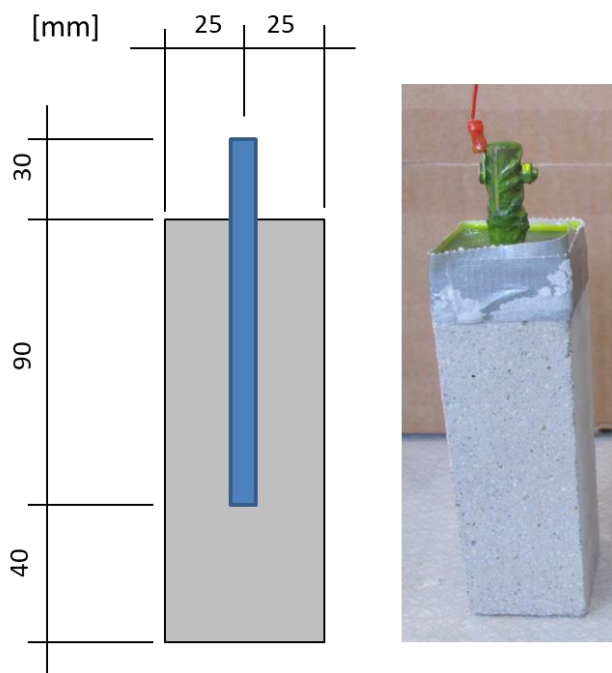
På liknande sätt som för den potentiostatiska mätmetoden så göts varje provstång in i betong i två separat omgångar med och utan natriumklorid i blandningsvattnet. Härdningsförfarandet och betongrecepten för alla tre elektrokemiska metoderna var den samma, avsnitt 5.2, *tabell 6* och 7. Dock skildes provkroppsutformningen mellan den potentiostatiska mätmetoden och de övriga två mätmetoderna, dvs. för den potentiodynamiska och den galvanostatiska mätmetoden.

*Figur 8* visar gjutformen och de monterade provstängerna vid användning av potentiodynamisk och galvanostatisk mätmetod, se avsnitt 4.3. Fem provstänger monterades i en provhållare/distans av plywood som i sin tur monterades på en kubform (150 mm) av plast.



*Figur 8. Gjutformen och de monterade armeringsjärnen vid användning av potentiodynamisk och galvanostatisk mätmetod.*

Efter härdning sågades betongprovkroppar (50x50x130 mm) med ingjutna provstänger ur den gjutna kuben. *Figur 9* visar ingjuten provstång vid användning av både den potentiodynamiska och galvanostatiska mätmetoden. I det borrarade hålet anslöts en mätsladd och det sista steget som gjordes var att applicera ett skikt av epoxi för att täcka skarven mellan betong och provstång för att undvika spaltkorrosion.

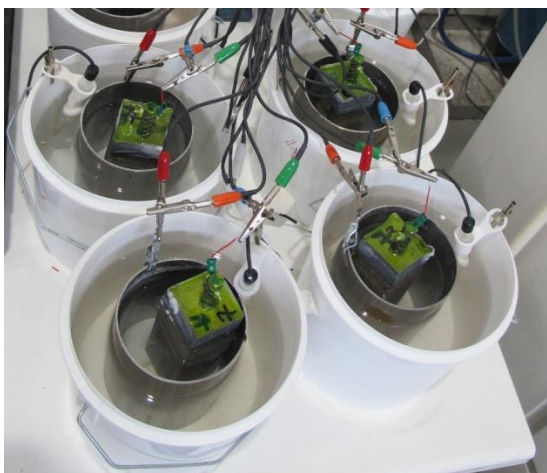


Figur 9. Ingjuten provstång vid användning av potentiodynamisk- och galvanostatisk mätmetod.

#### 4.2.3 Experimentell uppställning för potentiodynamisk mätmetod

Den experimentella uppställningen visas i *figur 10*. Uppställningen för den potentiodynamiska provmetoden var i princip den samma som för den potentiostatiska provmetoden.

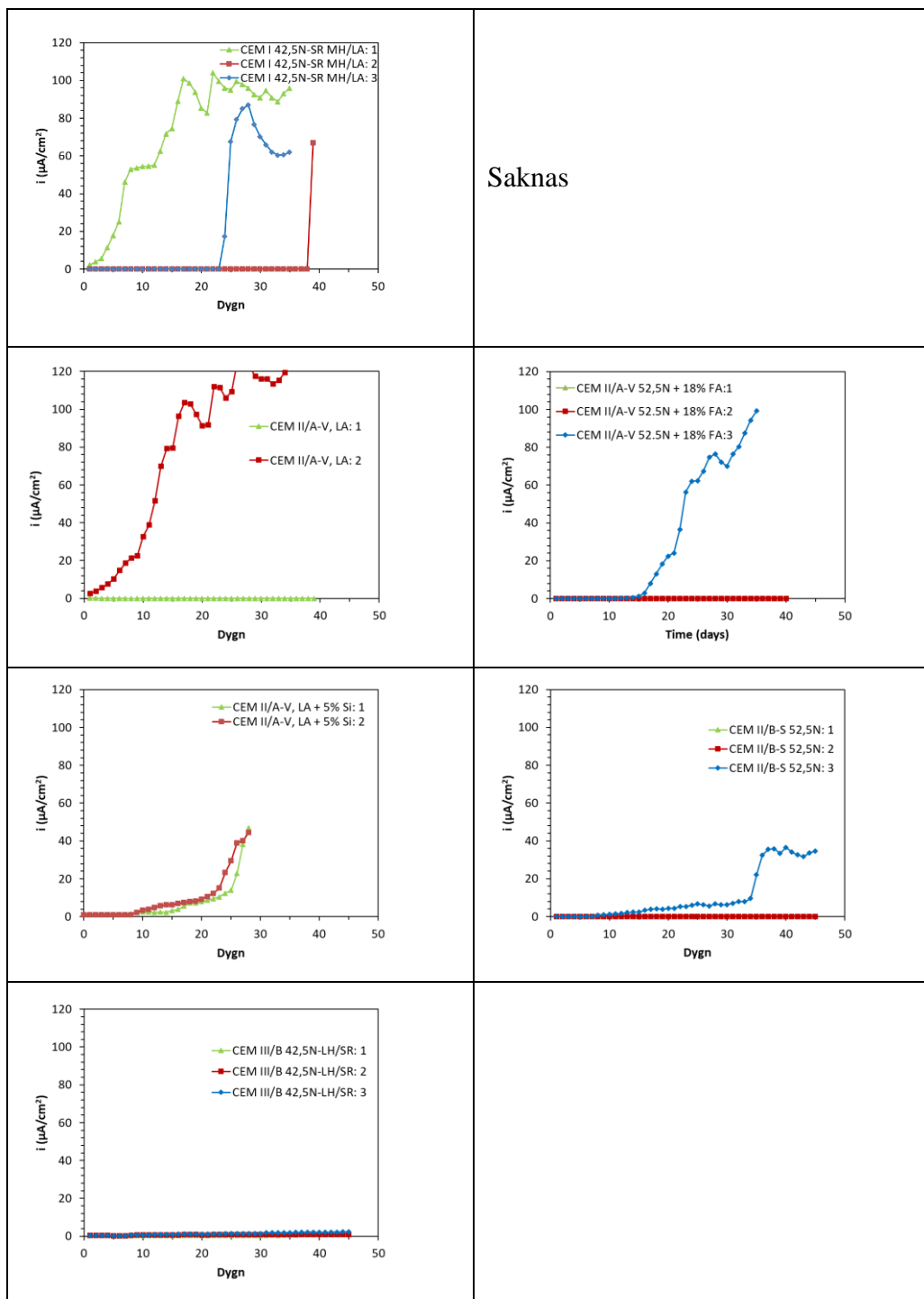
Elektroden var i detta fall kopplade till en åtta kanalers multiplexer (ECM8<sup>TM</sup>) som i sin tur styrdes av en potentiostat (Gamry, Interface 1000A). De elektrokemiska mätningarna startades med att polarisera de ingjutna provstängerna till -200 mV rel. Ag/AgCl och potentialen ökades i positiv riktning med 15 mV/dag (105 mV/vecka). Potentialökningen fortsatte tills en stor korrosionsströmökning (gropfrätning) kunde konstateras. Om ingen kraftig korrosionsströmökning kunde konstateras vid en potential upp till +400 mV relativ Ag/AgCl avslutades mätningarna.



Figur 10. Den experimentella uppställningen vid potentiodynamisk mätmetod

#### 4.2.4 Resultat från mätningar med potentiodynamisk mätmetod

Figur 11 visar resultat från mätningar av korrosionsström vid olika elektrokemiska potentialer som funktion av exponeringstiden. När gropfrätning initieras så visas detta genom en stor korrosionsströmsökning.



Figur 11. Resultat från mätningar av korrosionsström vid olika elektrokemiska potentialer som funktion exponeringstiden

Som framgår av resultaten i *figur 11* så kunde gropfrätning konstateras för samtliga provstänger ingjutna i betongprover med bindemedel innehållande:

- CEM I 42,5N - SR MH/LA (stor spridning när gropfrätning initierades)
- CEM II A-V, LA + 5 % silika (bara två provkroppar testades)

Vidare kunde gropfrätning konstateras i en av två provstänger ingjutna i betongprover med bindemedel innehållande:

- CEM II A-V, LA

Gropfrätning konstaterades på bara en av tre provstänger ingjutna i betongprover med bindemedel innehållande:

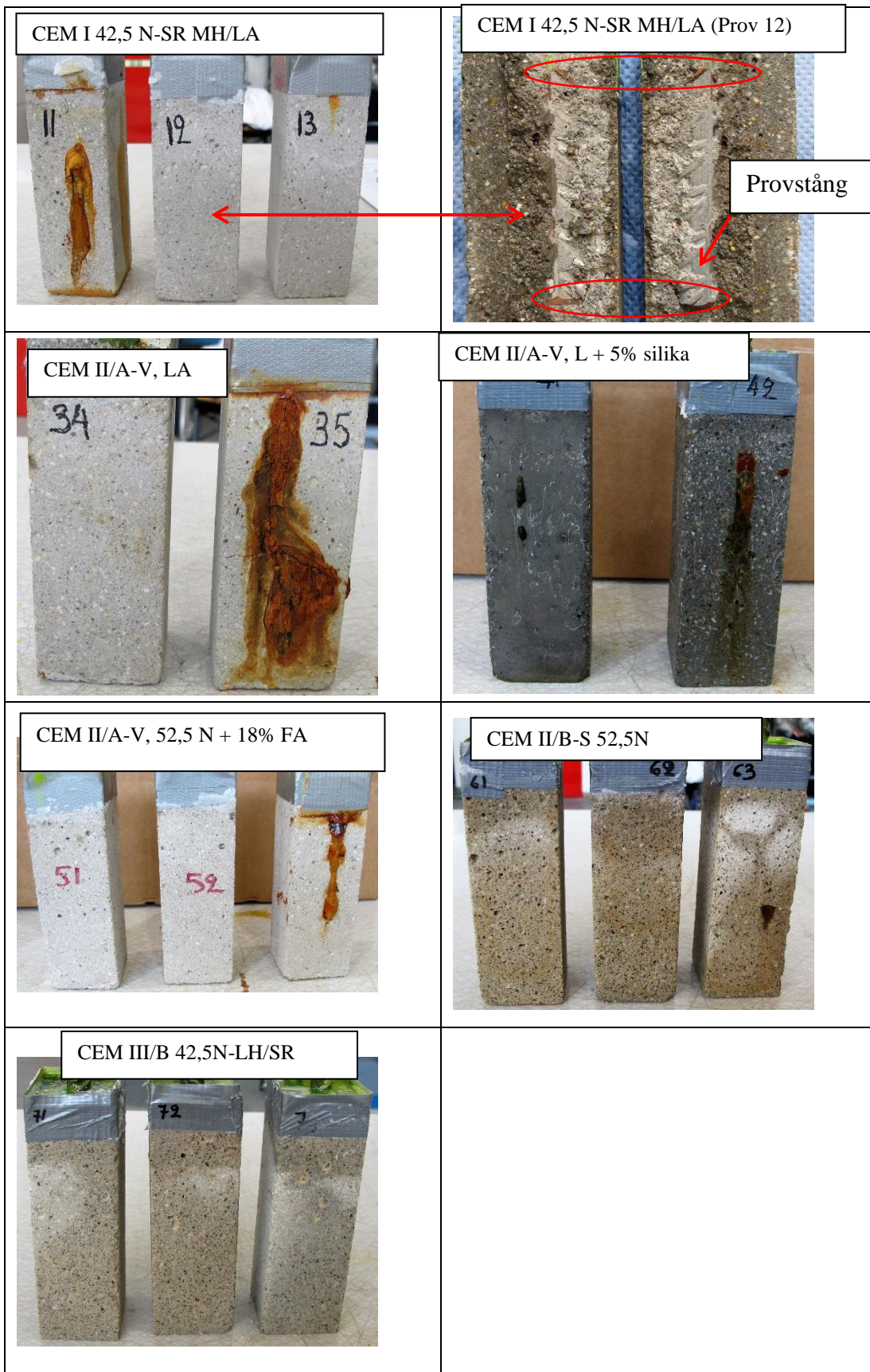
- CEM II A-V 52,5 N + 18 % FA

Ingen gropfrätning kan konstateras efter mer än 45 dagars exponering för armeringsjärnen ingjutna i bruksproverna med bindemedel innehållande:

- CEM III/B 42,5 N-LH/SR
- CEM II/B-S 52,5 N

*Figur 12* visar utseendet hos betongprover med ingjutna provstänger efter den potentiodynamiska mätningen. Kraftig rostutfällning på betongprovernas yta kan ses på de provkroppar som uppvisade en hög korrosionshastighet under en längre exponeringstid. Alla betongprover öppnades för att okulärt undersöka provstängernas korrosionstillstånd. Den okulära undersökningen visade att provstängernas korrosionsutseende stämde bra överens med de potentiodynamiska mätningarna. Ett exempel är ”betongprov 12” (CEM I 42,5 N – SR 3 MH/LA) där mätningen i *figur 11* visade på initiering av gropfrätning, vilket inte syntes som rostutfällning på betongytan men rostutfällningar på provstång kunde observeras inne i betongen, *figur 12*.





Figur 12. Utseendet hos betongprover efter att potentiodynamisk mätmetod har använts.



På grund av stor spridning i resultaten, *figur 11*, är det svårt att fastställa en individuell rangordning för bindemedel CEM II/A-V 52,5N + 18 % FA och CEM I 42,5N-SR MH/LA.

För övriga bindemedel kan man särskilja mellan två olika grupper med bättre och sämre korrosionsskyddande förmågan:

Bättre korrosionsskyddande förmåga:

- CEM III/B 42,5N-LH/SR
- CEM II/B-S 52,5N

Sämre korrosionsskyddande förmåga:

- CEM II/A-V, LA + 5 % silika
- CEM II/A-V, LA

Bindemedel CEM I 52,5 R var inte med i denna delundersökning.

Ett förslag på förbättring av mätmetoden i synnerhet med tanke på att minska spridningen i resultaten är att använda släta stänger. Vid en jämförelse mellan släta provstänger och provstänger av kamstål framgick det att de släta stänger hade en betydligt mindre spridning i mätresultaten jämfört med mätresultaten hos provstänger av kamstål, *figur 6 och 11*. Den troliga orsaken till denna skillnad är att när man använder släta stänger så minskar man risken för defekter. Med släta stänger bildas ett jämt och enhetligt passivskikt på stålytan. När provstänger av kamstål användes var det svårt att få bort allt bruk efter första progjutningen, vilket medförde att betongrester satt fast på stålytan. I den andra gjutomgången, där klorider blandades in i vattnet, innebär detta att armeringen på grund av fastsittande betongrester hade en inhomogen stålyta.

För att minska spridningen av mätresultaten ytterligare och öka reproducerbarheten i mätningarna och bör antal provkroppar ökas till exempelvis fem.

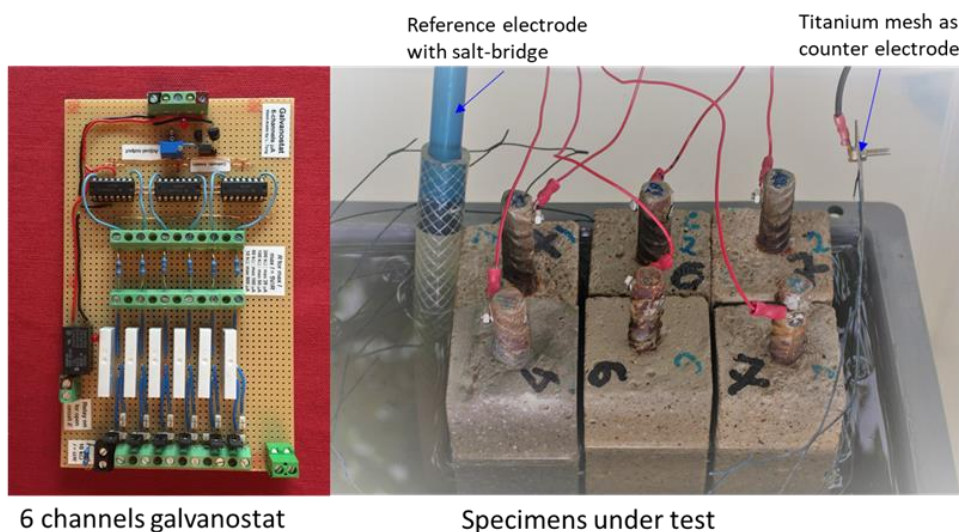
## 4.3 Elektrokemisk galvanostatisk mätmetod

### 4.3.1 Betongprover med ingjutna provstänger

Likadana provkroppar som har tidigare beskrivits i avsnitt 4.2.1 - 4.2.2 har använts i denna mätmetod.

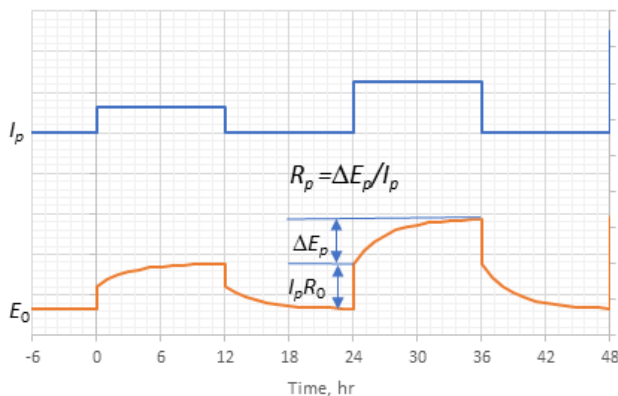
### 4.3.2 Experimentell uppställning för galvanostatisk mätmetod

Den experimentella uppställningen visas i *figur 13*. Varje betongprov med ingjutet armeringsjärn kopplades till galvanostaten (vänstra bild i *figur 13*) samt till en datalogger (Campbell Scientific CR10) för registrering av armeringsjärnets elektrokemiska potential. Intervallet mellan de registrerade mätningarna var 60 sekunder.



*Figur 13. Den experimentella uppställningen för galvanostatiska undersökningar: bild till vänster – galvanostat med 6 utgångar; höger – exempel på provning av sex betongprover med ingjutna provstänger.*

Provningen började med att betongproverna med ingjutna provstänger sänktes ned i en 2 % natriumkloridlösningen (avstånd till vattenytan från betongprovernas ovansida var ca 2 cm) i 6 timmar utan att applicera någon ström. Därefter registrerades den initiala elektrokemiska potentialen (korrosionspotentialen). Därefter applicerades en anodisk konstant ström i 12 timmar för polarisering av de ingjutna provstängerna. Efter 12 timmars anodisk polarisering slogs strömmen av och strömmen var frånslagen i 12 timmar. Detta resulterade i en 12 timmars depolarisering av provstängerna. Efter varje sådan 24 timmars cykel (på- och avstängning av ström) ökades stegvis den applicerade anodiska strömmen från 1,25  $\mu\text{A}$  till 2,5  $\mu\text{A}$  och sedan till 5  $\mu\text{A}$  och sedan till 10  $\mu\text{A}$  och sedan till 20  $\mu\text{A}$  och sedan till 30  $\mu\text{A}$  och avslutades med 50  $\mu\text{A}$ .



Figur 14. Exempel på två polarisations- och depolarisationskurvor.

Från polariserings- och depolarisationskurvan beräknas polarisationsmotstånd  $R_p$  ( $\Omega$ ) enligt följande ekvation.

$$R_p = \Delta E_p - I_p R_0 \quad (\text{ekv. 1})$$

där  $\Delta E_p$  (V) är den maximala potentialändringen under polarisationsperioden.  $I_p$  (A) är den applicerade anodiska strömstyrkan och  $R_0$  ( $\Omega$ ) är det ohmskt motstånd mellan provstängan och motelektroden (titannät).  $R_0$  mättes med en LCR-mätare (Keysight U1733C) vid 1 kHz.

Enligt Stern-Geary ekvationen är sambandet mellan  $R_p$  och korrosionsströmmen  $I_{corr}$  (A) följande:

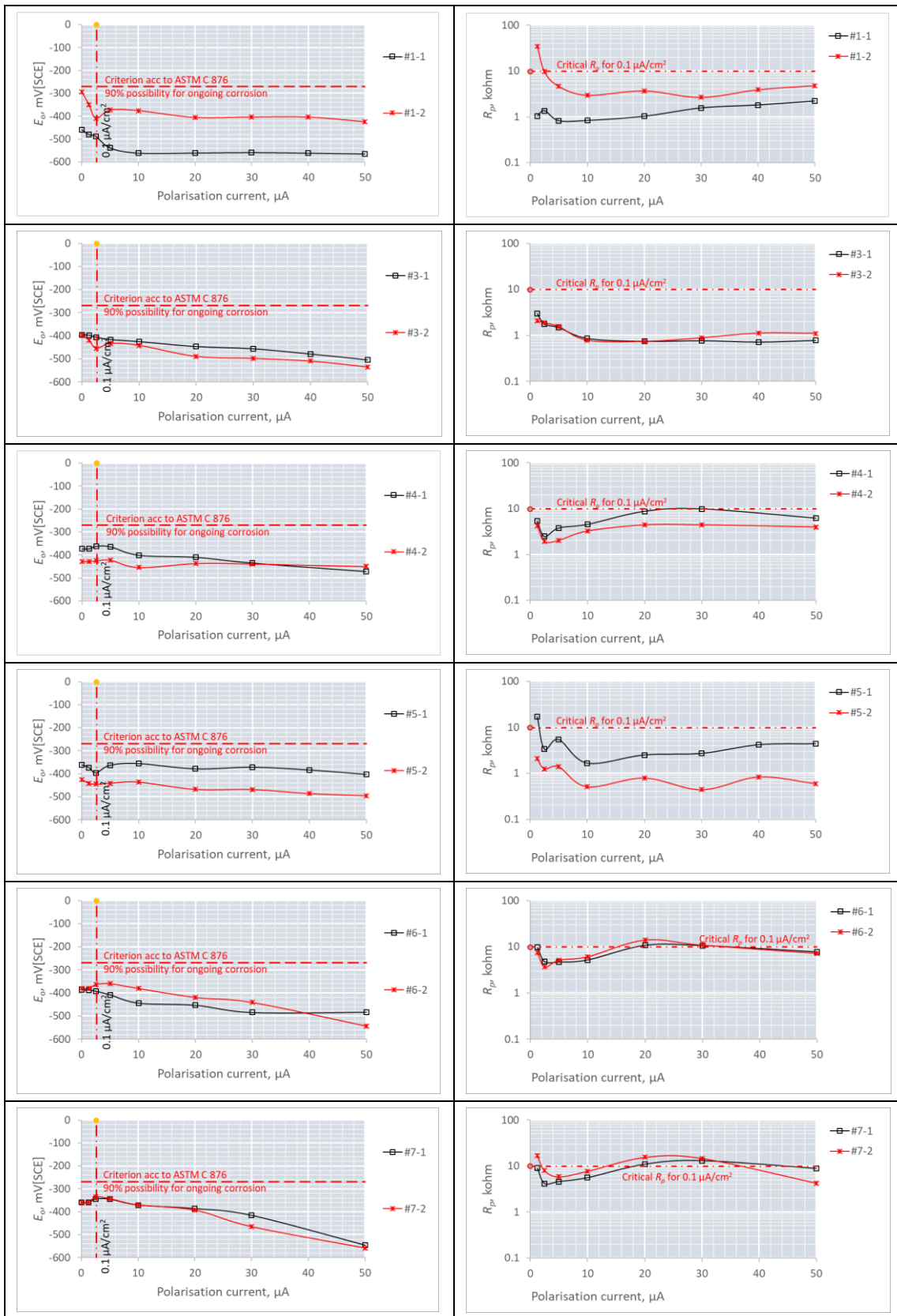
$$I_{corr} = B/R_p \quad (\text{ekv. 2})$$

där  $B$  är en empirisk bestämd konstant som har värdet 26 mV. Enligt Stern-Geary ekvationen så betyder ett högt  $R_p$  en låg korrosionsström, d.v.s. bättre korrosionsskyddande förmåga. Vid korrosionsmätningar anges korrosionshastigheten ( $i_{corr}$  uttryckt i  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ). Gränsen då ett ingjutet stål anses vara passivt är  $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Om man använder Stern-Geary ekvationen och ersätter  $I_{corr}$  med  $i_{corr}$  så kan ett polarisationsmotstånd vid ett passivt tillstånd hos stålet beräknas. Vid uppmätt  $R_p$  av ca  $10 \text{ k}\Omega$  innebär det att stålytan befinner sig i ett passivt tillstånd, medan ett  $R_p < 10 \text{ k}\Omega$  kan det innebära pågående korrosion. Var exakt denna gräns ligger är inte för närvarande känd.

Vidare kan eventuellt ASTM C 876 ge en fingervisning om korrosionssannolikheten av de ingjutna provstängerna av stål om man jämför den initialt uppmätta korrosionspotentialen (som mättes innan pålagt ström) och de uppmätta potentialerna efter depolarisering i 12 timmar. Det bör dock påpekas att bedöma risken för korrosion enligt ASTM C 876 för betongprover med ingjutna provstänger av stål som är placerad under vattenytan är mycket osäkert eftersom potentialvärdena i ASTM C 876 är framtagna för välluftad betong.

#### 4.3.3 Resultat från mätningar med galvanostatisk mätmetod

Figur 15 visar resultat från mätningar med den galvanostatiska mätmetoden. Diagrammen till vänster visar frånslagspotentialen efter 12 timmars frånslag av olika anodiska strömmar som funktion av polarisationsströmmen. Diagrammen till höger visar det beräknade polarisationsmotståndet enligt ekvation 1 och 2 som funktion av polarisationsströmmen.



Figur 15. Resultat från mätningar med den galvanostatiska mätmetoden

Som framgår av resultaten i *figur 15* är den initiala elektrokemiska potentialen i samtliga provstänger ingjutna i betongprover med 2 % klorider mer negativ än -270 mV (SCE). Enligt ASTM C 876 innebär det 90 % sannolikhet att korrosion pågår.

Eftersom många faktorer kan påverka provstängernas elektrokemiska potential (korrosionspotential) kan dessa värden inte ensamt användas utan måste kompletteras med andra parametrar t ex polarisationsmotstånd för bedömning av bindemedels korrosionsskyddande förmåga.

*Tabell 4* sammanfattas medelvärden av de initiala elektrokemiska potentialerna  $E_0$  och det ohmska motståndet  $R_0$  när  $I_p = 0$ . Vidare återges medelvärdet av polarisationsmotstånden för  $I_p \geq 2,5 \mu\text{A}$ . Polarisationsmotstånden, ( $R_p$ ), återspeglar bindemedels korrosionsskyddande förmåga. Ju lägre  $R_p$  som uppmätts hos provstängerna desto sämre är den korrosionsskyddande förmågan hos bindemedlet.

Det framgår vidare att de bindemedel som uppvisade de lägsta  $R_p$  (sämst korrosionsskyddande förmåga) är CEM II A-V, LA 14 % FA, CEM II A-V, LA + 5 % silika, CEM I 42,5 N - SR 3 MH/LA. De högsta polarisationsmotstånden (bäst korrosionsskyddande förmåga) uppmättes med bindemedel CEM III/B 42,5 N-LH/SR (67 % slagg) och CEM III/B 42,5 N-LH/SR (67 % slagg). Bindemedel CEM II A-V 52,5 N + 18 % FA ligger mellan de två ytterligheterna.

*Tabell 4. Medelvärden av olika mätvärdena med motsvarande variationskoefficient i parentes.*

ID	Bindemedelstyp	$E_0$ , mV <sub>(SCE)</sub>	$R_0$ , ohm	$R_p$ , ohm
1:	CEM I 42,5 N - SR 3 MH/LA	-377 (31%)	120 (10.6%)	3000 (77%)
2:	-			
3:	CEM II A-V, LA (14 % FA)	-397 (0,1%)	118 (3.2%)	1080 (9%)
4:	CEM II A-V 52,5 N + 18 % FA	-400 (10%)	384 (7.1%)	4700 (39%)
5:	CEM II A-V, LA + 5 % silika	-394 (12%)	139 (2.1%)	2140 (87%)
6:	CEM II/B-S 52,5 N (24 % slagg)	-384 (1,3%)	211 (3.9%)	7560 (4.2%)
7:	CEM III/B 42,5 N-LH/SR (67 % slagg)	-360 (0.04%)	707 (9.8%)	8300 (3.7%)

I *Figur 16* visas korrosionsutseendet hos provstängerna efter att mätningarna hade avslutats med den galvanostatiska mätmetoden.



*Figur 16. Provstängernas utseende efter mätningar med den galvanostatiska mätmetoden.*

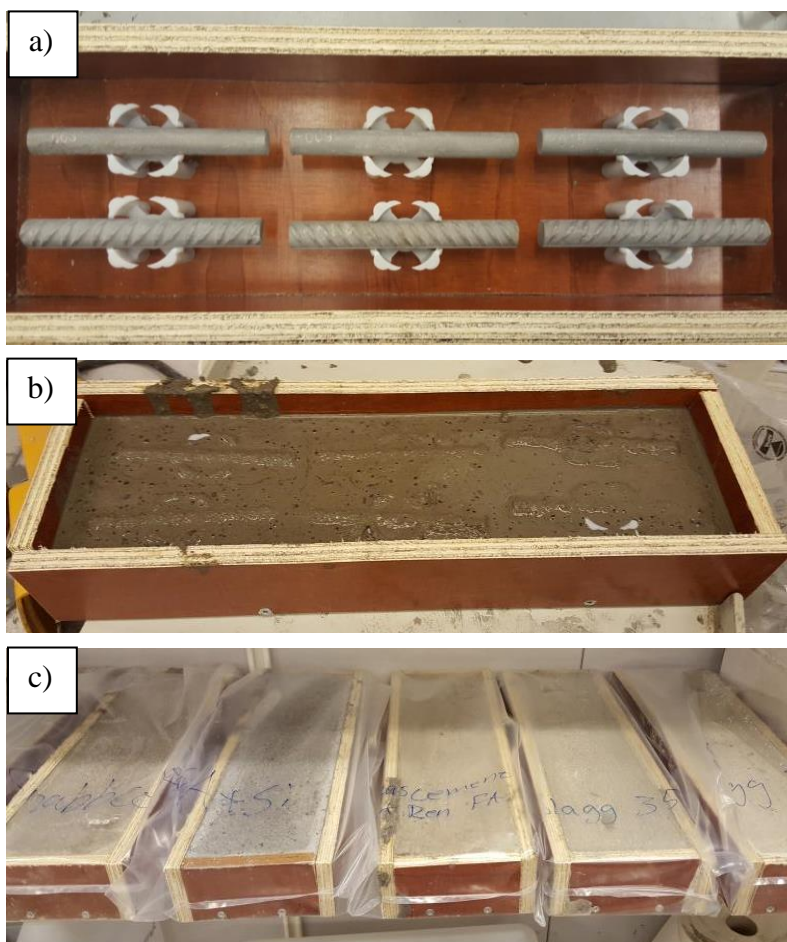


## 4.4 Fältexponering

### 4.4.1 Framtagning av betongprover för korrosionsprovning i fält

För fältexponeringarna användes både varmvalsade släta stänger och kamstänger. De släta stängerna var av samma typ som redovisas i avsnitt 4.1.1 men med skillnaden att glödskalet avlägsnades före exponering genom betning (borttagning av oxider) istället för slipning. De släta stängerna var 130 mm långa och hade en av diameter 12 mm. Provstänger av kamstål med beteckningen K500C-T hade en längd av 130 mm och en diameter av 10 mm. Likadana bindemedel som i laboratorieförsöken användes i fältförsöken, se *tabell 1* i avsnitt 4.1.1.

Provstängerna förpassiverades under två veckors härdning i betong med de bindemedel som anges i *tabell 1*. Efter förpassiveringen gjöts stängerna in i betongprover med 2 vikt-% Cl<sup>-</sup> per bindemedelsvikt i blandningsvattnet. I *figur 17 (a)* visas hur olika provstänger fastmonterades i distanser som är fastlimmade i gjutformens botten. Tre provstänger av varje typ göts in i varje provkropp. Under gjutningsförloppet användes ett skakbord för att ta bort luftporer. I *figur 17 (b)* visas att provstängerna låg horisontellt i gjutformen under gjutning. Det täckande betongskiktet var 15 mm. Provkropparna härdades i två veckor i plastpåsar vilket visas i *figur 17 (c)*.



Figur 17. (a) Stålprover fastsatta med distanser i gjutformen. (b) Gjutning av provkroppar. (c) Härdning av provkroppar i plastpåsar.

#### 4.4.2 Fältexponering av provstänger ingjutna i betongblock med olika bindemedel

Fältexponering av betongprover ingjutna med provstänger av kolstål utfördes under ett år på Swerea KIMABs provningsstation för utomhusprovning i Kista, Stockholm. Proverna exponerades på en provram av trä i 45 graders lutning i riktning mot söder under ett regnskydd, vilket visas i *figur 18*. Syftet med att använda ett regnskydd var för att förhindra att betongproverna med ingjutna provstänger skulle urlakas på klorider. Efter exponering slogs betongproverna isär och provstängerna togs ut för utvärdering av den jämna korrosionshastigheten. Korrosionshastigheten på stålproverna mättes gravimetriskt genom upprepad betning enligt standarden ISO 9226:2012.

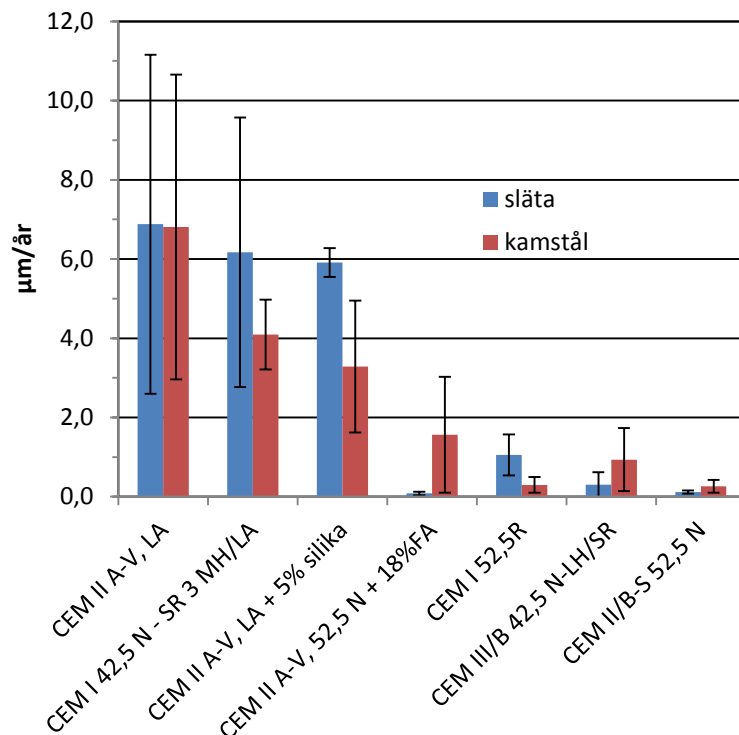


*Figur 18. Fältexponering av betongprover vid Swerea KIMABs provningsstation i Kista där betongprover med olika bindemedel och ingjutna provstänger exponerades under ett regnskydd.*

#### 4.4.3 Resultat från ett års fältexponering av ingjutna provstänger i betongblock med olika bindemedel

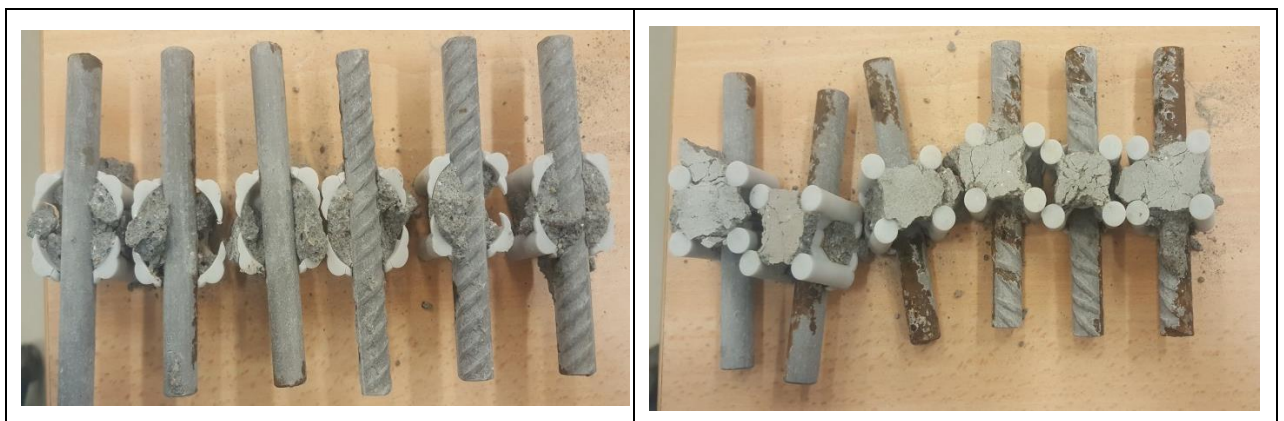
Resultaten från mätningar av korrosionshastigheten hos ingjutna provstänger av kolstål efter ett års fältexponering visas i *figur 19*. Varje stapel visar den genomsnittliga korrosionshastigheten hos tre provstänger ingjutna i betong med olika bindemedel.

Stapelndiagrammet visar även korrosionshastigheternas standardavvikelse som är relativt hög. Detta beror troligtvis på att stålproverna göts in horisontellt vilket betyder att ett litet hålrum bildas på stålprovets undersida som blir ett särskilt känsligt område där korrosion kan initieras. Därför påverkas korrosionshastigheten av hur stort detta hålrum är och därmed blir standardavvikelsen hög.



Figur 19. Genomsnittlig korrosionshastighet av släta stänger och kamstänger ingjutna i olika bindemedel efter ett års fältexponering.

I figur 20 visa över- och undersida på stängerna som varit ingjutna ett år i betongprover med bindemedlet CEM II A-V, LA. Som framgår av figuren så är undersidan betydligt mer korroderad än ovasidan. Detta beror på att antalet hålrum mellan betong och stålyta var betydligt mer frekvent på undersidan av provstängerna, vilket troligtvis har bidragit till att korrosionen startade på undersidan.



Figur 20. Provstängernas utseende efter ett års korrosionsprovning i fält. Bilden till vänster visa provstängernas ovasida och bilden till höger visar provstängernas undersida.



I tabell 5 visas en sammanställning av resultaten från mätningarna av korrosionshastigheten hos både kam- och släta provstänger.

Tabell 5. Sammanställning av resultat av korrosionshastigheten hos provstänger efter ett års fältexponering. Den korrosionsskyddande förmågan rangordnas enligt: 1=bra, 2=mindre bra, 3=dåligt.

Bindemedel	Korrosionshastighet Kamstänger Medelv. ( $\mu\text{m}/\text{år}$ )	Korrosionshastighet Släta stänger Medelv. ( $\mu\text{m}/\text{år}$ )	Rangordning
CEM II A-V, LA	6,7	6,8	3
CEM II A-V, LA+5 % silika	3,2	5,9	3
CEM I 42,5 N - SR 3 MH/LA	4,1	6,1	3
CEM II A-V 52,5 N+18 % FA	1,5	0,1	1-2
CEM I 52,5 R	0,4	0,9	1
CEM II/B-S 52,5 N	0,3	0,1	1
CEM III/B 42,5 N-LH/SR	0,8	0,2	1

## 5. Bedömning av bindemedlens relativa korrosionskänslighet - TG och XRD analyser

### 5.1 Bakgrund

För att undersöka hur förmågan att binda klorider skiljer sig åt analyserades fem av de sju bindemedel som ingick i projektet med hjälp av termogravimetrisk analys (TGA) och röntgendiffraktion (XRD) av RISE CBI (ost). Tanken med detta var att se hur mycket klorider som potentiellt kan kvarstå i bindemedlets porlösning efter härdningsförloppet och som därmed teoretiskt kan delta i korrosionsprocessen. Kapaciteten att binda klorider från blandningsvattnet under hydratationsförloppet skiljer sig åt mellan de olika bindemedlen beroende på bindemedlens kemiska sammansättning. Med hjälp av TGA kunde vi semi-kvantitativt och relativt avgöra hur mycket klorider som binds mellan de olika bindemedlen. TGA kombinerades med XRD analys för att stödja identifieringen av olika faser som bildades vilket ibland kan vara svårt att avgöra i ett TGA-diagram.

Klorider kan bindas från blandningsvatten, eller från klorider som transporteras av vatten genom pastans porsystem, på tre olika sätt:

- Genom bildning av Friedel's salt från monosulfat genom substitution av sulfater. I denna undersökning kunde vi påvisa att lösliga kloridjoner som tillsattes i blandningsvattnet (2 % av bindemedelsvikten) kinetiskt primärt binds i Friedel's salt ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) från monosulfat ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SO}_3\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ).
- Genom sorption på bindemedlets porväggar främst under transport i porsystemet. Sorption av kloridjoner på porväggarna tävlar med sorptionen av hydroxidjoner i

porlösningen och anses som svag för kloridkoncentrationer  $< 1 \text{ M}$  (Tritthart, 2009). Baroghel-Bouny et al (2012) har analyserat och modellerat de sorptionseffekter som kan uppstå i cementbaserade material under transport i porssystemet. Olsson et al (2018) beskriver vilken sorptionseffekt inblandning av slagg kan medföra för kloridjontransport i cementbaserade materials porssystem.

- Vid mycket starka kloridkoncentrationer kan cementpastans portlandit brytas ner och bilda t.ex. kalciumklorid. Cementpastans bindningsförmåga påverkas och materialet blir ”mjukt”.

Eftersom ingen transport av klorider sker i provernas porssystem medför det att den dominerande kloridbindningsmekanismen är bildning av Friedel´s salt, vilket också ges av TG och XRD analyserna.

Det skall understrykas att den beräknade mängden bildad Friedel´s salt i de olika bindemedlen inte är ett absolutvärde utan att osäkerheten finns i beräkningen. Mängderna skall istället betraktas i ett perspektiv där syftet har varit att ge ett relativt värde och att rangordna bindningsförmågan hos bindemedlen. Värdet användes sedan tillsammans med litteraturdata från porlösninganalyser för att kunna rangordna förutsättningarna för kloridinitierad korrosion hos bindemedlen.

Rangordningen av bindemedlen korrosionskänslighet jämfördes sedan med utfallet från de elektrokemiska försöken som gjordes parallellt på Swerea KIMAB, RISE CBI väst och Chalmers.

## 5.2 Genomförande

Följande fem bindemedel undersöktes av RISE CBI Betonginstitutet (öst) med avseende på den kloridbindande förmågan : CEM I 42,5 N - SR 3 MH/LA; CEM I 52,5 R; CEM II A-V, LA; CEM II/B-S 52,5 N; CEM III/B 42,5 N-LH/SR. De bindemedel som dessutom ingick projektets elektrokemiska undersökningar från Swerea KIMAB, RISE CB (väst) och Chalmers var: CEM II A-V 52,5 N + 18 % FA; CEM II A-V, LA + 5 % silika. Den kemiska sammansättningen av de här undersökta bindemedlen ges i *tabell 6* och sammansättningen för de två bindemedel som dessutom ingick i de elektrokemiska undersökningarna ges i *tabell 7*.

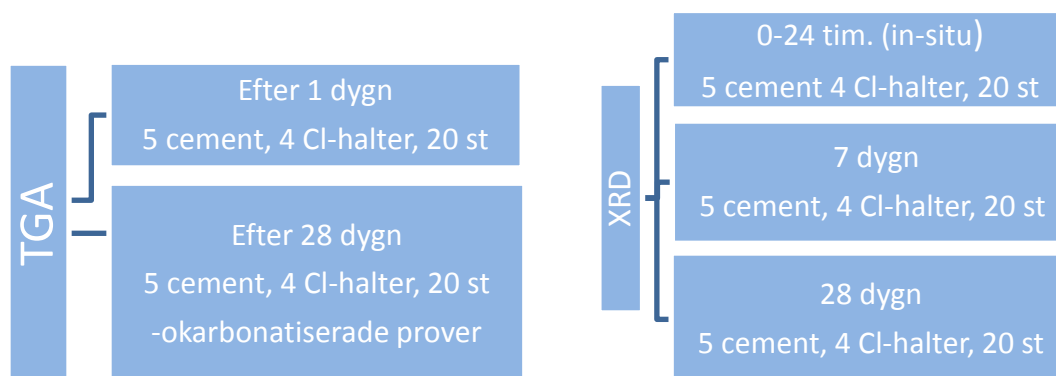
Tabell 6. Sammansättning av de bindemedel som undersöktes med TG- och XRD-analys.

Ämne (vikt%)	CEM I 42,5 N - SR 3MH/LA	CEM I 52,5 R	CEM II A- V, LA	CEM II/B -S 52,5 N	CEM III/B 42,5 N-LH/SR
CaO	63,9	62,9	55,9	58	45
SiO <sub>2</sub>	21,3	19,3	25,9	23	30
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,6	5,2	5,90	7	11
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,5	3,1	4,47	2	1
K <sub>2</sub> O	0,66	1,3	0,83		
Na <sub>2</sub> O	0,12	0,16	0,28		
MgO	1,0	1,3	1,62		
Cl <sup>-</sup>	0,01	0,04	<0,01	0,06	0,08
SO <sub>3</sub>	2,8	3,9	2,56	3,05	2,7
C <sub>3</sub> A	2,1	8,6	2,1		
Kalksten/filler	4	4	4	0	4
Flygaska	0	0	14	0	0
GGBFS (Slagg)				24	67

Tabell 7. Sammansättning av de bindemedel som i tillägg ingick i de elektrokemiska undersökningarna.

Ämne (vikt%)	CEM II A-V 52,5 N + 18 % FA	CEM II A-V, LA + 5 % silika
CaO	56,7	55,9
SiO <sub>2</sub>	22,7	25,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,1	5,90
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,6	4,47
K <sub>2</sub> O	1,2	0,83
Na <sub>2</sub> O	0,32	0,28
MgO	2,9	1,62
Cl <sup>-</sup>	0,06	<0,01
SO <sub>3</sub>	3,4	2,56
C <sub>3</sub> A	5,6	2,1
Kalksten/filler	4,6	4
Flygaska	12,2 + 18 %	14
Flygaska totalt i bindemedel	27,8	
Silika		5

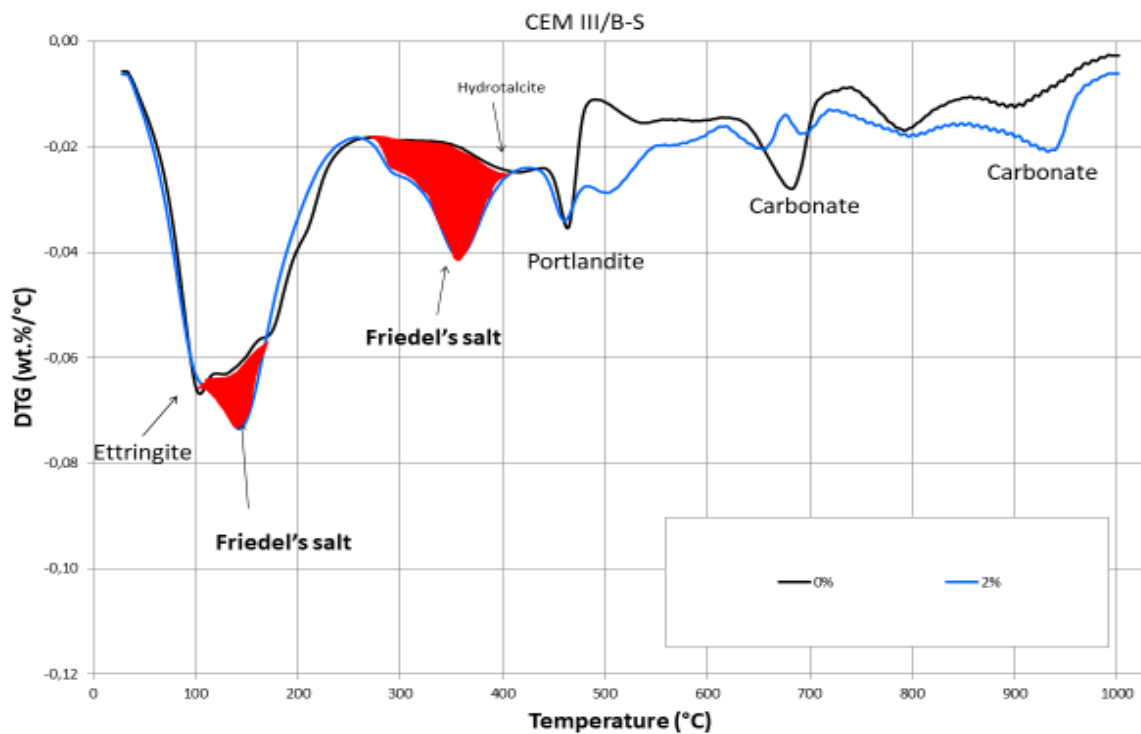
Provkroppar av de fem bindemedlen tillverkades utan ballast och med ett vatten/bindemedelstal (vbt) på 0,5. Blandningsvattnet hade en tillsats med klorider i koncentrationerna 2, 3 och 5 % av bindemedelsvikten. Utöver detta tillverkades referensprover med 0 % klorider. TG analyser utfördes även på betongprover som karbonatiserat i 2 dygn. Här redovisas endast resultat med 0 och 2 % klorider efter 28 dygn och med okarbonatiserade betongprover. *Figur 21* nedan visas analysgången i hela undersökningen. De okarbonatiserade betongproverna lagrades i en exicator fram till analysen.



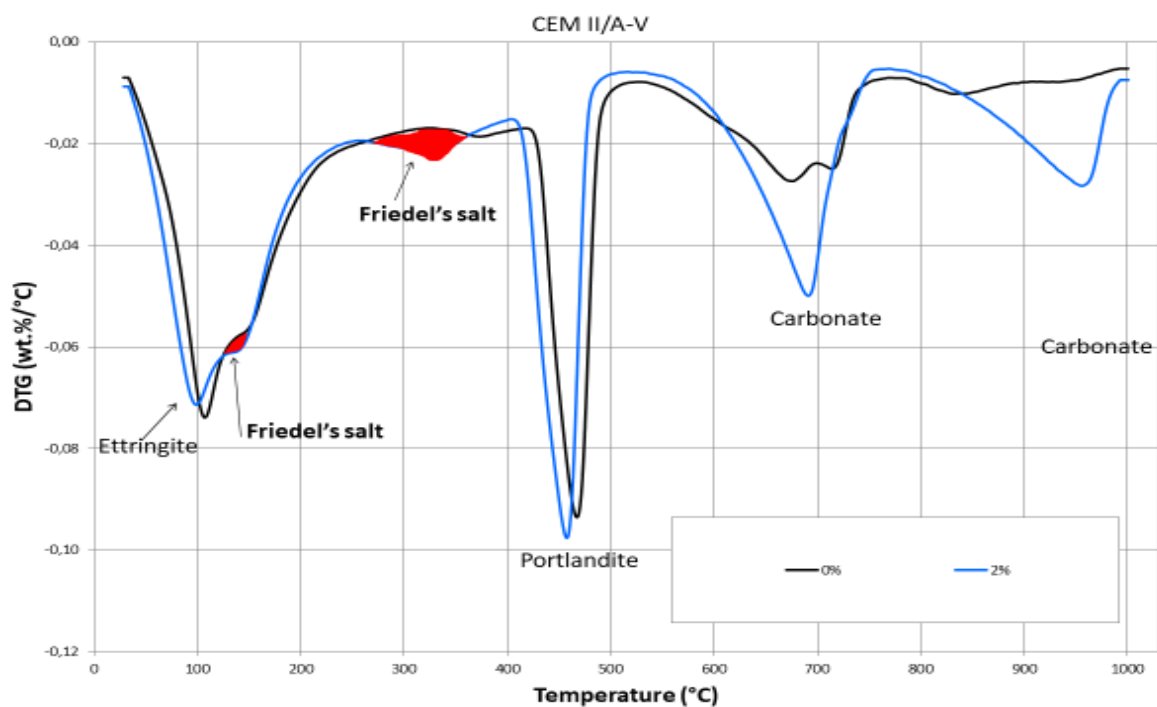
Figur 21. Analysgång och antalet prover totalt. I denna undersökning redovisas resultat med prover med 0 och 2 % Cl av bindemedelsvikten efter 28 dygns härdning med TGA samt bildningen av Friedel's salt från XRD 1, 7 och 28 dygn.

## 5.3 Resultat

I figur 22 och 23 ges exempel på TGA-diagram som visar skillnaden i bildning av Friedel's salt hos två diametralt olika bindemedel, CEM III/B 42,5 N-LH/SR (67 % slagg) och CEM II A-V, LA (14 % flygaska). Friedel's salt bildas vid två olika temperaturer beroende på mängden bundet vatten. Ytan mellan referenskurvan (0 % Cl<sup>-</sup>) och kurvan för 2 % Cl<sup>-</sup> i blandningsvattnet, här illustrerat med rött, representerar ett mått på mängden bildad Friedel's salt i vikt % av invägt prov. En ungefärlig beräknad mängd av Friedel's salt gjordes genom att integrera ytan mellan kurvorna för bindemedlen.



Figur 22. TG-diagram för CEM III med 67 % slagg efter 28 døgns härdning. 0 % (svart linje) och 2 % klorider (blå linje) i blandningsvattnet. Röd yta representerar mängd bildad Friedel's salt.



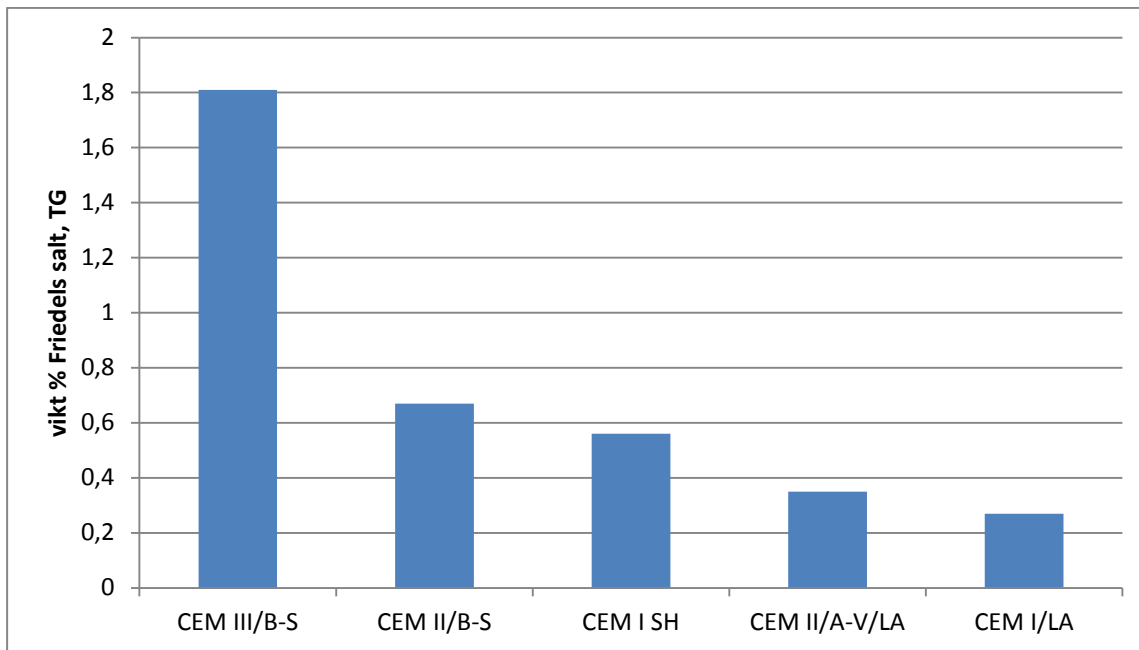
Figur 23. TG-diagram för CEM II A-V med 14 % flygaska efter 28 dagns härdning. 0% (svart linje) och 2 % klorider (blå linje) i blandningsvattnet. Röd yta representerar mängd bildad Friedel's salt.

Resultaten från de fem undersökta bindemedlen visas i figur 24. Rangordningen med avseende på förmågan att binda klorider uttryckt som mängden bildad Friedel's salt var: CEM III B-S > CEM II B-S > CEM I SH > CEM II A-V/LA > CEM I LA/SR

Med tanke på osäkerheten i metodiken kan man säga att bindemedlen grovt kan indelas i tre grupper med avseende på kapaciteten att binda klorider, A, B och C som visas i tabell 8.

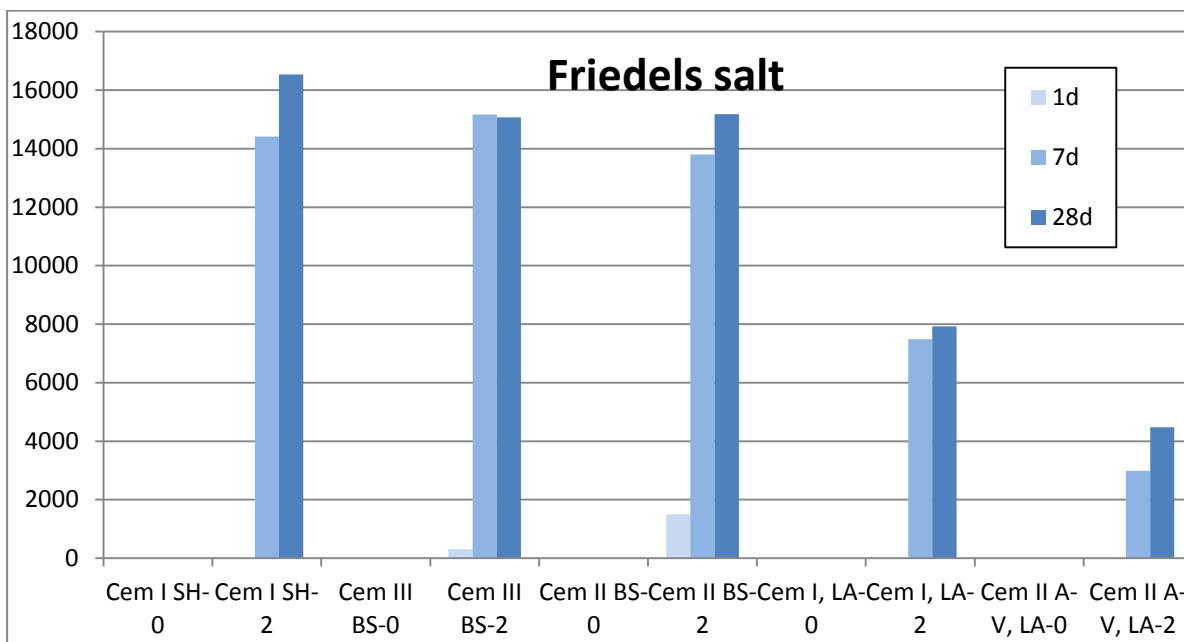
Tabell 8. Uppskattad mängd bildad Friedel's salt från TG analyserna. Uppskattningen gjordes från beräkning av rödmarkerad yta, se figur 22 och 23.

Bindemedel	Vikt %
CEM III/B-S	1.81 (A)
CEM II/B-S	0.67 (B)
CEM I SH	0.56 (B)
CEM II/A-V/LA	0.35 (C)
CEM I, LA	0.27 (C)



Figur24. Mängden bildad Friedel's salt (vikt %) efter 28 dygn i bindemedel med 2 vikt % klorider i blandningsvattnet från tabell 8.

Figur 25 visar en semi-kvantitativ bild av hur mycket Friedel's salt som bildades efter 1, 7 och 28 dygn från XRD analysen. Man kan notera att ungefär lika mycket Friedel's salt har bildats i samtliga bindemedel efter 7 dygn jämfört med 28 dygn. För referensblandningen (0 % klorider) förekom monosulfat eller ettringit istället för Friedel's salt.



Figur 25. XRD analys efter 1, 7 och 28 dygn. CPS (counts per second) på lodrät axel. 0=0% är referensblandning utan klorider och 2=2% klorider.

## 5.4 Rangordning av korrosionskänsligheten

Enligt definitionen av ett kloridtröskelvärde beror initieringen av korrosion på armeringen i betong på förhållandet mellan kloridjoner och hydroxidjoner i bindemedlets porlösningar (t.ex. Hausmann, 1967). Förhållandet i porlösningen varierar med typ av bindemedel, vct/vbt, C<sub>3</sub>A-halt, sulfathalt, monosulfat. Enligt litteraturen så startar korrosion på armeringen med vanligt portlandcement när  $\frac{[Cl^-]}{[OH^-]} > 0,6$  (mol/l).

### 5.4.1 Uppskattning av den relativa fria kloridjonskoncentrationen i bindemedlets porlösningar

Blandningsvattnet innehöll 2% klorider av bindemedelsvikten vilket medförde en kloridkoncentration på 40 000 mg/l (40 g/l). Mängden Friedel´s salt i vikt % av invägt prov erhöles från TG analysen (*tabell 8*) utgjorde ett mått på den kemiskt bundna andelen av den tillsatta mängden klorider.

Kvoten mellan blandningsvattnets kloridhalt och mängden bildad Friedel´s salt ger ett relativt mått på den fria kloridhalten i bindemedlets porlösning.

Ett exempel för CEM II A-V, LA ger en relativ kloridkoncentration i porlösningen:

$$\text{Relativ kloridmängd} = \frac{\text{kloridhalt i blandvatten } (\frac{g}{l})}{\text{mängd bildad Friedel's salt (vikt \%)} } = \frac{40}{0,35 \text{ (EM II A-V,LA)}} = 114$$

Ett värde för alla fem bindemedlen beräknades och användes nedan för uppskattning av en korrosionskänslighetsfaktor.

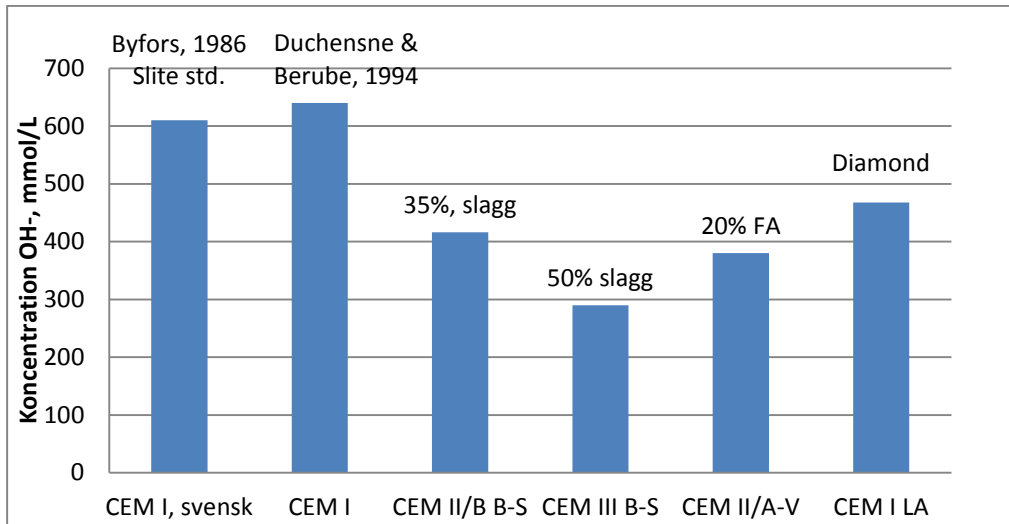
### 5.4.2 Korrosionskänslighetsfaktor

Korrosionskänslighetsfaktorn för de olika bindemedlen fås i analogi med Hausmann´s definition (Hausmann, 1967):

$$\frac{\text{relativ kloridmängd i porlösning}}{[OH^-] \text{ mol/l}} = \text{Korrosionskänslighetsfaktor}$$

där uppgifter om hydroxidjonskoncentrationer inhämtades från en litteraturstudie över analyserade porlösningssammansättningar för liknande bindemedel med samma vattenbindemedelstal (vbt=0,5) och typbeteckning, se *figur 27*, från Scott & Alexander (2016).





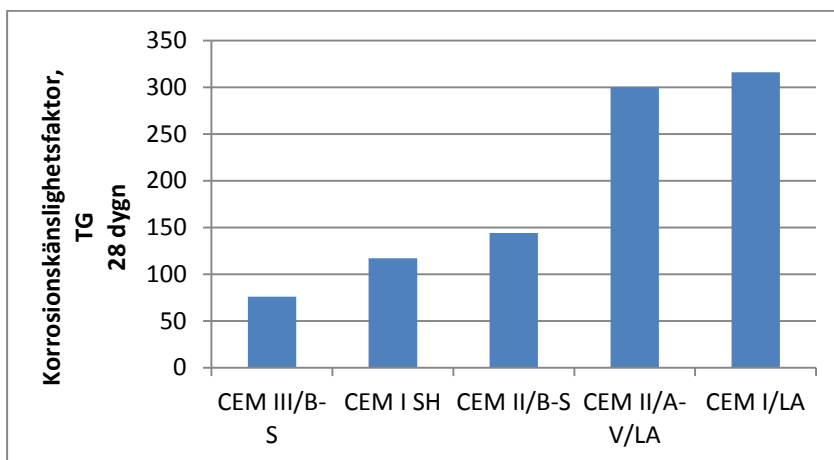
Figur 27. Hydroxidjonskoncentrationer i några bindemedels porlösningar (vct/vbt 0,5), Scott & Alexander, 2016.

Exempel på beräknad korrosionskänslighetsfaktor för två diametralt olika bindemedel:

Exempel 1: CEM II A-V, LA:  $\frac{114}{0,380} = 300$

Exempel 2: CEM III/B 42,5 N-LH/SR:  $\frac{22}{0,290} = 76$

där exempel 2 visar en låg känslighetsfaktor för ett bindemedel med stor kapacitet att kemiskt binda klorider från porlösningen och exempel 1 en hög känslighetsfaktor för ett bindemedel låg kloridbindningskapacitet. Trots att exempel 1 har en högre hydroxidjonskoncentration i porlösningen så medför ändå den högre fria kloridjonskoncentrationen att bindemedlet är mer korrosionskänsligt än bindemedlet i exempel 2. En korrosionskänslighetsfaktor för de fem undersökta bindemedlen ges i figur 28.



Figur 28. Korrosionskänslighetsfaktorn för de fem undersökta bindemedlen.

En rangordning efter korrosionskänslighetsfaktorn från *figur 28* ger följande tre grupper med minst korrosionskänsliga först:

CEM III B-S <CEM I SH och CEM II B-S <CEM II A-V/LA och CEM I LA/SR.

## 6. Diskussion

För att kunna bestämma olika bindemedels korrosionsskyddande förmåga under en betongkonstruktions livslängd är det viktigt att hänsyn tas till olika skeden som konstruktionen kommer att utsättas för under sin livslängd. När det gäller skador hos betongkonstruktionen som orsakats framför allt av kloridinerad korrosion kan konstruktionens livslängd indelas i tre olika skeden:

- Transportskedet (tiden för kloridjoner att nå armeringsstålet).
- Initieringsskedet (tiden för nedbrytning av passivskiktet hos armeringsstålet)
- Propageringsskedet (tiden då korrosion sker på armeringsstålet).

För att bedöma en konstruktionslivslängd bör hänsyn tas till samtliga tidigare nämnda skeden.

I denna undersökning har framför allt tiden till initiering av korrosion (gropfrätning) från det att kloriderna har nått stålytan och tills gropfrätning har initieras på stålytan undersökts. Tre olika accelererade elektrokemiska mätmetoder har använts och jämförts:

- Potentiostatiskt mätmetod
- Potentiodynamisk mätmetod
- Galvanostatisk mätmetod

För att kunna jämföra korrosionsskyddsegenskaperna hos olika bindemedel i betong är det viktigt att de provstänger av stål som används i undersökningarna har varit homogena på ytan, dvs inget glödskalet får förekomma på stålytan, eftersom glödskalet alltid innehåller defekter. Samtliga provstänger som ingick i undersökningarna hade innan mätningarna varit ingjutna i olika bindemedel utan klorider (passivering) och med klorider. Detta innebär att provstängerna hade fått ett passivskikt på stålytan som är beroende av de olika bindemedlens kemiska innehåll som i sin tur innebär olika förmåga att motstå gropfrätning. Det är viktigt att de betongprover som används vid de olika mätmetoderna är homogena, sprickfria och att betongen är väl vibrerad för att undvika håligheter mot stålytan.

Resultaten från fältexponeringen visade att korrosionen startar företrädesvis där håligheter mellan stål och betong finns. Detta innebär att både defekter på glödskalet och håligheter mellan betong och stålytan inverkar på var korrosionen startar.

Det är också viktigt att den laboratoriemiljö som de elektrokemiska mätmetoderna utförs har en kontrollerad miljö för att öka reproducerbarheten hos mätningarna.

Det framgår vidare av resultaten från de olika elektrokemiska mätmetoderna att rangordningen av de provade bindemedlens korrosionsskyddade förmåga överensstämmer med resultaten från fältexponeringen.

Vid betning finns risk att glödskalet inte helt kan avlägsnas och eftersom betmedlet innehåller en inhibitor som bygger upp ett passivskikt på den rena metallen vilket skulle kunna påverka

stålytans egenskaper. Den största påverkan har troligtvis betongprovernas geometri och provstängernas ytbeskaffenhet, dvs slätstål jämfört med kamstål. Med avseende betongprovernas geometri så är det fördelaktigt om den är cylindrisk eftersom det täckande betongskiktet är likadant på hela provkroppen. Detta innebär att strömspridningen också blir lika över provstängerna.

En liten spridning av mätresultaten har erhållits för släta provstänger. En större spridning har erhållits när kamstål användes. Det förklaras med att det är svårt att avlägsna bindemedlet efter den inledande förpassiveringen av provstängerna i olika bindemedel eftersom den ojämna stålytan medför att betongrester lätt fastnar. Betongresterna är i princip omöjliga att avlägsna från stålytan eftersom risken att skada passivskiktet då är stor.

För att öka träffsäkerheten i provmetodiken bör antalet provstänger ökas till exempelvis vara minst fem per bindemedel.

Som framgår att resultaten från de elektrokemiska mätningarna stämmer de väl överens med resultaten från fältexponeringarna. Det framgår vidare att resultaten från laboratorie- och fält undersökningarna överensstämmer med den analytiska TG- och XRD-undersökningen av bindemedlens korrosionsskyddande egenskaper.

TG- och XRD-undersökningen visade att bindemedlen har olika kloridbindande förmåga som i sin tur kan förklara resultaten från laboratorie- och fältundersökningarna. En litteraturstudie visade också på skillnader i hydroxidjonskoncentration i porlösningar hos olika bindemedel som liknar bindemedel som ingår i projektet. Undersökningen visade att bindemedel som innehåller slagg har bättre förmåga binda klorider eftersom större initial mängd monosulfat kan konvertera till Friedels salt. En annan faktor som har betydelse för att binda klorider är mängden kalciumaluminater ( $C_3A$ ) i portlandcement som också kan bilda Friedels salt från monosulfat under härdningsförloppet. Mängden Friedels salt som kan bildas när klorider transporteras in i betong med olika bindemedelstypers kapillärporsystem är inte helt klarlagt och fodrar fortsatta undersökningar. Under transportfasen tillkommer även sorptionseffekter som kan binda klorider.

Sammanfattningsvis kan sägas att resultaten från laboratorie- och fältmätningarna samt analyser av bindemedlens korrosionskänslighet genom TG- och XRD-analyser visade att denna kombination av mätningar ger ett bra verktyg att bedöma den korrosionssyddande förmågan hos olika bindemedel.

## 7. Slutsatser

Sammanfattningsvis kan sägas att resultaten från laboratorie- och fältmätningarna samt analyser av bindemedlens korrosionskänslighet genom TG- och XRD-analyser visade att denna kombination av mätningar ger ett bra verktyg att bedöma den korrosionsskyddande förmågan hos olika bindemedel. En sammanställning av rangordningen för bindemedlens korrosionsskyddande förmåga redovisas i *tabell 9*.

*Tabell. 9 Sammanställning av rangordningen för bindemedlens korrosionsskyddande förmåga från de olika undersökningarna. Den korrosionsskyddande förmågan rangordnas enligt: bra < 1,5 och 1,5 ≥ mindre bra < 2,5 samt dåligt ≥ 2,5*

Bindemedel	Potentio- statisk metod	Potentio- dynamisk metod	Galvano- statisk metod	Fält- provning	Korrosions- känslighets- faktor	Rangordning av korrosions- skyddande förmåga (medelvärde)
CEM II A-V, LA	3	3	3	3	3	3,0
CEM II A-V, LA+5 % silika	3	3	3	3	Ingick ej	3,0
CEM II A-V 52,5 N+18 % FA	2	stor spridning	2	3	Ingick ej	2,3
CEM I 42,5 N - SR 3 MH/LA	2	stor spridning	2	2	3	2,3
CEM I 52,5 R	1	saknas	saknas	1	2	1,3
CEM II/B-S 52,5 N	1	1	1	1	2	1,2
CEM III/B 42,5 N- LH/SR	1	1	1	1	1	1,0

Som rangordningen visar i *tabell 9* så har bindemedel med slagg och portlandcement med hög  $C_3A$  en bra korrosionsskyddande förmåga. Detta beror till största delen på kapaciteten att bilda Friedels salt från monosulfat under härdningsprocessen. Bindemedel som har en låg korrosionsskyddande förmåga har ett lågt  $C_3A$ -innehåll och en inblandning av flygaska och/eller silika. Det medför dessutom en utspädningseffekt på förmågan att bilda Friedels salt. Resultaten överensstämmer med (Page P, 1986).

För övrigt kan följande slutsatser från undersökningen dras:

- För att kunna jämföra korrosionsskyddsegenskaperna hos olika bindemedel i betong är det viktigt att de provstänger av stål som används i undersökningarna är homogena på ytan, dvs. inget glödskalet får förekomma på stålytan, eftersom glödskalet alltid innehåller defekter som påverkar resultaten.
- Vid framtagning provkroppar för elektrokemisk mätning är det viktigt att undvika spaltkorrosion i gränsyta mellan betong och luft.

- Den minsta spridningen i mätresultat har erhållits för släta provstänger istället för provstänger av kamstål. Förklaringen till detta kan vara att provstängernas glödskalet avlägsnas genom slipning istället för betning.
- Det är viktigt att de betongprover som används vid de olika mätmetoderna är homogena, sprickfria och att betongen är väl vibrerad för att undvika håligheter mot stålytan för att undvika spridningen av resultaten.
- Resultaten från fältexponeringen visade att korrosionen startar företrädesvis där håligheter mellan stål och betong finns. Detta har rapporterats tidigare i litteraturen (Zang R, 2011). Detta innebär att både defekter på glödskalet och håligheter mellan betong och stålytan inverkar på var korrosionen startar.
- Med avseende på betongprovernas geometri så är det fördelaktigt om den är cylindrisk eftersom det täckande betongskiktet är likadant på hela provkroppen. Detta innebär att strömspridningen också blir lika över provstängerna.
- En heltäckande modell som även innefattar transportskedet, dvs. kloridtransportkoefficienter eller data från fältexponeringar, har inte varit möjligt att uppnå i projektet. Detta har fått som konsekvens att en LCA-analys inte kunna beräknas.
- Den rangordning av den korrosionsskyddande förmågan hos olika bindemedel och bindemedelskombinationer kan användas som en faktor för att definiera era initierings- och propageringsskedet. På liknande sätt kan en framtagen transportkoefficient användas för att definiera transportskedet. Dessa faktorer kan sedan användas i beräkningsmodeller för bestämning av livslängd och i LCA.

## 8. Fortsatta undersökningar

Från utförda undersökningar har följande konstaterats som kan ligga till grund för fortsatta undersökningar:

- För att kunna göra uppskattning på betongkonstruktioners livslängd med avseende på kloridinitierad korrosion måste transportskedet definieras. För det föreslås att en transportkoefficient tas fram för de undersökta bindemedlen.
- Det har framkommit vid fältexponeringen att korrosionen startar vid håligheter mellan betong och stålyta. I kombination med defekter i glödskalet kan detta innebära en lokal accelererad korrosionshastighet i hålrummet.
- Eftersom kloriderna har funnits i blandningsvattnet vid gjuttillfället har eventuell bildningen av Friedels salt under transportskedet inte kunna utvärderas. Det föreslås att detta utvärderas i fortsatta undersökningar.

- I fortsatta försök föreslås att bindemedlen utvärderas också efter en längre härdningstid än 14 dygn exempelvis efter ca 100 dygn. Detta för att se långtidseffekterna av kloridbindningskapaciteten.
- Eftersom en fungerande provningsmetodik är framtagen är det möjligt att nu utöka antalet bindemedel efter önskemål referensgruppen.
- Det har framkommit indikationer på att vissa bindemedel kan förstärka passivskiktets korrosionsskyddande förmåga inte bara pga hydroxidjonskoncentrationen, utan även av bildande av mineralfaser runt stålytan. Detta skulle kunna undersökas i ett fortsatt projekt.
- Utföra egna analyser av hydroxid- och den lösliga kloridjonskoncentrationen hos de undersökta bindemedlens porlösningar. Detta kan skapa djupare förståelse för den framtagna rangordningen med avseende på korrosionskänsligheten.

## 9. Referenser och bibliografi

Ahlström J and Bror Sederholm (2013) Glödskallets inverkan på korrosionshårdigheten hos armeringsstål i betongkonstruktioner. Internal Report, Swerea KIMAB (in Swedish).

Alhozaimy, A, Raja Rizwan Hussain, Abdulaziz Al-Negheimish, 2016: Significance of oxygen concentration on the quality of passive film formation for steel reinforced concrete structures during the initial curing of concrete, *Cement and Concrete Composites* 65 (2016) 171e176.

Angst U., Elsener B., Larsen C.K. and Vennesland Ø (2009) Critical chloride content in reinforced concrete – a review. *Cement and Concrete Research* 39 (12) 1122-1138.

Baroghel-Bouny, V, X. Wang, M, Thiery, M, Saillio, F. Barberon, 2012: Prediction of chloride binding isotherms of cementitious materials by analytical model or numerical inverse analysis, *Cement and Concrete Research* 42 (2012) 1207–1224.

Boubitsas D and Tang L (2014) The influence of reinforcement steel surfaces condition on initiation of chloride induced corrosion. *Materials and Structures*, Rilem 2014

Boubitsas D., Tang L., Utgenannt P (2014) Chloride ingress in concrete exposed to marine environment – field data up to 20 years exposure. SBUF Report p 137.

Galan, I and Fredrik P. Glasser, 2015: Chloride in cement, *Advances in Cement Research*, Volume 27 Issue 2, *Advances in Cement Research*, 2015, 27(2), 63–97.

Ghods, P, 2010: Multi-Scale Investigation of the Formation and Breakdown of Passive Films on Carbon Steel Rebar in Concrete, PhD thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Carleton University Ottawa-Carleton, Institute of Civil and Environmental Engineering, February 2010.

Ghods, P, O.B. Isgor, G.A. McRae, G.P. Gub, 2010: Electrochemical investigation of chloride-induced depassivation of black steel rebar under simulated service conditions, *Corrosion Science* 52 (2010) 1649–1659.

Glass, G.K, N.R. Buenfeld, 2000: The inhibitive effects of electrochemical treatment applied to steel in concrete, *Corrosion Science* 42 (2000) 923-927.

Hansson CM and Sörensen B (1988): The threshold concentration of chloride in concrete for the initiation of reinforcement corrosion. Corrosion rates of steel in concrete, *ASTM STP 1065*, Balitmore pp 3-16.

Hausmann, D.A (1967)Steel corrosion in concrete. *Materials protection*, Nov. 1967.

Mohammed T.U and Hamada H (2006) Corrosion of steel bars in concrete with various steel surface conditions. *ACI Mater J* 103(4) pp 233-242.

Olsson, N, Barbara Lothenbachb, Véronique Baroghel-Bounyc, Lars-Olof Nilsson, 2018: Unsaturated ion diffusion in cementitious materials – The effect of slag and silica fume, *Cement and Concrete Research* 108 (2018) 31-37.

Page, P. L, N R Short and W R Holden, 1986: The Influence of different cements on chloride-induced corrosion of reinforcing steel, *Cement and Concrete research*. vol. 16, pp. 79-86, 1986.

Scott A, M.G. Alexander, 2016: Effect of supplementary cementitious materials (binder type) on the pore solution chemistry and the corrosion of steel in alkaline environments, *Cement and Concrete Research* 89 (2016) 45–55.

Sederholm B and Ahlström J (2013) Rostfria ståls korrosionshärdighet och galvaniska inverkan på kolstål i betong med hög fukt- och kloridhalt. *KIMAB Report 2013-116*, Swerea KIMAB, Stockholm 2013 (in Swedish).

Tang L., Nilsson L-O., Muhammed Basheer P.A (2012) Resistance of concrete to chloride ingress : testing and modelling. London Taylor & Francis 2012 xviii, 241 s. ISBN 978-0-415-48614-9.

Tang L., Nilsson L-O., Muhammed Basheer P.A (2012) Resistance of concrete to chloride ingress : testing and modelling. London Taylor & Francis 2012 xviii, 241 s. ISBN 978-0-415-48614-9.

Treadaway KW., Cox RN., Brown BL (1989): Durability of corrosion resisting steels in concrete. *ICE Proc* 86(2) pp 305-331.

Tuutti, K. (1982) Corrosion of Steel in Concrete, *CBI Report 4:82*, Swedish Cement and Concrete Institute, Stockholm.

Tritthart, J, 2009: Pore solution of concrete: The equilibrium of bound and free Chloride, *Materials and Corrosion* 2009, 60, No. 8.



Vollpracht, A , Barbara Lothenbach, Ruben Snellings . Johannes Haufe, 2015: The pore solution of blended cements: a review, *Materials and Structures* (2016) 49:3341–3367.

Zhang, R, Raoul Francois and Arnaud Castel, 2011: Influence of steel–concrete interface defects owing to the top-bar effect on the chloride induced corrosion of reinforcement, *Magazine of Concrete Research* Volume 63 Issue 10.