



# Rostfria ståls korrosionshär- dighet och galvaniska inverkan på kolstål i betong med hög fukt- och kloridhalt

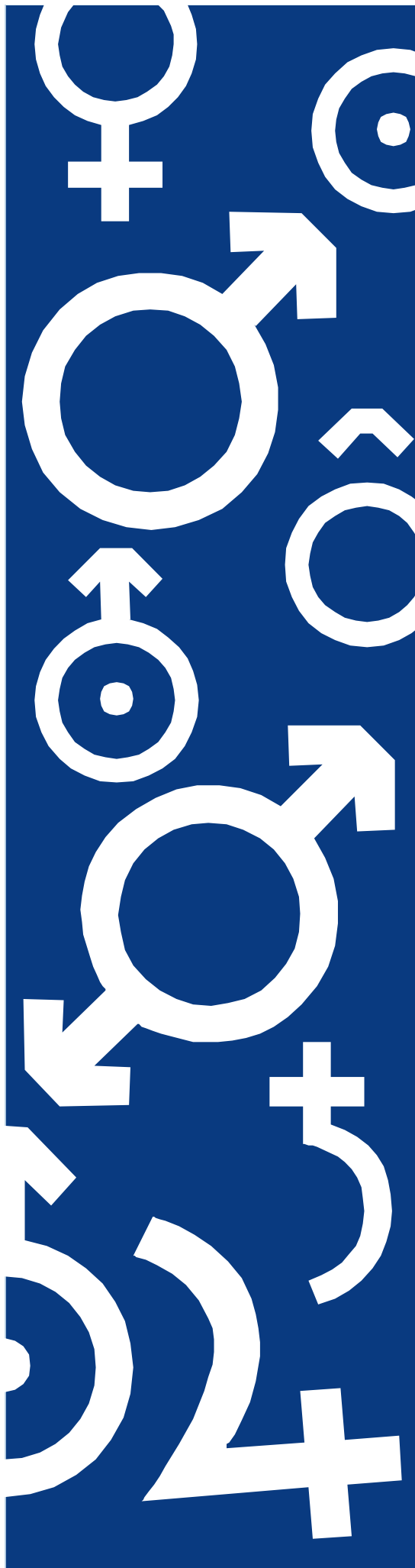
Elforsk rapport 13:81



Bror Sederholm och Johan Ahlström

September 2013

**ELFORSK**



## F O R S K N I N G S R A P P O R T

### **Rostfria ståls korrosionshårdighet och galvaniska inverkan på kolstål i betong med hög fukt- och kloridhalt**

*Bror Sederholm & Johan Ahlström*

KIMAB-2013-116

Öppen

Swerea KIMAB

Projektet har finansierats med anslag från:

Elforsk

**ELFORSK**

Göteborgs Hamn AB



Outokumpu Stainless AB

**OUTO  
KUMPU**

Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF)

**SBUF** 

Swerea KIMAB

**swerea** | **KIMAB**

Trafikverket



---

Swerea KIMAB AB ● Box 7047, 164 07 Kista  
Tel. 08-440 48 00 ● [kimab@swerea.se](mailto:kimab@swerea.se) ● [www.swereakimab.se](http://www.swereakimab.se)

Titel: Rostfria ståls korrosionshårdighet och galvaniska inverkan på  
kolstål i betong  
med hög fukt- och kloridhalt  
Författare: Bror Sederholm & Johan Ahlström  
Rapportnr: KIMAB-2013-116  
ISRN:  
ISSN: 1403-848X  
Tryck: Stockholm

# Rostfria ståls korrosionshårdighet och galvaniska inverkan på kolstål i betong med hög fukt- och kloridhalt

Författare: Bror Sederholm & Johan Ahlström

Rapport: KIMAB-2013-116

Swerea KIMAB Projektnummer: 411014

Datum: 2013-08-27

Status: Öppen

## Sammanfattning

Föreliggande rapport avslutar FoU-projektet - *Rostfria ståls korrosionsegenskaper i betong med en hög fukt- och kloridhalt*. I rapporten ingår resultat från fyra delrapporter som tidigare publicerats inom projektet. I rapporten ingår även nya resultat från två års utomhusexponering i havsvatten och i stadsatmosfär av betongingjutna provstänger av rostfritt stål (kamstänger) av stålqualiteten EN 1.4301, 1.4436, 1.4162, 1.4362 och 1.4462 samt provstänger av kolstål ihopkopplade med rostfria provstänger för att undersöka risken för galvanisk korrosion på kolstålet.

Betongblock av tre olika betongkvaliteter (OPC C45/55, CEM I, PFA C32/40, CEM IIB-V och GGBFS C32/40, CEM IIIA) ingår i undersökningarna. Vid utomhusexponering i stadsatmosfär innehåller betongblocken före exponering 2-10 mass-% klorider per bindemedelsvikt och har ett täckande betongskikt av 15 mm och ett vbt av 0,45. Vid utomhusexponering i havsvatten innehåller samtliga betongblock före exponering en total kloridhalt av 3 % klorider per bindemedelsvikt och ett täckande betongskikt av 15 mm och vbt 0,45.

Samtliga utförda undersökningarna (utomhus och på laboratorium) visar att rostfri stålarmering av stålqualiteten EN 1.4301, 1.4436, 1.4162, 1.4362 och 1.4462 har betydligt bättre förmåga att motstå korrosionsangrepp i en kloridhaltig betong jämfört med ett vanligt kolstål. Förmågan hos rostfri armering att motstå korrosionsangrepp i en kloridhaltig betong beror framförallt av halten legeringsämnen som finns i det rostfria stålet. De legeringsämnen som har stor betydelse för det rostfria stålets förmåga att motstå korrosionsangrepp är framförallt krom, nickel, molybden och kväve. Det framgår vidare att korrosionshårdigheten hos fem olika rostfria stålqualiteter som ingått i laboratorieundersökningarna ökar enligt följande ordning: (sämst) EN 1.4301 < EN 1.4162 < EN 1.4436 < EN 1.4362 < EN 1.4462 (bäst).

Vid en total kloridhalt av 3 % per bindemedelsvikt i betongblock med olika bindemedel (OPC C45/55, CEM I, PFA C32/40, CEM IIB-V och GGBFS C32/40, CEM IIIA) som exponerats delvis nedsänkta i havsvatten i två år kunde inga för ögat synliga, korrosionsangrepp konstateras på rostfria provstänger av stålqualiteten EN 1.4301, 1.4436, 1.4162, 1.4362 och 1.4462.

Swerea KIMAB AB

Box 7047  
164 07 Kista

Isafjordsgatan 28A  
164 40 Kista

Telefon 08-440 48 00  
Fax: 08-440 45 35

2010-02-15 MLu

[kimab@swerea.se](mailto:kimab@swerea.se)

[www.swereakimab.se](http://www.swereakimab.se)

Org no 5565930509



Vid ihopkoppling av rostfri armering med kolstålsarmering i en kloridhaltig betong är den galvaniska påverkan från den ingjutna rostfria armeringen på det ingjutna kolstålet helt försumbar efter två års exponering i havsvatten.

Rostfritt stål (plåt, pumpar, etc) som inte är ingjutet i betong, och som exponeras fritt nedsänkt i ett kloridhaltigt vatten och ihopkopplad med ingjuten kolstålsarmering, kommer att öka risken för galvanisk korrosion på den ingjutna stålarmingen. Hur stor denna ökning blir är beroende av ytförhållandet mellan det rostfria materialet (katodyta) och den ingjutna stålarmingen (anodyta) som är i kontakt med det kloridhaltiga vattnet via sprickor eller andra defekter i betongen.

Samtliga utförda undersökningar i betong med en hög kloridhalt visade att betongens bindemedel har en försumbar inverkan på de rostfria provstängernas korrosionshastighet och initiering av gropfrätning.

För att undvika armeringskorrosion i betongkonstruktioner som är utsatta för klorider rekommenderas användning av rostfri armering vid nybyggnation på utvalda delar av betongkonstruktionen som kan bli utsatt för armeringskorrosion. Exempel på sådana konstruktionsdelar skulle kunna vara kantbalkar till betongbroar som är utsatta för tösalter. Eventuellt kan rostfri armering användas i stället för stålarmering i brobaneplattan utan att isolering behöver användas mellan betong och asfalt.

## Summary

The present report concludes the R&D project *Corrosion properties of stainless steels in concrete with a high content of moisture and chloride*. The report includes results from four interim reports previously published within the project. The report also includes recent results from two years of outdoor exposure in sea water and in urban atmosphere of stainless steel test bars (ribbed bars) of stainless steel grades EN 1.4301, 1.4436, 1.4162, 1.4362 and 1.4462 cast in concrete, as well as of test bars of carbon steel electrically coupled to stainless steel test bars for investigation of the risk of galvanic corrosion on the carbon steel.

Concrete blocks of three different concrete qualities (OPC C45/55, CEM I, PFA C32/40, CEM IIB-V och GGBFS C32/40, CEM IIIA) were included in the investigations. In the outdoors exposure in urban atmosphere the concrete blocks contained 2-10 mass-% of chlorides by binder weight before exposure and had a concrete cover of 15 mm and a water/cement ratio of 0,45. In the outdoor exposure in seawater all concrete blocks had a total chloride content of 3% chlorides by binder weight before the exposure and a concrete cover of 15 mm and a water/cement ratio of 0,45.

All the performed investigations (outdoors and laboratory) show that stainless steel reinforcement of steel grades EN 1.4301, 1.4436, 1.4162, 1.4362 and 1.4462 has a significantly better resistance to corrosion attack in a chloride-containing concrete compared to ordinary carbon steel. The ability of stainless steel reinforcement to resist corrosion attack in a chloride-containing concrete is primarily dependent on the alloying elements content in the stainless steel. The alloying elements that primarily have a major importance on the ability of the stainless steel to withstand corrosion attack are chromium, nickel, molybdenum and nitrogen. The investigations further showed that the corrosion resistance of the five different stainless steels in the laboratory tests increased in the following order: EN 1.4301(worst) < EN 1.4162 < EN 1.4436 < EN 1.4362 < EN 1.4462 (best).

At a total chloride content of 3 % by weight of binder in concrete blocks with different binders (OPC C45/55, CEM I, PFA C32/40, CEM IIB-V and GGBFS C32/40, CEM IIIA) that were exposed partly submerged in seawater for two years no visible corrosion attacks were observed on stainless steel test bars of the steel grades EN 1.4301, 1.4436, 1.4162, 1.4362 och 1.4462.

On connecting stainless steel reinforcement electrically with carbon steel reinforcement in a chloride-containing concrete the galvanic effect from the cast-in stainless steel reinforcement on the cast-in carbon steel is wholly negligible after two years of exposure in sea water.

Stainless steel (sheet, pumps etc) that is not cast in concrete and that is exposed freely immersed in a chloride-containing water and connected to cast-in carbon steel will increase the risk of galvanic corrosion on the cast-in carbon steel reinforcement. The magnitude of this increase will depend on the area ratio between the stainless steel part (cathodic surface) and the cast-in steel reinforcement (anodic surface) that are in contact with the chloride-containing water through cracks or other defects in the concrete..

Swerea KIMAB AB

Box 7047  
164 07 Kista

Sisajordsgatan 28A  
164 40 Kista

Telefon 08-440 48 00  
Fax: 08-440 45 35

2010-02-15 MLu

[kimab@swerea.se](mailto:kimab@swerea.se)

[www.swereakimab.se](http://www.swereakimab.se)

Org no 5565930509



All of the studies undertaken in concrete with a high chloride content showed that different binders in the concrete has a negligible impact on the corrosion rate and initiation of pitting of the stainless steel test rods.

In order to avoid reinforcement corrosion in concrete structures that are exposed to chlorides the use of stainless steel reinforcement is recommended in selected parts of new structures that may be subject to reinforcement corrosion. An example of such structural parts are the edge beams on concrete bridges that are exposed to de-icing salts. Stainless steel reinforcement may optionally also be used instead of carbon steel reinforcement in bridge decks, without insulation being necessary between the concrete and the asphalt.

# Innehåll

|       |                                                                                                                                         |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Inledning.....                                                                                                                          | 9  |
| 2     | Bakgrund .....                                                                                                                          | 9  |
| 3     | Syfte .....                                                                                                                             | 11 |
| 4     | Litteraturundersökning.....                                                                                                             | 11 |
| 4.1   | Rostfria ståls korrosionshårdighet i betong .....                                                                                       | 11 |
| 4.2   | Rostfria ståls galvaniska inverkan på kolstål.....                                                                                      | 12 |
| 4.3   | Accelererad provningsmetod för rostfritt stål i betong .....                                                                            | 19 |
| 5     | Experimentell teknik .....                                                                                                              | 21 |
| 5.1   | Långtidsexponering i havsvatten .....                                                                                                   | 21 |
| 5.1.1 | Provningsplats.....                                                                                                                     | 23 |
| 5.1.2 | Provstänger av kolstål .....                                                                                                            | 24 |
| 5.1.3 | Rostfria provstänger .....                                                                                                              | 24 |
| 5.1.4 | Utvärdering av korrosionshastighet och lokala angrepp .....                                                                             | 24 |
| 5.1.5 | Betongkvalitet och tillverkning av betongblock.....                                                                                     | 25 |
| 5.2   | Utomhusexponering av rostfri armering ingjutna i betongblock med hög kloridhalt.....                                                    | 26 |
| 5.2.1 | Provstänger av kolstål .....                                                                                                            | 26 |
| 5.2.2 | Rostfria provstänger .....                                                                                                              | 27 |
| 5.2.3 | Utvärdering av korrosionshastighet och lokala angrepp .....                                                                             | 28 |
| 5.2.4 | Betongkvalitet och tillverkning av betongblock.....                                                                                     | 28 |
| 5.3   | Laboratorieundersökning – galvanisk korrosion .....                                                                                     | 29 |
| 5.3.1 | Rostfria ståls galvaniska inverkan på ingjuten kolstål .....                                                                            | 29 |
| 5.3.2 | Provstänger ingjutna i betongcylindrar .....                                                                                            | 30 |
| 5.3.3 | Rostfria stålrör .....                                                                                                                  | 31 |
| 5.3.4 | Betongcylindrarnas sammansättning .....                                                                                                 | 31 |
| 5.3.5 | Utvärdering av elektrokemisk potential av galvanisk korrosionsström.....                                                                | 32 |
| 5.3.6 | Utvärdering av korrosionshastighet .....                                                                                                | 32 |
| 5.4   | Undersökning av kritisk kloridtröskelvärde för rostfritt stål i betong – laboratorieundersökning.....                                   | 32 |
| 5.4.1 | Undersökning av kritisk kloridtröskelvärde hos rostfritt stål i kloridhaltig betong .....                                               | 32 |
| 5.4.2 | Provmaterial.....                                                                                                                       | 33 |
| 5.4.3 | Provkropparnas utseende och betongkvalitet .....                                                                                        | 34 |
| 6     | Resultat och diskussion .....                                                                                                           | 35 |
| 6.1   | Långtidsprovning i havsvatten.....                                                                                                      | 35 |
| 6.1.1 | Betongblockens utseende efter två års exponering i havsvatten.....                                                                      | 35 |
| 6.1.2 | Utvärdering av provstängernas utseende efter två års exponering i havsvatten .....                                                      | 36 |
| 6.1.3 | Utvärdering av korrosionshastighet och lokala korrosionsangrepp efter två års exponering i havsvatten .....                             | 37 |
| 6.2   | Utomhusexponering av rostfri armering ingjutna i betongblock med hög kloridhalt.....                                                    | 42 |
| 6.2.1 | Betongblockens utseende efter två års utomhusexponering.....                                                                            | 42 |
| 6.2.2 | Provstängernas utseende efter två års utomhusexponering .....                                                                           | 43 |
| 6.2.3 | Korrosionshastighet och gropfrätning hos provstänger av kolstål och rostfritt stål efter två års exponering i kloridhaltig betong ..... | 53 |
| 6.3   | Laboratorieundersökning – galvanisk korrosion .....                                                                                     | 58 |

|       |                                                                                                         |    |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.3.1 | Utvärdering av utseende hos betongcylindrar, ingjutna provstänger av kolstål och rostfria stålrör ..... | 58 |
| 6.3.2 | Utvärdering av korrosionshastighet hos ingjutna provstänger av kolstål....                              | 60 |
| 6.3.3 | Utvärdering av elektrokemisk potential och galvanisk korrosionsström.....                               | 60 |
| 6.4   | Undersökning av kritisk kloridtröskelvärde för rostfritt stål i betong – laboratorieundersökning .....  | 63 |
| 6.4.1 | Undersökning av korrosionsutseende hos provstänger.....                                                 | 65 |
| 6.4.2 | Förslag till vidareutveckling .....                                                                     | 65 |
| 7     | Slutsatser och rekommendationer.....                                                                    | 72 |
| 8     | Referenser .....                                                                                        | 73 |

# 1 Inledning

Föreliggande slutrapport avslutar projektet – *Rostfria ståls korrosionshårdighet och galvaniska inverkan på stålarmering i en kloridhaltig betong med hög fukthalt*.

Slutrapporten omfattar en kort sammanfattning av rostfria ståls material- och korrosionsegenskaper i olika miljöer, en litteraturundersökning av rostfria ståls korrosionsegenskaper i betong samt resultat från ett och två års utomhusexponering av betongingjutna provstänger (kamstål) av olika rostfria stålqualiteter och låglegerat kolstål. Dessutom ingår i exponeringen ingjutna ihopkopplade provstänger av rostfritt stål (fyra stålqualiteter) och kolstål för att undersöka rostfria stålens galvaniska inverkan på kolstål i betong.

Projektet startades under våren 2008 och har finansierats med anslag från:

Elforsk  
Göteborgs Hamn AB  
Outokumpu Stainless AB  
Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF)  
Swerea KIMAB  
Trafikverket

Den till projektet knutna arbetsgruppen har haft följande medlemmar:

Jonas Bergfors, OKG  
Manoucher Hassansadeh, Vattenfall AB (representerar Elforsk)  
Valle Janssen, Trafikverket  
Thomas Krekula, NCC Construction AB  
Sara Randström, Outokumpu, Stainless AB  
Mikael Schönning, Outokumpu Stainless AB  
Yngve Thorén, Trafikverket  
Stig Östfjord, Göteborgs Hamn AB

# 2 Bakgrund

Rostfritt stål har erkänt goda korrosionsegenskaper i kloridhaltiga och alkaliska miljöer. Det finns ett stort intresse dels att använda rostfri armering i speciellt utsatta delar av armerade betongkonstruktioner och dels att i större omfattning vid reparationer ersätta rostig armering med rostfri armering.

Om hänsyn tas inte enbart till direkta materialkostnader för armeringen utan också till underhållskostnader – som huvudsakligen orsakas av korrosion på stålarmeringen – under t ex en 100 års period kommer skillnaderna mellan rostfri armering och vanlig stålarmering att minska. Den totala kostnaden under konstruktionens livstid blir sannolikt lägre med rostfri armering.

I en undersökning utförd av Swerea KIMAB 2008 framgick det att rostfritt stål kan kopplas ihop med kolstål i en normalfuktad betong utan att det ingjutna kolstålet nämnvärt påverkas galvaniskt av det ingjutna rostfria stålet, **Ref 1**. Det framgick vidare att det råder en viss osäkerhet för risken för galvanisk korrosion vid en mycket hög fukt- och kloridbelastning av betongen. Detta gäller också om det ingjutna kolstålet är ihopkopplat med t ex en rostfri stålplåt som exponeras i kloridhaltigt vatten. Det är allmänt känt om att om kolstål och rostfritt stål kopplas ihop med varandra och sänks ned i ett kloridhaltigt vatten så kommer kolstålet att utsättas för kraftig korrosion.

Den galvaniska korrosionseffekten skulle kunna bli större i en betong med hög fukt-och kloridhalt (högre ledningsförmåga i betongen) som förekommer i vägmiljöer genom regn, snösmältning och för konstruktioner som står delvis i vatten såsom bropelare och hamnkajer eller konstruktioner som är helt nedsänkta i vatten såsom kylvattenvägar i kärnkraftverk.

För att skydda betongpålar till hamnkajer mot nötning från t ex is används plåt av rostfritt stål. Om de rostfria plåtarna vid fastmonteringen oavsiktligen får elektrisk kontakt med den ingjutna stålarmeringen skulle detta möjligen kunna ge upphov till galvanisk korrosion på den ingjutna stålarmeringen eftersom resistiviteten i vattenmättad betong (de öppna porerna och eventuellt öppna sprickor är helt fyllda med vatten) är betydligt lägre än i en normalfuktad betong (öppna porer och sprickor är eventuellt delvis vattenfylld)

### 3 Syfte

Syftet med denna undersökning är:

- att fastställa risken för galvanisk korrosion på kolstålsarmering vid elektrisk kontakt med rostfri armering i betong med hög klorid- och fukthalt
- att fastställa rostfria ståls korrosionshårdighet i betong med hög klorid- och fukthalt
- att ta fram några lämpliga rostfria stålqualiteter som kan användas tillsammans med kolstålsarmering i betongkonstruktioner med hög klorid- och fukthalt
- att komplettera tidigare riktlinjer som utarbetats för optimalt val av rostfria armeringsstål vid nybyggnation och vid reparation med rostfri armering.

### 4 Litteraturundersökning

#### 4.1 Rostfria ståls korrosionshårdighet i betong

Rostfria ståls korrosionsegenskaper i en icke karbonatiserad betong kan jämföras med ett passiverat kolstål i samma miljö. De elektrokemiska potentialerna för rostfritt stål och passiverat kolstål i betong är jämförbara. Vid en karbonatisering av betongen, då pH-värdet i betongen sjunker från ca 12,5 till < 10, ökar risken för korrosionsangrepp på kolstålet. De rostfria stålen kommer däremot inte att bli mer utsatta för korrosionsangrepp genom karbonatiseringen. Om klorider tränger in i den karbonatiserade betongen ökar dock risken för lokala korrosionsangrepp (gropfrätning) både på kolstål och rostfria stål. Hur stor risken är att ett rostfritt stål utsätts för gropfrätning beror framför allt på halten legeringsämnen i det rostfria stålet. De legeringsämnen som har störst betydelse för förmågan att motstå gropfrätning är krom, molybden och kväve. Dessa legeringsämnen påverkar passivfilmens korrosionskyddande egenskaper. Vid kloridhalter överstigande 0,4 % klorider per cementvikt i en karbonatiserad betong finns risk för korrosionsangrepp på kolstål **Ref 16**. För låglegerade rostfria stål (PRE < 20) har gropfrätning konstaterats vid totala kloridhalter överstigande 1 % klorider per cementvikt. För höglegerade rostfria stål (PRE > 20) har inga korrosionsangrepp konstaterats vid så höga kloridhalter som 5 % klorider per cementvikt **Ref 1** och **Ref 16**.

I en undersökning utförd av Nürnberger et. al **Ref 2** har provstänger (både svetsade och icke svetsade) av sju olika rostfria kvaliteter; X2CrNiMoN17-13-5, X2CrNiMoN 22-5-3, X6CrNiMoTi17-12-2, X6Cr17, X20Cr13, X2CrNi12 och X10CrAl7 exponerats 36 månader utomhus ingjutna i betongblock (både karbonatiserade och icke karbonatiserade). Den totala kloridhalten per cementvikt i betongblocken var 1, 3 och 5 %. Efter exponeringen slogs blocken isär och provstängernas korrosionsutseende utvärderades okulärt. Det framgår av utvärderingen av provstängernas utseende efter utomhusexponeringen att endast provstänger av stålqualiteterna EN 1.4571 (X6CrNiMoTi17-12-2) och EN1.4462 (X2CrNiMoNi22-5-3) var helt oangripna av korrosion (gäller både svetsade och icke svetsade provstänger).

I en annan undersökning utförd av Hewitt & Tullmin **Ref 3** har korrosionshårdigheten hos olika rostfria stål (X6CrAl13, X6Cr17, X5CrNi18-10 och X5CrNiMo) i kloridhaltig betong utvärderats efter 10 års utomhusexponering. De rostfria provstängerna hade varit ingjutna i betongblock med olika vct, cementhalt och betonghållfasthet. Det täckande betongskiktet var antingen 10 eller 20 mm och kloridhalten varierade mellan 0 och 3,2 vikt-%. Utvärderingen av korrosionshårdigheten av de olika rostfria stålen visade att inga allvarliga korrosionsangrepp kunde påvisas på provstänger av kvaliteterna X5CrNi18-10 och X5CrNiMo17-12-2 i kloridhaltig betong. För de ferritiska rostfria stålen X6CrAl13 och X6Cr17 konstaterades en kraftig gropfrätning vid en kloridhalt av 1-2 vikt-% (vct 0,75). Kraftig gropfrätning kunde också påvisas på de ferritiska rostfria stålen vid en kloridhalt av 2-3 % per cementvikt (vct 0,6).

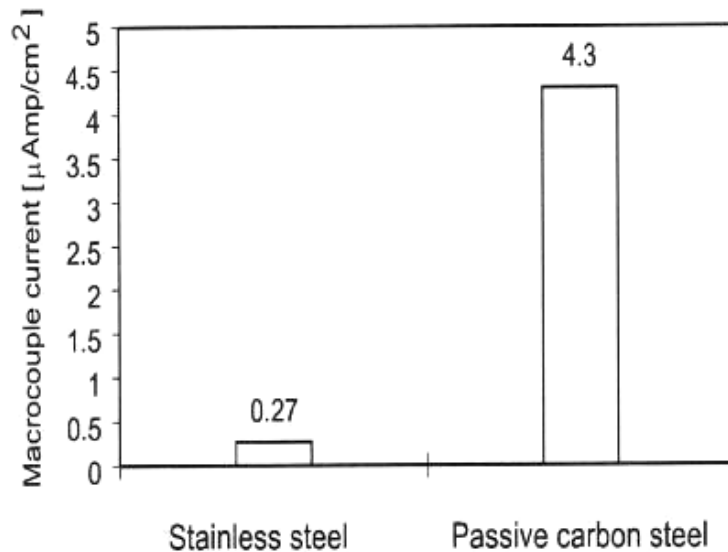
Enligt Bertolini och Pediferri **Ref 4** kan austenitiska rostfria stål av kvaliteten EN 1.4207 (X2CrNi18-8) och EN 1.4436 (X2CrNiMo17-12-2) eller duplexstål av kvaliteten EN 1.4460 (X3CrNiMoN27-5-2) användas utan någon risk för korrosionsangrepp i en icke karbonatiserad betong med en kloridhalt av 5 % . Även om de nämnda rostfria stålen är svetsade (risk för svetsoxider) kan de användas utan några problem med korrosionsangrepp i en icke karbonatiserad betong med en kloridhalt av 3,5 % klorider per torr cementvikt.

När det gäller användning av rostfria stål i karbonatiserad betong med olika kloridhalter ges inga rekommendationer för val av stålqualität. Däremot menar man att PRE-talet möjligen skulle kunna användas vid val av rostfri stålqualität. Vidare rekommenderas en minsta halt molybden av 2,5 % vid höga kloridhalter **Ref 4**.

## 4.2 Rostfria ståls galvaniska inverkan på kolstål

En fråga som har diskuterats är möjligheten att använda rostfri armering tillsammans med kolstålsarmering i betongkonstruktioner utan att kolstålet utsätts för en galvanisk påverkan från det rostfria stålet. Det finns idag ett stort intresse att använda rostfri armering i nya betongkonstruktioner på speciellt korrosionsutsatta delar, såsom dilatationsfogar och kantbalkar till broar och i skvalpzonen hos marina betongkonstruktioner (bropelare, kajer). Av stort intresse är även möjligheten att ersätta delvis gammal och sönderrostad stålarmring med rostfri armering vid reparation av betongkonstruktioner.

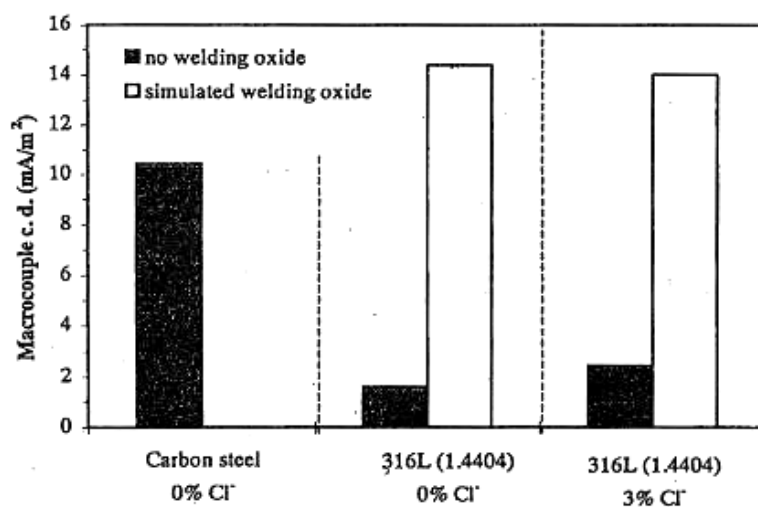
Det finns några publicerade undersökningar som behandlar rostfria ståls galvaniska inverkan på kolstål i betong. Undersökningar är bland annat utförda i Danmark, **Ref 5**, Italien, **Ref 6** och i USA, **Ref 7**. Från de danska och italienska undersökningarna framgår det att austenitiska rostfria stål i elektrisk kontakt med kolstål i betong inte ökar risken för galvanisk korrosion i icke karbonatiserad betong. Anledningen är att skillnaden i elektrokemisk potential mellan ett passiverat kolstål i betong och ett rostfritt stål i betong är mycket liten. Detta innebär att den drivande kraften för galvanisk korrosion mellan rostfria stål och passiverat kolstål i en icke karbonatiserad betong är försumbar. Det framgår vidare att ett passiverat kolstål i betong har större galvanisk inverkan på ett korroderande kolstål än vad ett austenitiskt rostfritt stål har på ett korroderande kolstål, **figur 1**.



**Figure 6** Macrocouple current for stainless steel and passive carbon steel.

**Figur 1** Resultat från mätningar av makrocellström mellan passiverat kolstål och korroderande kolstål respektive austenitiskt rostfritt stål och korroderande kolstål **Ref 5**

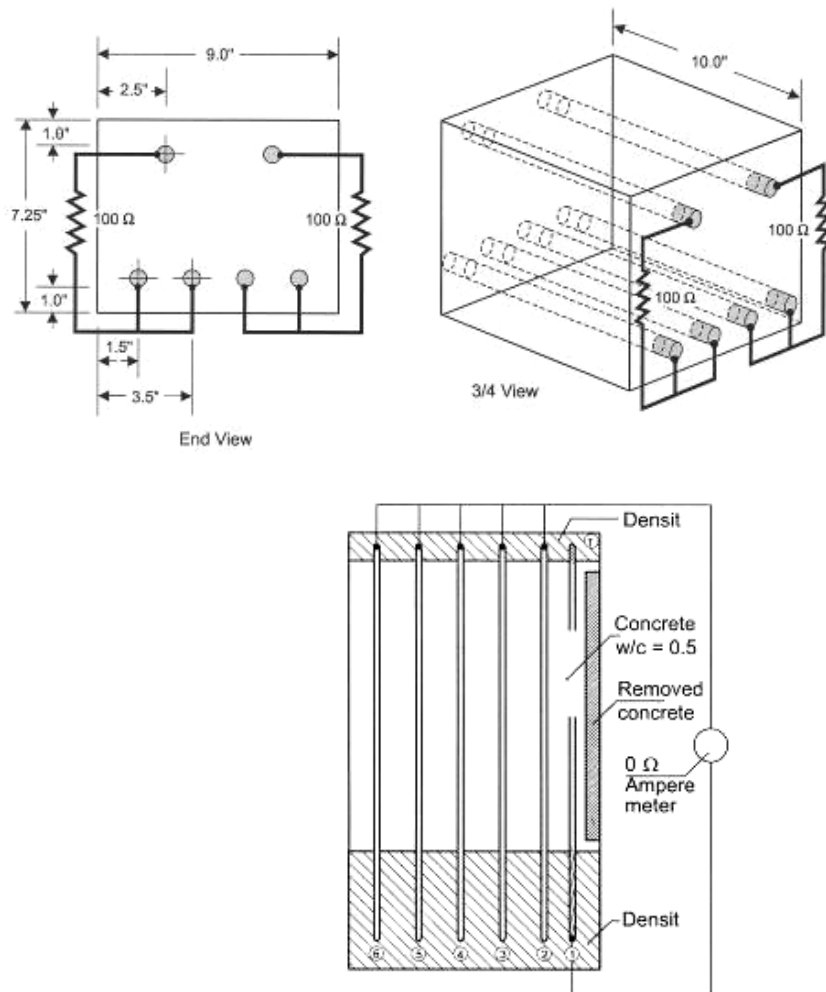
Anledningen till detta anses vara att katodreaktionen (syrgasreduktionen) är kinetiskt hämmad på den austenitiska rostfria stålytan, och att kinetiken för syrgasreduktion är mer gynnsam på passiverat kolstål än på austenitiskt rostfritt stål. Kinetiken för syrgasreduktion på austenitiskt rostfritt stål påverkas, bland annat av förekomst av svetsoxider på metallytan. Dessa gynnar kinetiken hos katodreaktionen, och förekomsten av svetsoxider på den rostfria stålytan medför att reaktionshastigheten blir i paritet med eller snabbare än på passiverat kolstål, **figur 2**.



**Fig. 5:** Macrocouple current density exchanged between a corroding bar of carbon steel in 3% chloride contaminated concrete connected with a (parallel) passive bar of: carbon steel in chloride free concrete, on 316L (1.4404) stainless steel in chloride free concrete or in 3% chloride contaminated concrete (20°C, 95% R.H.) Results on stainless steel bars with simulated welding scale are also reported /19/.

**Figur 2** *Inverkan av svetsoxider på makrocellströmmen mellan austenitiskt rostfritt stål (EN 1.4436) och passiverat respektive aktivt kolstål, Ref 8.*

I den amerikanska undersökningen, **Ref 7** har olika rostfria stålqualiteters (ASTM 304 = EN 1.4301, ASTM 316LN=EN 1.4404, ASTM 2205 = EN 1.4462) galvaniska inverkan på kolstål (både passiverat och aktivt stål) i betong undersökts. I **figur 3** visas schematiskt försöksupställningar för kontinuerliga mätningar av makrocellströmmar mellan olika ihopkopplade provmaterial med nollresistansamperemeter respektive multimeter.



**Figure 1** Experimental model. See also Figure 3 and Figure 4.

**Figur 3** Schematisk beskrivning av försöksupställningar vid mätning av makrocellström (galvanisk ström) mellan olika material, **Ref 7**).

Makrocellströmmens storlek och riktning mellan de olika stålqualiteterna bestämdes genom att mäta spänningsfallet över ett 100-ohms motstånd mellan provstänger av olika stålqualiteter. Mätningarna utfördes kontinuerligt under två år. Under exponeringen bevattnades betongblockens övre sida med en mättad saltlösning. I **tabell 1** visas en sammanfattning av medelvärdet av samtliga mätningar av makrocellströmmen som utförts under exponeringstiden (700 dagar). Den högsta makrocellströmmen uppmättes mellan korroderande provstängerna av kolstål och passiverade provstängerna av kolstål. Vid en uppmätt positiv makrocellström gick strömmen från de övre provstängerna genom betongen och in till de nedre provstängerna. Om den uppmätta makrocellen var negativ innebar det att makroströmmen gick från de nedre provstängerna genom betongen in till de övre provstängerna (se figur 5 överst till höger). Det framgår vidare av tabellen att makrocellströmmen är betydligt högre (ca faktor 10) mellan 2205 Duplex och kolstål än mellan de austenitiska rostfria stålerna och kolstål.

*Tabell 1 Medelvärdet av kontinuerligt uppmätta makrocellströmmar under en 700 dagars period, Ref 7.*

**Table 3. Macrocell Currents Densities for Various Groups of Test Concrete Blocks**

| Test Blocks     | Mean Macrocell Current ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) <sup>a</sup> |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------|
| CS/CS           | 0.414 $\pm$ 0.0008                                                |
| CS (bent)/CS    | 0.857                                                             |
| 316LN/316LN     | 0.0000                                                            |
| 316LN/CS        | -0.0038                                                           |
| 316L (bent)/CS  | -0.0031                                                           |
| 304/304         | -0.0002                                                           |
| 304/CS          | -0.0026                                                           |
| 304 (bent)/CS   | -0.0004                                                           |
| 2205/2205       | 0.0004                                                            |
| 2205/CS         | -0.0286                                                           |
| 2205 (bent)/CS  | -0.0058                                                           |
| CB/CB           | 0.0000                                                            |
| CB (w/holes)/CB | -0.0001                                                           |
| CB/CS           | -0.0077                                                           |
| CB (bent)/CS    | -0.0109                                                           |

CS = carbon steel bars; CB = clad bars.

<sup>a</sup>The sign indicates the direction of current flow between the top and bottom mats.

I **figurerna 4-7** visas resultat från de kontinuerliga mätningarna av makrocellströmmar mellan olika rostfria stålqualiteter och kolstål. Från figurerna framgår det att makrocellströmmen mellan det duplexa 2205 stålet (EN 1.4462) och kolstål ökar kraftigt efter ca 600 dagars exponering, **figur 4**. Ökningen av makrocellströmmen mellan de austenitiska rostfria stålerna och kolstål var betydligt mindre än ökningen mellan 2205 duplex (EN 1.4462) och kolstålet, **figur 5 och 6**. Den högsta makrocellströmmen uppmättes mellan passiverat kolstål och aktivt kolstål, **figur 7**.

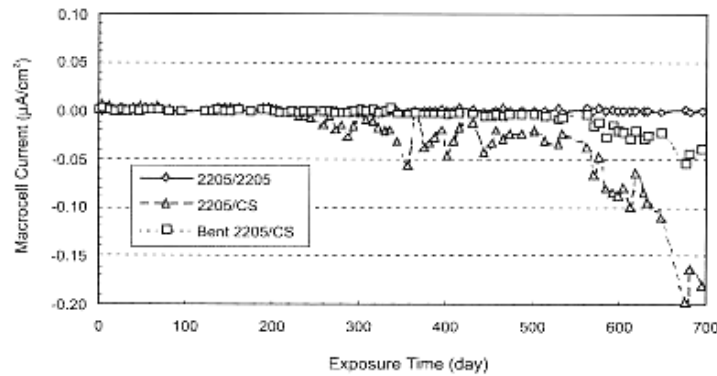


Figure 7. Macrocell Currents of Test Concrete Blocks with 2205 Duplex Stainless Steel Bars in Various Bar Combinations. The macrocell currents were normalized to the surface area of the top bars in the concrete blocks.

**Figur 4** Kontinuerliga mätningar av makrocellström mellan 2205 Duplex och kolstål i betong under 700 dagars utomhusexponering, Ref 7

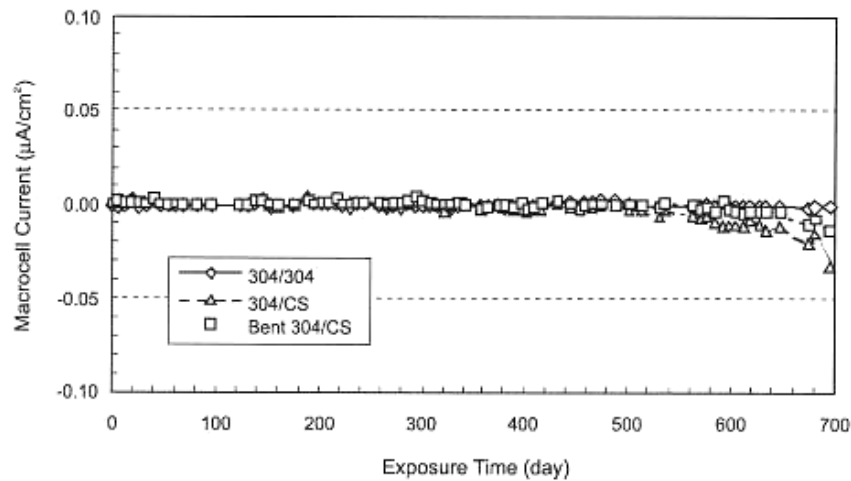


Figure 6. Macrocell Currents of Test Concrete Blocks with 304 Stainless Steel Bars in Various Bar Combinations. The macrocell currents were normalized to the surface area of the top bars in the concrete blocks.

**Figur 5** Kontinuerliga mätningar av makrocellström mellan austenitiskt rostfritt stål (ASTM 304) och kolstål i betong under 700 dagars utomhusexponering, Ref 7.

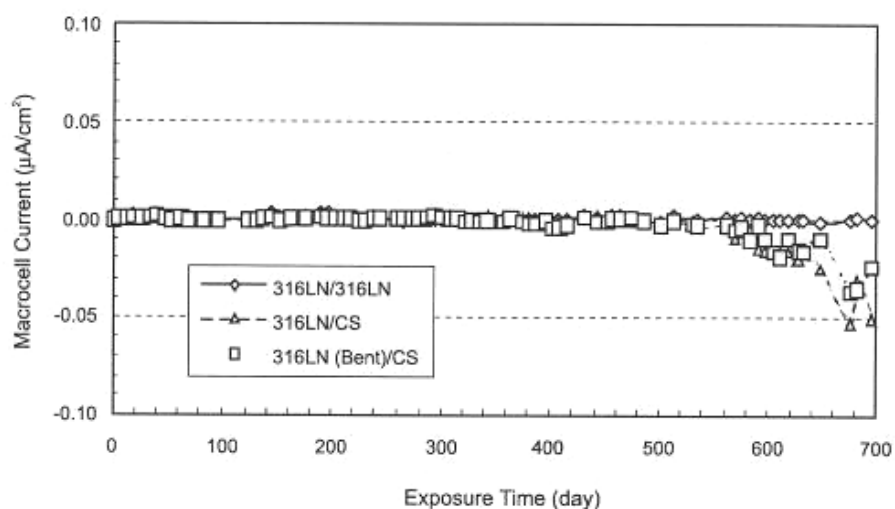


Figure 5. Macrocell Currents of Test Concrete Blocks with 316LN Stainless Steel Bars in Various Bar Combinations. The macrocell currents were normalized to the surface area of the top bars in the concrete blocks.

**Figur 6** Kontinuerliga mätningar av makrocellström mellan austenitiskt rostfritt stål (ASTM 316LN) och kolstål i betong under 700 dagars utomhusexponering, Ref 7.

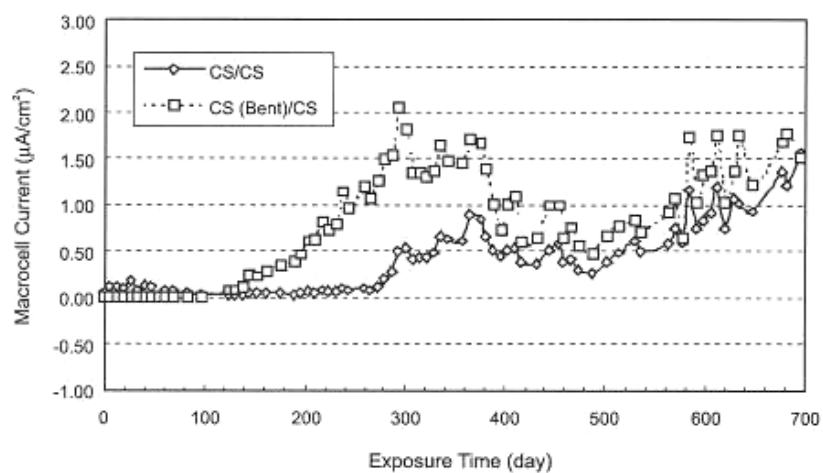


Figure 4. Macrocell Currents of Test Concrete Blocks With Either Straight or Bent Carbon Steel Bars in Top. The macrocell currents were normalized to the surface area of the top bars in the concrete blocks.

**Figur 7** Kontinuerliga mätningar av makrocellströmmar mellan passiverat kolstål och korroderande kolstål i betong under 700 dagars utomhusexponering, Ref 7.

### 4.3 Accelererad provningsmetod för rostfritt stål i betong

I en tidigare litteraturundersökning ”Elektrokemiska metoder för utvärdering av armeringskorrosion samt kritisk kloridjonkoncentration för rostfritt stål i betong”, **Ref 9** utfördes en kritisk utvärdering av olika elektrokemiska mätmetoder för bestämning av kloridtröskelvärden för rostfritt stål i betong. Av litteraturstudien framgick det att den potentiostatiska metoden med polarisering upp till +200 mV rel. SCE skulle kunna vara en lämplig metod för att bestämma olika rostfria ståls korrosionshärdighet i kloridhaltig betong.

Vid en potentiostatisk polarisation är potentialen konstant över tid och då den resulterande strömmen mäts. Fördelen med metoden är att en depassivering sker snabbare än under naturliga förhållanden. En nackdel kan vara att polariseringen är så stor att den kritiska kloridkoncentrationen inte kan relateras till naturliga förhållanden där ingen polarisering sker. Kloridtröskelkoncentrationen (CTL) för kolstål antas ofta vara den koncentration som ger en korrosionsström på 0,1-0,2  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . För undersökningar med rostfria stål används ofta högre strömtätheter som initeringsström, mellan 1 och 500  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Eftersom olika gränser för vilken strömtäthet som antas motsvara initierad korrosion används i litteraturen, kan det vara svårt att jämföra CTL-värden.

Sörensen, **Ref 10**, utförde potentiostatiska försök vid olika potentialer enligt följande: 0 mV (vs SCE) i fem dagar, +150 mV i 1,5 dagar och +200 mV i 2,5 dagar, och allt annat lika som vid PDP-försöken i punkt 5.4. Korrosionsströmmen mättes kontinuerligt och passivströmmen antogs vara 0,1-0,01  $\text{mA}/\text{m}^2$ . När strömmen snabbt ökade 3-4 dekader antogs att CTL hade uppnåtts och kloridkoncentrationen bestämdes. Kloridtröskelvärdena visas i **tabell 2**. Försök gjordes även med betong utan ingjutna klorider som exponerades i mättad  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  med 1 M NaCl och polariserades till 0 mV. Tiden för initiering av korrosion mättes och CTL bestämdes. För kolstål blev initieringsperioden 82 +/- 28 dagar och CTL  $0,26 \pm 0,13$  vikts % Cl<sup>-</sup> per betongvikt. För AISI 304: 255 dagar och CTL 0,77 vikt% Cl<sup>-</sup> per betongvikt. Ingen korrosion upptäcktes för AISI 316. Det står inte i klartext vilken lösning som användes för försöken med klorider ingjutna i betong.

**Tabell 2** Kloridtröskelvärden (vikts % Cl<sup>-</sup> per cementvikt) bestämda med potentiostatisk polarisation i cemen, **Ref 10**.

| Polarisering | AISI 304 (EN 1.4301) | AISI 316 (EN 1.4436) |
|--------------|----------------------|----------------------|
| 0 mV, SCE    | 5-8 %                | Över 8 %             |
| 150 mV, SCE  | 3,5-5 %              | 3,5-5 %              |
| 200 mV, SCE  | 3,5-5 %              | 3,5-5 %              |

Försök utfördes av Lysorgski, **Ref 11**, med potentiostatisk polarisation vid 100 mV (SCE) i simulerad porlösning bestående av: 0,3 N KOH, 0,05 N NaOH, pH 13,2-13,46. Lösningen var utan klorider vid starten av försöket och koncentrationen av Cl<sup>-</sup> ökades tills strömmen var 10  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Flera material undersöktes och några materials tröskelvärden visas i tabell 2. Materialen EN 1.4162, EN 1.4362, EN 1.4462 är duplexa rostfria stål, SSC1, SSC2 har ett yttre lager av austenitiskt rostfritt stål AISI 316 (EN 1.4436) och en inre kärna av kolstål. Lägst kloridtröskelvärde hade kolstål följt av de duplexa stålen. Stålen med ett ytskikt av EN 1.4436 hade högst tröskelvärden, **tabell 3**.

**Tabell 3** Kloridtröskelvärden bestämda med potentiostatisk polarisation i simulerad porväska, **Ref 11**.

| Material  | Vikt-% Cl <sup>-</sup> av lösning | [Cl <sup>-</sup> ] <sub>T</sub> (antal mol per liter) | [Cl <sup>-</sup> ] <sub>T</sub> /[OH <sup>-</sup> ] |
|-----------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Kolstål   | 0,26                              | 0,08                                                  | 0,27                                                |
| EN 1.4162 | 1,18                              | 0,35                                                  | 1,43                                                |
| EN 1.4362 | 7,51                              | 2,47                                                  | 12,29                                               |
| EN 1.4462 | 11,48                             | 4,07                                                  | 25,14                                               |
| SSC2      | 14,47                             | 5,51                                                  | 30,56                                               |
| SSC1      | 14,71                             | 5,61                                                  | 31,11                                               |

Bertolini, **Ref 12**, utförde potentiostatisk polarisation vid +200 mV (SCE) i olika simulerade porväska med varierande pH: 7,5-13,9. Strömdensiteten antogs vara 500  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  för initiering av korrosion. 0,5 % klorider tillsattes med 48 timmars intervall upp till 10 %. För att undersöka inverkan av temperaturen utfördes försök vid 20°C och 40°C. Kloridtröskelvärden i en mättad  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  lösning (pH 12,6) för båda temperaturerna visas i **tabell 4**. För AISI 410 (martensitiskt) var kloridtröskelvärdet 2 % för båda temperaturerna och som lägst ca 4,5 % för de austenitiska rostfria stål. Det duplexa rostfria stålet hade ett tröskelvärde på 10 % vid 20°C och 3 % vid 40°C. I en lösning med pH 13,9 skedde ingen initiering för det duplexa och de austenitiska stål upp till 10 % Cl vid 20°C och 40°C.

De potentiostatiska försöken utfördes simultant med åtta prover med en gemensam referenselektrod (SCE) kopplade till en potentiostat. Det framgår inte av artikeln om det var åtta prover av samma material eller om det är de åtta olika materialen som avses. Om det var åtta olika material så är det mycket svårt att veta hur varje material har blivit polariserat eftersom det blir en blandpotential av alla material och därmed kan felaktiga resultat erhållas. Ett prov bröts när strömtätheten 500  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  uppnåddes vilket betyder att en ny blandpotential bildades. Om det var åtta prover av samma material blir denna effekt liten, särskilt om proverna tillhör samma batch.

**Tabell 4** Kloridtröskelvärden bestämda med potentiostatisk polarisation i mättad  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , **Ref 12**.

| Tabell 6: Kloridtröskelvärden bestämda med potentiostatisk polarisation i mättad $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , Ref 12 |                                         |                                         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| Material                                                                                                           | Vikt-% Cl <sup>-</sup> av lösning, 20°C | Vikt-% Cl <sup>-</sup> av lösning, 40°C |
| Kolstål                                                                                                            | 0,8                                     | <0,5                                    |
| AISI 304 (EN 1.4301)                                                                                               | >10                                     | 4,5                                     |
| AISI 304L (EN 1.4311)                                                                                              | 5                                       | 4,5                                     |
| AISI 316 (EN 1.4401)                                                                                               | >10                                     | >10                                     |
| AISI 316L (EN 1.4432)                                                                                              | 5                                       | 4,5                                     |
| 23Cr4Ni (EN 1.4362)                                                                                                | >10                                     | 3,5                                     |
| 254 SMO (EN 1.4547)                                                                                                | >10                                     | >10                                     |
| AISI 410                                                                                                           | 2                                       | 2                                       |

## 5 Experimentell teknik

### 5.1 Långtidsexponering i havsvatten

Ingjutna och delvis ingjutna provstänger av kolstål och rostfritt stål av fem olika stålqualiteter exponeras två år delvis nedsänkta i havsvatten från en flotte vid Swerea KIMAB:s provningsplats på Bohus Malmön vid Sveriges västkust, **figur 8**.



**Figur 8** Bilden visar hur betongblocken exponeras delvis nedsänkta i havsvatten från flotten vid Bohus Malmö.

I betongblocken finns både ihopkopplade och icke ihopkopplade provstänger av kolstål och rostfritt stål. Provstängerna (korta provstänger) är placerade på tre olika provnivåer i betongblocken, **figur 9**. I varje betongblock finns även långa provstänger där den nedre delen är utsatt för vattenmättad betong och den övre för välluftad betong. Det finns även betongblock med två ihopkopplade provstänger av kolstål där den ena stängen är ingjuten i en kloridhaltig betong och den andra stängen är ingjuten i betong utan klorider, gjutningen har gjorts så att betongen utan klorider är i kontakt med betongen med klorider, **figur 10**. Betongblock där provstängerna sticker ut från betongen ingår även i undersökningen, **figur 11**.



**Figur 9** *Betongform med provstänger i olika höjdnivåer färdiga för ingjutning. Kamstängerna är av rostfritt stål och de släta stängerna är av låglegerat kolstål*



**Figur 10** *Provstång av kolstål som är ihopkopplad med en provstång ingjuten i kloridhaltig betong. Efter det att betongen härdat avlägsnas skiljeväggen och utrymmet till höger i formen fylls med betong utan tillsatta klorider.*



**Figur 11** Bilden visar delvis ingjutna provstänger under exponering från flotten.

#### 5.1.1 Provningsplats

Som provningsplats användes en stabil flotte med för ändamålet dimensionerade flytblock. Flotten är förankrad i en havsvik belägen vid Bohus Malmön vid Sveriges västkust och är en del av Swerea KIMAB:s fältstation på Bohus Malmön, **figur 12**.



**Figur 12** Bilden visar flotten vid Bohus Malmön där betongblocken exponerats.

### 5.1.2 Provstänger av kolstål

Som provstänger används rundstång av kolstål av stålqualiteten S235JR från Ståldepån AB. Provstängernas har en diameter av 12 mm. I **tabell 5** visas den kemiska sammansättningen hos provstängerna. Provstängernas längd är antingen 100 eller 280 mm.

**Tabell 5** Kemisk sammansättning av provstänger av kolstål (mass-%)

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

### 5.1.3 Rostfria provstänger

I undersökningen ingår provstänger av fem olika rostfria stålqualiteter, EN 1.4301, EN 1.4436, EN 1.4362, EN 1.4162, EN 1.4462. I **tabell 6** visas den kemiska sammansättningen hos de rostfria stål som ingår i undersökningen. Provstängerna hade kamprofil och var tillverkade av Outokumpu Stainless för att användas som stålarmring i betong. De rostfria provstängernas diameter är 12 mm (provstänger av stålqualiteten EN 1.4301 levererades med en diameter av 7 mm) och längden är antingen 100 mm eller 280 mm.

**Tabell 6** Kemisk sammansättning av rostfria provstänger (mass-%)

| EN-nummer | C    | Cr   | Ni   | Mo  | N    | Mn  | Mikrostruktur |
|-----------|------|------|------|-----|------|-----|---------------|
| 1.4162    | 0,03 | 21,5 | 1,5  | 0,3 | 0,22 | 5,0 | Duplex        |
| 1.4362    | 0,02 | 21,5 | 4,8  | 0,3 | 0,22 | -   | Duplex        |
| 1.4462    | 0,02 | 22,0 | 5,7  | 3,1 | 0,17 | -   | Duplex        |
| 1.4301    |      | 18,1 | 8,1  | -   | -    | -   | Austenitisk   |
| 1.4436    | 0,02 | 17,2 | 10,1 | 2,6 | -    | -   | Austenitisk   |

### 5.1.4 Utvärdering av korrosionshastighet och lokala angrepp

Korrosionshastigheten utvärderades genom massförlustbestämning. Massminskningen (massförlusten) på grund av korrosionen bestäms genom att provstängerna vägs före exponeringen och vid exponeringens slut, efter det att provstängerna rengjorts från korrosionsprodukter och betongrester. Rengöringen görs genom en upprepad betning, för kolstålstängerna användes Clarkes lösning (20g/l  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  och 60 g/l  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  i koncentrerad HCl) vid rumstemperatur. Vid renbetningen av de rostfria provstängerna användes 20 %  $\text{HNO}_3$  vid rumstemperatur. Vid beräkning av kolstålstängernas och de rostfria stängernas korrosionshastighet användes densiteten  $7800 \text{ kg/m}^3$ .

För att upptäcka eventuella lokala korrosionsangrepp (gropfrätning) undersöktes efter betningen samtliga provstänger i ett makromikroskop i låg förstoring (20 gångers förstoring).

### 5.1.5 Betongkvalitet och tillverkning av betongblock

Både ihopkopplade och icke ihopkopplade provstänger av kolstål och rostfritt stål göts in i betongblock, **figur 11**. Tre olika betongkvaliteter, OPC C45/55, PFA C32/40 och GGBFS C32/40 ingår i undersökningarna. De olika betongblockens sammansättning visas i **tabell 7**. Betongblocken innehåller 3 vikts % Cl<sup>-</sup> per bindemedelsvikt. Klorider tillsattes i form av NaCl i avjoniserat vatten. Betongen blandades under tio minuter med hjälp av elektrisk betongomrörare. Samtliga betongblock tillverkades med ett ca 15 mm täckande betongskikt med ett vbt av 0,45 över provstängerna. I några betongblock pågöts en betongklack utan klorider. En provstång av kolstål i pågjutningen sammankopplades med en kolstålsstång från det ursprungliga kloridhaltiga blocket, **figur 10**. Betongblock med utstickande provstänger ingår även i undersökningen, **figur 11**.

**Tabell 7** Tabellen visar sammansättningen i mass-% hos de betongblock som ingår i undersökningen.

| Betongkvalitet                                                                                | OPC C45/55 (Cem I)<br>(mass-%) | PFA C32/40 (CEM IIB-V)<br>(mass-%) | GGBFS C32/40 2(CEM IIIA)<br>(mass-%) |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| Bindemedel                                                                                    | Anläggnings-<br>cement: 17,5   | Norsk FA: 14,85<br>FA filler: 1,65 | CBR Heidelberg: 16,5                 |
| Ballast, sand 0-0,5 mm                                                                        | 25                             | 25                                 | 25                                   |
| Ballast, sand 0,5-1,0 mm                                                                      | 6                              | 6                                  | 6                                    |
| Ballast, sand 1,0-2,0 mm                                                                      | 11,25                          | 12,17                              | 12,25                                |
| Ballast, sand 2,0-4,0 mm                                                                      | 40                             | 40                                 | 40                                   |
| Tillsatsmedel                                                                                 | SC 52: 0,05<br>SC 94: 0,2      | SC 52: 0,05<br>SC 94: 0,2          | SC 52: 0,05<br>SC 94: 0,2            |
| Total kloridhalt i<br>betongblock per<br>bindemedelsvikt                                      | 3,0                            | 3,0                                | 3,0                                  |
| Uppmätt total kloridhalt<br>vid armeringsyta per<br>bindemedelsvikt efter 2<br>års exponering | 4,2                            | 3,5                                | 3,9                                  |
| vbt                                                                                           | 0,45                           | 0,45                               | 0,45                                 |

## 5.2 Utomhusexponering av rostfri armering ingjutna i betongblock med hög kloridhalt

I denna undersökning är syftet att fastställa korrosionshårdigheten hos rostfri armering som är ingjuten i en betong som utsätts för mycket höga kloridhalter (total kloridhalt upp till 10 mass-% per bindemedelsvikt). Utomhusexponeringen har utförts vid Swerea KIMAB:s provningsplatser vid Drottning Kristinas väg 48 och i Kista i Stockholm. I **figur 13** visas exponeringen av 18 st provblock med ingjutna provstänger av rostfri armering och kolstål. Provstängernas korrosionstillstånd utvärderades efter två års utomhusexponering.



**Figur 13** Utomhusexponering av provstänger av rostfri armering och kolstål ingjutna i betongblock med höga kloridhalter.

### 5.2.1 Provstänger av kolstål

Som provstänger används rundstång av kolstål av stålqualiteten S235JR från Ståldepån AB. Provstängernas har en diameter av 12 mm och en längd av 10 mm. I **tabell 8** visas den kemiska sammansättningen hos provstängerna.

**Tabell 8** Kemisk sammansättning av provstänger av kolstål (mass-%)

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

### 5.2.2 Rostfria provstänger

I undersökningen ingår provstänger av fem olika rostfria stålqualiteter, EN 1.4301, EN 1.4436, EN 1.4362, EN 1.4162, EN 1.4462. I **tabell 9** visas den kemiska sammansättningen hos de rostfria stål som ingår i undersökningen. Provstängerna hade kamprofil och var tillverkade av Outokumpu Stainless för att användas som stålarmring i betong. De rostfria provstängernas diameter är 12 mm (provstänger av stålqualiteten EN 1.4301 levererades med en diameter av 7 mm) och längden är 100 mm

**Tabell 9** Kemisk sammansättning av rostfria provstänger (mass-%)

| EN-nummer | C    | Cr   | Ni   | Mo  | N    | Mn  | Mikrostruktur |
|-----------|------|------|------|-----|------|-----|---------------|
| 1.4162    | 0,03 | 21,5 | 1,5  | 0,3 | 0,22 | 5,0 | Duplex        |
| 1.4362    | 0,02 | 21,5 | 4,8  | 0,3 | 0,22 | -   | Duplex        |
| 1.4462    | 0,02 | 22,0 | 5,7  | 3,1 | 0,17 | -   | Duplex        |
| 1.4301    |      | 18,1 | 8,1  | -   | -    | -   | Austenitisk   |
| 1.4436    | 0,02 | 17,2 | 10,1 | 2,1 | -    | -   | Austenitisk   |

### 5.2.3 Utvärdering av korrosionshastighet och lokala angrepp

Provstängernas korrosionshastighet (tre provstänger per material i varje betongblock) efter två års utomhusexponering utvärderades genom massförlustbestämning. Massminskningen (massförlusten) på grund av korrosionen bestäms genom att provstängerna vägs före exponeringen och vid exponeringens slut, efter det att provstängerna rengjorts från korrosionsprodukter och betongrester. Rengöringen görs genom en upprepad betning, för kolstålstängerna användes Clarkes lösning (20g/l  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  och 60 g/l  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  i koncentrerad HCl) vid rumstemperatur. Vid renbetningen av de rostfria provstängerna användes 20 %  $\text{HNO}_3$  vid rumstemperatur. Vid beräkning av kolstålstängernas och de rostfria stängernas korrosionshastighet användes densiteten  $7800 \text{ kg/m}^3$ .

För att upptäcka eventuella lokala korrosionsangrepp (gropfrätning) undersöktes efter betningen samtliga provstänger i ett makromikroskop i låg förstoring (20 gångers förstoring).

### 5.2.4 Betongkvalitet och tillverkning av betongblock

Provstänger av kolstål (tre provstänger per block) och rostfritt stål (15 provstänger per block, tre provstänger av varje rostfri stålqualität) göts in i totalt 18 st betongblock. Tre olika betongkvaliteter, OPC C45/55, PFA C32/40 och GGBFS C32/40 ingår i undersökningarna. De olika betongblockens sammansättning visas i **tabell 10**. Betongblocken innehåller 0, 2, 4, 6, 8 och 10 mass %  $\text{Cl}^-$  per bindemedelsvikt. Klorider tillsattes i form av NaCl i avjoniserat vatten. Betongen blandades under tio minuter med hjälp av elektrisk betongomrörare. Samtliga betongblock tillverkades med ett ca 15 mm täckande betongskikt och med ett vbt av 0,45.

**Tabell 10** Tabellen visar sammansättningen i mass-% hos de betongblock som ingår i undersökningen.

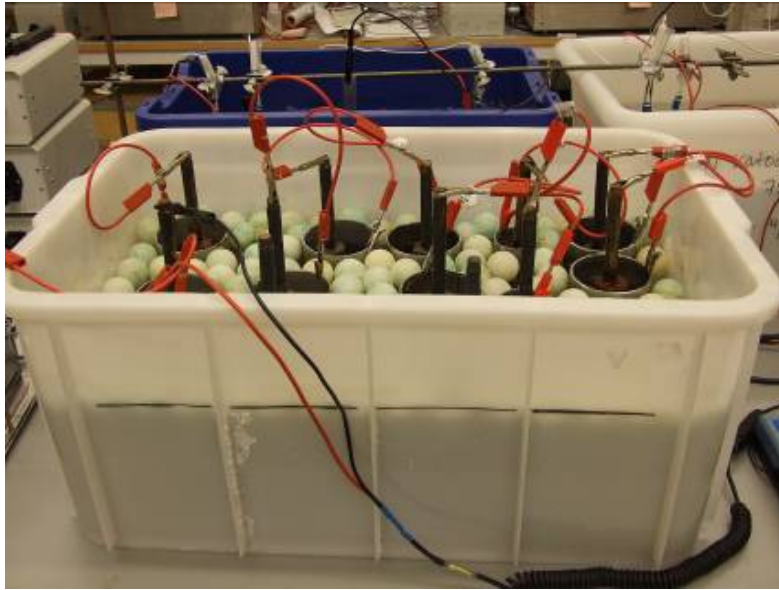
| Betongkvalitet                                           | OPC C45/55 (Cem I)<br>(mass-%) | PFA C32/40 (CEM IIB-V)<br>(mass-%) | GGBFS C32/40 2(CEM IIIA)<br>(mass-%) |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| Bindemedel                                               | Anläggnings-<br>cement: 17,5   | Norsk FA: 14,85<br>FA filler: 1,65 | CBR Heidelberg: 16,5                 |
| Ballast, sand 0-0,5 mm                                   | 25                             | 25                                 | 25                                   |
| Ballast, sand 0,5-1,0 mm                                 | 6                              | 6                                  | 6                                    |
| Ballast, sand 1,0-2,0 mm                                 | 11,25                          | 12,17                              | 12,25                                |
| Ballast, sand 2,0-4,0 mm                                 | 40                             | 40                                 | 40                                   |
| Tillsatsmedel                                            | SC 52: 0,05<br>SC 94: 0,2      | SC 52: 0,05<br>SC 94: 0,2          | SC 52: 0,05<br>SC 94: 0,2            |
| Total kloridhalt i<br>betongblock per<br>bindemedelsvikt | 0, 2, 4, 6, 8 och 10           | 0, 2, 4, 6, 8 och 10               | 0, 2, 4, 6, 8 och 10                 |
| vbt                                                      | 0,45                           | 0,45                               | 0,45                                 |
| Antal betongblock                                        | 6 st                           | 6 st                               | 6 st                                 |

## 5.3 Laboratorieundersökning – galvanisk korrosion

### 5.3.1 Rostfria ståls galvaniska inverkan på ingjuten kolstål

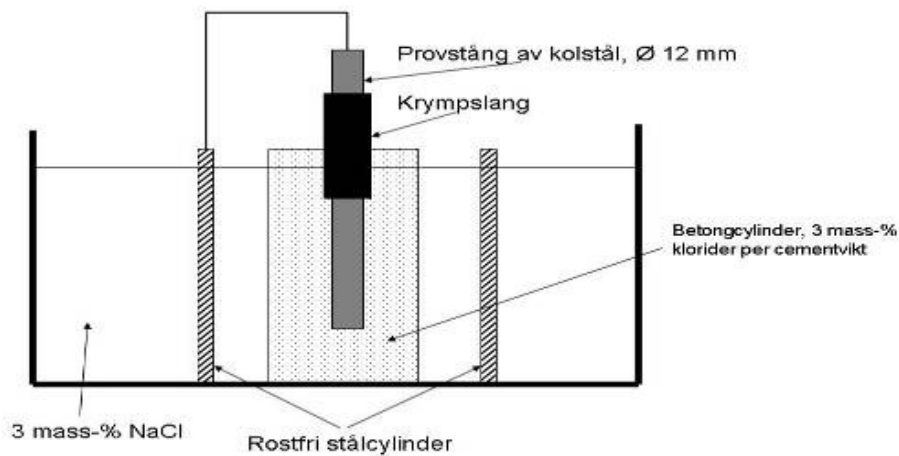
I denna undersökning som genomförts på laboratorium simuleras faktiska förhållanden genom att exponera betongingjutna provstänger av kolstål som är elektriskt ihopkopplade med rostfritt stål nedsänkta i ett kloridhaltigt vatten.

Ingjutna provstänger av kolstål exponeras nedsänkta i en 3 % NaCl-lösning vid en temperatur av ca 20 °C. Tio av totalt tolv delvis ingjutna provstänger är under exponeringen elektriskt ihopkopplade med rostfria stålrör, **figur 14**. De övriga två delvis ingjutna provstänger av kolstål är inte i elektrisk kontakt med ett rostfritt stålrör.



**Figur 14** Försöksuppläggning på laboratorium

I **figur 15** visas en schematisk skiss på en ingjuten provstång av kolstål som är elektriskt ihopkopplad med ett rostfritt stålrör.



**Figur 15** Schematisk skiss för en betongcylinder med en ingjuten provstång av kolstål.

### 5.3.2 Provstänger ingjutna i betongcylindrar

Som provstänger användes rundstång av kolstål av stålqualiteten S235JR från Ståldepån AB. Provstängernas har en diameter av 12 mm och en längd av 280 mm. I **tabell 11** visas den kemiska sammansättningen hos provstängerna.

**Tabell 11** Kemisk sammansättning av provstänger av kolstål (mass-%)

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

### 5.3.3 Rostfria stålrör

I undersökningen ingår fem rostfria stålrör av stålqualiteten, EN 1.4301, EN 1.4436, EN 1.4362, EN 1.4162, EN 1.4462. Fyra av fem rostfria stålrör har en yttre diameter av 90 mm och en längd 200 mm. Stålröret av stålqualiteten EN 1.4362 har en yttre diameter av 50 mm och en längd av 200 mm. I **tabell 12** visas den kemiska sammansättningen hos de olika rostfria stålrören som ingår i undersökningen.

**Tabell 12** Kemisk sammansättning av rostfria stålrör (mass-%)

| EN-nummer | C    | Cr   | Ni   | Mo  | N    | Mn  | Mikrostruktur |
|-----------|------|------|------|-----|------|-----|---------------|
| 1.4162    | 0,03 | 21,5 | 1,5  | 0,3 | 0,22 | 5,0 | Duplex        |
| 1.4362    | 0,02 | 21,5 | 4,8  | 0,3 | 0,22 | -   | Duplex        |
| 1.4462    | 0,02 | 22,0 | 5,7  | 3,1 | 0,17 | -   | Duplex        |
| 1.4301    |      | 18,1 | 8,1  | -   | -    | -   | Austenitisk   |
| 1.4436    | 0,02 | 17,2 | 10,1 | 2,6 | -    | -   | Austenitisk   |

### 5.3.4 Betongcylindrarnas sammansättning

Vid tillverkning av betongcylindrar med ingjutna provstänger av kolstål användes anläggningsbetong från Weber Saint-Gobain. I **tabell 13** visas sammansättningen hos 10 kg betongblandning.

**Tabell 13** Sammansättning av 10 kg betongblandning vid ett vct av 0,45 och 3 vikt-% klorider per cementvikt

| Innehåll                                                                                 | Massa i kg                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| <b>Anläggningscement</b><br>OPC C45/55 (CEM I)                                           | 1,75                       |
| <b>Ballast</b><br>Sand 0-0,5 mm<br>Sand 0,5-1,0 mm<br>Sand 1,0-2,0 mm<br>Sand 2,0-4,0 mm | 2,5<br>0,6<br>1,125<br>4,0 |
| <b>Tillsatsmedel</b><br>SC 52<br>SC 94                                                   | 0,005<br>0,02              |
| Blandvatten                                                                              | 0,7875                     |
| Natriumklorid (purum)                                                                    | 0,8654                     |

Betongens täckande betongskikt hos betongcylindrarna är 15 mm.

### **5.3.5 Utvärdering av elektrokemisk potential av galvanisk korrosionsström**

Den galvaniska korrosionsströmmen (makrocellström) mellan ihopkopplade rostfria stålrör och ingjutna provstänger av kolstål mättes med en nollresistansamperemeter. Den elektrokemiska potentialen hos de rostfria stålrören och de ingjutna provstängerna mättes med en mättad kalomelelektrod. Den elektrokemiska potentialen mättes både i ihopkopplat och i icke ihopkopplat tillstånd.

### **5.3.6 Utvärdering av korrosionshastighet**

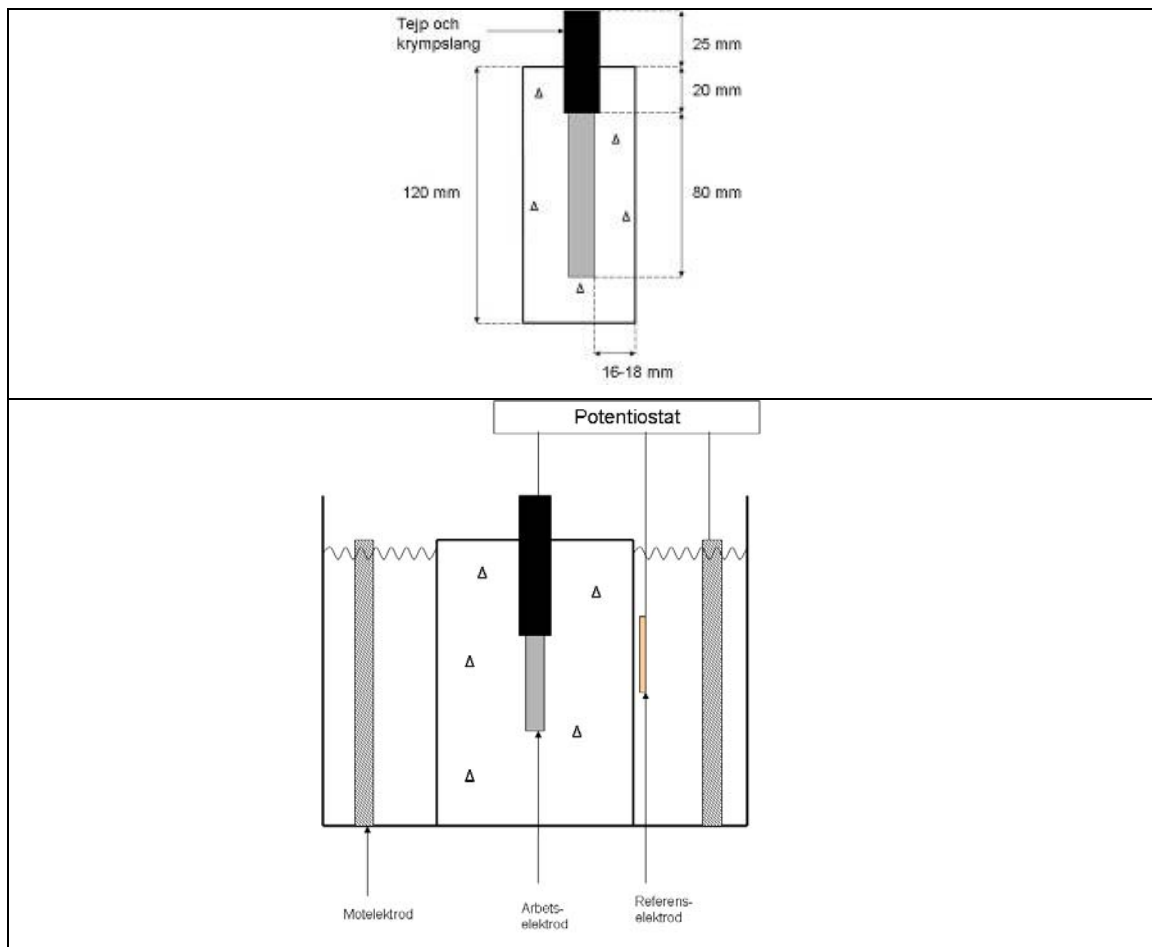
Efter åtta månaders exponering i 3 % NaCl-lösning på laboratorium slogs betongcylindrarna isär och provstängernas korrosionsutseende och korrosionshastighet utvärderades. Korrosionshastigheten utvärderades genom massförlustbestämning. Massminskningen (massförlusten) på grund av korrosionen bestäms genom att provstängerna vägs före exponeringen och vid exponeringens slut, efter det att provstängerna rengjorts från korrosionsprodukter och betongrester. Detta görs genom en upprepad betning i Clarks lösning (20g/l  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  och 60 g/l  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  i koncentrerad HCl) vid rumstemperatur. Vid beräkning av kolstålstängernas korrosionshastighet användes densiteten  $7800 \text{ kg/m}^3$ .

## **5.4 Undersökning av kritisk kloridtröskelvärde för rostfritt stål i betong – laboratorieundersökning**

### **5.4.1 Undersökning av kritisk kloridtröskelvärde hos rostfritt stål i kloridhaltig betong**

För att ta fram kloridtröskelvärden för olika rostfria stål i betong har en potentiostatisk elektrokemisk mätmetod använts. Provkropparna polariseras från korrosionspotentialen till +200 mV relativt SCE. Försökupställningen visas i **figur 16**. Provkropparna ställdes ned i ett värmebad med kranvatten blandat med NaCl. Koncentrationen av NaCl i badvattnet var samma som koncentration Cl per cementvikt i provkropparna d.v.s. för provkroppar med 2 vikt % Cl per cementvikt så användes ett vattenbad med 2 vikt % NaCl. Detta för att förhindra att klorider lakas ur från provkropparna.

Korrosionsströmmen mättes över tid genom att mäta spänningsfallet över en resistor. När korrosionsströmmen uppnådde en viss initieringsström så antogs att korrosionsprocessen hade startat. Initieringsströmmen beräknades genom att multiplicera varje provdimension med en strömdensitet på  $10 \mu\text{A/cm}^2$ . Temperaturen på badvattnet var  $20^\circ\text{C}$  under försöksperiodens första 14 dagar. Sedan höjdes temperaturen med  $5^\circ\text{C}$ , upp till max  $40^\circ\text{C}$ , för varje 14 dagarsperiod, ända tills initieringsströmmen uppnåddes. Utvärdering av de rostfria stålen utfördes genom att notera temperatur för initiering och tid till initiering.



**Figur 16** Schematisk beskrivning av försöksuppställning

#### 5.4.2 Provmaterial

Fem olika kvaliteter av rostfria armeringsstänger tillverkade av Outokumpu samt rundstång av kolstål har använts i denna försöksserie varav tre rostfria stål var duplexa stål och två austenitiska. Diametern på de rostfria stängerna var mellan 8 och 12 mm och för kolstål stängerna var diametern 12 mm. De rostfria stålens sammansättning samt PRE-tal (pitting resistance equivalent) visas i **tabell 14**. PRE-talet är ett mått på hur lätt ett rostfritt stål angrips av gropfrätning, baserat på den kemiska sammansättningen enligt ekvation 1.

$$PRE = \%Cr + 3,3\%Mo + 16\%N \quad \text{ekvation 1}$$

**Tabell 14** Kemisk sammansättning av rostfria armeringsstänger

| EN-nummer | Kommersiell betäckning | C    | Cr   | Ni   | Mo  | N    | Mn  | PRE-tal | Mikrostruktur |
|-----------|------------------------|------|------|------|-----|------|-----|---------|---------------|
| 1.4162    | LDX 2101               | 0,03 | 21,5 | 1,5  | 0,3 | 0,22 | 5,0 | 26      | Duplex        |
| 1.4362    | 2304                   | 0,02 | 23   | 4,8  | 0,3 | 0,22 | -   | 27      | Duplex        |
| 1.4462    | 2205                   | 0,02 | 22,0 | 5,7  | 3,1 | 0,17 | -   | 35      | Duplex        |
| 1.4301    | 304                    | 0,04 | 18,1 | 8,1  | -   | -    | -   | 18      | Austenitisk   |
| 1.4436    | 316                    | 0,02 | 17,2 | 10,1 | 2,6 | -    | -   | 26      | Austenitisk   |

Kolstålet, från Ståldepån, var av stålqualiteten S235JR med en diameter på 12 mm. Kolstålets kemiska sammansättning visas i **tabell 15**.

**Tabell 15** Kemisk sammansättning av provstänger i kolstål.

| C    | Mn  | P     | S     | N    | Cu   |
|------|-----|-------|-------|------|------|
| 0,17 | 1,4 | 0,035 | 0,035 | 0,12 | 0,55 |

Armeringsstängerna kapades till 125 mm längder och ett hål med 4 mm i diameter borrades på ena kortsidan för elektrisk anslutning. De rostfria materialen avfettades i etanol (10 minuter i ultraljudsbad). Stängerna i kolstål avfettades i trikloretylen (30 sekunder i ånga + 5 minuter i ultraljudsbad, fyra upprepade behandlingar).

#### 5.4.3 Provkropparnas utseende och betongkvalitet

De rostfria armeringsstängerna göts in i betong i cylinderformar med diameter 45 mm, **figur 16**. Före gjutning täcktes 45 mm av armeringsstängerna, från kortsidan med det borrarade hålet, med vulkaniserande tejp samt krympslang med lim. Sammanlagt 36 provkroppar tillverkades, en provkropp för varje material och kloridhalt. Klorider i form av NaCl tillsattes med blandningsvattnet och mängden beräknades för 0, 2, 4, 6, 8, 10 vikt-% Cl per cementvikt. Betongens täckande betongskikt varierade mellan 16,5 och 18,5 mm. För provstänger av kolstål, rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4162 och EN 1.4301 var det täckande betongskiktet 16,5 mm och för provstänger av stålqualiteterna EN 1.4436, EN 1.4362 och EN 1.4462 var det täckande betongskiktet 18,5 mm. För att undvika alltför många luftporer i provkropparna så användes ett skakbord där gjutformarna, efter fyllning med betong, placerades i 2 minuter. Betongen var tillverkad av Weber Saint-Gobain, sammansättningen visas i **tabell 16**. Efter gjutningen så härdades provkropparna i 14 dygn i 100 % relativ fuktighet.

**Tabell 16** Betongens sammansättning

| Innehåll                                           | Vikt-%                                     |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| <b>Anläggningscement</b><br>OPC C45/55 (CEM1)      | 17,5                                       |
| <b>Ballast</b>                                     |                                            |
| Sand 0-0,5 mm                                      | 25                                         |
| Sand 0,5-1,0 mm                                    | 6                                          |
| Sand 1,0-2,0 mm                                    | 11,25                                      |
| Sand 2-4 mm                                        | 40                                         |
| <b>Tillsatsmedel</b>                               |                                            |
| SC 52                                              | 0,05                                       |
| SC 94                                              | 0,2                                        |
| <b>Vatten/cement-tal (VCT)</b>                     | 0,45 (kg.vatten/kg.cement)                 |
| <b>Klorider (tillsattes med blandningsvattnet)</b> | 0, 2, 4, 6, 8, 10 vikt-% Cl per cementvikt |

## 6 Resultat och diskussion

### 6.1 Långtidsprovning i havsvatten

#### 6.1.1 Betongblockens utseende efter två års exponering i havsvatten

I **figur 18** och **19** ges ett exempel på provblockens utseende efter två års exponering i havsvatten. Som framgår av figuren så har betongblocket (den del som varit nedsänkt i havet) fått en kraftig påväxt av sjögräs, musslor, snäckor och havstulpaner.



**Figur 18** Utseendet av betongblock efter två års exponering i havsvatten.



**Figur 19** *Utseendet hos ett betongblock med utstickande provstänger efter två års exponering i havsvatten.*

En spricka med rostutfällning på betongytan hade uppkommit vid provstång av kolstål efter två års exponering i havsvatten

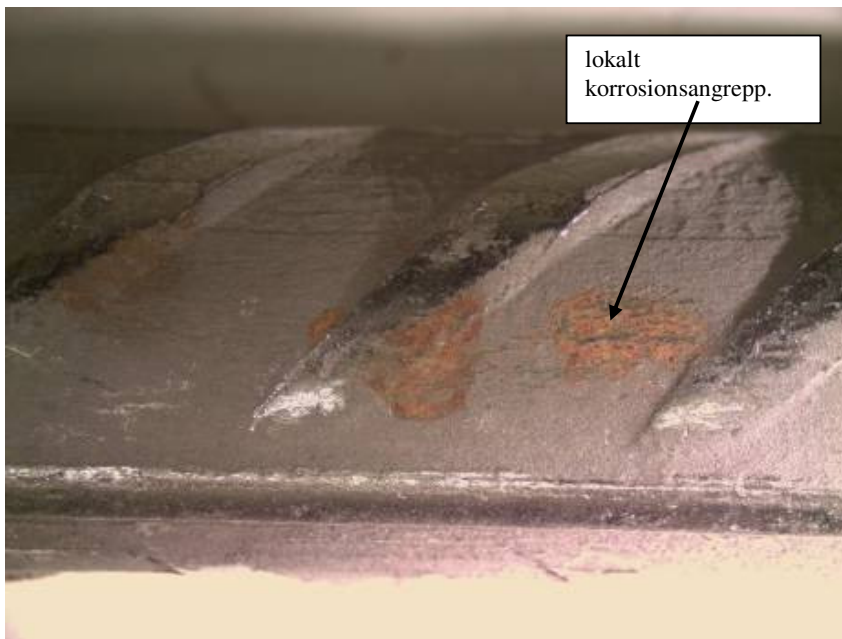
### **6.1.2 Utvärdering av provstängernas utseende efter två års exponering i havsvatten**

I **bilaga 1-13** visas provstängernas utseende efter två års exponering i kloridhaltiga betongblock delvis nedsänkta i havet.

De provstänger av kolstål som varit placerade i betongblockens övre delar har fått kraftiga lokala korrosionsangrepp (rödrost). De provstänger som varit placerade i betongblockens nedre delar vid eller under vattenytan har betydligt mindre lokala korrosionsangrepp (rödrost). Ingen större skillnad i korrosionsutseende mellan ihopkopplade och icke ihopkopplade provstänger av kolstål har kunnat konstateras.

Vid den okulära undersökningen kunde inga synbara frätgropar konstateras på samtliga rostfria provstänger av stålqualiteterna EN 1.4301, EN 1.4436, EN 1.4162, EN 1.4362 och EN 1.4462. För den rostfria stålvaliteten EN 1.4301 konstaterades i ett makromikroskåp vid 16 gångers förstoring ett fåtal grunda frätgropar. I **figur 20** visas exempel på en grund frätgrop efter ett års exponering i kloridhaltiga betongblock delvis nedsänkta i havsvatten.

Inga frätgropar kunde konstateras på övriga rostfria stålqualiteter (EN 1.4436, EN 1.4162, EN 1.4362 och EN 1.4462).



**Figur 20** Lokala angrepp på ytan av en rostfri provstång i av stålqualiteten EN 1.4301 i 16 gångers förstoring efter ett års exponering.

### 6.1.3 Utvärdering av korrosionshastighet och lokala korrosionsangrepp efter två års exponering i havsvatten

I tabellerna 17 och 18 ges en sammanställning av korrosionshastigheterna hos samtliga små provstänger (okopplade och ihopkopplade) efter ett och två års exponering i betongblock delvis nedsänkta i havsvatten. Av de uppmätta korrosionshastigheterna i tabell 17 och 18 hos okopplade och ihopkopplade provstänger av kolstål framgår det att de provstänger som varit placerade i betongblockens nedre delar (permanent våta) inte varit utsatta för galvanisk påverkan från de rostfria provstängerna. När det gäller de provstänger av kolstål som varit placerade i betongblockens övre delar (i kontakt med luft) har i några fall ej ihopkopplade provstänger erhållit en högre korrosionshastighet än ihopkopplade provstänger.

Ur tabellerna framgår vidare att korrosionshastigheten är betydligt högre hos de provstänger av kolstål (både ihopkopplade och icke ihopkopplade) som varit placerade i betongblockens övre delar jämfört med de som varit placerade vid betongblockens nedre delar. Den högre uppmätta korrosionshastigheten hos kolstålsstängerna i betongblockens övre delar kan förklaras med att syrediffusionen är betydligt högre i betongblockens övre delar än i de nedre vattenmättade delarna.

Det förekommer även skillnader i korrosionshastighet mellan provstänger av kolstål som är placerade på samma provnivå (gäller både okopplade och ihopkopplade provstänger). Denna skillnad torde bero på lokala skillnader i betongens fukthalt, kloridhalt vid provstängernas yta. Även andra defekter såsom sprickor och ihåligheter i betongen påverkar förmågan att initiera lokala korrosionsangrepp. Provstängernas lokala ytillstånd såsom defekter i glödskalet och glödskalets tjocklek har betydelse för förmågan att hindra en snabb initiering av lokala korrosionsangrepp på stålytan

**Tabell 17** Korrosionshastigheten hos ihopkopplade provstänger av kolstål och rostfritt stål av olika stålqualiteter efter ett och två års exponering i betongblock delvis nedsänkta i havsvatten.

| Betong-kvalitet | Provnivå           | Kolstål<br>(µm/år) |      | EN 1.4301,<br>(µm/år) |      | EN 1.4436<br>(µm/år) |      | EN 1.4162<br>(µm/år) |      | EN 1.4362<br>(µm/år) |      |
|-----------------|--------------------|--------------------|------|-----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|
|                 |                    | 1 år               | 2 år | 1 år                  | 2 år | 1 år                 | 2 år | 1 år                 | 2 år | 1 år                 | 2 år |
| OPC<br>C45/55   | Över<br>vattenyta  | 34,1               | 35,3 | 0,5                   | 0,2  | 0,5                  | 0,1  | 0,5                  | 0,2  | 0,3                  | <0,1 |
|                 |                    | 15,4               | 28,0 |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 44,4...            | 41,6 |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 38,7...            | 51,8 |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |
| PFA<br>C32/40   | Över<br>vattenyta  | 35,8               | 23,4 | 0,3                   | 0,4  | 0,2                  | <0,1 | 0,5                  | 0,20 | 0,3                  | <0,1 |
|                 |                    | 17,2               | 52,5 |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 28,9               | 40,7 |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 36,5               | 51,7 |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |
| GGBFS<br>C32/40 | Över<br>vattenyta  | 52,0               | 39,1 | 1,4                   | 0,2  | 0,2                  | <0,1 | 0,7                  | 0,20 | 0,3                  | <0,1 |
|                 |                    | 11,8               | 84,8 |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 101,9              | 50,3 |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 36,3               | 43,2 |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |
| OPC<br>C45/55   | Vid<br>vattenyta   | 11,5               | 10,6 | 0,2                   | 0,2  | 0,2                  | <0,1 | 0,6                  | 0,2  | 0,2                  | <0,1 |
|                 |                    | 10,7               | 9,7  |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 11,3               | 10,1 |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 11,9               | 10,4 |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |
| PFA<br>C32/40   | Vid<br>vattenyta   | 13,3               | 9,4  | 0,4                   | 0,1  | 0,2                  | <0,1 | 0,6                  | 0,2  | 0,3                  | <0,1 |
|                 |                    | 9,4                | 9,8  |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 11,9               | 9,8  |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 10,8               | 10,4 |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |
| GGBFS<br>C32/40 | Vid<br>vattenyta   | 9,9                | 10,8 | 0,2                   | <0,1 | 0,2                  | <0,1 | 0,5                  | 0,2  | 0,3                  | <0,1 |
|                 |                    | 7,8                | 9,4  |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 11,3               | 11,0 |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 13,8               | 10,3 |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |
| OPC<br>C45/55   | Under<br>vattenyta | 12,1               | 9,7  | 0,2                   | 0,1  | 0,1                  | <0,1 | 0,5                  | 0,2  | 0,3                  | <0,1 |
|                 |                    | 10,6               | 9,7  |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 11,2               | 9,1  |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 11,1               | 9,7  |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |
| PFA<br>C32/40   | Under<br>vattenyta | 11,6               | 10,7 | 0,2                   | <0,1 | 0,3                  | <0,1 | 0,6                  | 0,2  | 0,3                  | <0,1 |
|                 |                    | 9,7                | 9,6  |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 10,9               | 10,3 |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 10,4               | 10,6 |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |
| GGBFS<br>C32/40 | Under<br>vattenyta | 11,0               | 10,1 | 1,6                   | <0,1 | 0,2                  | <0,1 | 0,5                  | 0,2  | 0,4                  | <0,1 |
|                 |                    | 8,6                | 9,0  |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 12,3               | 11,1 |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 11,1               | 9,7  |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |

**Tabell 18** Korrosionshastigheten hos icke ihopkopplade provstänger av kolstål och rostfritt stål av olika stålqualiteter efter ett och två års exponering i olika betongblock delvis nedsänkta i havsvatten.

| Betong-kvalitet | Provnivå           | Kolstål<br>(µm/år) |      | EN 1.4301<br>(µm/år) |      | EN 1.4436<br>(µm/år) |      | EN 1.4162<br>(µm/år) |      | EN 1.4362<br>(µm/år) |      | EN 1.4462<br>(µm/år) |      |
|-----------------|--------------------|--------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|
|                 |                    | 1 år               | 2 år | 1 år                 | 2 år | 1 år                 | 2 år | 1 år                 | 2 år | 1 år                 | 2 år | 1 år                 | 2 år |
| OPC<br>C45/55   | Över<br>vattenyta  | 46,8               | 33,4 | 1,0                  | 0,4  |                      |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 10,9               | 19,6 |                      |      | 0,1                  | <0,1 |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 56,9               | 40,5 |                      |      |                      |      | <0,1                 | 0,2  |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 33,9               | 42,1 |                      |      |                      |      |                      |      | 0,2                  | <0,1 |                      |      |
|                 |                    |                    |      |                      |      |                      |      |                      |      |                      |      | <0,1                 | <0,1 |
| PFA<br>C32/40   | Över<br>vattenyta  | 72,1               | 21,6 | 0,3                  | 0,4  |                      |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 7,9                | 40,4 |                      |      | 0,1                  | <0,1 |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 27,0               | 59,5 |                      |      |                      |      | 0,5                  | 0,2  |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 56,5               | 41,4 |                      |      |                      |      |                      |      | 0,1                  | <0,1 |                      |      |
| GGBFS<br>C32/40 | Över<br>vattenyta  | 28,7               | 43,1 | 0,8                  | 0,4  |                      |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 24,0               | 75,0 |                      |      | 0,1                  | <0,1 |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 43,7               | 52,6 |                      |      |                      |      | 0,3                  | 0,2  |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 41,8               | 45,1 |                      |      |                      |      |                      |      | 0,3                  | <0,1 |                      |      |
| OPC<br>C45/55   | Vid<br>vattenyta   | 9,5                | 8,9  | 0,9                  | 0,2  |                      |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 10,5               | 9,5  |                      |      | 0,2                  | <0,1 |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 8,2                | 12,4 |                      |      |                      |      | 0,6                  | 0,2  |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 12,7               | 10,6 |                      |      |                      |      |                      |      | 0,3                  | <0,1 |                      |      |
|                 |                    |                    |      |                      |      |                      |      |                      |      |                      |      | <0,1                 | 0,1  |
| PFA<br>C32/40   | Vid<br>vattenyta   | 11,7               | 9,4  | 0,9                  | 0,1  |                      |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 9,8                | 10,4 |                      |      | 0,1                  | <0,1 |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 9,0                | 11,7 |                      |      |                      |      | 0,4                  | 0,1  |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 9,5                | 9,2  |                      |      |                      |      |                      |      | 0,2                  | <0,1 |                      |      |
| GGBFS<br>C32/40 | Vid<br>vattenyta   | 7,7                | 10,1 | 0,3                  | 0,3  |                      |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 9,4                | 9,8  |                      |      | 0,1                  | <0,1 |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 14,4               | 11,1 |                      |      |                      |      | 0,1                  | 0,1  |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 14,4               | 11,5 |                      |      |                      |      |                      |      | 0,3                  | <0,1 |                      |      |
| OPC<br>C45/55   | Under<br>vattenyta | 9,4                | 9,4  | 1,6                  | 0,2  |                      |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 10,7               | 10,0 |                      |      | 0,1                  | <0,1 |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 9,0                | 9,1  |                      |      |                      |      | 0,5                  | 0,1  |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 10,8               | 10,6 |                      |      |                      |      |                      |      | 0,2                  | <0,1 |                      |      |
| PFA<br>C32/40   | Under<br>vattenyta | 8,9                | 9,5  | 0,7                  | <0,1 |                      |      |                      |      |                      |      | <0,1                 | <0,1 |
|                 |                    | 9,7                | 9,9  |                      |      | 0,1                  | <0,1 |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 9,2                | 10,6 |                      |      |                      |      | 0,2                  | 0,1  |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 1,2                | 10,1 |                      |      |                      |      |                      |      | 0,3                  | <0,1 |                      |      |
| GGBFS<br>C32/40 | Under<br>vattenyta | 9,0                | 11,3 | 1,3                  | 0,1  |                      |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 9,3                | 10,0 |                      |      | 0,1                  | <0,1 |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 15,3               | 11,7 |                      |      |                      |      | 0,2                  | 0,1  |                      |      |                      |      |
|                 |                    | 14,2               | 11,3 |                      |      |                      |      |                      |      | 0,2                  | <0,1 |                      |      |

När det gäller de långa provstängerna av kolstål, **tabell 19** och **20**, som varit utsatt för en betong med olika fukthalt utefter stängen, framgår det att korrosionshastigheten hos långa provstänger av kolstål är något högre än korrosionshastigheten hos korta provstänger som varit placerade i betongblockens, permanent våta, nedre delar.

Antalet lokala korrosionsangrepp (frätgropar) är flest på de provstänger av kolstål som varit placerade i betongblockens övre delar.

**Tabell 19** Korrosionshastigheten hos ihopkopplade långa provstänger av kolstål och rostfritt stål av olika stålqualiteter efter ett och två års exponering i olika betongblock delvis nedsänkta i havsvatten

| Betong-kvalitet | Provnivå                                                                  | Kolstål<br>(µm/år) |      | EN 1.4301,<br>(µm/år) |      | EN 1.4436<br>(µm/år) |      | EN 1.4162<br>(µm/år) |      | EN 1.4362<br>(µm/år) |      |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------|--------------------|------|-----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|
|                 |                                                                           | 1 år               | 2 år | 1 år                  | 2 år | 1 år                 | 2 år | 1 år                 | 2 år | 1 år                 | 2 år |
| OPC<br>C45/55   | Provstängerna                                                             | 16,4               | 11,9 | 0,5                   | 0,3  | <0,1                 | <0,1 | 0,3                  | 0,2  | 0,2                  | 0,1  |
|                 |                                                                           | 9,9                | 9,1  |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                                                                           | 9,8                | 15,8 |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                                                                           | 10,7               | 10,3 |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |
| PFA<br>C32/40   | sträcker sig<br>längs hela<br>sträckan över -<br>vid - under<br>vattenyta | 13,1               | 9,8  | 1,2                   | 0,6  | 0,1                  | <0,1 | 0,6                  | 0,2  | 0,3                  | 0,1  |
|                 |                                                                           | 5,6                | 10,3 |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                                                                           | 14,6               | 18,5 |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                                                                           | 16,3               | 12,8 |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |
| GGBFS<br>C32/40 | vattenyta                                                                 | 11,3               | 30,2 | 1,5                   | 0,4  | 0,1                  | <0,1 | 0,3                  | 0,2  | 0,2                  | 0,1  |
|                 |                                                                           | 12,1               | 10,2 |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                                                                           | 19,6               | 19,1 |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                                                                           | 16,7               | 13,9 |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |

**Tabell 20** Korrosionshastigheten hos icke ihopkopplade provstänger av kolstål och rostfritt stål av olika stålqualiteter efter ett och två års exponering i olika betongblock delvis nedsänkta i havsvatten

| Betong-kvalitet | Provnivå                                                                                        | Kolstål<br>(µm/år) |      | EN 1.4301,<br>(µm/år) |      | EN 1.4436<br>(µm/år) |      | EN 1.4162<br>(µm/år) |      | EN 1.4362<br>(µm/år) |      | EN 1.4462<br>(µm/år) |      |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|------|-----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|
|                 |                                                                                                 | 1 år               | 2 år | 1 år                  | 2 år | 1 år                 | 2 år | 1 år                 | 2 år | 1 år                 | 2 år | 1 år                 | 2 år |
| OPC<br>C45/55   | Provstäng-<br>erna sträcker<br>sig längs<br>hela sträckan<br>över - vid -<br>under<br>vattenyta | 11,7               | 12,7 | 0,5                   | 0,1  | <0,1                 | <0,1 | 0,1                  | 0,2  | 0,1                  | <0,1 | <0,1                 | <0,1 |
|                 |                                                                                                 | 9,2                | 10,0 |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                                                                                                 | 8,0                | 19,7 |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                                                                                                 | 11,1               | 13,4 |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |                      |      |
| PFA<br>C32/40   | sträcker sig<br>längs<br>hela sträckan<br>över - vid -<br>under<br>vattenyta                    | 9,8                | 11,4 | 0,5                   | 0,2  | <0,1                 | <0,1 | 0,2                  | 0,1  | 0,1                  | 0,1  | 0,1                  | 0,1  |
|                 |                                                                                                 | 9,3                | 12,3 |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                                                                                                 | 16,4               | 18,4 |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                                                                                                 | 8,6                | 11,6 |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |                      |      |
| GGBFS<br>C32/40 | vattenyta                                                                                       | 18,0               | 19,7 | 0,5                   | 0,2  | <0,1                 | <0,1 | 0,3                  | 0,3  | 0,2                  | 0,1  | 0,1                  | 0,1  |
|                 |                                                                                                 | 13,3               | 13,8 |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                                                                                                 | 15,5               | 16,1 |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |                      |      |
|                 |                                                                                                 | 19,5               | 17,1 |                       |      |                      |      |                      |      |                      |      |                      |      |

När det gäller korrosionshastigheten hos de rostfria provstängerna (gäller både ihopkopplade och ej ihopkopplade provstänger) framgår det av **tabellerna 17-20** att korrosionshastigheten är mycket låg efter två års exponering ( $< 0,5 \mu\text{m}/\text{år}$ ) hos samtliga provstänger av stålqualiteten EN 1.4301, EN 1.4436, EN 1.4162, EN1.4362 och EN 1.4462. Korrosionshastigheten hos de rostfria stängerna har sjunkit något efter två års exponering jämfört med korrosionshastigheten efter ett års exponering.

Ingen galvanisk påverkan från de rostfria stålen har kunnat påvisas efter ett och två års exponering i havsvatten.

Ingen inverkan av olika betongkvaliteter på korrosionshastigheten hos både provstänger av kolstål och rostfritt stål har kunnat konstateras efter två års exponering i olika betongblock delvis nedsänkta i havsvatten.

Ingen galvanisk påverkan kunde konstateras på de provstänger av kolstål som är ingjutna i en kloridhaltig betong och ihopkopplade med provstänger ingjutna i en betong utan klorider.

I **tabell 21** visas korrosionshastigheten hos utstickande provstänger av kolstål och rostfritt stål av olika stålqualiteter som exponerats ett och två år i betongblock delvis nedsänkta i havsvatten. Som framgår av **tabell 21** så är korrosionshastigheten låg efter två års exponering hos samtliga rostfria provstängerna. Korrosionshastigheten hos ihopkopplade provstänger av kolstål i betong utan klorider är lägre än korrosionshastigheten hos provstänger av kolstål exponerade i kloridhaltig betong, **tabell 22**. Den galvaniska effekten från ihopkopplade provstänger av kolstål som ingjuts i kloridfri betong och som är ihopkopplad med provstänger av kolstål ingjuten i kloridhaltig betong är försumbar. Den högre korrosionshastigheten som uppmättes hos provstänger i en kloridhaltig betong jämfört med korrosionshastigheten hos en kloridfri betong beror enbart på provstängernas egenkorrosionen.

**Tabell 21** Korrosionshastigheten hos utstickande provstänger av kolstål och rostfritt stål exponerade ett och två år i både i betong och i luft. Betongblocken är delvis nedsänkta i havsvatten.

| Betong-kvalitet      | Kolstål<br>( $\mu\text{m}/\text{år}$ ) | EN 1.4301<br>( $\mu\text{m}/\text{år}$ ) | EN 1.4436<br>( $\mu\text{m}/\text{år}$ ) | EN 1.4162<br>( $\mu\text{m}/\text{år}$ ) | EN 1.4362<br>( $\mu\text{m}/\text{år}$ ) | EN 1.4462<br>( $\mu\text{m}/\text{år}$ ) |
|----------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|
| OPC C45/55<br>(1 år) | 63,0                                   | 0,6                                      | 0,1                                      | 0,5                                      | 0,5                                      | 0,1                                      |
| OPC C45/55<br>(2 år) | 39,0                                   | 0,3                                      | <0,1                                     | 0,2                                      | 0,2                                      | <0,1                                     |

**Tabell 22** Korrosionshastigheten hos ihopkopplade långa provstänger av kolstål i betong utan klorider ihopkopplade med provstänger av kolstål med klorider.

| Betongkvalitet             | Korrosionshastighet kolstål<br>$\mu\text{m}/\text{år}$ |      |
|----------------------------|--------------------------------------------------------|------|
|                            | 1 år                                                   | 2 år |
| OPC C45/55, 3 % klorider   | 20,6                                                   | 16,2 |
| OPC C45/55, 0 % klorider   | 10,6                                                   | 11,2 |
| PFA C32/40, 3 % klorider   | 18,5                                                   | 15,5 |
| PFA C32/40, 0 % klorider   | 10,5                                                   | 9,0  |
| GGBFS C32/40, 3 % klorider | 20,8                                                   | 17,5 |
| GGBFS C32/40, 0 % klorider | 14,4                                                   | 11,7 |

## 6.2 Utomhusexponering av rostfri armering ingjutna i betongblock med hög kloridhalt

### 6.2.1 Betongblockens utseende efter två års utomhusexponering

I **figur 21** visas utseendet hos samtliga betongblock med ingjutna provstänger av kolstål och rostfritt stål efter två års utomhusexponering vid Swerea KIMAB provningsstation i Kista. Vid en kloridhalt överstigande 4 vikt- % per cementvikt förekom betongsprickor vid de ingjutna provstängerna av kolstål. Inga betongsprickor kunde konstateras vid de rostfria provstängerna. I **figur 22** vis ett exempel på betongsprickor orsakade av sprängande rost från provstänger av kolstål.



**Figur 21** *Betongblock med ingjutna provstänger av rostfritt stål och kolstål. Betongblocken har exponerats utomhus i två år i Stockholm*



**Figur 22** *Betongblock med betongspricka orsakad av korrosionsprodukter från kraftigt korroderade provstänger av kolstål efter två års utomhusexponering. Inga sprickor från de rostfria provstängerna kunde konstateras.*

I **tabell 23** visas den totala kloridhalten per bindemedelsvikt hos betongblocken före och efter två års utomhusexponering.

**Tabell 23** Resultat från uppmätt total kloridhalt per bindemedelsvikt i betongblock med varierande kloridhalt före exponering och efter två års utomhusexponering.

| Betongkvalitet           | Total kloridhalt per bindemedelsvikt före exponering (%) | Total kloridhalt per bindemedelsvikt efter exponering (%) |
|--------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| OPC C45/55 (Cem I)       | 0                                                        | 0                                                         |
|                          | 2                                                        | 1,4                                                       |
|                          | 4                                                        | 2,0                                                       |
|                          | 6                                                        | 3,2                                                       |
|                          | 8                                                        | 1,9                                                       |
|                          | 10                                                       | 2,0                                                       |
| PFA C32/40 (CEM IIB-V)   | 0                                                        | 0                                                         |
|                          | 2                                                        | 1,5                                                       |
|                          | 4                                                        | 1,6                                                       |
|                          | 6                                                        | 1,7                                                       |
|                          | 8                                                        | 3,4                                                       |
|                          | 10                                                       | 4,6                                                       |
| GGBFS C32/40 2(CEM IIIA) | 0                                                        | 0                                                         |
|                          | 2                                                        | 1,0                                                       |
|                          | 4                                                        | 1,1                                                       |
|                          | 6                                                        | 1,5                                                       |
|                          | 8                                                        | 5,2                                                       |
|                          | 10                                                       | 2,9                                                       |

Som framgår av resultaten av kloridhaltsbestämningarna i **tabell 23** har halten klorider i betongblocken minskat kraftigt under exponeringen. En möjlig orsak till detta är att kloriderna lakats ut under exponeringen. Vid mycket hög inblandning av klorider i betongen blir betong mer porös vilket ger en ökad urlakningshastighet.

### 6.2.2 Provstängernas utseende efter två års utomhusexponering

I **figurerna 23-40** visas utseendet hos samtliga provstänger av kolstål och rostfritt stål (fem olika stålkvaliteter) som varit ingjutna i kloridhaltig betong och som exponerats två utomhus vid Swerea KIMABs provningsstation vid KTH/Kista.



**Figur 23** Utseendet hos provstänger av rostfritt stål och kolstål efter två års exponering utomhus ingjutna i betong (OPC C45/55, vbt 0,45) utan klorider.



**Figur 24** Utseendet hos provstänger av rostfritt stål och kolstål efter två års exponering utomhus ingjutna i betong (OPC C45/55, vbt 0,45) med 2 % klorider.



**Figur 25** Utseendet hos provstänger av rostfritt stål och kolstål efter två års exponering utomhus ingjutna i betong (OPC C45/55, vbt 0,45) med 4 % klorider.



**Figur 26** Utseendet hos provstänger av rostfritt stål och kolstål efter två års exponering utomhus ingjutna i betong (OPC C45/55, vbt 0,45) med 6 % klorider.



|                  |
|------------------|
| EN 1.4362        |
| EN 1.4162        |
| EN 1.4301        |
| EN 1.4436        |
| EN 1.4462        |
| Referens kolstål |

**Figur 27** Utseendet hos provstänger av rostfritt stål och kolstål efter två års exponering utomhus ingjutna i betong (OPC C45/55, vbt 0,45) med 8 % klorider.



|                  |
|------------------|
| EN 1.4362        |
| EN 1.4162        |
| EN 1.4301        |
| EN 1.4436        |
| EN 1.4462        |
| Referens kolstål |

**Figur 28** Utseendet hos provstänger av rostfritt stål och kolstål efter två års exponering utomhus ingjutna i betong (OPC C45/55, vbt 0,45) med 10 % klorider



**Figur 29** Utseendet hos provstänger av rostfritt stål och kolstål efter två års exponering utomhus ingjutna i betong (PFA C32/40, vbt 0,45) utan klorider.



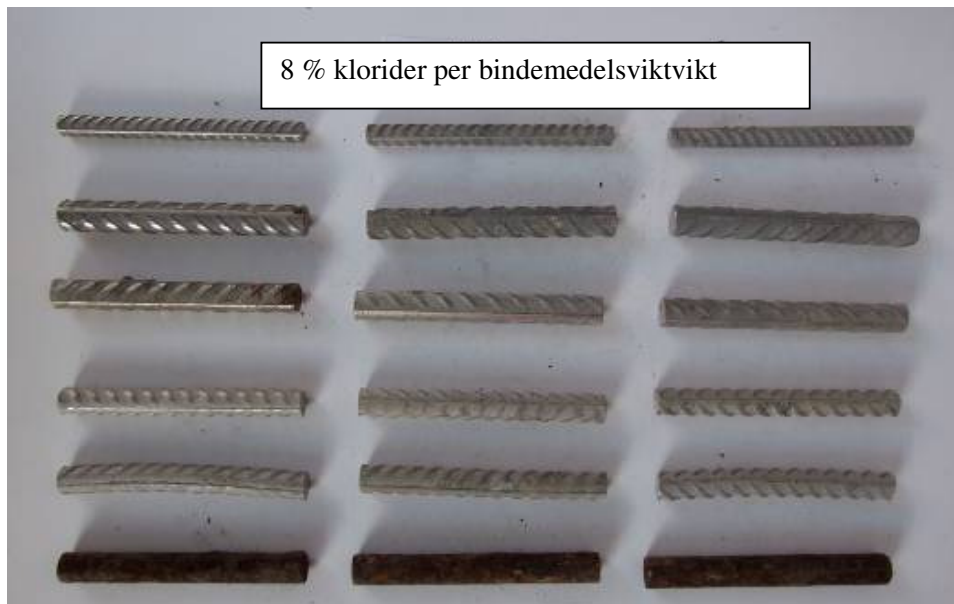
**Figur 30** Utseendet hos provstänger av rostfritt stål och kolstål efter två års exponering utomhus ingjutna i betong (PFA C32/40, vbt 0,45) med 2 % klorider.



**Figur 31** Utseendet hos provstänger av rostfritt stål och kolstål efter två års exponering utomhus ingjutna i betong (PFA C32/40, vbt 0,45) med 4 % klorider.



**Figur 32** Utseendet hos provstänger av rostfritt stål och kolstål efter två års exponering utomhus ingjutna i betong (PFA C32/40, vbt 0,45) med 6 % klorider



EN 1.4362

EN 1.4162

EN 1.4301

EN 1.4436

EN 1.4462

Referens kolstål

**Figur 33** Utseendet hos provstänger av rostfritt stål och kolstål efter två års exponering utomhus ingjutna i betong (PFA C32/40, vbt 0,45) med 8 % klorider



EN 1.4362

EN 1.4162

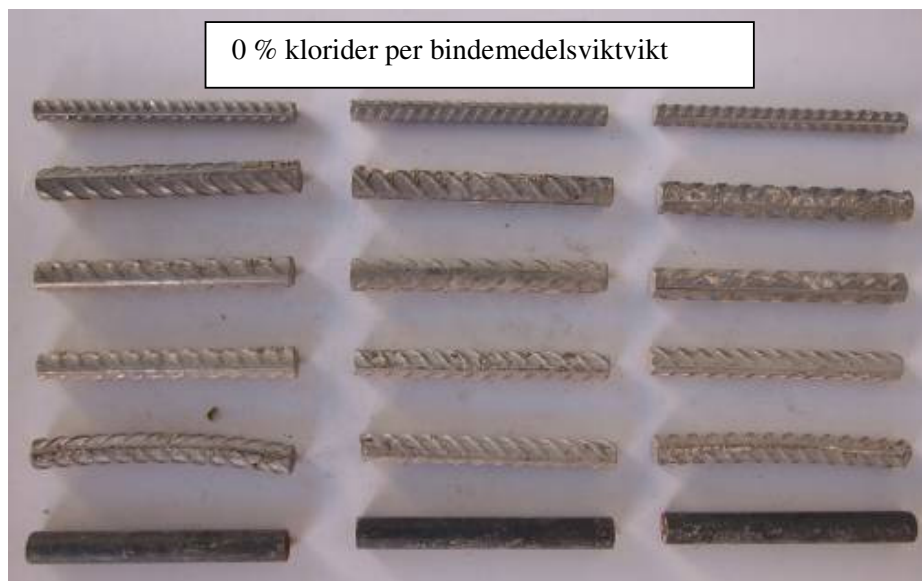
EN 1.4301

EN 1.4436

EN 1.4462

Referens kolstål

**Figur 34** Utseendet hos provstänger av rostfritt stål och kolstål efter två års exponering utomhus ingjutna i betong (PFA C32/40, vbt 0,45) med 10 % klorider



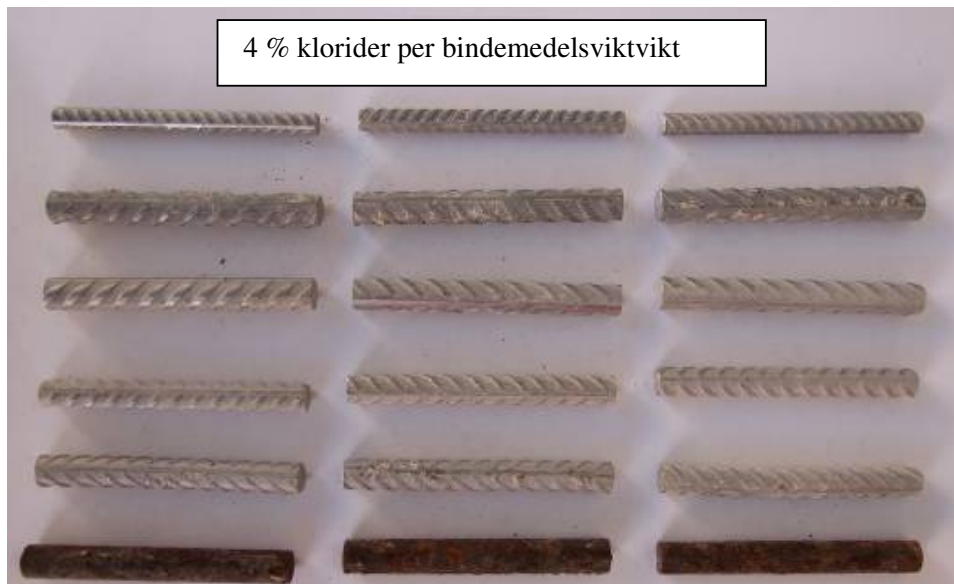
**Figur 35** Utseendet hos provstänger av rostfritt stål och kolstål efter två års exponering utomhus ingjutna i betong (GGBFS C32/40, vbt 0,45) utan klorider

|                  |
|------------------|
| EN 1.4362        |
| EN 1.4162        |
| EN 1.4301        |
| EN 1.4436        |
| EN 1.4462        |
| Referens kolstål |



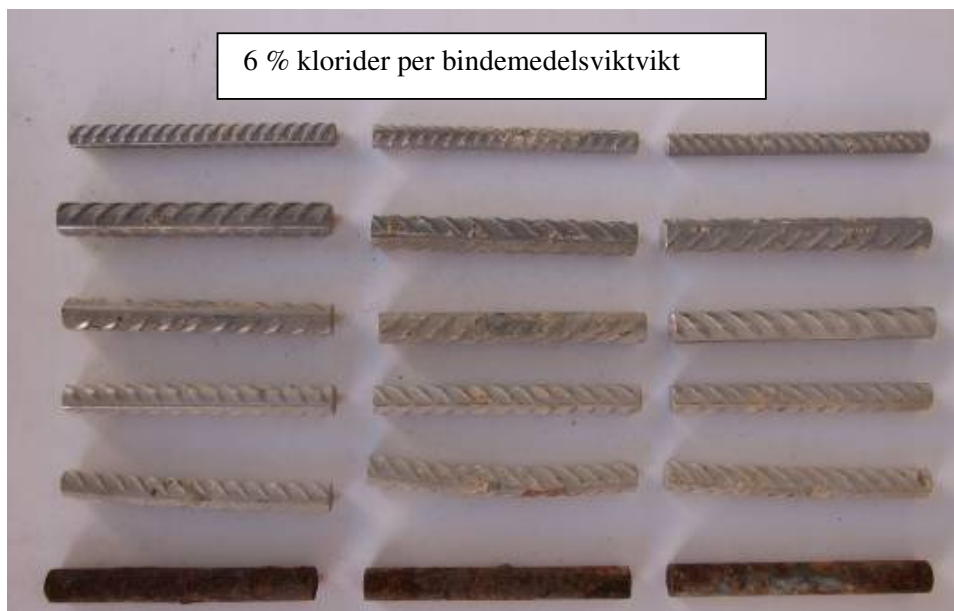
**Figur 36** Utseendet hos provstänger av rostfritt stål och kolstål efter två års exponering utomhus ingjutna i betong (GGBFS C32/40, vbt 0,45) med 2 % klorider

|                  |
|------------------|
| EN 1.4362        |
| EN 1.4162        |
| EN 1.4301        |
| EN 1.4436        |
| EN 1.4462        |
| Referens kolstål |



EN 1.4362  
EN 1.4162  
EN 1.4301  
EN 1.4436  
EN 1.4462  
Referens kolstål

**Figur 37** Utseendet hos provstänger av rostfritt stål och kolstål efter två års exponering utomhus ingjutna i betong (GGBFS C32/40, vbt 0,45) med 4 % klorider



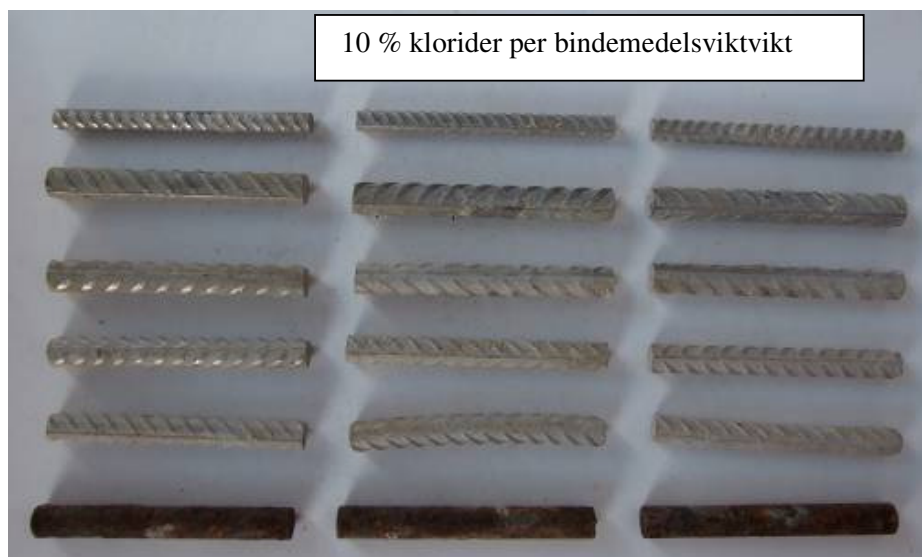
EN 1.4362  
EN 1.4162  
EN 1.4301  
EN 1.4436  
EN 1.4462  
Referens kolstål

**Figur 38** Utseendet hos provstänger av rostfritt stål och kolstål efter två års exponering utomhus ingjutna i betong (GGBFS C32/40, vbt 0,45) med 6 % klorider



**Figur 39** Utseendet hos provstänger av rostfritt stål och kolstål efter två års exponering utomhus ingjutna i betong (GGBFS C32/40, vbt 0,45) med 8 % klorider

EN 1.4362  
EN 1.4162  
EN 1.4301  
  
EN 1.4436  
EN 1.4462  
Referens kolstål



**Figur 40** Utseendet hos provstänger av rostfritt stål och kolstål efter två års exponering utomhus ingjutna i betong (GGBFS C32/40, vbt 0,45) med 10 % klorider

EN 1.4362  
EN 1.4162  
EN 1.4301  
  
EN 1.4436  
EN 1.4462  
Referens kolstål

### 6.2.3 Korrosionshastighet och gropfrätning hos provstänger av kolstål och rostfritt stål efter två års exponering i kloridhaltig betong

I **tabell 24-26** visas resultaten från utvärderingen av korrosionshastigheten hos provstänger av både kolstål och rostfritt stål i kloridhaltiga betongblock med olika bindemedel efter två års utomhusexponering.

**Tabell 24** Resultat från mätningar av korrosionshastigheten hos provstänger av kolstål och rostfritt stål efter två års exponering i betongblock(OPC C45/55, vbt 0,45) med olika kloridhalt.

| Betongblock<br>Kloridhalt (%) |       | Kolstål<br>Korrosions-<br>hastighet<br>för varje<br>enskild<br>provstång<br>µm/år | EN 1.4301<br>Korrosions-<br>hastighet<br>för varje<br>enskild<br>provstång<br>µm/år | EN 1.4436<br>Korrosions-<br>hastighet<br>för varje<br>enskild<br>provstång<br>µm/år | EN 1.4162<br>Korrosions-<br>hastighet<br>för varje<br>enskild<br>provstång<br>µm/år | EN 1.4362<br>Korrosions-<br>hastighet<br>för varje<br>enskild<br>provstång<br>µm/år | EN 1.4462<br>Korrosions-<br>hastighet<br>för varje<br>enskild<br>provstång<br>µm/år |
|-------------------------------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Före                          | Efter |                                                                                   |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |
| 0                             | 0     | 8,1                                                                               | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,1                                                                                 | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                |
|                               |       | 7,9                                                                               | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
|                               |       | 8,1                                                                               | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
| 2                             | 1,4   | 31,8                                                                              | 0,3                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,2                                                                                 | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                |
|                               |       | 20,8                                                                              | 0,3                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,1                                                                                 | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                |
|                               |       | 28,6                                                                              | 0,4                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
| 4                             | 2,0   | 58,6                                                                              | 0,4                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,2                                                                                 | 0,2                                                                                 | <0,1                                                                                |
|                               |       | 64,5                                                                              | 0,4                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,2                                                                                 | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                |
|                               |       | 65,7                                                                              | 0,3                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,1                                                                                 | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                |
| 6                             | 3,2   | 108,8                                                                             | 0,3                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,2                                                                                 | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                |
|                               |       | 89,4                                                                              | 0,2                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,2                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
|                               |       | 101,9                                                                             | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
| 8                             | 1,9   | 99,8                                                                              | 0,5                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,4                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
|                               |       | 78,3                                                                              | 0,3                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,4                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
|                               |       | 93,4                                                                              | 0,3                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,4                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
| 10                            | 2,0   | 82,3                                                                              | 0,4                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,5                                                                                 | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                |
|                               |       | 52,8                                                                              | 0,4                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,4                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
|                               |       | 60,3                                                                              | 0,2                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,4                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |

**Tabell 25** Resultat från mätningar av korrosionshastigheten hos provstänger av kolstål och rostfritt stål efter två års exponering i betongblock(PFA C32/40, vbt 0,45) med kloridhalt.

| Betongblock<br>Kloridhalt (%) |       | Kolstål<br>Korrosions-<br>hastighet<br>för varje<br>enskild<br>provstång<br>µm/år | EN 1.4301<br>Korrosions-<br>hastighet<br>för varje<br>enskild<br>provstång<br>µm/år | EN 1.4436<br>Korrosions-<br>hastighet<br>för varje<br>enskild<br>provstång<br>µm/år | EN 1.4162<br>Korrosions-<br>hastighet<br>för varje<br>enskild<br>provstång<br>µm/år | EN 1.4362<br>Korrosions-<br>hastighet<br>för varje<br>enskild<br>provstång<br>µm/år | EN 1.4462<br>Korrosions-<br>hastighet<br>för varje<br>enskild<br>provstång<br>µm/år |
|-------------------------------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Före                          | Efter |                                                                                   |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |
| 0                             | 0     | 8,4                                                                               | 0,2                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,1                                                                                 | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                |
|                               |       | 9,4                                                                               | 0,2                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
|                               |       | 11,5                                                                              | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
| 2                             | 1,5   | 14,9                                                                              | 0,3                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
|                               |       | 25,6                                                                              | 0,3                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
|                               |       | 25,5                                                                              | 0,2                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
| 4                             | 1,6   | 56,4                                                                              | 0,4                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,2                                                                                 | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                |
|                               |       | 50,1                                                                              | 0,3                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,1                                                                                 | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                |
|                               |       | 46,4                                                                              | 0,2                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
| 6                             | 1,7   | 79,8                                                                              | 0,7                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,5                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
|                               |       | 51,9                                                                              | 0,4                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,4                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
|                               |       | 48,2                                                                              | 0,2                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
| 8                             | 3,4   | 77,1                                                                              | 0,9                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,3                                                                                 | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                |
|                               |       | 66,5                                                                              | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
|                               |       | 65,1                                                                              | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
| 10                            | 4,6   | 38,2                                                                              | 0,2                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                |
|                               |       | 38,0                                                                              | 0,2                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                |
|                               |       | 36,5                                                                              | 0,2                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |

**Tabell 26** Resultat från mätningar av korrosionshastigheten hos provstänger av kolstål och rostfritt stål efter två års exponering i betongblock (GGBFS C32/40, vbt 0,45) med olika bindemedel och kloridhalt.

| Betongblock<br>Kloridhalt (%) |       | Kolstål<br>Korrosions-<br>hastighet<br>för varje<br>enskild<br>provstång<br>µm/år | EN 1.4301<br>Korrosions-<br>hastighet<br>för varje<br>enskild<br>provstång<br>µm/år | EN 1.4436<br>Korrosions-<br>hastighet<br>för varje<br>enskild<br>provstång<br>µm/år | EN 1.4162<br>Korrosions-<br>hastighet<br>för varje<br>enskild<br>provstång<br>µm/år | EN 1.4362<br>Korrosions-<br>hastighet<br>för varje<br>enskild<br>provstång<br>µm/år | EN 1.4462<br>Korrosions-<br>hastighet<br>för varje<br>enskild<br>provstång<br>µm/år |
|-------------------------------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Före                          | Efter |                                                                                   |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |
| 0                             | 0     | 9,0                                                                               | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
|                               |       | 8,0                                                                               | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
|                               |       | 7,9                                                                               | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
| 2                             | 1,1   | 35,3                                                                              | 0,4                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
|                               |       | 24,6                                                                              | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
|                               |       | 23,8                                                                              | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
| 4                             | 1,0   | 61,8                                                                              | 0,2                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,1                                                                                 | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                |
|                               |       | 55,2                                                                              | 0,2                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
|                               |       | 42,5                                                                              | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
| 6                             | 1,5   | 63,8                                                                              | 0,5                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
|                               |       | 52,3                                                                              | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
|                               |       | 40,4                                                                              | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
| 8                             | 5,2   | 99,6                                                                              | 0,2                                                                                 | <0,1                                                                                | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
|                               |       | 79,4                                                                              | 0,2                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
|                               |       | 26,9                                                                              | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
| 10                            | 2,9   | 51,6                                                                              | 0,1                                                                                 | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
|                               |       | 48,4                                                                              | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |
|                               |       | 46,6                                                                              | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                | <0,1                                                                                |

Det framgår av **tabell 24-26** att korrosionshastigheten hos de rostfria provstängerna är mycket låga (mellan 0 och 0,5 µm/år hos de rostfria stålkaliterna EN 1.4436, EN 1.4162, EN 1.4362 och EN 1.4462). För den rostfria stålkaliteten EN 1.4301 är korrosionshastigheten som högst 0,9 µm/år. Ingen större skillnad i korrosionshastighet mellan olika bindemedel i betongen kunde konstateras.

För provstänger av kolstål varierade korrosionshastigheten från ca 8 µm/år vid en total kloridhalt av 0 % oberoende av betongkvalitet. Den högsta korrosionshastigheten efter två års exponering av provstänger av kolstål uppmättes i betongblock med ett bindemedel av portland cement vid en total kloridhalt av 6 % (108,8 µm/år). För betongblock med flygaska som bindemedel uppmättes den högsta korrosionshastigheten vid en total kloridhalt av 6 % (79,8 µm/år). För betongblock med slaggcement uppmättes den högsta korrosionshastigheten vid en total kloridhalt av 8 % av bindemedelsvikten (99,6 µm/år).

De uppmätta korrosionshastigheterna hos kolstål är betydligt högre än vad som tidigare uppmätts för betongblock med ingjutna klorider innehållande anläggningscement. I en tidigare undersökning utförd av Swerea KIMAB uppmättes korrosionshastigheter av ca 23 µm/år vid en total kloridhalt av 3,2 % per cementvikt.

För provstänger av kolstål är korrosionshastigheten hög vid en total kloridhalt i betongen som ligger mellan 4 och 8 %. Vid en total kloridhalt av 8-10 % sjunker korrosionshastigheten för kolstål. Vid mycket höga kloridhalter (> 6 % klorider) kommer kloriderna att binda fukt vilket innebär en försämrad syretransport vilket resulterar i en lägre korrosionshastighet hos kolstålet.

I **tabell 27-29** redovisas resultat av okulära undersökningar av förekomst av frätgropar hos både provstänger kolstål och rostfritt stål för tre olika betongkvaliteter. Undersökningen utfördes med ett makromikroskåp i en låg förstoring (16 gånger). Frätgroparnas maximala djup mättes enbart på provstänger av kolstål. De rostfria provstängernas frätgropar har för liten diameter för att kunna mätas med en frätgropsmätare. Mätning av frätgropsdjup med metalljumsmikroskåp är ej möjligt att göra pga av förekomst av kammar.

**Tabell 27** Resultat från undersökning av förekomst av lokala korrosionsangrepp (frätgropar) hos provstänger av kolstål och rostfritt stål. Provstängerna har exponerats utomhus ingjutna i betongblock (OPC C45/55, vbt 0,45) med varierande kloridhalt.

| Betongblock<br>Kloridhalt (%) | Kolstål<br>Förekomst<br>av frät-<br>gropar<br>(max<br>frätdjup,mm) | EN 1.4301<br>Förekomst<br>av frät-<br>gropar | EN 1.4436<br>Förekomst<br>av frät-<br>gropar | EN 1.4162<br>Förekomst<br>av frät-<br>gropar | EN 1.4362<br>Förekomst<br>av frät-<br>gropar | EN 1.4462<br>Förekomst<br>av frät-<br>gropar |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Före                          |                                                                    |                                              |                                              |                                              |                                              |                                              |
| Efter                         |                                                                    |                                              |                                              |                                              |                                              |                                              |
| 0                             | 0                                                                  | Nej (0 mm)                                   | Nej                                          | Nej                                          | Nej                                          | Nej                                          |
| 2                             | 1,4                                                                | Ja (1,1 mm)                                  | Nej                                          | Nej                                          | Nej                                          | Nej                                          |
| 4                             | 2,0                                                                | Ja (1,0 mm)                                  | Nej                                          | Nej                                          | Nej                                          | Nej                                          |
| 6                             | 3,2                                                                | Ja (1,2 mm)                                  | Ja (*)                                       | Nej                                          | Nej                                          | Nej                                          |
| 8                             | 1,9                                                                | Ja (1,0 mm)                                  | Ja (*)                                       | Nej                                          | Ja (*)                                       | Nej                                          |
| 10                            | 2,0                                                                | Ja (0,9 mm)                                  | Ja (*)                                       | Nej                                          | Ja (*)                                       | Nej                                          |

(\*) Frätgropar förekommer men är så små och få att de saknar någon praktisk betydelse

**Tabell 28** Resultat från undersökning av förekomst av lokala korrosionsangrepp (frätgropar) hos provstänger av kolstål och rostfritt stål. Provstängerna har exponerats utomhus ingjutna i betongblock (PFA C32/40, vbt 0,45) med varierande kloridhalt

| Betongblock<br>Kloridhalt<br>(%) | Kolstål<br>Förekomst<br>av<br>frätgropar<br>(max.<br>frätdjup,<br>mm) | EN 1.4301<br>Förekomst<br>av frät-<br>gropar | EN 1.4436<br>Förekomst<br>av frät-<br>gropar | EN 1.4162<br>Förekomst<br>av frät-<br>gropar | EN 1.4362<br>Förekomst<br>av frät-<br>gropar | EN 1.4462<br>Förekomst<br>av frät-<br>gropar |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Före                             | Efter                                                                 |                                              |                                              |                                              |                                              |                                              |
| 0                                | 0                                                                     | Nej (0 mm)                                   | Nej                                          | Nej                                          | Nej                                          | Nej                                          |
| 2                                | 1,5                                                                   | Ja (0,5 mm)                                  | Nej                                          | Nej                                          | Nej                                          | Nej                                          |
| 4                                | 1,6                                                                   | Ja (1,0 mm)                                  | Nej                                          | Nej                                          | Nej                                          | Nej                                          |
| 6                                | 1,7                                                                   | Ja (1,0 mm)                                  | Ja (*)                                       | Nej                                          | Ja (*)                                       | Nej                                          |
| 8                                | 3,4                                                                   | Ja (1,0 mm)                                  | Ja (*)                                       | Nej                                          | Ja (*)                                       | Nej                                          |
| 10                               | 4,6                                                                   | Ja (1,3 mm)                                  | Ja (*)                                       | Nej                                          | Ja (*)                                       | Nej                                          |

(\*) Frätgropar förekommer men är så små och få att de saknar någon praktisk betydelse

**Tabell 29** Resultat från undersökning av förekomst av lokala korrosionsangrepp (frätgropar) hos provstänger av kolstål och rostfritt stål. Provstängerna har exponerats utomhus ingjutna i betongblock (GGBFS C32/40, vbt 0,45) med varierande kloridhalt

| Betongblock<br>Kloridhalt<br>(%) | Kolstål<br>Förekomst<br>av frät-<br>gropar<br>(max.<br>frätdjup,<br>mm) | EN 1.4301<br>Förekomst<br>av frät-<br>gropar | EN 1.4436<br>Förekomst<br>av frät-<br>gropar | EN 1.4162<br>Förekomst<br>av frät-<br>gropar | EN 1.4362<br>Förekomst<br>av frät-<br>gropar | EN 1.4462<br>Förekomst<br>av frät-<br>gropar |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Före                             | Efter                                                                   |                                              |                                              |                                              |                                              |                                              |
| 0                                | 0                                                                       | Nej (0 mm)                                   | Nej                                          | Nej                                          | Nej                                          | Nej                                          |
| 2                                | 1,1                                                                     | Ja (0,5 mm)                                  | Nej                                          | Nej                                          | Nej                                          | Nej                                          |
| 4                                | 1,0                                                                     | Ja (0,8 mm)                                  | Nej                                          | Nej                                          | Nej                                          | Nej                                          |
| 6                                | 1,5                                                                     | Ja (1,3 mm)                                  | Ja (*)                                       | Nej                                          | Ja (*)                                       | Nej                                          |
| 8                                | 5,2                                                                     | Ja (1,2 mm)                                  | Ja (*)                                       | Nej                                          | Ja (*)                                       | Nej                                          |
| 10                               | 2,9                                                                     | Ja (1,6 mm)                                  | Ja (*)                                       | Nej                                          | Ja (*)                                       | Nej                                          |

(\*) Frätgropar förekommer men är så små och få att de saknar någon praktisk betydelse

Det framgår av resultaten i från mätningar av maximalt frätgropsdjup hos provstänger av kolstål efter två års utomhusexponering i betongblock med hög kloridhalt att frätgropsdjupet varierar från 0,5 mm (2 % klorider) upp till 1,6 mm. När det gäller de rostfria provstängerna har det inte varit möjligt att mäta frätgropsdjupet. Däremot kan förekomst av frätgropar bestämmas i ett makromikroskop i 16 X förstoring. Det bedöms dock att de flesta påträffade frätgropar har ingen praktisk betydelse för de rostfria provstängerna hållfasthet.

## 6.3 Laboratorieundersökning – galvanisk korrosion

### 6.3.1 Utvärdering av utseende hos betongcylindrar, ingjutna provstänger av kolstål och rostfria stålrör

I **figur 41** visas utseendet hos sex av totalt 12 st betongcylindrar med ingjutna provstänger av kolstål som varit ihopkopplade med olika rostfria stålrör nedsänkta i ett vattenbad med 3 % NaCl vid rumstemperatur. I betongcylinder A (ref) har provstängan av kolstål inte varit ihopkopplat med något rostfritt stålrör.



**Figur 41** *Provstänger av kolstål ingjutna i betong har exponerats 8 månader ihopkopplade med olika rostfria stålrör nedsänkta i ett vattenbad med 3 % NaCl. Prov A ingen ihopkoppling, För prov B-F har provstängerna av kolstål varit ihopkopplade med olika rostfria stålrör.*

Ingen utfällning av korrosionsprodukter kunde konstatera på ytan hos referensen, betongcylinder A. Som framgår av utseendet hos betongcylindrarna så har det fällts ut rödrost ( $\text{FeOOH}$ ) på enstaka ställen hos betongcylindrarnas yta (prov C-F). För prov B har det fällts ut svarta korrosionsprodukter ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) på betongytan. En möjlig förklaring till att det har bildas svarta korrosionsprodukter i stället för rödrost är att tillgången på syre har varit betydligt lägre vid prov B jämfört med proverna C-F. Den lägre syrehalten beror på att det rostfria röret som använts runt prov B har en betydligt mindre diameter och därmed en smalare spalt (mindre vätskevolym) mellan det rostfria stålröret och betongcylinder jämfört med prov C-F.

I **figur 42** visas provstängernas utseende efter det att betongen har avlägsnats och stängerna rengjorts från betong och korrosionsprodukter genom betning i Clarkes lösning. Samtliga provstänger som har varit ihopkopplade med rostfria stålrör har fått kraftiga lokala korrosionsangrepp. De provstänger av kolstål som inte varit ihopkopplade med rostfria stålrör har betydligt mindre korrosionsangrepp på stålytan jämfört med ihopkopplade provstänger. De korrosionsangrepp som förekommer på okopplade provstänger kan härledas till den höga kloridhalt som tillsattes betongen vid gjutning.



| A(ref)   | B         | C         | D         | E         | F         |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Cylinder | EN 1.4362 | EN 1.4162 | EN 1.4462 | EN 1.4301 | EN 1.4436 |

**Figur 42** Utseendet hos betade provstänger av kolstål efter 8 månaders korrosionsprovning i 3 % NaCl.

Det kan konstateras att samtliga rostfria stålrör som varit ihopkopplade med de ingjutna provstängerna av kolstål efter 8 månaders exponering i 3 % NaCl var helt oangripna av korrosion. Inga okopplade rostfria stålrör, d.v.s. utan katodiskt skydd från kolstål, har ingått i undersökningen.

### 6.3.2 Utvärdering av korrosionshastighet hos ingjutna provstänger av kolstål

Resultaten från utvärderingen av korrosionshastigheten hos både ihopkopplade och icke ihopkopplade provstänger av kolstål efter 8 månaders exponering i en 3 % NaCl lösning på laboratorium visas i **tabell 30**. Som framgår av resultaten i **tabell 30** så ökar korrosionshastigheten kraftigt vid en ihopkoppling av de ingjutna provstängerna. Uppmätt korrosionshastighet för ihopkopplade stänger var mellan 83  $\mu\text{m}/\text{år}$  och 231  $\mu\text{m}/\text{år}$ . Det framgår vidare att korrosionshastigheten är något lägre för de provstänger som varit ihopkopplade med ett rostfritt stålrör av stålqualiteten EN 1.4301 jämfört med ihopkoppling med övriga rostfria stålrörskvaliteter. En möjlig förklaring till detta är att kontakten mellan stålrör och mätsladd för dessa två prov hade korroderat vilket ger en ökad resistans i kretsen och därmed minskad galvanisk korrosionsström.

För de provstänger som inte kopplats ihop med rostfria stålrör uppmättes en korrosionshastighet av mellan 13 och 31  $\mu\text{m}/\text{år}$ . Som framgår av resultaten i **tabell 30** ökar korrosionshastigheten hos ingjutet kolstål med ca en faktor 10 vid ihopkoppling med rostfritt stål under vattenmättade förhållanden.

**Tabell 30** Korrosionshastigheten hos kopplade och icke kopplade provstänger av kolstål efter 8 månaders korrosionsprovning på laboratorium i 3 % NaCl.

| Provstång<br>kolstål<br><br>(nr) | Rostfri stålrör<br><br>(EN-nummer) | Korrosionshastighet<br>Provstång kolstål<br><br>(Medelvärde två stänger)<br>( $\mu\text{m}/\text{år}$ )      ( $\mu\text{m}/\text{år}$ ) |     |
|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|                                  |                                    |                                                                                                                                          |     |
| 28                               | 1.4301 (ihopkopplad)               | 117                                                                                                                                      | 100 |
| 34                               | 1.4301 (ihopkopplad)               | 83                                                                                                                                       |     |
| 29                               | 1.4404 (ihopkopplad)               | 192                                                                                                                                      | 194 |
| 35                               | 1.4404 (ihopkopplad)               | 195                                                                                                                                      |     |
| 30                               | 1.4162 (ihopkopplad)               | 203                                                                                                                                      | 198 |
| 36                               | 1.4162 (ihopkopplad)               | 193                                                                                                                                      |     |
| 31                               | 1.4362 (ihopkopplad)               | 220                                                                                                                                      | 226 |
| 37                               | 1.4362 (ihopkopplad)               | 231                                                                                                                                      |     |
| 32                               | 1.4462 (ihopkopplad)               | 175                                                                                                                                      | 175 |
| 38                               | 1.4462 (ihopkopplad)               | 174                                                                                                                                      |     |
| 27                               | Ej ihopkopplad                     | 31                                                                                                                                       | 21  |
| 33                               | Ej ihopkopplad                     | 11                                                                                                                                       |     |

### 6.3.3 Utvärdering av elektrokemisk potential och galvanisk korrosionsström

I **tabell 31** visas resultat från mätningar av elektrokemisk potential före ihopkoppling av rostfria stålrör med ingjutna provstänger av kolstål. Som framgår av resultaten från mätningarna, så är de rostfria stålrörens elektrokemiska potential före ihopkoppling ca 250-300 mV mindre negativ jämfört med kolstålets elektrokemiska potential

Vid ihopkoppling av stålrören och de ingjutna provstängerna uppmättes en blandpotential som ligger betydligt närmare de ingjutna provstängernas elektrokemiska potential än de rostfria stålrörens potential. Detta innebär att de rostfria stålrören polariseras betydligt lättare än de ingjutna provstängerna av kolstål, **tabell 32** och **33**

**Tabell 31** Resultat från mätningar av elektrokemisk potential före ihopkoppling och efter ihopkoppling av olika rostfria stålrör med ingjutna provstänger av kolstål.

| Provstång<br>kolstål | Rostfri<br>stålrör | Ingjuten provstång<br>av kolstål före<br>ihopkoppling | Rostfri stålrör<br>före ihopkoppling | Blandpotential<br>efter<br>ihopkoppling |
|----------------------|--------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|
| Nr                   | EN-<br>nummer      | mV, SCE                                               | mV, SCE                              | mV, SCE                                 |
| 28                   | 1.4301             | -532                                                  | -236                                 | -463                                    |
| 34                   | 1.4301             | -562                                                  | -261                                 | -476                                    |
| 29                   | 1.4404             | -541                                                  | -267                                 | -463                                    |
| 35                   | 1.4404             | -546                                                  | -308                                 | -463                                    |
| 30                   | 1.4162             | -529                                                  | -230                                 | -469                                    |
| 36                   | 1.4162             | -530                                                  | -310                                 | -462                                    |
| 31                   | 1.4362             | -523                                                  | -212                                 | -474                                    |
| 37                   | 1.4362             | -552                                                  | -185                                 | -490                                    |
| 32                   | 1.4462             | -520                                                  | -246                                 | -459                                    |
| 38                   | 1.4462             | -547                                                  | -218                                 | -4476                                   |

**Tabell 32** Resultat från mätningar av blandpotential efter fyra månaders korrosionsprovning och elektrodpotentialer efter isärkoppling av rostfria stålrör och ingjutna provstänger av kolstål

| Provstång<br>kolstål | Rostfri<br>stålrör | Ihopkopplat<br>(bland-<br>potential) | Provstång<br>kolstål efter<br>1 min<br>isärkoppling | Rostfri<br>stålrör efter<br>1 min<br>isärkoppling | Provstång<br>kolstål efter<br>5 tim<br>isärkoppling | Rostfri stål-<br>rör efter 5<br>tim<br>isärkoppling |
|----------------------|--------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Prov<br>nr           | EN-<br>nummer      | mV, SCE                              | mV, SCE                                             | mV, SCE                                           | mV, SCE                                             | mV, SCE                                             |
| 28                   | 1.4301             | -466                                 | -516                                                | -246                                              | -595                                                | -210                                                |
| 34                   | 1.4301             | -481                                 | -551                                                | -271                                              | -560                                                | -206                                                |
| 29                   | 1.4404             | -467                                 | -521                                                | -277                                              | -565                                                | -243                                                |
| 35                   | 1.4404             | -466                                 | -530                                                | -320                                              | -605                                                | -285                                                |
| 30                   | 1.4162             | -472                                 | -529                                                | -240                                              | -575                                                | -209                                                |
| 36                   | 1.4162             | -466                                 | -530                                                | -320                                              | -605                                                | -285                                                |
| 31                   | 1.4362             | -479                                 | -523                                                | -232                                              | -565                                                | -190                                                |
| 37                   | 1.4362             | -494                                 | -552                                                | -195                                              | -630                                                | -195                                                |
| 32                   | 1.4462             | -463                                 | -520                                                | -256                                              | -595                                                | -206                                                |
| 38                   | 1.4462             | -483                                 | -547                                                | -228                                              | -605                                                | -201                                                |

**Tabell 33** Resultat från mätningar av blandpotential efter 8 månaders korrosionsprovning och elektropotentialer efter isärkoppling av rostfria stålrör och ingjutna provstänger av kolstål.

| Provstång<br>kolstål | Rostfri<br>stålrör | Ihopkopplat<br>(bland-<br>potential) | Provstång<br>kolstål efter<br>1 min<br>isärkoppling | Rostfri<br>stålrör efter<br>1 min<br>isärkoppling | Provstång<br>kolstål efter<br>5 tim<br>isärkoppling | Rostfri stål-<br>rör efter 5<br>tim<br>isärkoppling |
|----------------------|--------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Prov<br>nr           | EN-<br>nummer      | mV, SCE                              | mV, SCE                                             | mV, SCE                                           | mV, SCE                                             | mV, SCE                                             |
| 28                   | 1.4307             | -469                                 | -523                                                | -260                                              | -599                                                | -225                                                |
| 34                   | 1.4307             | -486                                 | -530                                                | -273                                              | -572                                                | -220                                                |
| 29                   | 1.4404             | -459                                 | -517                                                | -283                                              | -566                                                | -250                                                |
| 35                   | 1.4404             | -462                                 | -529                                                | -324                                              | -604                                                | -291                                                |
| 30                   | 1.4162             | -475                                 | -534                                                | -273                                              | -598                                                | -221                                                |
| 36                   | 1.4162             | -469                                 | -528                                                | -322                                              | -610                                                | -268                                                |
| 31                   | 1.4362             | -633                                 | -675                                                | -239                                              | -739                                                | -205                                                |
| 37                   | 1.4362             | -643                                 | -682                                                | -232                                              | -745                                                | -203                                                |
| 32                   | 1.4462             | -445                                 | -520                                                | -263                                              | -586                                                | -220                                                |
| 38                   | 1.4462             | -457                                 | -535                                                | -239                                              | -592                                                | -208                                                |

I **tabell 34** visas resultat från mätningar av den galvaniska korrosionsströmmen mellan olika rostfria stålrör ihopkopplade med ingjutna provstänger av kolstål. Som framgår av tabellen så sjunker korrosionsströmmen med exponeringstiden.

**Tabell 34** Resultat från mätningar av galvanisk korrosionsström mellan ihopkopplade rostfria stålrör och provstänger av kolstål ingjutna i kloridhaltig betong delvis nedsänkta i 3 mass-% NaCl

| Provstång<br>kolstål | Rostfri<br>stålrör | Galvanisk<br>strömtäthet<br>efter 3<br>månaders<br>exponering<br>mA/m <sup>2</sup> | Galvanisk<br>strömtäthet<br>Efter 6<br>månaders<br>exponering<br>mA/m <sup>2</sup> | Galvanisk<br>ström<br>efter 8<br>månaders<br>exponering<br>mA/m <sup>2</sup> |
|----------------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Prov nr              | EN-<br>nummer      |                                                                                    |                                                                                    |                                                                              |
| 28                   | 1.4301             | 130,7                                                                              | 113,6                                                                              | 104,9                                                                        |
| 34                   | 1.4301             | 124,5                                                                              | 95,4                                                                               | 90,8                                                                         |
| 29                   | 1.4404             | 173,5                                                                              | 156,6                                                                              | 153,3                                                                        |
| 35                   | 1.4404             | 175,4                                                                              | 163,4,4                                                                            | 158,4                                                                        |
| 30                   | 1.4162             | 187,1                                                                              | 179,1                                                                              | 172,1                                                                        |
| 36                   | 1.4162             | 185,3                                                                              | 172,3                                                                              | 167,3                                                                        |
| 31                   | 1.4362             | 204,6                                                                              | 199,2,6                                                                            | 196,7                                                                        |
| 37                   | 1.4362             | 218,9                                                                              | 214,9                                                                              | 208,9                                                                        |
| 32                   | 1.4462             | 192,4                                                                              | 179,4                                                                              | 174,4                                                                        |
| 38                   | 1.4462             | 188,5                                                                              | 180,5                                                                              | 173,5                                                                        |

Som framgår av resultaten så uppmättes relativt höga galvaniska korrosionsströmmen mellan de rostfria stålrören och de ingjutna provstängerna av kolstål. Storleken på korrosionsströmmarna stämmer relativt bra med uppmätta korrosionshastigheter. En korrosionsström av  $1 \text{ mA/m}^2$  per stålyta motsvarar ungefär  $1 \text{ }\mu\text{m/år}$  i korrosionshastighet.

Sammanfattningsvis visar laboratorieundersökningarna att rostfritt stål som exponeras i kloridhaltigt vatten, och är i elektriskt kontakt med betongingjutet kolstål i kloridhaltigt vatten, kommer att ge en kraftig ökning av korrosionshastigheten hos det ingjutna kolstålet. En förutsättning för att detta skall ske är att det finns genomgående porer/defekter/sprickor i betongen så att kloridhaltigt vatten kan tränga in till stålytan. Korrosionsangreppen på provstängerna är lokaliserade vid genomgående porer/defekter/sprickor i betongen. Inga korrosionsprodukter har fällts ut på stålytan utan utfällning av korrosionsprodukter sker på betongytan i kontakt med vattnet.

Vid här utförda laboratieförsök fås rödrost ( $\text{FeOOH}$ ) på betongytan vid ihopkoppling med rostfria stålrör av en innerdiameter av 90 mm och svarta korrosionsprodukter ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) vid ihopkoppling med rostfritt rör på 50 mm. Skillnaden i utseendet hos korrosionsprodukterna som fällts ut på betongytan kan förklaras med den mindre volym vatten med löst syre som finns mellan det rostfria stålröret av en innerdiameter av 50 mm och betongcylindern jämfört den mängd vatten med löst syre som finns mellan det rostfria stålröret av en diameter av 90 mm (större mängd löst syre) och betongcylindern. Det vattenlösliga syret kommer att förbrukas betydligt snabbare i det rostfria stålröret med en innerdiameter av 50 mm vilket innebär att det bildas svartrost, magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), på grund av lägre mängd vattenlösligt. Syrehalten har dock varit tillräcklig hög för att hålla igång upplösningen av järn på provstångens stålyta.

Eftersom de rostfria stålrören och de ingjutna provstängerna utsatts för stillastående vatten så har de utfällda korrosionsprodukterna inte transporterats bort från betongytan utan har fastnat på betongytan och gett upphov till missfärgning av betongytan.

Om vattenflödet istället hade varit högt vid de ingjutna provstängerna så hade den galvaniska korrosionen på det ingjutna stålet sannolikt blivit högre än vid stillastående vatten. Vid flödande vatten tillförs hela tiden syrerikt vatten till det rostfria stålröret (katoden) som ökar korrosionshastigheten hos det ingjutna stålet (anoden). Vid kraftigt flödande vatten är det vidare mycket möjligt att korrosionsprodukterna transporteras bort från betongytan som därmed inte missfärgas.

## 6.4 Undersökning av kritisk kloridtröskelvärde för rostfritt stål i betong – laboratorieundersökning

En sammanställning över temperatur på vattenbadet och tid till initiering då initieringsströmmen uppnåddes visas i **tabell 35**. Strömmen som funktion av tid visas i **figur 44-49** där initieringsströmmen visas som en horisontell linje (i dessa strömkurvor kallas initieringsströmmen för strömgräns). Inget rostfritt material angreps av korrosion i betong med upp till 2 vikt-% Cl per cementvikt. För det högst legerade stålet EN 1.4462 (högst PRE-tal) uppnåddes aldrig initieringsströmmen för 0, 2, 6 och 10 vikt-% Cl per cementvikt. Med 4 och 8 vikt-% Cl per cementvikt så angreps stängerna av spaltkorrosion. För EN 1.4362 nåddes initieringsströmmen för 10 (20°C), 8 (20°C) och 6 (35°C) vikt-% Cl per cementvikt. För provkroppen med 4 vikt-% Cl per cementvikt inträffade spaltkorrosion.

De rostfria stålen EN 1.4301, 1.4436 och 1.4162 angreps av korrosion vid 4 vikt-% Cl per cementvikt och högre. Skillnad mellan stålen erhöles endast med 4 vikt-% Cl per cementvikt. Initieringsströmmen uppnåddes vid 20°C för EN 1.4301, vid 25°C för EN 1.4162 och vid 30°C för 1.4436. Generellt sett så hade EN 1.4301 kortast tid till initiering följt av EN 1.4162, längst tid till initiering hade EN 1.4436. Detta förhållande är något motstridigt mot materialens PRE-tal då EN 1.4162 har högre PRE-tal än 1.4436. Dock så har endast enkelprover exponerats vilket inte är tillräckligt för att bestämma korrosionshårdigheten eftersom korrosion har en stokastisk natur. För att statistiskt kunna säkerställa kloridtröskelvärden för rostfritt stål i betong krävs det att fler försöksserier utförs.

Enligt här framkomna resultat ökar korrosionshårdigheten följande ordning:

Kolstål < EN 1.4301 (304) < EN 1.4162 (2101) < EN 1.4436 (316) < EN 1.4362 (2304) < EN 1.4462 (2205)

Bedömningen baseras på tid till initiering samt temperatur för initiering för de olika armeringsmaterialen.

**Tabell 35** Temperatur för initiering av korrosion.

| Stål      | Vikt-% Cl per cementvikt                        | 0 % | 2 %        | 4 %            | 6 %            | 8 %         | 10 %           |
|-----------|-------------------------------------------------|-----|------------|----------------|----------------|-------------|----------------|
| Kolstål   | Temperatur för initiering (tid till initiering) | *   | 20°C (1 h) | 20°C (0 h)     | 20°C (0 h)     | 20°C (0 h)  | 20°C (0 h)     |
| EN 1.4301 |                                                 | *   | *          | 20°C (2dygn)   | 20°C (1 h)     | 20°C (0 h)  | 20°C (0 h)     |
| EN 1.4436 |                                                 | *   | *          | 30°C (31 dygn) | 20°C (15 h)    | 20°C (18 h) | 20°C (1 h)     |
| EN 1.4162 |                                                 | *   | *          | 25°C (24 dygn) | 20°C (7 h)     | 20°C (7 h)  | 20°C (0 h)     |
| EN 1.4362 |                                                 | *   | *          | (*)            | 35°C (54 dygn) | 20°C (3h)   | 30°C (37 dygn) |
| EN 1.4462 |                                                 | *   | *          | (*)            | *              | (*)         | *              |

\* Initiationsströmmen uppnåddes inte under exponeringsperioden (10 veckor d.v.s. exponering upp till 30 °C)

(\*) Stången angreps av spaltkorrosion

Av den tidigare litteraturstudien, **Ref 9**, så framgick det att det inte finns så många rapporterade undersökningar, av kloridtröskelvärden i betong för rostfritt stål, utförda med potentiostatisk polarisation. De flesta tidigare försök med rostfritt stål har varit i syntetiska porlösningar. Dock så har en studie rapporterats, **Ref 12**, där 304 (EN 1.4301) och 316 (EN 1.4436) undersökts i betong med ingjutna klorider, med en potentiostatisk metod med polarisering till +200 mV rel. SCE. Resultaten visade att 304 och 316 hade ett kloridtröskelvärde på mellan 3,5 och 5 vikt-% Cl per cementvikt. Dessa resultat stämmer överens med resultaten i denna studie.

#### 6.4.1 Undersökning av korrosionsutseende hos provstänger

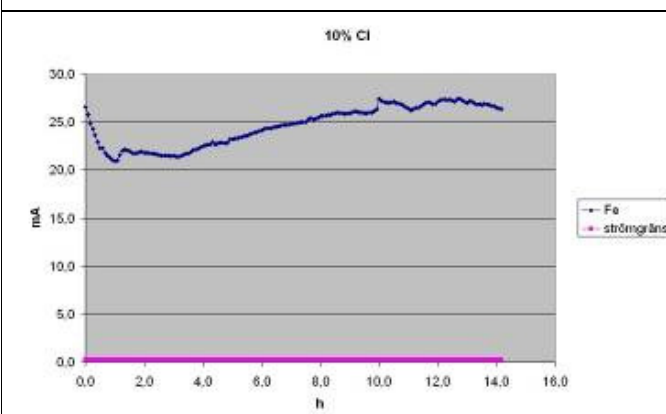
**Figur 43a** och **43b** visar ett exempel på utseendet hos en provstång av stålqualiteten EN 1.4436 i betong med 4 vikt-% Cl per cementvikt efter 57 dagars exponering. **Figur 43a** visar stången i spräckt betong där armeringsytan ser relativt oangripen ut, men ett svart område syns på höger sida av stången. Den svarta beläggningen består av korrosionsprodukter (troligen magnetit, vilket indikerar syrefattig miljö). **Figur 43b** visar den andra sidan av stången som har mer korrosionsangrepp. Generellt sett så angreps stängerna relativt slumpvis, ibland var en sida mer angripen och för andra stänger var angreppen mer jämt fördelade.



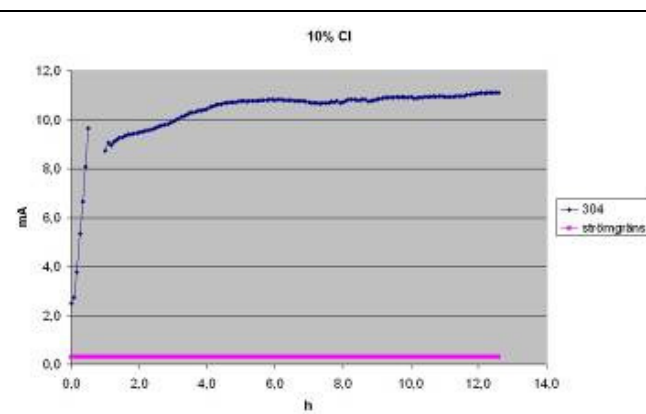
#### 6.4.2 Förslag till vidareutveckling

Försöksperioden kan vara som längst 10 veckor vilket är en relativ lång period. För att korta ned denna period föreslås att exponera prover i 14 dagar vid 20°C och följande 14 dagar vid 40°C. På detta sätt skulle det gå snabbare att rangordna rostfria stål i betong, dock så går det inte att få fram exakta kloridtröskelvärden. För att minska problem med spaltkorrosion så kan delen som inte exponeras först täckas med Lacomit Varnish (Agar Scientific) istället för endast vulkaniserande tejp och krympslang. Vid högre temperaturer samt högre NaCl halter i vattenbadet uppstod ibland problem med att saltet kröp upp till området där den elektriska anslutningen sitter. För att undvika detta problem skulle vattenbadet, vid kortare provningstider, kunna vara utan klorider.

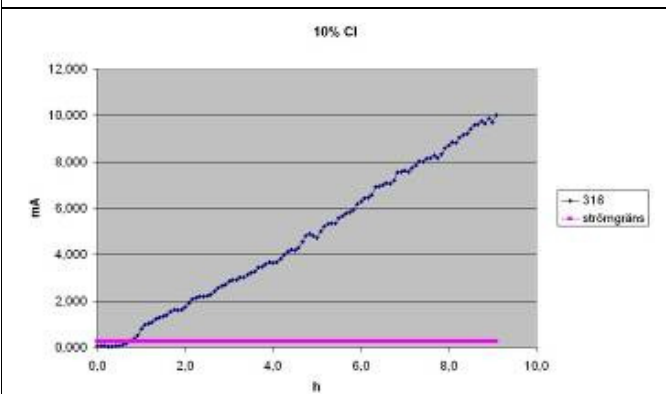
**Figur 44** 10 vikt-% Cl per cementvikt



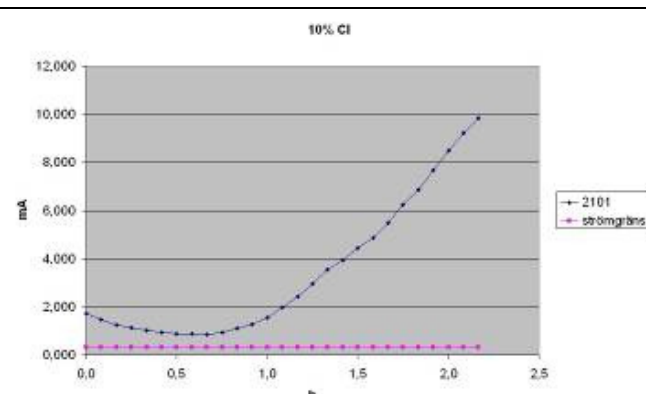
a) Kolstål



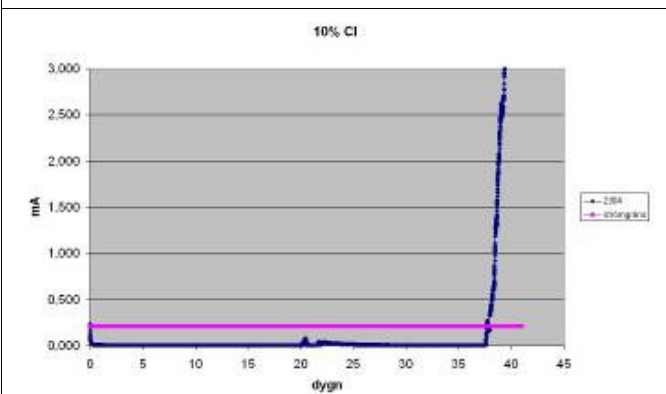
b) 304 (EN 1.4301)



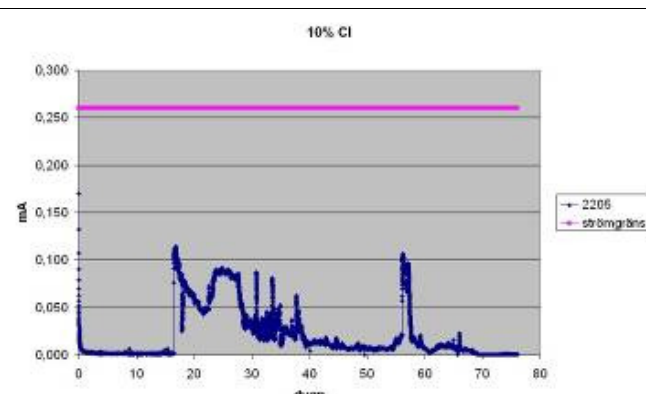
c) 316 (EN 1.4436)



d) 2101 (EN 1.4162)

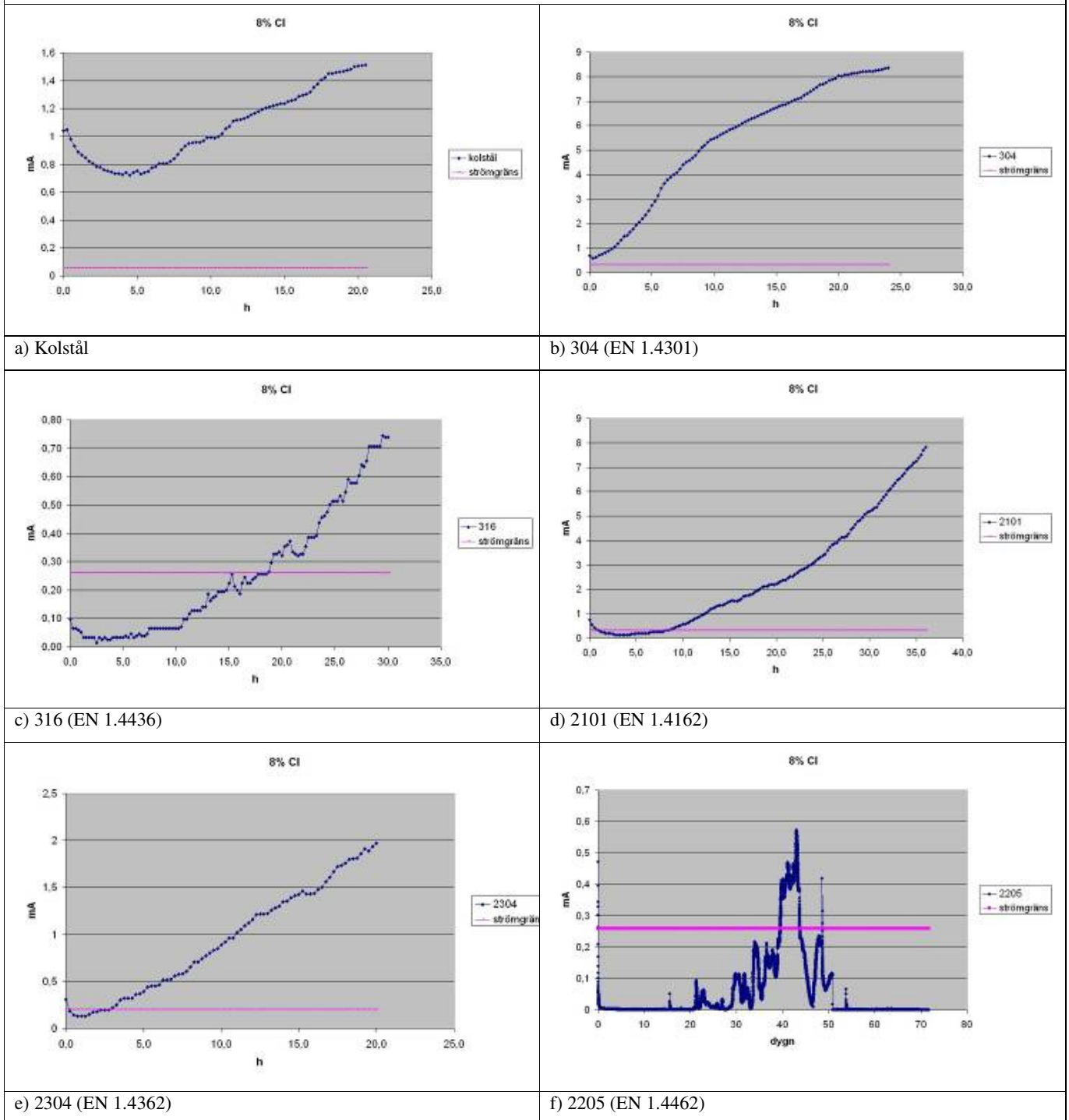


e) 2304 (EN 1.4362)

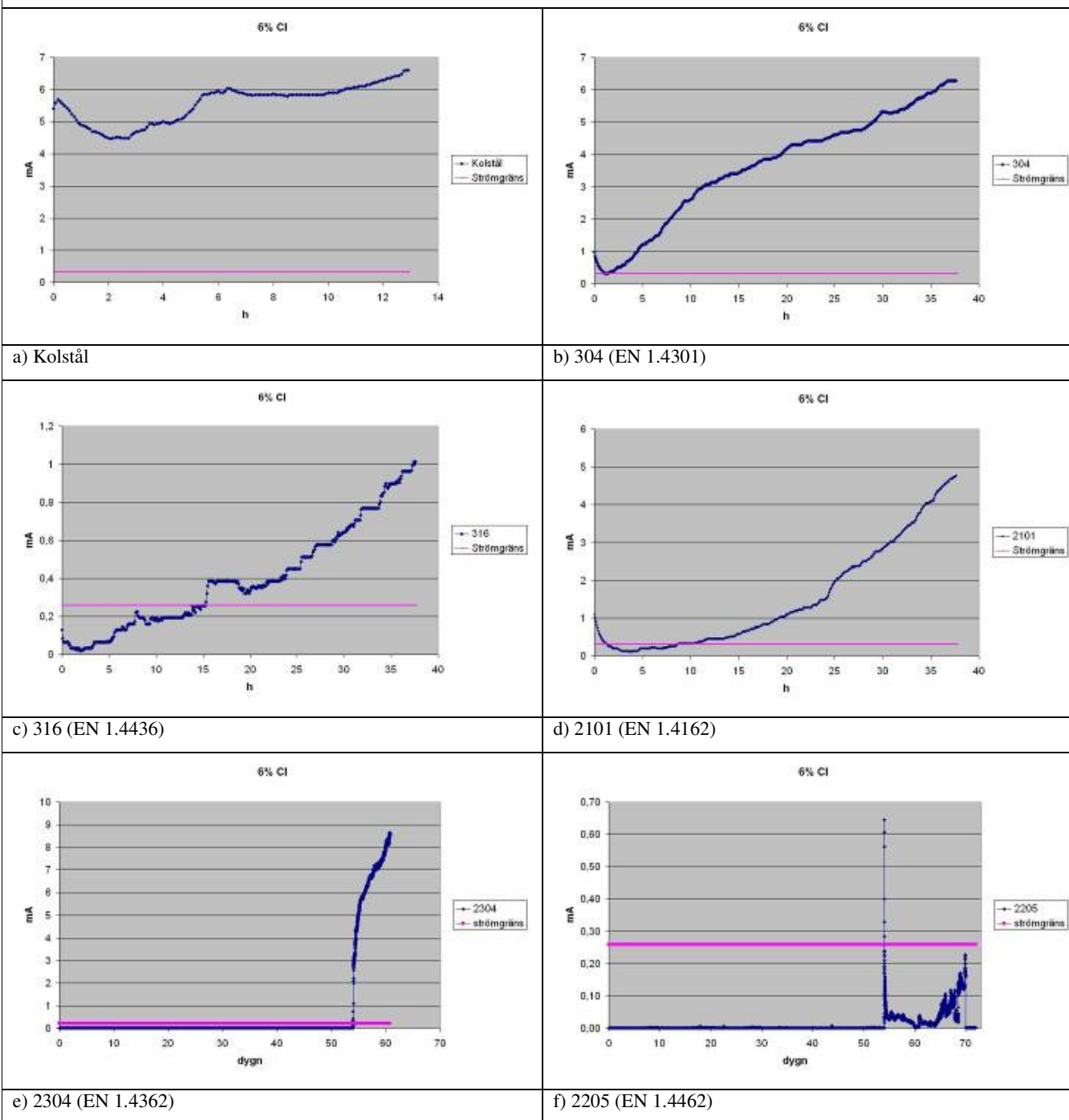


f) 2205 (EN 1.4462)

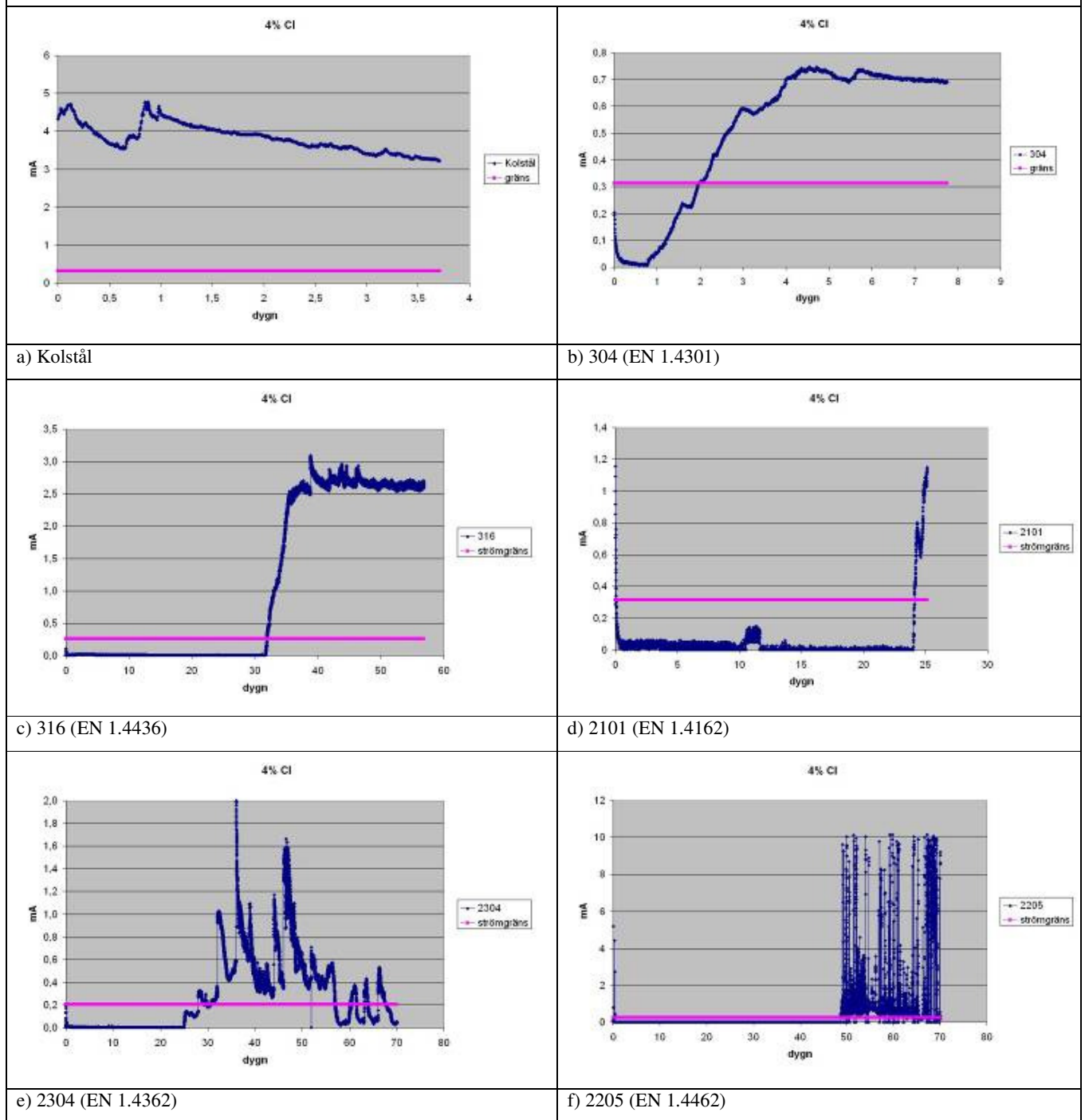
**Figur 45** 8 vikt-% Cl per cementvikt



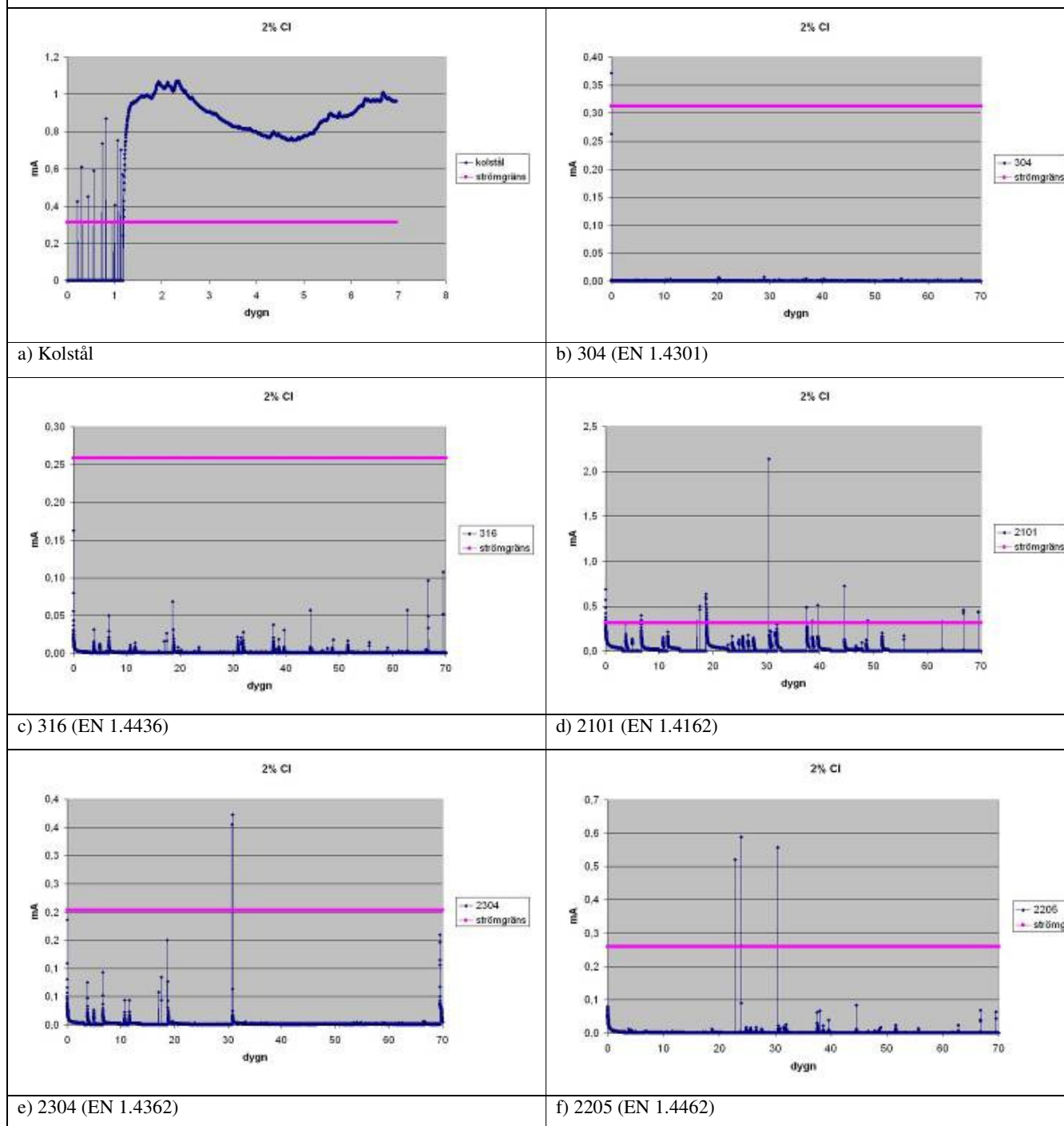
**Figur 46** 6 vikt-% Cl per cementvikt

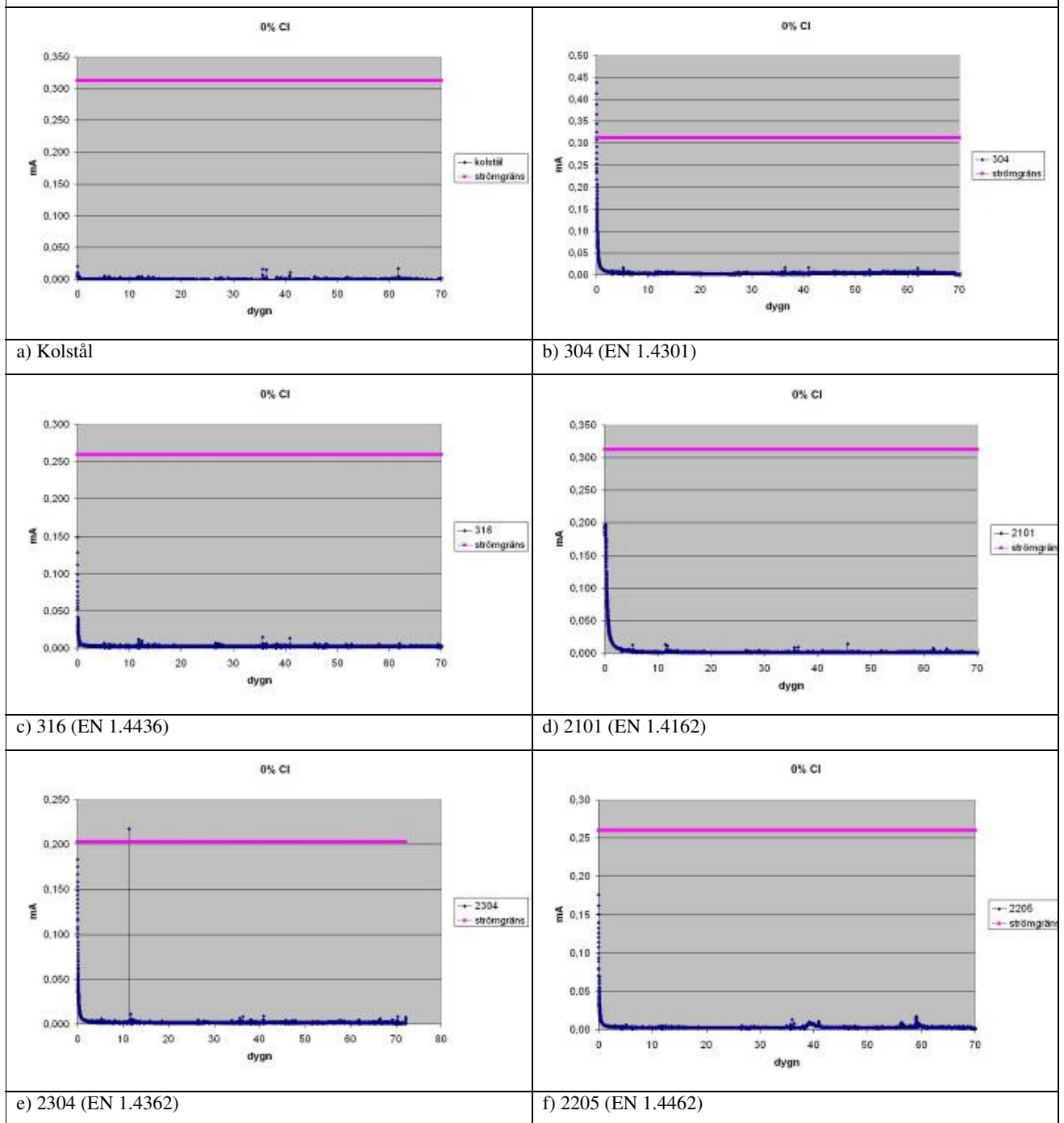


**Figur 47** 4 vikt-% Cl per cementvikt



**Figur 48** 2 vikt-% Cl per cementvikt



**Figur 49** 0 vikt-% Cl per cementvikt

## 7 Slutsatser och rekommendationer

Efter två års utomhusexponering i havsvatten, två års utomhusexponering vid Swerea KIMAB:s provningsstation i Kista och 8 månaders badprovning på laboratorium samt accelererade provningar på laboratorium av betongingjutna rostfria provstänger (kamstänger) av stålqualiteterna EN 1.4301, 1.4436, 1.4162, 1.4362 och 1.4462 kan följande slutsatser och rekommendationer ges:

- Samtliga utförda undersökningarna visar att rostfri stålarmering av stålqualiteten EN 1.4301, 1.4436, 1.4162, 1.4362 och 1.4462 har betydligt bättre förmåga att motstå korrosionsangrepp i en kloridhaltig betong jämfört med ett vanligt kolstål.
- Förmågan hos rostfri armering att motstå korrosionsangrepp i en kloridhaltig betong beror framförallt av halten legeringsämnen som finns i det rostfria stålet. De legeringsämnen som har stor betydelse för det rostfria stålets förmåga att motstå korrosionsangrepp är framförallt krom, nickel, molybden och kväve.
- Av resultaten från utförda undersökningar på laboratorium framgår det att korrosionshårdigheten hos fem undersökta rostfria stålqualiteter ökar enligt följande ordning: (sämst) EN 1.4301 < EN 1.4162 < EN 1.4436 < EN 1.4362 < EN 1.4462 (bäst).
- Vid en total kloridhalt av 3 % per bindemedelvikt i betongblock med olika bindemedel (OPC C45/55, CEM I, PFA C32/40, CEM IIB-V och GGBFS C32/40, CEM IIIA) som exponerats delvis nedsänkta i havsvatten i två år kunde inga för ögat synliga korrosionsangrepp konstateras på rostfria provstänger av stålqualiteten EN 1.4301, 1.4436, 1.4162, 1.4362 och 1.4462.
- Vid ihopkoppling av rostfri armering med kolstålsarmering i en kloridhaltig betong är galvaniska påverkan från den ingjutna rostfria armeringen på det ingjutna kolstålet helt försumbar efter två års exponering i havsvatten.
- Rostfritt stål, (plåt, pumpar, etc) som inte är ingjutet i betong och som exponeras fritt nedsänkt i ett kloridhaltigt vatten och är ihopkopplad med ingjuten kolstålsarmering, kommer att öka risken för galvanisk korrosion på den ingjutna stålarmeringen. Hur stor denna korrosionsökning blir är beroende av ytförhållandet mellan det rostfria materialet (katodyta) och den ingjutna stålarmeringen (anodyta) som är i kontakt med det kloridhaltiga vattnet via sprickor eller andra defekter i betongen.
- Samtliga utförda undersökningar i betong med en hög kloridhalt visade att betongens bindemedel har en försumbar inverkan på de rostfria provstängernas korrosionshastighet och initiering av gropfrätning.

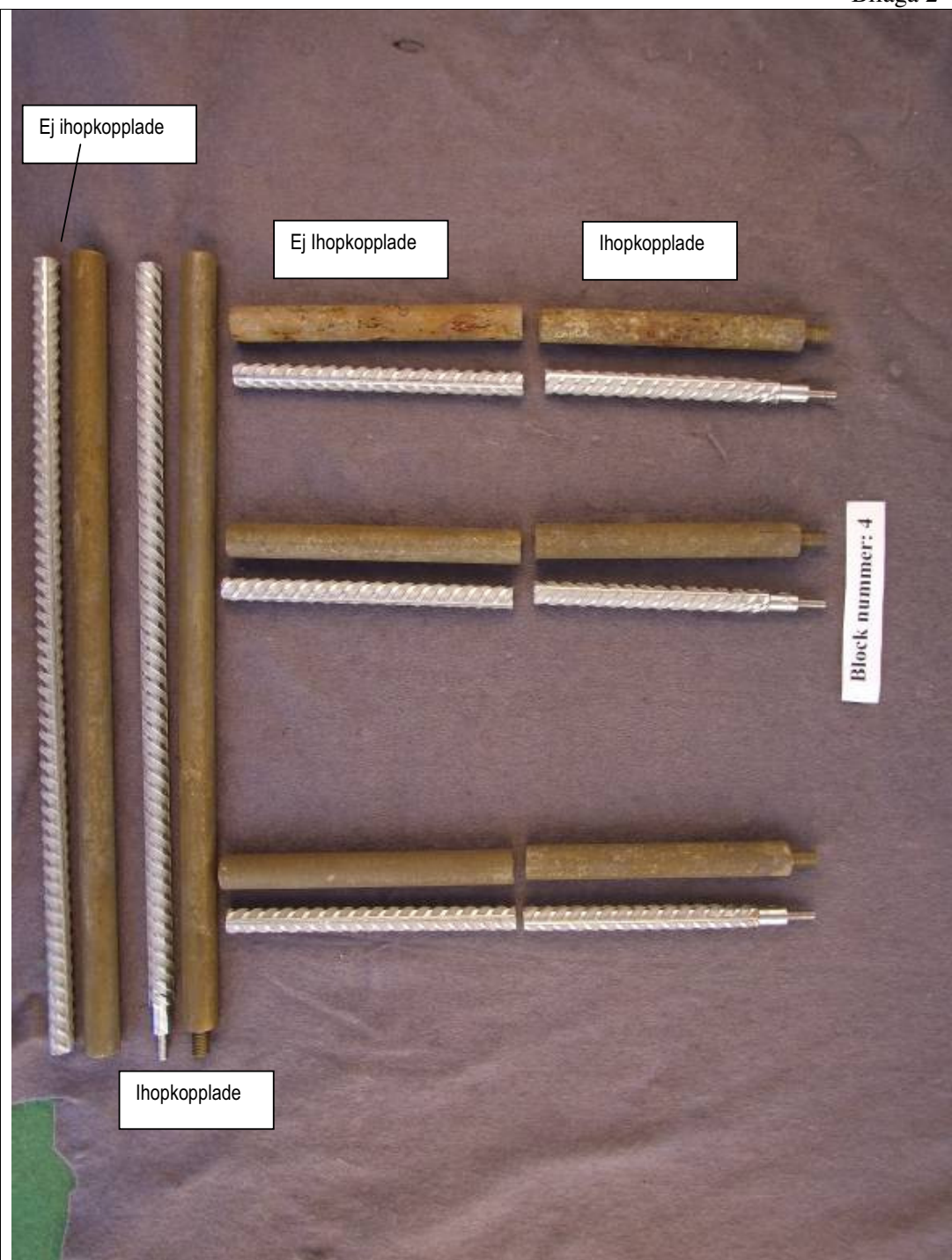
- För att undvika armeringskorrosion i betongkonstruktioner som är utsatta för klorider rekommenderas användning av rostfri armering vid nybyggnation på utvalda delar av betongkonstruktionen som kan bli utsatt för armeringskorrosion. Exempel på sådana konstruktionsdelar skulle kunna vara kantbalkar till betongbroar som är utsatta för tölsalter. Eventuellt kan rostfri armering användas i stället för stålarmring i brobanaplattan utan att isolering behöver användas mellan betong och asfalt.

## 8 Referenser

- Ref 1 Sederholm B & Almqvist J: Rostfritt stål i betong - Galvaniska effekter på kolstål. Litteraturundersökning och fältexponering . KIMAB 2008-132. Stockholm.
- Ref 2 Nürnberger, U & Beul, W & Onuseit, G: Corrosion behaviour of welded stainless reinforced steel in concrete. Otto-Graf-Journal, FMPA BW Stuttgart, 1993, vol. 4, sid. 225-259.
- Ref 3 Hewitt, J & Tullmin, M: Corrosion and stress corrosion cracking performance of stainless steel and other reinforcing bar materials in concrete. Corrosion and corrosion protection of steel in concrete, R.N. Swamy (ed.), Sheffield Academic Press, 1994, sid.527-539.
- Ref 4 Bertolini, L & Pedeferrri, P: Laboratory and Field experience on the Use of stainless steel. Corrosion Reviews. Vol. 20, Nos 1-2, 2002.
- Ref 5 Knudsen, A & Jensen, F.M & Klinghoffer, O & Skovsgaard, T: Costeffective enhancement of durability of concrete structures by intelligent use of stainless steel reinforcement. Int. Conf. "Corrosion and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures. FHW, Orlando 7-11 December 1998.
- Ref 6 Bertolini, L & Gastaldi, M & Pastore, T & Pedeferrri, M.P & Pedeferrri, P: Effects of galvanic coupling between carbon steel and stainless steel reinforcement in concrete. Int. Conf. "Corrosion and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures. FHW, Orlando 7-11 December 1998
- Ref 7 Clemena, G.G & Virmani Y.P: Testing of selective metallic reinforcing bars for extending the service life of future concrete bridges – Testing in outdoor concrete blocks. U.S Department of Transportation Federal Highway administration. VTRC 03-R6, Virginia 2002.
- Ref 8 Bertolini, L & Gastaldi, M & Pedeferrri: Stainless steel in concrete. COST 521 Corrosion of steel in reinforced concrete structures. 18-18 February 2002, Luxembourg.
- Ref 9 Ahlström, J: Elektrokemiska metoder för utvärdering av armeringskorrosion samt kritisk kloridjonkoncentration för rostfritt stål i betong – Litteraturstudie. KIMAB-2011-133. Stockholm.
- Ref 10 Sörensen, B & Jensen, P & Maahn, E: in "Corrosion of reinforcement in concrete", 601-605, 1990, London, Elsevier.
- Ref 11 Lysogorski, D & Hartt, W: "Performance of corrosion resistant reinforcement in short term laboratory experiments" Nace, paper no 06339, (2006)
- Ref 12 Bertolini, L & Bolzini, F & Pastore, T & Pedeferrri, P: Behavior of stainless steel in simulated concrete pore solution", Br. Corr. J, vol 31, No3, 218-222, (1996).

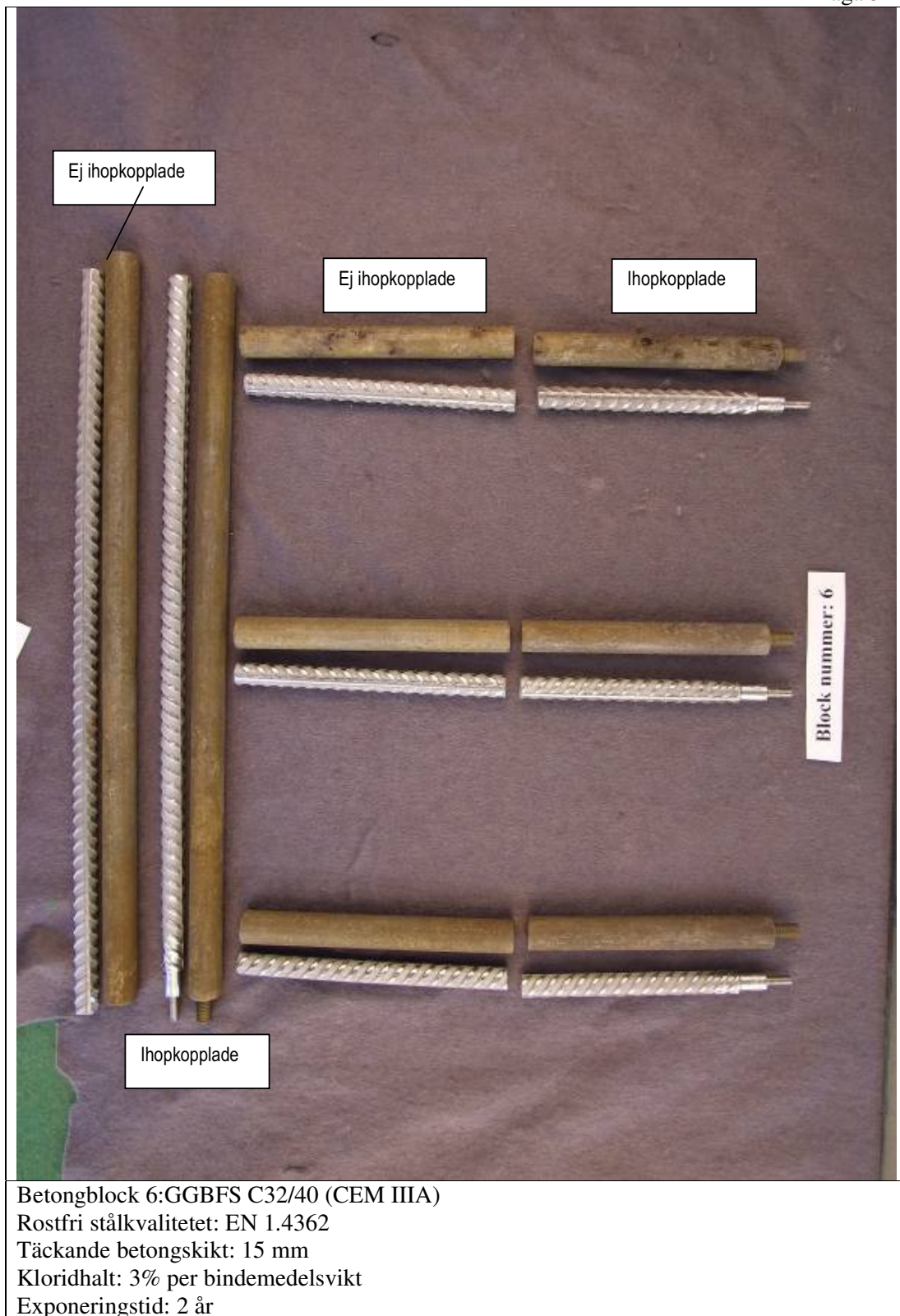
- Ref 13 Sederholm, B & Almqvist, J: Rostfria ståls galvaniska inverkan på ingjutet kolstål i kloridhaltigt vatten – åtta månaders laboratorieprovning. KIMAB-2011-130, Swerea KIMAB 2011, Stockholm.
- Ref 14 Sederholm, B & Almqvist, J: Rostfria ståls korrosionsegenskaper i kloridhaltig betong – Ett års exponering i havsvatten, KIMAB-2011-131, Swerea KIMAB 2011, Stockholm.
- Ref 15 Ahlström, J: Rostfritt stål i betong med hög fukt- och kloridhalt - Provningsmetod för rostfritt stål i betong. KIMAB-2011-129, Swerea KIMAB 2011, Stockholm.
- Ref 16 Bertolini, L & Pedferri, P: Laboratory and Field experience on the Use of stainlesssteel. Corrosion Reviews. Vol. 20, No 1-2, 2002.





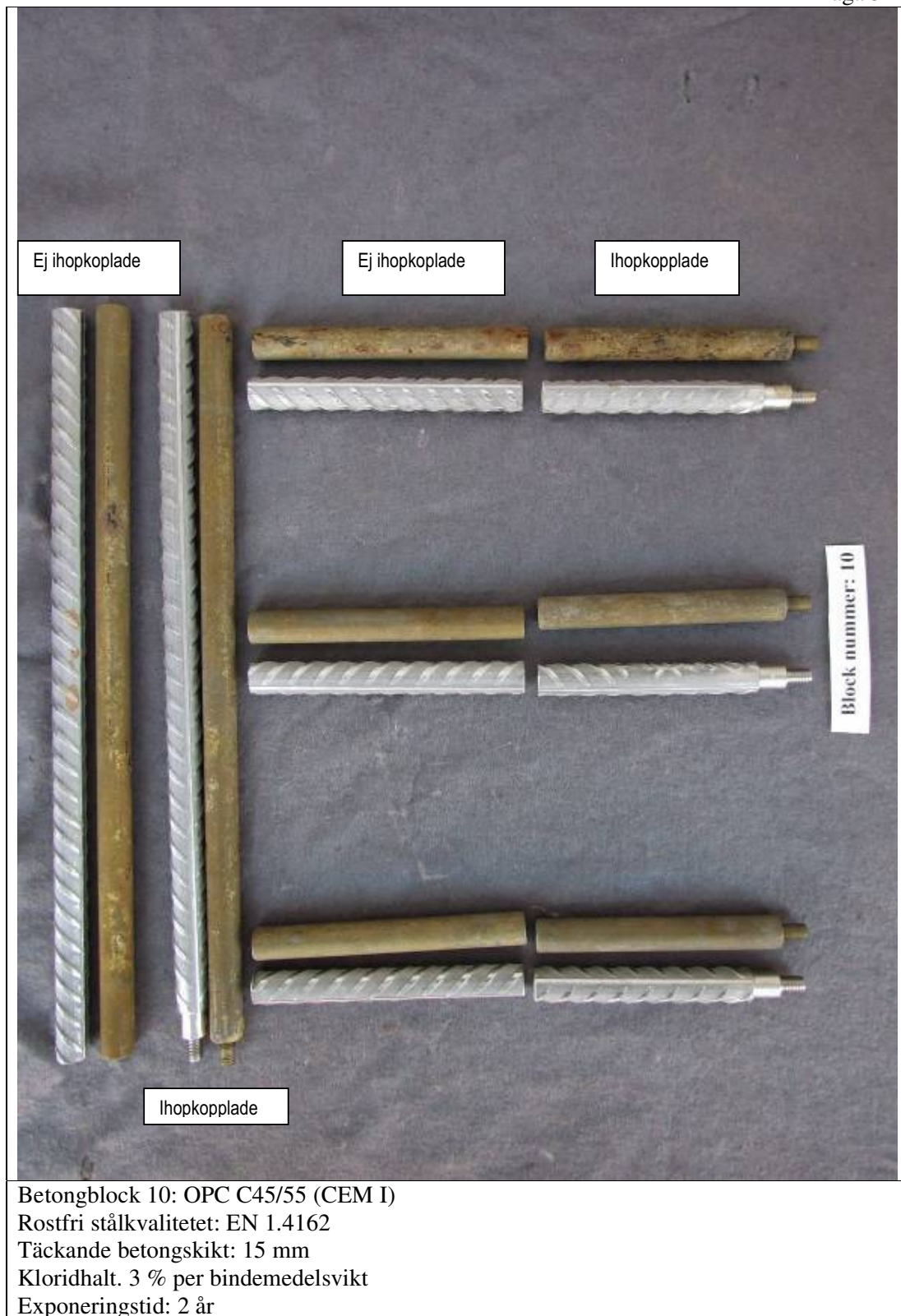
Betongblock 4: PFA C32/40 (CEMIIB-V)  
 Rostfri stålqualität: EN 1.4362  
 Täckande betongskikt: 15 mm  
 Kloridhalt: 3 % per bindemedelsvikt  
 Exponeringstid: 2 år

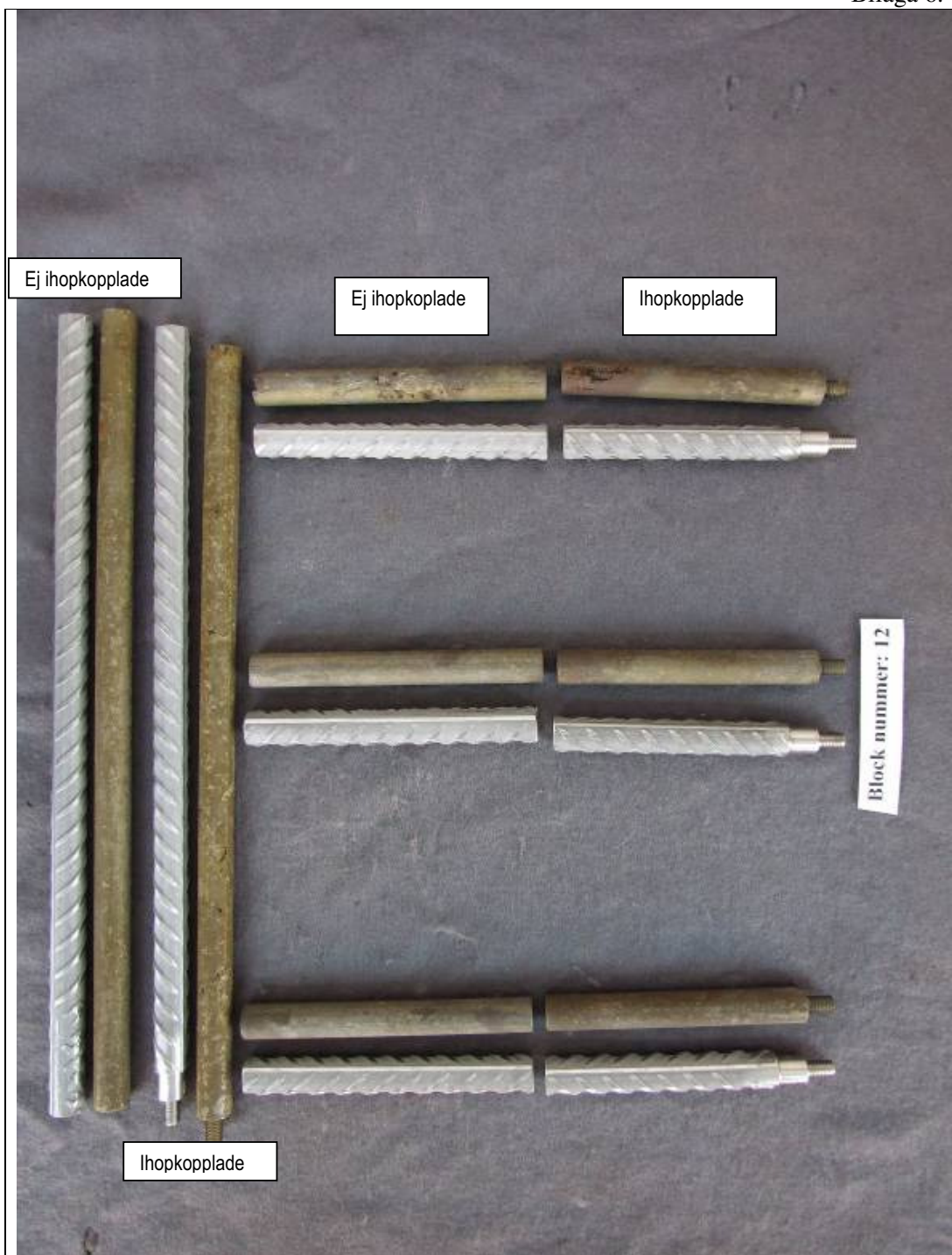
Bilaga 3





Bilaga 5





Betongblock 12:GGBFS C32/40 (CEM IIIA)

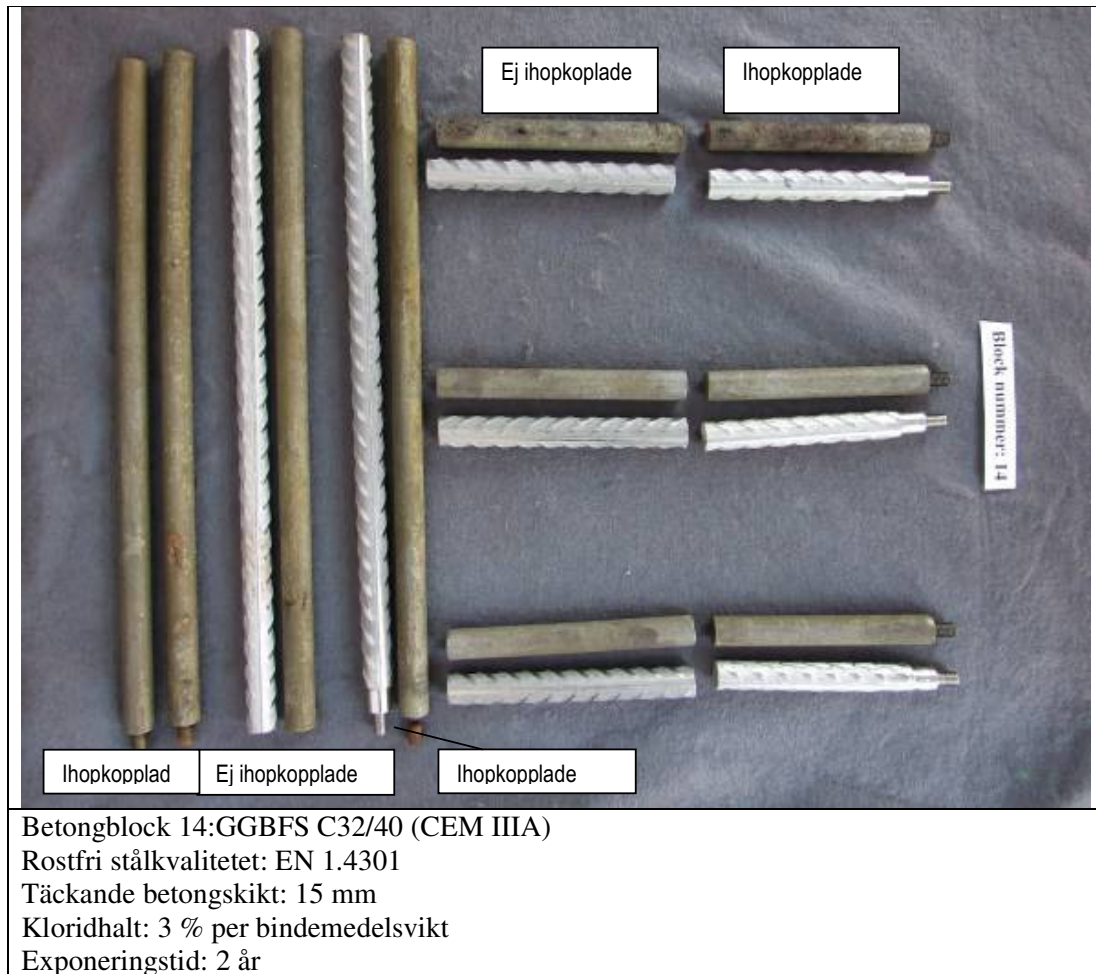
Rostfri stålqualität: EN 1.4162

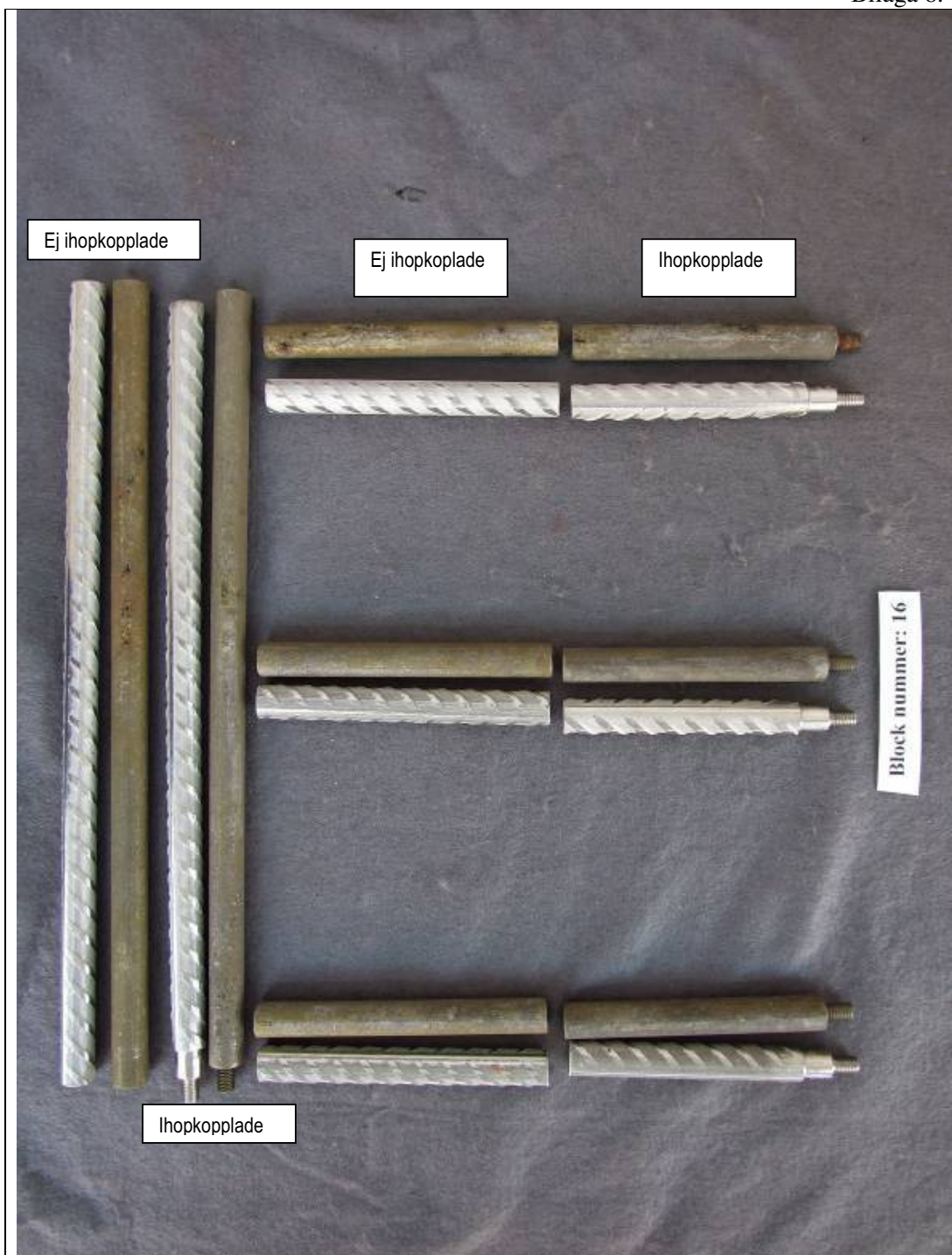
Täckande betongskikt: 15 mm

Kloridhalt: 3 % per bindemedelsvikt

Exponeringstid: 2 år

## Bilaga 7





Betongblock 16: PFA C32/40 (CEMIIB-V)

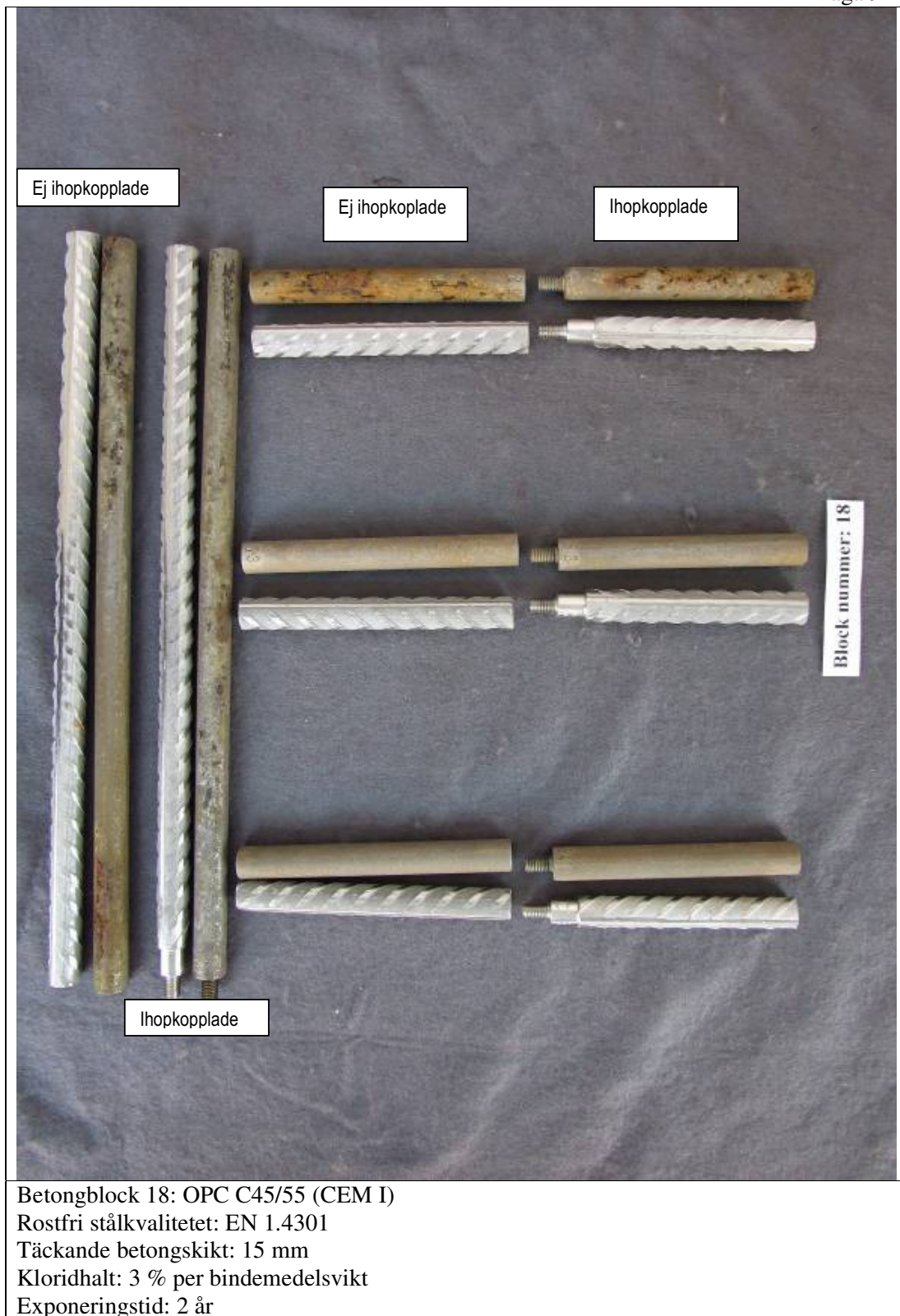
Rostfri stålqualität: EN 1.4301

Täckande betongskikt: 15 mm

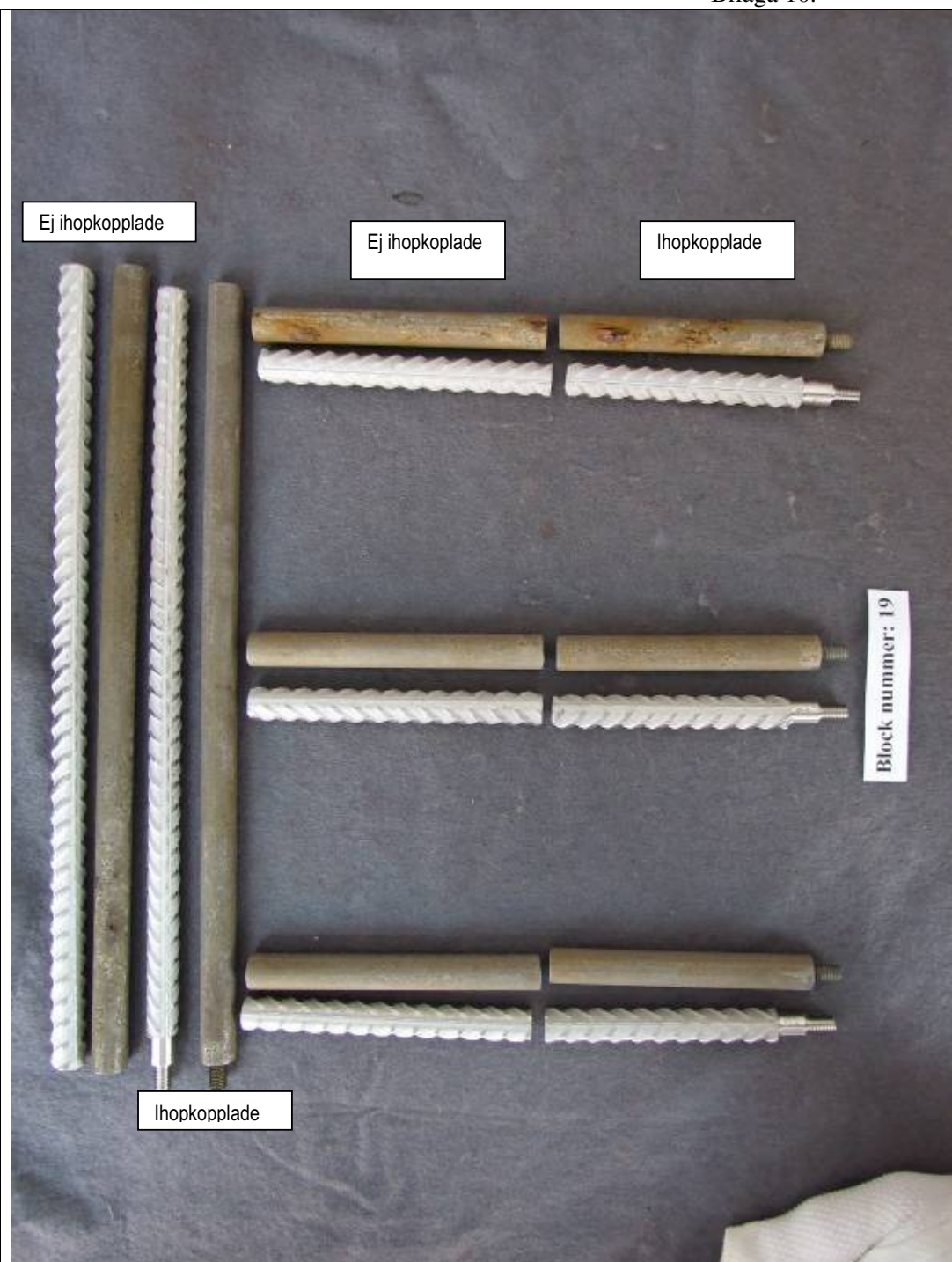
Kloridhalt: 3 % per bindemedelsvikt

Exponeringstid: 2 år

Bilaga 9



Bilaga 10.



Betongblock 19:PFA C32/40 (CEMIIB-V)

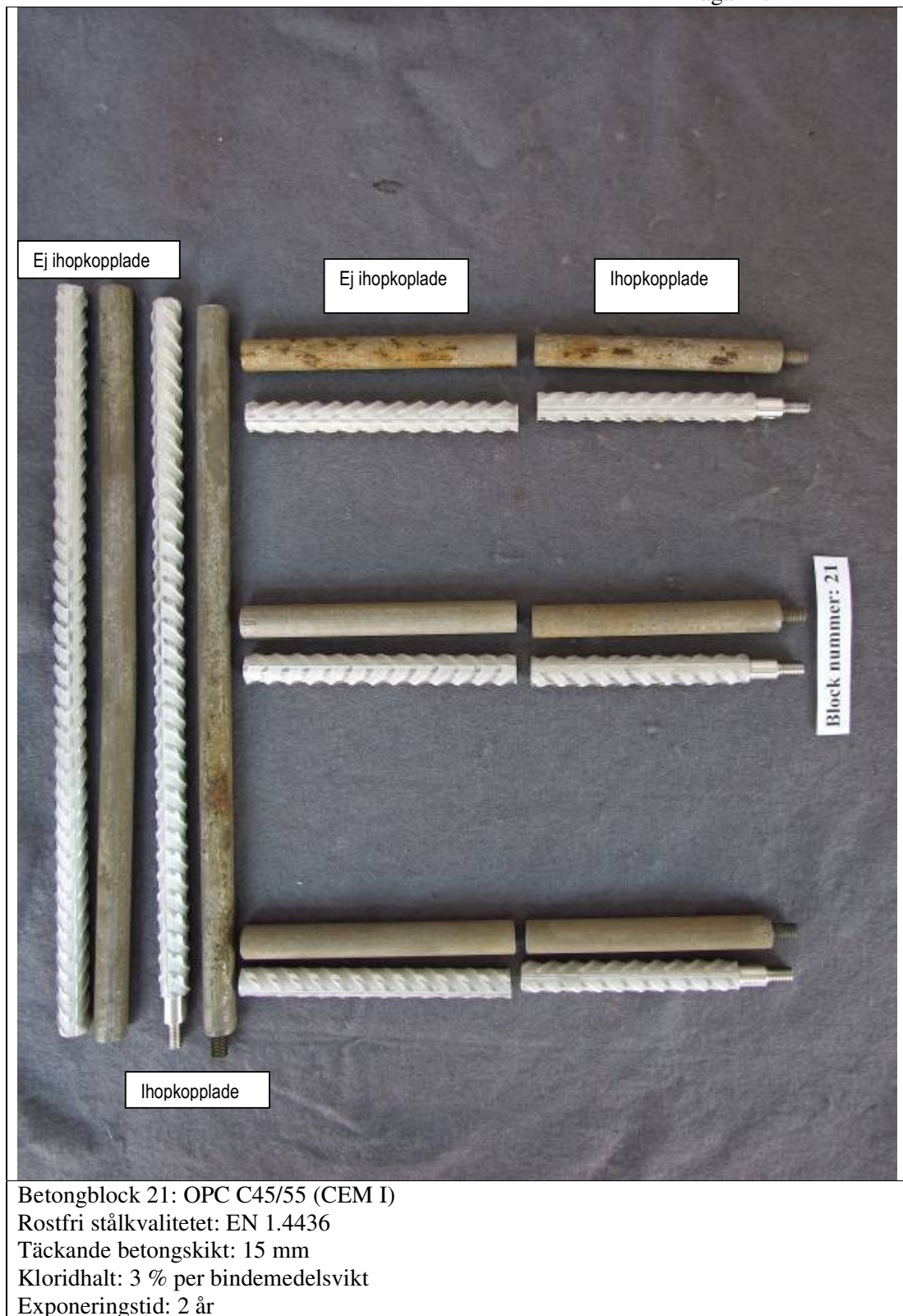
Rostfri stålqualität: EN 1.4436

Täckande betongskikt: 15 mm

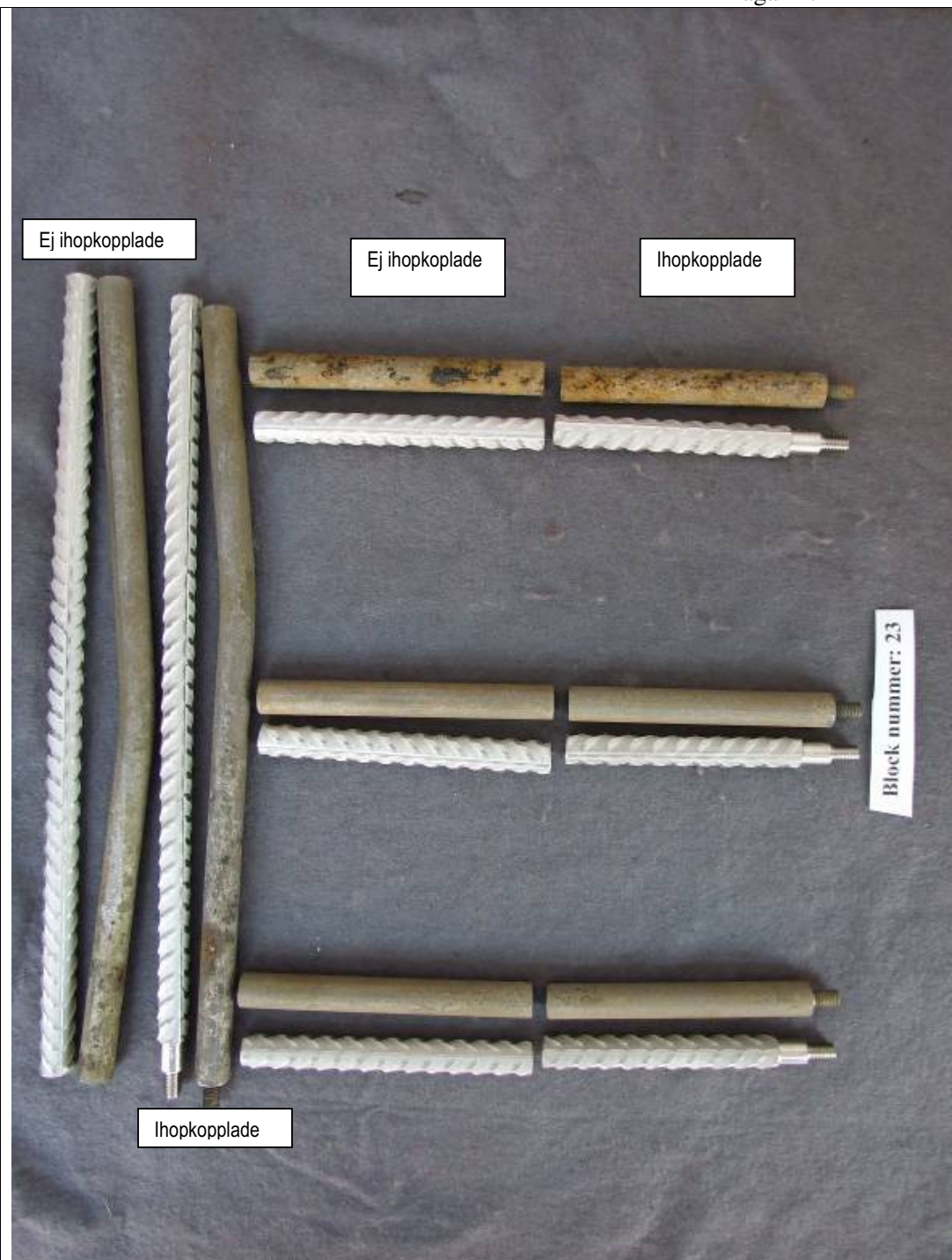
Kloridhalt. 3 % per bindemedelsvikt

Exponeringstid: 2 år

Bilaga 11.



Bilaga 12.



Betongblock 23: GGBFS C32/40 (CEM IIIA)

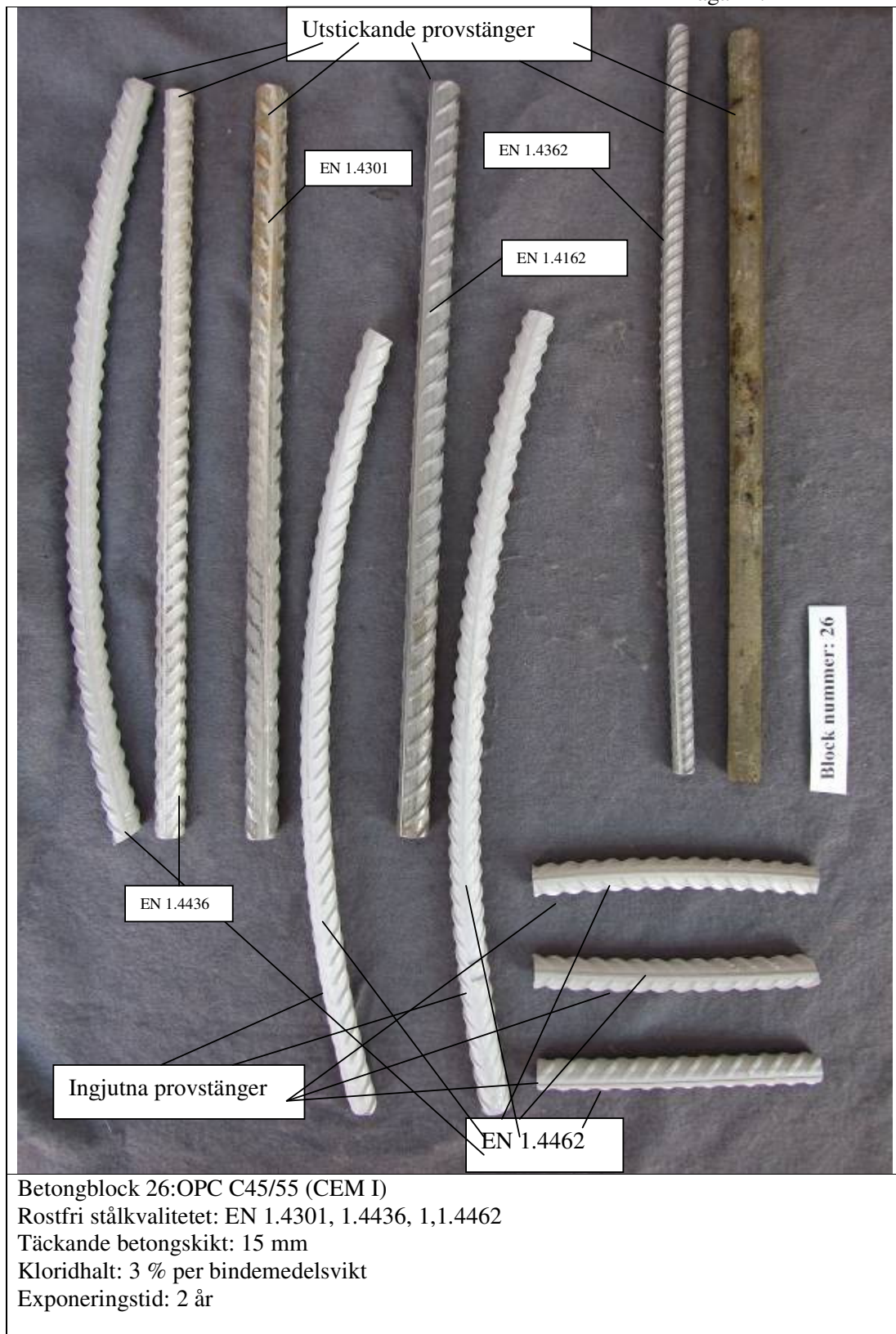
Rostfri stålqualität: EN 1.4436

Täckande betongskikt: 15 mm

Kloridhalt: 3 % per bindemedelsvikt

Exponeringstid: 2 år

Bilaga 12.





|               |            |                  |                        |
|---------------|------------|------------------|------------------------|
| <b>Datum:</b> | 2013-08-27 | <b>Rapport</b>   | <b>Swerea KIMAB AB</b> |
| <b>Sidor:</b> | 87         | <b>ISSN:</b>     | 1403-848X              |
| <b>Språk</b>  | Svenska    | <b>ISRN:</b>     |                        |
|               |            | <b>KIMAB-nr:</b> | KIMAB-2013-116         |

|                                    |                                                                                                             |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Titel</b>                       | Rostfria ståls korrosionshårdighet och galvaniska inverkan på kolstål i betong med hög fukt- och kloridhalt |
| <b>Författare</b>                  | Bror Sederholm & Johan Ahlström                                                                             |
| <b>Swerea KIMAB-Projektnummer:</b> | 2013-116                                                                                                    |
| <b>Forskningsavdelning:</b>        | Korrosionsskydd och ytteknik                                                                                |
| <b>Godkänd av:</b>                 | Eva Lindh Ulmgren                                                                                           |
| <b>Finansiering:</b>               | Deltagande företag                                                                                          |

|                   |                                                                                                           |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Nyckelord:</b> | Rostfri armering, kolstål, galvanisk korrosion, betong, klorider, fältexponering, laboratorieundersökning |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|                            |                                                      |
|----------------------------|------------------------------------------------------|
| <b>Forskningskommitté:</b> | <b>Deltagande företag</b><br>Trafikverket<br>Elforsk |
| <b>Distribution:</b>       | SBUF<br>Outokump<br>Stainless AB<br>Göteborgs Hamn   |

**swerea**|**KIMAB**

Swerea KIMAB AB, Box 7047, 164 07 Kista  
Tel 08-440 48 00, kimab@swerea.se, www.swereakimab.se

Swerea KIMAB är ett ledande korrosions- och metallforskningsinstitut. Swerea KIMAB arbetar för att förbättra material och processer för materialframställning samt studerar hur nya material uppträder i verkstadsteknisk tillverkning och i mekaniska konstruktioner. Verksamheten omfattar forskningsprojekt, provning och uppdrag.

All forskning och allt utvecklingsarbete sker i ett nära samarbete med svenska och internationella företag inom stål-, metall-, elektronik-, verkstads-, plast-, pappers-, fordons-, tillverknings-, och kraftindustri. Resultatet av vårt arbete ska för våra kunder vara en god satsning för framtida intäkter.

**swerea**|**KIMAB**

Swerea KIMAB AB, Box 7047, 164 07 Kista  
Tel 08-440 48 00, [kimab@swerea.se](mailto:kimab@swerea.se)  
[www.swereakimab.se](http://www.swereakimab.se)

