



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

## **Rostfritt stål i betong - Galvaniska effekter på kolstål**

**Litteraturundersökning och  
fältexponering**

*Författare: Bror Sederholm och Jörgen Almqvist*

**KIMAB-2008-132**

**Status: Öppen**

**Medlemsprogram: Korrosionsinstitutet**



Rostfritt stål i betong - Galvaniska effekter på kolstål. Litteraturundersökning och fältexponering

Författare: Bror Sederholm och Jörgen Almqvist

Rapport nr: KIMAB-2008-132

Swerea KIMAB Projektnr: 731540

Status: Öppen

Datum: 2008-10-16

Medlemsprogram: Korrosionsinstitutet

## Sammanfattning

Föreliggande slutrapport avslutar projektet *Korrosionsegenskaper hos rostfritt stål i betong - Optimalt val av stålqualität i betongkonstruktioner*.

I rapporten redovisas korrosionsresultat efter ett och två års utomhusexponering av betongingjutna provstänger av kolstål och rostfritt stål av stålqualiteterna EN 1.4301, 1.4401, 1.4162 och 1.4462. I undersökningen ingår även provstänger av kolstål som ihopkopplats med rostfritt stål av de nämnda stålqualiteterna. Den totala uppmätta halten av klorider per cementvikt i betongblocken varierade från 0 upp till 3,2 %. Betongblockens täckande betongskikt är antingen 15 mm (vct 0,5) eller 50 mm (vct 0,38).

Provstängernas korrosionstillstånd har utvärderats genom att undersöka provstängernas korrosionsutseende och korrosionshastighet efter ett och två års utomhusexponering i kloridhaltiga betongblock. Under exponeringens gång har kontinuerliga mätningar av makrocellström (galvanisk korrosionsström) utförts mellan ihopkopplade provstänger av kolstål och rostfritt stål av olika kvaliteter. Även provstängernas elektropotential (både ihopkopplade och icke ihopkopplade provstänger) har kontinuerligt registrerats under exponeringen.

I rapporten redovisas även en litteraturundersökning av rostfria ståls material- och korrosionsegenskaper i olika miljöer.

Efter upp till två års utomhusexponering av provstänger av olika rostfria stålqualiteter och kolstål ingjutna i kloridhaltiga betongblock kan följande slutsatser dras:

- Inga korrosionsangrepp kunde konstateras på vare sig ihopkopplade eller icke ihopkopplade provstänger av kolstål som varit ingjutna i betongblock utan klorider.
- Korrosionsangrepp (gropfrätning) konstaterades på både ihopkopplade och icke ihopkopplade provstänger av kolstål som varit ingjutna i kloridhaltiga betongblock.
- Inga korrosionsangrepp kunde konstateras på någon av de rostfria provstängerna i kontakt med kloridhaltig betong.

- I kloridhaltiga betongblock är korrosionshastigheten något högre hos ihopkopplade stänger av kolstål än hos icke kopplade stänger av kolstål.
- I betongblock utan klorider är korrosionshastigheten hos ihopkopplade stänger av kolstål jämförbar med korrosionshastigheten hos icke kopplade provstänger av kolstål.
- Utvärderingen av korrosionshastigheten hos både ihopkopplade och icke ihopkopplade provstänger av kolstål visade att korrosionshastigheten är betydligt högre hos både ihopkopplade och icke ihopkopplade provstänger efter ett års exponering än efter två års exponering.
- Från resultaten av de kontinuerliga mätningar av makrocellström (galvaniska ström) mellan rostfritt stål och kolstål framgick det att höga galvaniska strömmar har uppmätts enbart mellan den rostfria stålqualiteten EN 1.4162 och kolstål under de första 150 dagarna av exponeringen vid en total kloridhalt i betongen  $\geq 0,9$  % per cementvikt.
- Från resultaten av kontinuerliga mätningar av elektrodpotential framgick det att de rostfria provstängernas elektrodpotentialer i kloridhaltig betong är betydligt mindre negativa än elektrodpotentialen hos provstänger av kolstål. De negativa potentialvärdena hos kolstål beror på att stålet är aktivt och korroderar.
- De kontinuerligt registrerade elektrodpotentialerna hos provstänger av kolstål och rostfritt stål visade att elektrodpotentialerna är jämförbara mellan rostfritt stål och kolstål i betong utan klorider. De positiva potentialvärdena hos kolstål beror på att stålet är passiverat och korrosionen är därmed försumbar.

Sammanfattningsvis visade undersökningen att rostfritt stål av olika stålqualiteter (EN 1.4301, 1.4401, 1.4162 och 1.4462) kan kopplas ihop med kolstål i betong (med och utan klorider) i konstruktioner utomhus utan att kolstålet nämnvärt påverkas galvaniskt av det rostfria stålet. Inga korrosionsangrepp har konstaterats på någon av de rostfria provstängerna (EN 1.4301, 1.4401, 1.4162 och 1.4462) som har i kontakt med kloridhaltig betong efter två års utomhusexponering. Betongen var ytligt karbonatiserad genom CO<sub>2</sub>-behandling. Den galvaniska korrosionseffekten kan bli större i betong med mycket hög fukthalt eller i vattenmättad betong.

---

## SUMMARY

The following final report concludes the project *Corrosion properties of stainless steel in concrete – Optimised selection of steel grades for concrete structures*.

Corrosion results from one and two years of outdoors exposure of test bars of carbon steel and of stainless steels of grades EN 1.4301, 1.4401, 1.4162 and 1.4462 cast in concrete are presented in the report. The investigation also included carbon steel test bars electrically connected to stainless steel bars of the above grades. The total amount of chlorides per weight of cement in the concrete blocks varied from 0 to 3,2 %. The thickness of the concrete cover of the blocks was either 15 mm (water-cement ratio 0,5) or 50 mm (water-cement ratio 0,38).

The corrosion state of the test bars was evaluated by visual inspection and by determination of the corrosion rates after one and two years of outdoor exposure in the chloride-containing concrete blocks. Continuous measurements of the macrocell current (galvanic corrosion current) have been made between electrically coupled bars of carbon steel and stainless steels during the exposure. The electrode potentials of the test bars (coupled as well as uncoupled bars) was continuously registered during the exposure.

A literature survey of the materials characteristics and corrosion properties of stainless steels in different environments is included in the report.

After up to two years of outdoors exposure of test bars of different stainless steel grades and of carbon steel cast in chloride-containing concrete blocks the following conclusions may be drawn:

- No corrosion damage could be observed either on electrically coupled or uncoupled carbon steel test bars in concrete blocks without chlorides.
- Corrosion damage (pitting) was observed on coupled as well as uncoupled carbon steel test bars in chloride-containing concrete blocks.
- No corrosion damage could be observed on any of the stainless steel test bars in contact with chloride-containing concrete.
- In chloride-containing concrete blocks the corrosion rate is slightly higher for the coupled than for the uncoupled carbon steel test bars.
- In concrete blocks without chlorides the corrosion rate of coupled carbon steel test bars is comparable to that of the uncoupled carbon steel test bars.
- Evaluation of the corrosion rate of coupled or uncoupled carbon steel test bars shows that the corrosion rate after one year of exposure was markedly higher for coupled as well as uncoupled test bars than after two years.
- The results of the continuous measurements of the macrocell current (galvanic current) between stainless steel and carbon steel show that high galvanic

currents had only occurred between the stainless steel grade EN 1.4162 and carbon steel during the initial 150 days of exposure at a total chloride content in the concrete of  $\geq 0,9$  % per cement weight.

- The continuous measurements of the electrode potential show that the potentials of the stainless steel test bars in chloride-containing concrete was markedly less negative than the potentials of the carbon steel test bars. The negative potential values of the carbon steel show that the steel is active and corroding.
- The continuously registered electrode potentials of carbon steel and stainless steel test bars showed that the electrode potentials of stainless steel and carbon steel in concrete are comparable in concrete without chlorides. The positive potential values of the carbon steel show that the steel is in a passive state and that the corrosion consequently is negligible.

Thus the investigation shows that stainless steels of various grades (EN 1.4301, 1.4401, 1.4162 and 1.4462) may be in contact with carbon steel in concrete (with and without chlorides) in outdoor structures without noticeable galvanic effects from the stainless steel on the carbon steel. No corrosion damage was observed on any of the stainless steel test bars (steels EN 1.4301, 1.4401, 1.4162 and 1.4462) in the chloride-containing concrete after two years of outdoor exposure. The concrete had been superficially carbonated by CO<sub>2</sub> treatment. In very highly humid or in water-saturated concrete the galvanic corrosion effect may be higher.

---

# Innehållsförteckning

	<b>Sid.</b>
<b>SAMMANFATTNING - SUMMARY</b>	
<b>1</b>	<b>INLEDNING</b> <span style="float: right;"><b>7</b></span>
<b>2</b>	<b>BAKGRUND</b> <span style="float: right;"><b>7</b></span>
<b>3</b>	<b>SYFTE</b> <span style="float: right;"><b>8</b></span>
<b>4</b>	<b>Litteraturundersökning</b> <span style="float: right;"><b>9</b></span>
4.1	Rostfritt stål - Allmänt
4.2	Rostfria ståls mekaniska och fysikaliska egenskaper
4.3	Rostfria stål: inverkan av legeringsämnen
4.4	Austenitiska rostfria stål
4.5	Ferritiska rostfria stål
4.6	Duplexa rostfria stål
4.7	Martensitiska stål
4.8	Korrosion av rostfritt stål i olika miljöer
4.9	Rostfria ståls korrosionshärdighet i betong
<b>5</b>	<b>Experimentellt arbete</b> <span style="float: right;"><b>32</b></span>
5.1	Provstänger ingjutna i betongblock
5.2	Betongblockens sammansättning och utseende
5.3	Försöksutförande och utvärdering av korrosionstillstånd.
<b>6</b>	<b>RESULTAT OCH DISKUSSION</b> <span style="float: right;"><b>37</b></span>
6.1	Bestämning av total kloridhalt per cementvikt hos betongblock efter ett och två års exponering
6.2	Korrosionsutseende hos provstänger efter ett och två års utomhusexponering
6.3	Utvärdering av korrosionshastighet efter ett och två års utomhusexponering
6.4	Utvärdering av kontinuerliga mätningar av makrocellström
6.5	Utvärdering av kontinuerliga mätningar av elektropotential
<b>7</b>	<b>SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER</b> <span style="float: right;"><b>55</b></span>
<b>8</b>	<b>REFERENSER</b> <span style="float: right;"><b>56</b></span>
<b>Bilagor</b>	<b>58-101</b>





# 1 INLEDNING

Föreliggande slutrapport avslutar projektet *Korrosionsegenskaper hos rostfritt stål i betong - Optimalt val av stålqualität i betongkonstruktioner*.

Slutrapporten omfattar en 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 kamstål för att undersöka rostfria ståls galvaniska inverkan på kolstål i betong.

Projektet startades under våren 2004 och har finansierats med anslag från:

Banverket  
Forsmarks Kraftgrupp AB  
Göteborgs Hamn AB  
Korrosionsinstitutets intressentförening  
Oskarshamns Kraftgrupp AB  
Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF)  
Vattenfall Ringhals AB  
Outokumpu Stainless AB  
Vägverket

Den till projektet knutna arbetsgruppen har haft följande medlemmar:

Anna Iversen, Outokumpu, Stainless AB  
Jonas Bergfors, Oskarshamn Kraftgrupp AB  
Valle Jansen, Banverket  
Samir Redha, Vägverket  
Lars-Erik Berglund, Forsmark Kraft AB  
Jan Gustavsson, Ringhals AB  
Thomas Krekula, NCC Construction AB  
Stig Östfjord, Göteborgs Hamn

## 2 BAKGRUND

Användningen av rostfritt stål i betongkonstruktioner har under de senaste åren ökat påtagligt utomlands. I Sverige finns ännu ett fåtal betongkonstruktioner med armering av enbart rostfritt stål. Däremot förekommer att kolstålsarmering i den mest utsatta yttre skiktet vid reparation ersatts med rostfritt stål. Det finns flera orsaker till att användningen av rostfritt stål i betongkonstruktioner inte har ökat nämnvärt trots det rostfria stålets allmänt goda förmåga att motstå korrosionsangrepp i kloridhaltiga och alkaliska miljöer. En orsak är att materialkostnaderna anses höga jämfört med vanlig stålarmring. Det kan också vara svårt att direkt överföra erhållna utländska resultat till svenska förhållanden, bland annat med hänsyn till nationella konstruktionsföreskrifter, klimat och användningen av vägsalt under vintersäsongen.

Undersökningar utförda av vägverket i Schweiz har visat att kostnaden för brobyggen ökade mellan 4 och 8 % om rostfri armering användes istället för kolstålsarmering. I andra studier (USA) anges upp till 15 % högre kostnader.

Om hänsyn tas inte enbart till direkta materialkostnader för armeringen utan också till underhållskostnader - som huvudsakligen orsakas av korrosion på stålarmingen - 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.

Val av optimal rostfri kvalitet påverkar klart prisbilden, både initialt och med hänsyn till livstidskostnader. I en studie anges t ex kostnadsökningen vid användning av stål typ 304 eller 316 till 4 respektive 8 %. Idag finns ett 100-tal standardiserade rostfria stålqualiteter. Valet av den lämpligaste ur både ekonomisk och teknisk synvinkel är en komplicerad uppgift.

I några betongkonstruktioner i Sverige har befintlig rostig stålarmering i den yttre armeringsnivån ersatts med ny armering av rostfritt stål. Den inre kolstålsarmeringen är ofta så oskadad att den inte behöver bytas. En aktuell fråga är om reparationsarmering med rostfritt stål i den yttre mest utsatta delen medför ökad risk för galvanisk korrosion på kvarvarande kolstålsarmering. Uppfattningarna är delade när det gäller äldre betongkonstruktioner där betongen är karbonatiserad och klorider har trängt in. Kloriderna kan aktivera kolstålsarmeringen. Kolstålets elektropotential sänks, och potentialskillnaden mellan det rostfria stålet och kolstålet ökar vilket medför en ökad risk för galvanisk korrosion på kolstålet.

Under namnet ”rostfritt stål” finns en stor grupp stålqualiteter. Rostfria stål är järnlegeringar, i vilka krom utgör huvudlegeringsämnen och kromhalten är minst 10,5 %. Tack vare kromhalten passiveras dess legeringar lätt och får därigenom god korrosionshårdighet i många vanliga miljöer. Generellt kan sägas att ju högre innehåll av legeringsämnen krom, nickel och molybden i rostfritt stål desto dyrare och korrosionshårdigare är det rostfria materialet.

De rostfria stålens korrosion mätt som medelavfrätning är i allmänhet mycket låg i sådana miljöer som berörs här. Däremot kan lokala angrepp, som gropfrätning, spaltkorrosion, interkristallin korrosion och spänningskorrosion, inträffa och påtagligt inverka på konstruktionens hållfasthet.

### **3 SYFTE**

Det övergripande syftet med projektet är:

- att fastställa risken för galvanisk korrosion på kolstålsarmering vid elektrisk kontakt med rostfri armering i betong.
- att ta fram några lämpliga rostfria kvaliteter som kan användas under svenska förhållanden i betongkonstruktioner som är utsatta för olika kloridhaltiga miljöer.

- att utarbeta en vägledning, baserad på resultat från undersökningar, för val av rostfria stål vid både nybyggnation och vid reparation med rostfri armering

## 4 LITTERATURUNDERSÖKNING

### 4.1 Rostfritt stål - Allmänt

Under namnet ”rostfritt stål” finns en stor grupp stålqualiteter. Rostfria stål är järnlegeringar, i vilka krom utgör huvudlegeringsämnet. Kromhalten är minst 10,5 %. Tack vare kromhalten passiveras dess legeringar lätt (kromet reagerar med luftens syre och bildar en skyddande oxidfilm på stålytan) och får därigenom god korrosionshårdighet i många vanliga miljöer. Generellt kan sägas att ju högre innehåll av legeringsämnena krom, nickel och molybdenrostfritt stål har desto dyrare och korrosionshårdigare är materialet (1).

Det första rostfria stålet utvecklades i Sheffield, England, under början av 1910-talet. Vid försök att utveckla ett nytt och slitstarkt material för eldrör i stora kanoner användes krom som ett legeringselement. Det upptäcktes att stål med höga kromhalter inte påverkades av etsmedel. Denna upptäckt ledde fram till ett patent på ett stål med 9-16% krom och max 0.7% kol - det första rostfria kromstålet. Vid samma tid pågick försök i Tyskland att få fram ett lämpligt skyddsmaterial till termoelement. Bland de legeringar som provades fanns några med tillsatser av järn, krom och nickel. Det konstaterades att stållegeringar med ca 20 % krom inte korroderade efter lång tids exponering i laboratoriet. Detta ledde fram till det första austenitiska rostfria stålet med 0.25% kol, 20 % krom och 7 % nickel. Samtidigt upptäcktes i USA att ett stål med 20 % krom var oxidationsbeständigt i luft upp till 1200°C, detta ledde till de värmebeständiga stålen (1).

Det finns flera sätt att dela in rostfria stål i olika grupper. Ett är baserat på användningsområden:

- rostfritt stål
- syrafast stål
- högtemperaturstål.

Ett annat är att dela in dem efter ingående legeringsämnen:

- kromstål
- krom-nickelstål
- krom-nickel-molybdenstål.

Det vanligaste sättet är dock att dela in stålen efter deras mikroskopiska kristallstruktur:

- ferritiska stål
- austenitiska stål
- stål med blandstruktur (duplexstål)
- martensitiska stål

Av stålen med blandstruktur är de austenit-ferritiska tveklöst de viktigaste och i modernt språkbruk kallas gruppen för duplexa (tvåfas) stål.

Olika mekaniska och fysikaliska egenskaper är direkt kopplade till stålets mikrostruktur och för en materialtekniker är den naturliga uppdelningen därigenom baserad på mikrostrukturen.

Rent järn är vid rumstemperatur ferritiskt men vid upphettning till ca 900 °C blir det austenitiskt. Genom att legera stålet med vissa ämnen kan man få austeniten att bli stabil ned till mycket låga temperaturer. Legeringsämnen som stabiliserar austenit är bl.a. kol, kväve, mangan och nickel. Det finns också legeringsämnen som stabiliserar ferrit t.ex. krom, molybden och kisel.

Strukturen bestäms huvudsakligen av stålets sammansättning, balansen mellan ferrit- och austenitstabiliserande ämnen. I vissa fall kan även värmebehandling och kalldeformation inverka. Vid en snabb kylning (=härdning) av rostfritt stål med väl avvägda halter av austenit- och ferritbildare fås en mycket hård struktur, martensit.

## 4.2 Rostfria ståls mekaniska och fysikaliska egenskaper

Ett materials mekaniska och fysikaliska egenskaper är ofta viktiga för en konstruktör att förstå. Det gör att man kan utnyttja materialet effektivt och därigenom optimera sin konstruktion och sin tillverkningsprocess. När man väljer ett rostfritt stål framför t.ex. aluminium eller kolstål så är den vanligaste orsaken de rostfria stålets goda korrosionsegenskaper. Men man får heller inte glömma bort de mycket goda mekaniska egenskaper hos rostfritt stål. Genom att förstå skillnaderna mellan olika konstruktionsmaterial kan man optimera sin konstruktion utifrån tillverkning, funktion och kostnad (1).

De största mekaniska skillnaderna som rostfritt stål har jämfört med kolstål är:

- Kraftigt deformationshärdande
- Hög hållfasthet över ett stort temperaturintervall
- Bra energiupptagningsförmåga (seghet)

### Sträckgräns, $R_{p0,2}$ och $R_{p1,0}$

Den gräns där materialet övergår från att vara elastiskt till att bli plastiskt kallas för sträckgräns eller flytgräns. Man talar om att materialet börjar flyta och det uppstår en bestående deformation på materialet. Till skillnad från kolstål som har en tydlig sträckgräns så är det svårt att ange en exakt spänning där rostfritt stål börjar flyta. Man anger då istället spänningen i materialet vid en viss töjning, vanligtvis vid 0.2% töjning, den så kallade  $R_{p0,2}$ -gränsen. Men det förekommer även att man anger den vid 1 % töjning,  $R_{p1,0}$ .

### Brottgräns, $R_m$

Brottgräns är den spänning där materialet brister och inte längre kan ta någon last,  $R_m$ . Det görs ingen skillnad i definitionen av brottgräns för kolstål och rostfritt stål.

### Brottförlängning, $A_X$

Brottförlängning är ett mått på den totala töjning som materialet kan motstå innan det brister och är ett mått på materialets seghet (duktilitet). Brottförlängningen anges i procent och uppmäts på provstavar vid dragprovning. Beroende på mätlängden på provstaven så kan brottförlängningen anges som  $A_5$ ,  $A_{50}$ ,  $A_{80}$  eller  $A_2$ . Eftersom töjningen definieras som en längdförändring av den ursprungliga mätlängden kan dessa värden inte direkt jämföras med varandra.

### Spännings- och töjningsdiagram

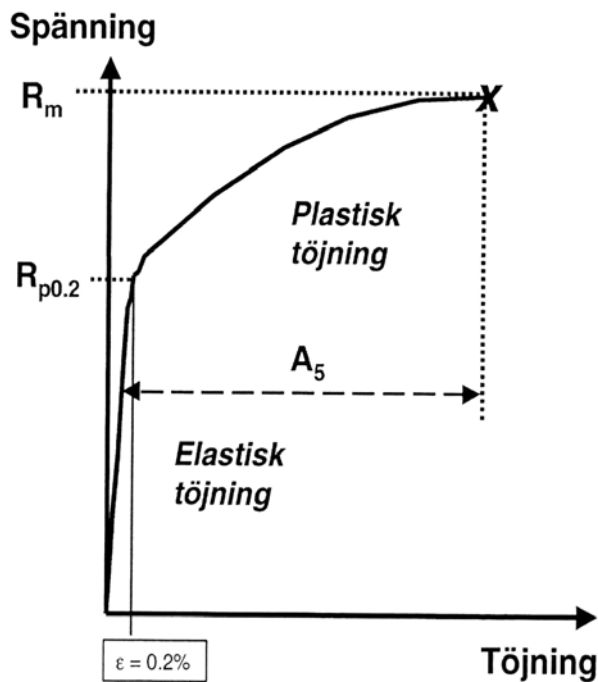
Som funktion av spänningen,  $\sigma$  och töjningen,  $\epsilon$  kan man rita ett så kallat spännings - töjningsdiagram. Ur diagrammet kan man utläsa värden på sträckgräns  $R_{p0,2}$ , brottgräns  $R_m$ , E-modul och brottförlängning  $A_X$ , **figur 1**.

Spännings-töjningsdiagram eller dragprovkurvor är intressanta i många aspekter och används för att ta fram mekaniska värden så att man kan jämföra material med varandra. Vanligtvis används standardiserade provstavar som tas ut ur plåten efter tillverkning. Det sker på allt material som tillverkas för att fastställa materialens hållfasthetsvärdena. De unika hållfasthetsvärdena från dragprovningen av materialet kan ses på det materialcertifikat som följer med plåten.

Spännings-töjningsdiagram används även för att fastställa andra parametrar än de som syns på materialcertifikatet. Man kan till exempel utläsa graden av deformationshårdnande vid deformation, men även få en mer allmän bild av materialets beteende. Detta är till exempel intressant vid olika formningsoperationer.

Spännings-töjningsdiagrammet är unikt för varje material. Skillnaderna beror på en rad faktorer som till exempel:

- Kemisk sammansättning
- Tillverkningshistorik (processväg, glödning, valsning mm.)
- Eventuell tidigare plastisk deformation, deformationshårdnande
- Töjningshastighet
- Temperatur

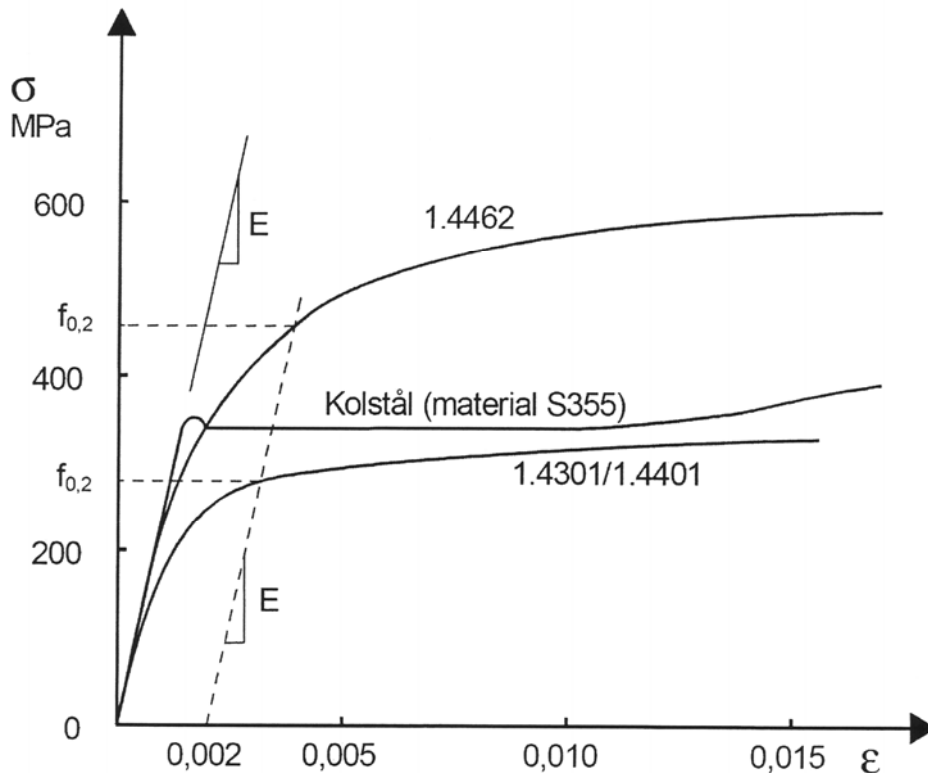


Figur 1. Principiellt spännings-töjningsdiagram för kolstål (1)

Skillnaden mellan rostfritt stål och kolstål syns tydligt i ett spännings- töjningsdiagram, **figur 2**. Kolstål har ett linjär-elastiskt beteende medan rostfritt stål är icke-linjär-elastiskt. Med linjär-elastiskt menas att spänningen förhåller sig linjärt till töjningen så länge man är inom det elastiska området. För en viss ökning av spänningen sker en lika stor ökning av töjningen. Det kan ses som en rak linje i diagrammet mellan origo och sträckgränsen för materialet.

För ett icke-linjär-elastiskt material är förhållande mellan spänning och töjning inte linjär inom det elastiska området. För en viss ökning av spänningen ökar töjningen något mer. I diagrammet framgår det som gradvis avvikande utan att man nått en tydlig punkt. Detta är orsaken till att man för rostfritt stål inte finner en tydlig sträckgräns och man måste ange den vid en viss töjning, 0,2% eller 1,0%

I **figur 2** visas principiella spännings-töjningsdiagram för kolstål och rostfritt stål. Kurvan för kolstål har ett linjärt förhållande mellan spänning och töjning till dess att sträckgränsen nås. Rostfritt stål, i detta fall duplex 2205 (EN 1.4462) och austenitiskt (EN 1.4301/1.4401) har ett icke linjärt förhållanden.



Figur 2. *Principiella spännings-töjningsdiagram för kolstål och rostfritt stål. Kurvan för kolstål har ett linjärt förhållande mellan spänning och töjning till dess att sträckgränsen nås. Rostfritt stål, i detta fall duplex 2205 (EN 1.4462 och austenitiskt EN 1.4301/1.4401 har ett icke linjärt förhållanden. Figur från (1).*

### Hårdnade vid kalldeformation

Ett typiskt beteende för rostfritt stål är ett utpräglat hårdnande vid kalldeformation. Graden av deformationshårdnande skiljer mellan de olika rostfria stålqualiteter och beror av kemisk sammansättning och struktur men även tillverkningshistorik. Allmänt gäller följande:

- Austenit           hårdnar kraftigt
- Duplex            hårdnar
- Ferrit             hårdnar mindre
- Martensit        hårdnar obetydligt

Deformationshårdnandet påverkar stålets mekaniska egenskaper, främst hållfasthet och brottförlängning. Detta i sin tur påverkar fabriktionsprocesser som formning, bockning och skärande bearbetning. Eftersom materialet hårdnar successivt med graden av deformation måste man ta hänsyn till hur man tillverkar sin detalj. Vid till exempel bockning visar sig detta som en ökad återfjädring och en överbockning är nödvändig för att uppnå en önskad förbestämmd vinkel.

Deformationshårdnandet går även att utnyttja eftersom man får en ökad hållfasthet, även om man inte tar med det i beräkningarna. Typiskt för austenitiskt stål är en ökning av hållfastheten med 20-100 % i bockade hörn.

Segheten hos austenitiska stål är mycket god med typiska brottförlängningsvärden ända upp till 50 %. Även om man deformerar materialet kraftigt blir det inte sprött.

### Densitet

Densiteten för stålet är beroende av legeringshalten. För de ferritiska och de mindre legerade austenitiska stålen är densiteten densamma som för kolstål,  $7900 \text{ kg/m}^3$ . För de mer höglegerade stålen ökar densiteten något till  $8000 \text{ kg/m}^3$ . Denna skillnad är liten och har oftast ingen praktisk betydelse.

### Värmeutvidgning

Värmeutvidgningen är ett mått på materialets utvidgning vid en ökad temperatur. Ferritiska och duplexa stål har en utvidgning som liknar kolstålets. Austenitiska stål har däremot en högre värmeutvidgning. Värmeutvidgningen måste man ta hänsyn till vid konstruktioner för höga temperaturer eller när man till exempel har långa rörkonstruktioner.

### Värmekonduktivitet

Värmekonduktiviteten är ett mått på materialets förmåga att leda värme. Rostfritt stål har en låg värmekonduktivitet jämfört med kolstål vilket medför att till exempel att en värmeväxlare i rostfritt stål har en lägre verkningsgrad än värmeväxlare gjord i kolstål. Men i många fall är rostfritt stål ändå önskvärt på grund av den högre korrosionshårdigheten. Vid högre temperatur ökar värmekonduktiviteten för austenitiskt rostfritt stål.

### Värmekapacitet

Värmekapacitet är ett mått på hur mycket energi som måste tillföras för att åstadkomma en temperaturförändring i materialet. Rostfritt stål har en hög värmekapacitet vilket medför att det går åt mer energi att värma materialet jämfört med kolstål.

### Resistivitet

Resistiviteten är ett mått på det elektriska motståndet i materialet. Rostfritt stål har en hög resistivitet vilket medför att det inte är en god elektrisk ledare. Exempel på metaller som har en låg resistivitet är koppar och silver.

### Permabilitet

Permeabilitet ett mått på magnetismen i materialet och styrs av metallens struktur. Ferritisk och duplexa strukturer är magnetiska medan en austenitisk struktur är omagnetisk, vilket lätt avgörs med en vanlig magnet. Vid kalldeformation av austenitiska stål ändras däremot strukturen i materialet och en viss magnetism kan märkas. Permeabiliteten har sällan någon betydelse.



## 4.3 Rostfria stål: inverkan av legeringsämnen

### Krom (Cr)

Krom är det viktigaste legeringsämnet i rostfria stål. En kromhalt av ca 10-12 % krävs för att stålet skall få en skyddande kromoxidhinna. Styrkan hos det skyddande skiktet stiger med ökande halt av krom. En mycket vanlig kromhalt är 17-18 %. Krom stabiliserar ferrit.

### Nickel (Ni)

Nickel används huvudsakligen för att stabilisera austenit. En austenitisk struktur ger allmänt bättre formbarhet och svetsbarhet. För ett stål med 18 % Cr krävs 8 - 9 % Ni för att stålet skall bli helt austenitiskt. Det vanligaste austenitiska rostfria stålet, EN 1.4301, har sammansättningen 18 % Cr och 9 % Ni.

### Molybden (Mo)

Molybden höjer materialets hårdighet mot framförallt lokal korrosion och allmän korrosion. Austenitiska stål med 2-3 % molybden brukar populärt kallas "syrafasta". Eftersom molybden stabiliserar ferrit krävs då en högre halt av ett austenitstabiliserande ämne, t.ex. nickel. Det "syrafasta" stålet EN 1.4436 har därför sammansättningen 17Cr-12Ni-2,5Mo.

### Kväve (N)

Kväve är ett legeringsämne som har blivit allt vanligare under senare år, framför allt pga. förbättrad tillsatsteknik. Inledningsvis användes kväve dels för att höja hållfastheten och dels för att stabilisera austeniten. Kvävet har dessutom en mycket positiv inverkan på hårdigheten mot lokal korrosion, t.ex. punktfrätning och spaltkorrosion. Tillsatserna varierar beroende på stålsort men ligger vanligtvis på ca 0,1-0,2 %.

### Mangan (Mn)

Mangan stabiliserar austenit. Det har använts ibland i stället för nickel, speciellt under tider med dålig tillgång på nickel. Mangan höjer också stålets möjlighet att lösa in kväve, stål med höga kvävehalter har därför ofta en hög manganhalt.

### Kol (C)

Kol är ett kraftigt austenitstabiliserande ämne. Kol är på samma sätt som kväve löst interstitiellt i stålet, d.v.s. de ganska små atomerna kilar in sig mellan de större metallatomerna och åstadkommer därmed inre spänningar, som har en hållfasthetshöjande effekt.

Vanligtvis strävar man efter låga kolhalter eftersom kol kan ha en negativ effekt på korrosionshårdigheten genom bildning av kromkarbider. Med modern metallurgi kan man till förhållandevis låga kostnader reducera kolhalten till mycket lägre nivåer än tidigare. Ju lägre kolhalten är hos ett austenitiskt stål desto mer nickel krävs för att bibehålla den austenitiska strukturen. Det är denna lägre kolhalt och följaktligen högre nickelhalt som gör att så kallat 18-8-stål nu motsvarar 18-9 och ibland till och med 18-10 i sammansättning.

Riktigt höga kolhalter förekommer i de härdbara, martensitiska, rostfria stålen, men även i austenitiska högtemperaturstål förekommer förhöjda halter om än på en relativt låg nivå, 100-dels procent.

#### Kisel (Si)

Kisel höjer oxidationsbeständigheten. Kisel är ett vanligt legeringselement i högtemperaturstål och i specialstål för t.ex. högkoncentrerad salpetersyra och svavelsyra. Kisel stabiliserar ferrit.

#### Titan (Ti) och Niob (Nb)

Om låg kolhalt eftersträvas kan man stabilisera kolet med titan eller niob. Titan och niob binder då kolet i form av titan- eller niobkarbider och förhindrar därmed bildandet av kromkarbider. Såväl titan som niob stabiliserar ferrit. Stabilisering med titan och niob kan dock minska korrosionshårdigheten och bör därför endast användas i speciella fall, t.ex. för förhöjda temperaturer.

### **4.4 Austenitiska rostfria stål**

I den svenska standarden SS-EN 10088-1:2005, del 1, utgåva 2 finns en förteckning över samtliga rostfria stål. I standarden anges bland annat de rostfria stålets kemiska sammansättning och fysikaliska egenskaper.

Det vanligaste austenitiska rostfria stålet är EN 1.4301 (X5CrNi18-10). Detta stål har en bra korrosionshårdighet i många miljöer. Det finns också varianter med olika kolhalter, stabiliserade med titan eller niob och med tillsats av kväve. Korrosionshårdigheten påverkas framförallt av innehållet av molybden. Molybdenhalter på upp till 5 % förekommer.

Som tidigare nämnts balanseras höjda halter av molybden med högre halter av austenit-stabiliserande ämnen, framför allt nickel, **tabell 1**.

Tabell 1. Exempel på austenitiska rostfria stå. Kemisk sammansättning i vikt-% (1).

EN (nummer)	EN (Namn)	C	Cr	Ni	Mo	Cu	Övriga
1.4301	X5CrNi18-10	0,04	18	9	-	-	-
1.4436	X3CrNiMo17-13-3	0,03	17	11	2,7	-	-
1.4429 I	X2CrNiMo17-13-3	0,02	17	12	2,7	-	0,16 N
1.4547	X1CrNiMoCuN20	0,01	20	18	6,1	0,7	0,20 N
1.4539	X1NiCrMoCuN25-20-5	0,01	20	25	4,5	1,5	0,06 N
1.4878	X8CrNiTi18	0,05	17	9	-	-	0,5 Ti
1.4845	X8CrNi25-21	0,05	25	20	-	-	-
1.4835	X9CrNiSiNcCe21-11-2	0,09	21	11	-	-	1,6 Si, Ce

Speciellt svåra korrosionsmiljöer kräver högre halter legeringstillsatser än vad som finns i varianter av 18/9-stålet och en rad olika austenitiska specialstål har därför utvecklats, t.ex. EN 1.4547 (X1CrNiMoCuN20-18-7) mot lokalkorrosion i kloridhaltiga lösningar eller EN 1.4539 (X1NiCrMoCu25-20-5) för utspädd svavelsyra. Man kan säga att de austenitiska stålen har en anpassad korrosionsbeständighet. Det finns austenitiska stål för många olika nivåer av korrosivitet.

Hållfastheten hos konventionella 18-9-stål, angett som sträckgräns, är något låg jämfört med andra stål, normalt 250-300 N/mm<sup>2</sup> med ett garanterat min. värde av ca 200 N/mm<sup>2</sup>. Genom tillsats av kväve kan den höjas betydligt. Det finns specialstål, med höga legeringshalter, som har en sträckgräns av mer än 400 N/mm<sup>2</sup>, **tabell 2**.

Tabell 2. Exempel på austenitiska ståls hållfasthet (min värden vid RT) (1).

EN (Nummer)	EN (Namn)	R <sub>po,2</sub> , N/mm <sup>2</sup>	R <sub>m</sub> , N/mm <sup>2</sup>	A5, %
1.4301	X5CrNi18-10	210	520	45
1.4436	X3CrNiMo17-13-3	220	530	40
1.4429	X2CrNiMo17-13-3	290	590	40
1.4547	X1CrNiMoCuN20-18-7	300	650	40
1.4539	X1NiCrMoCu25-20-5	220	520	35

En speciell grupp bland de austenitiska stålen utgörs av vissa högtemperaturstål. Tillsatser av krom och kisel höjer skalningstemperaturen, d.v.s. den temperatur där oxidskallet börjar

tillväxa och flagna av med alltför hög hastighet, och legering med kväve, ibland i kombination med lite förhöjd kolhalt, förbättrar kryphållfastheten, **tabell 3**.

Tabell 3. Austenitiska högtemperaturstål, kryphållfasthet,  $R$ ,  $N/mm^2$  (1).

EN (Nummer)	EN (Namn)	600 °C	700 °C	800 °C	900 °C
1.4878	X8CrNiTi18-10	65	22	10	-
1.4845	X8CrNi25	80	18	7	3
1.4835	X9CrNiSiNcCe21-11-2	88	35	15	8

Austenitiska stål har god formbarhet i såväl varmt som kallt tillstånd. Den höga brottförlängningen gör att deras formbarhet är mycket god. De behåller en hög seghet ned till mycket låga temperaturer, vilket gör att de kan användas till kryogena applikationer. De har i allmänhet mycket god svetsbarhet.

De har en låg värmeledningsförmåga, vilket kan vara en nackdel ibland men i andra fall en fördel. De har också betydligt högre värmeutvidgning än andra stål. Austenitiska stål är omagnetiska i släckglödlat tillstånd men kan bli magnetiska då de kalldeformeras.

När metalliska material kalldeformeras höjs hållfastheten, de kallhårdnar. För austenitiska rostfria stål gäller att redan vid mycket måttliga deformationer sker ett kraftigt kallhårdnande, d.v.s. sträckgränsen höjs. Samtidigt har de ett högt förhållande mellan brottgräns och sträckgräns, ca 2, samt en hög brottförlängning, i praktiken 50 till 60 %. Genom att kallsträcka austenitiskt rostfritt stål 3 till 4 %, antingen i form av enstaka plåtar eller kontinuerligt i en bandlinje, höjs sträckgränsen med 100-150  $N/mm^2$ . Ett alternativ kan vara att med hjälp av vatten "pumpa upp" t ex färdiga kärl till önskad kallsträckningsgrad och därmed också hållfasthet. Maximal tillåten höjning av  $R_{p0.2}$  är 200  $N/mm^2$  över det garanterade min. värdet för stålsorten ifråga i släckglödlat tillstånd.

Ännu högre hållfasthet kan åstadkommas genom kallvalsning av materialet utan efterföljande glödning, s.k. hårdvalsning. Ju högre deformationsgrad, desto högre hållfasthet. Om stålets sammansättning är "mager", d.v.s. krom- och nickelhalterna i 18/9-stål ligger i underkant, är den austenitiska strukturen instabil och den omvandlas delvis till martensit vid kraftig kalldeformation. Sådan fasomvandling kan ge upphov till sprödhetsfenomen i stålet och det kan ibland vara nödvändigt att glödga komponenter med för hög martensithalt för att undvika spontan sprickbildning.

## 4.5 Ferritiska rostfria stål

Genom att hålla halten av austenitstabiliserande ämnen på en låg nivå får stålen en ferritisk struktur. Ferritiska stål med låg kromhalt, ca 13 % (EN 1.4000), innehåller ofta också små mängder martensit såvida inte kolhalten är mycket låg. De ferritiska stålen innehåller normalt minst 17 å 18 % krom (t.ex. EN 1.4016) men det finns stål med upp till nära 30 % krom, **tabell 4**.

Tabell 4. Exempel på ferritiska stål, sammansättning, vikt-%. (1)

EN (Nummer)	EN (Namn)	C	Cr	Ni	Mo	Övrigt
1.4000	X6Cr13	0,04	13	-	-	-
1.4016	X6Cr17	0,04	16,5	-	-	-
1.4510	X3CrTi17	0,04	18	-	-	Ti

Hållfastheten är normalt obetydligt högre än för austenitiska stål men om stålen legeras med nickel, vilket görs för att höja segheten vid låg temperatur, höjs hållfastheten kraftigt, **tabell 5**.

Tabell 5. Ferritiska stål, hållfasthet (min. värden vid RT). (1)

EN (Nummer)	EN (Namn)	R <sub>p0,2</sub> , N/mm <sup>2</sup>	R <sub>m</sub> , N/mm <sup>2</sup>	A <sub>5</sub> , %
1.4000	X6Cr13	230	400	19
1.4016	X6Cr17	260	430	20
1.4510	X3CrTi17	240	420	23

Det finns ferritiska rostfria stål med olika korrosionshårdighet för olika användningsområden. Den lägst legerade gruppen av ferritiska stål, med 12-13 % krom blir allt vanligare. De låglegerade ferritiska stålen används i stor utsträckning inom bilindustrin, till bl.a. avgassystemen. De används också alltmer istället för kolstål som konstruktionsmaterial, ibland i rostskyddsmålat tillstånd om miljön är aggressiv. Ferritiska stål med kromhalter under 20 % används t.ex. för hushållsartiklar och bildetaljer medan stål med mer än 25 % krom används främst för högttemperaturändamål.

Den ferritiska strukturen har en god beständighet mot spänningskorrosion. Ferritiska stål som ej har en mycket låg kolhalt kan vara känsliga för interkristallin korrosion.

Ferritiska stål går att svetsa. Området runt svetsen kan dock bli något sprött, dels beroende på en partiell härdning av området intill svetsen, dels på grund av kornförstoring. Den erhållna härdningen genom martensitbildning försvinner efter glödning vid ca 750 °C men den sprödhet som beror på kornförstoringen kvarstår. Svetsbarheten hos de ferritiska stålen har under åren förbättrats genom att kol- och kvävehalterna minskat och genom stabilisering med titan. Dessa åtgärder har gjort att sprödheten inte blir så markant vid svetsningen. Moderna ferritiska stål klarar sig därför ofta bra även utan värmebehandling.

## 4.6 Duplexa rostfria stål

Duplex betyder tvåfas. De duplexa stålen har alltså en blandning av två faser, kristallstrukturer. Avsikten med att blanda faserna är att kombinera de fördelar som finns hos

de respektive strukturerna. Den vanligaste typen av duplexstål är de austenit-ferritiska och begreppet duplex är i dagligt metallurgiskt tal synonymt med austenit-ferritiska.

Som nämnts ovan får man en austenitisk struktur vid tillräckligt hög halt av austenitstabiliserande ämnen och en ferritisk struktur vid tillräckligt låg halt. Genom att sätta till austenitstabiliserande ämnen, i första hand nickel, motsvarande en mellannivå fås en austenit-ferritisk struktur.

De austenit-ferritiska stålen har funnits sedan trettioalet. De har dock utvecklats och blivit allt bättre med åren. Den första generationen av duplexa stål hade en relativt hög kolhalt och därmed en dålig svetsbarhet. Med modern ståltillverkningsteknik kan dock en mycket låg kolhalt fås i kombination med hög kvävehalt och därmed blir egenskaperna också mycket bättre. Under det senaste decenniet har användningen av duplexa stål ökat markant. Det har också utvecklats nya duplexa stålsorter med mycket bra egenskaper.

Austenit-ferritiska stål finns med olika nivåer av legeringshalt och därmed korrosionsbeständighet, dock lägst i nivå med EN 1.4401, **tabell 6**.

*Tabell 6. Exempel på duplexa rostfria stål. Kemisk sammansättning i vikt-%. (1)*

EN (Nummer)	EN (Namn)	C	Cr	Ni	Mo	N
1.4460	X3CrNiMoN29-7-2	0,020	25	5	1,5	-
1.4162	X2CrNiMnN21-2-4	0.030	21	1.5	0.3	0.22
1.4362	X2CrNiN23-4	0,020	23	4,5	0,3	0,10
1.4462	X2CrNiMoN22-5-2	0,020	22	5,5	3	0,17
1.4410	X2CrNiMo25-7-4	0,020	25	7	4	0,30

Den mest utmärkande egenskapen hos de austenit-ferritiska stålen är deras höga mekaniska hållfasthet, ca 2 gånger högre sträckgräns än för de austenitiska. Brottörlängningen är dock sämre än hos de austenitiska stålen, vilket innebär vissa begränsningar i formbarheten, **tabell 7**. De austenit-ferritiska stålen är svetsbara, till varandra eller till andra typer av rostfria stål. De bör svetsas med tillsatsmaterial. Dessa stål används framför allt i applikationer där deras höga hållfasthet i kombination med den goda korrosionshårdigheten kan utnyttjas. Andra fördelar med dessa material är deras höga hårdighet mot spänningskorrosion samt låga längdutvidgning, mycket lik kolstålens.

Tabell 7. Duplexa rostfria stål, hållfasthet (min. värden vid rumstemperatur (1))

EN (Nummer)	EN (Namn)	R <sub>p0.2</sub> , N/m m <sup>2</sup>	R <sub>m</sub> , N/mm <sup>2</sup>	A5, %
1.4460	X3CrNiMoN29-7-2	460	620	20
1.4162	X2CrNiMnN21-2-4	480	700	38
1.4362	X2CrNiN23-4	400	630	25
1.4462	X2CrNiMoN22-5-2	460	640	25
1.4410	X2CrNiMo25-7-4	530	730	20

## 4.7 Martensitiska rostfria stål

Även inom den rostfria familjen finns hårdbara stål, d.v.s. stål som genom värmebehandling, ibland i kombination med kall- eller varmbearbetning, kan ges förhöjd hållfasthet. De vanligaste hårdbara rostfria stålen är de martensitiska, relativt låglegerade kromstålen, där kol används som legeringsämne för att höja hållfasthet och hårdhet, **tabell 8** och **9**.

Tabell 8. Exempel på martensitiska stål, kemisk sammansättning, vikt-%. (1).

EN (Nummer)	EN (Namn)	C	Cr	Ni	Mo
1.4006	X12Cr13	0,13	13	-	-
1.4021	X20Cr13	0,20	13	-	-
1.4028	X30Cr13	0,30	12,5	-	-
1.4418	X4CrNiMo16-5-1	0,03	16	5	1

Tabell 9. Martensitiska stål, hållfasthet. Min. värden i seghärdat tillstånd (1).

EN (Nummer)	En (Namn)	RP <sub>0,2</sub> , N/mm <sup>2</sup>	R <sub>m</sub> , N/mm <sup>2</sup>	A5, %
1.4006	X12Cr13	1080	1275	12
1.4021	X20Cr13	550	750	13
1.4028	X30Cr13	600	800	11
1.4418	X4CrNiMo16-5-1	620	830	15

Martensitiska stål innehåller oftast 12-17 % krom och har normalt en kolhalt som överstiger 0.1 %. Nickel i storleksordningen någon procent tillsätts ibland för att förbättra hårdbarheten och molybden kan tillsättas för att öka korrosionshårdigheten hos stålet.

De martensitiska stålen är mycket hårda och spröda. De kan svetsas men för att undvika sprickbildning i stålet bör de förvärmas och för att minska sprödheten efter svetsning bör även en efterföljande anlöpning utföras.

Martensitiska stål används t.ex. till knivar och rakblad där en skarp egg önskas.

Molybdenlegerade martensitiska stål används t.ex. till vattenturbiner och fartygspropellrar på grund av deras höga hållfasthet och erosionsmotstånd.

## 4.8 Korrosion av rostfritt stål i olika miljöer

Krom utgör huvudlegeringsämnen i rostfria stål och kromhalten är minst 10,5 %. Tack vare krominnehållet passiveras dessa legeringar lätt och får därigenom god korrosionshårdighet i många vanliga miljöer. Under ogynnsamma betingelser kan dock rostfria stål angripas genom



t ex. jämn korrosion, gropfrätning, spaltkorrosion, interkristallin korrosion eller spänningskorrosion. Hur väl ett rostfritt stål motstår korrosion i en viss miljö beror bland annat på legeringssammansättningen i kombination med aggressiviteten hos miljön. Det finns en mängd olika rostfria stålsorter och dessa lämpar sig olika väl för olika användningsområden.

Att rostfritt stål har så goda korrosionsegenskaper i de flesta miljöer beror på bildning av det skyddande skiktet (passiverande skyddsskikt) av krom- och järnoxider. För att skyddsskiktet skall bli tätt och täcka hela ytan kromhalten var minst 10,5 %. På grund av passivskiktet på den rostfria stålytan sänks korrosionshastigheten med flera tiopotenser. Passivskiktet på det rostfria stålet är så tunt att det är osynligt för ett mänskligt öga. Tjockleken varierar mellan 10 och 30 Å (Ångström, 1 Å =  $10^{-10}$  m), beroende på miljö och stålsort (1).

För att hålla passivskiktet intakt fordras det att oxidationsmedel (syrgas) hela tiden finns tillgängligt vid ytan. Den låga syrehalten i vanligt vatten är tillräcklig för att behålla passivskiktet. Om passivskiktet mekaniskt skadas i en oxiderande miljöer kommer skiktet att återbildas. I vissa miljöer bryts dock passivskiktet ned, helt eller delvis, utan att kunna återuppbyggas. Korrosionsangrepp uppkommer då på det oskyddade stålet.

De rostfria stålens korrosion mätt som medelavfrätning är i allmänhet mycket låg i sådana miljöer som berörs här. Däremot kan lokala angrepp, som gropfrätning, spaltkorrosion, interkristallin korrosion och spänningskorrosion, inträffa och påtagligt inverka på konstruktionens hållfasthet.

Kontrollerade studier av rostfria ståls korrosionsegenskaper i miljöer motsvarande betong är relativt nya. I utländska undersökningar har olika rostfria ståls förmåga att motstå korrosionsangrepp i kloridhaltig betong eller vätskor studerats i långtidsexponeringar i fält och i accelererade laboratorieförsök. Flertalet försök är dock utförda i icke karbonatiserad betong med varierande kloridhalter i betongen (se också avsnitt 4.9).

I de tidigare studierna har heller inte, av naturliga skäl de senaste framtagna rostfria stålsorterna ingått, en del specifikt avsedda för armering. Exempel på nya armeringsstål är t ex Outokumpu Stainless AB (f.d. Avesta Polarit) nya duplexstål LDX 2101 (EN 1.4162).

Rostfritt stål som armering i betongkonstruktioner i aggressiva miljöer har använts och undersökts genom forskning i flera olika länder.

Riktlinjer för när rostfritt stål bör väljas, och kriterier för ett optimalt val av stålqualität med hänsyn till tekniska och ekonomiska faktorer har börjat utarbetas i flera länder, till exempel Storbritannien och Canada. Att ta fram ett sådant underlag för svenska förhållanden är väsentligt inför kommande investeringar.

Som tidigare nämnts kan rostfria stål angripas genom jämn korrosion, gropfrätning, spaltkorrosion, interkristallin korrosion eller spänningskorrosion. Den jämna korrosionen sker oftast i sura vätskor. I alkaliska miljöer såsom betong (pH 12-13) eller i karbonatiserad betong (pH 10) är den jämna korrosionen oftast försumbar. Gropfrätning är den vanligaste formen av korrosionsangrepp på rostfria stål i betong (2). Korrosionsangreppen beror på att klorider trängts in i betongen och lokalt brutit ned det rostfria stålets passivskikt. Det fordras dock betydligt högre kloridhalter i betongen för att få gropfrätning på rostfritt stål jämfört med

passiverat kolstål i betong (6, 8). Risken för gropfrätning ökar med ökad kloridhalt, ökad temperatur och minskning av hydroxidhalten (karbonatisering av betongen) samt vid låga legerings tillsatser hos det rostfria stålet (2-9). Även ytfinhet kan inverka på korrosionshårdigheten. En grövre yta kan försämra korrosionshårdigheten hos det rostfria stålet.

En grov bedömning av risken för gropfrätning oftast kan göras genom att använda PRE-tal (PRE = Pitting Resistance Equivalent). PRE beräknas enligt följande formel:  $(1 \times \%Cr + 3,3 \times \%Mo + 16 \times \%N)$ . I **tabell 10** framgår PRE-talet hos några vanliga rostfria stålqualiteter som används i betong (2). Ju högre PRE-tal desto mindre risk för gropfrätning.

Tabell 10 PRE-tal för olika rostfria stålqualiteter som används i betong enligt (2).

Nummer enligt SS-EN 10088-1	Namn enligt SS-EN 10088-1	Mikrostruktur	PRE
1.4003	X2CrNi12	ferritisk	11
1.4016	X1Cr17	ferritisk	17
1.4301	X5CrNi18-10	austenitisk	18
1.4541	X6CrNiTi18-10	austenitiskt	18
1.4162	-	ferrit-austeniskt	29
1.4401	X5CrNiMo17-12-2	austenitiskt	24
1.4571	X6CrNiMoTi17-12-2	austenitiskt	24
1.4462	X2CrNiMoN22-5-3	ferrit-austenitiskt	32

I allmänhet uppvisar svetsade rostfria stål sämre korrosionshårdighet mot gropfrätning än icke svetsade rostfria stål pga. svetsoxider som bildas vid svetsningen. Korrosionshårdigheten mot gropfrätning hos svetsade rostfria stål kan förbättras genom att avlägsna svetsoxiderna genom betning eller blästring. Ytfinheten hos de rostfria stålen påverkar korrosionshårdigheten. En blästrad yta (grov yta) har oftast sämre korrosionshårdighet än en kallvalsad yta med hög ytfinhet (2, 3).

## 4.9 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 korrosionsskyddande egenskaper. Vid kloridhalter överstigande 0,4 % klorider per cementvikt i en karbonatiserad betong uppstår oftast korrosionsangrepp på kolstål (3). 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 (3,5).

I en undersökning utförd av Nürnberger et. al (13) har provstänger (både svetsade och icke svetsade) av sju olika rostfria kvaliteter; X2CrNiMoN17-13-5, X2CrNiMoN 22-5-3, X6C3NiMoTi17-12-2, X6Cr17, X20Cr13, X2C3Ni12 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 1.4571 (X6CrNiMoTi17-12-2) och 1.4462 (X2CrNiMoNi22-5-3) var helt oangripna av korrosion (gäller både svetsade och icke svetsade provstänger).

I en annan undersökning utförd av Hewitt & Tullmin (14) 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).

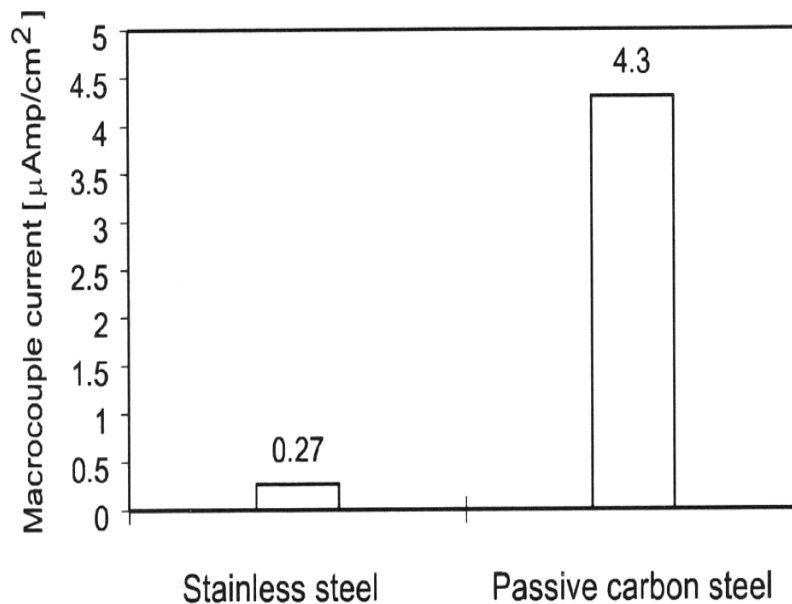
Enligt Bertolini och Pediferri (3) kan austenitiska rostfria stål av kvaliteten EN 1.4207 (X2CrNi18-8) och EN 1.4404 (X2CrNiMo17-12-2) eller duplexstål av kvaliteten EN 1.4460 (X3CrNiMoN27-5-2) användas utan någon risk för korrosionsangrepp i en icke karbonatiserad betong med en kloridhalt av 5 % . Även 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 (3).

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 (3).

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 (4), Italien (7) och i USA (12). 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

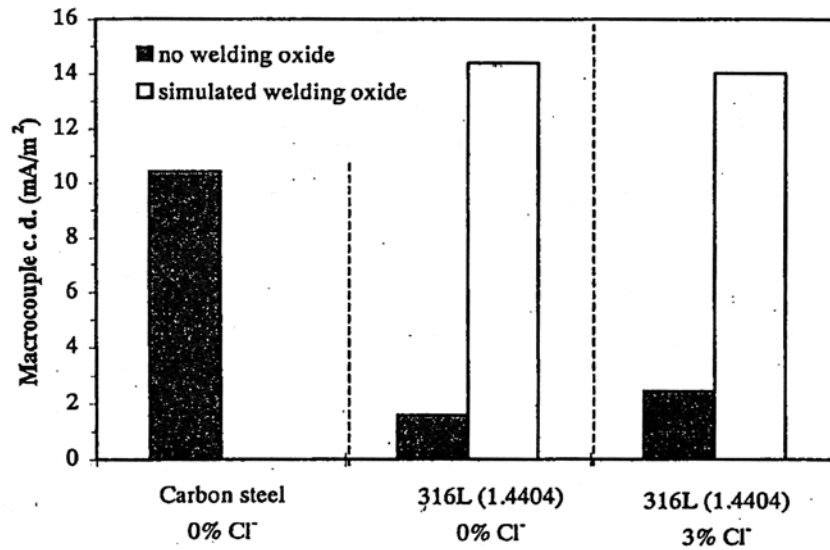
passiverat kolstål i betong och ett rostfritt stål i betong är mycket liten. Detta innebär att den drivande kraften för galvanisk korrosion mellan rostfria stål och passiverat kolstål i en icke karboniserad betong är försumbar. Det framgår vidare att ett passiverat kolstål i betong har större galvanisk inverkan på ett korroderande kolstål än vad ett austenitiskt rostfritt stål har på ett korroderande kolstål, **figur 3**.



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

*Figur 3. Resultat från mätningar av makrocellström mellan passiverat kolstål och korroderande kolstål respektive austenitiskt rostfritt stål och korroderande kolstål (4)*

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 ståls. Kinetiken för syrgasreduktion på austenitiskt rostfritt stål påverkas, bland annat av förekomsten av svetsoxider på metallytan. Dessa gynnar kinetiken hos katodreaktionen och förekomsten av svetsoxider på den rostfria stålytan vilket medför att reaktionshastigheten blir i paritet med eller snabbare än på passiverat kolstål, **figur 4**.

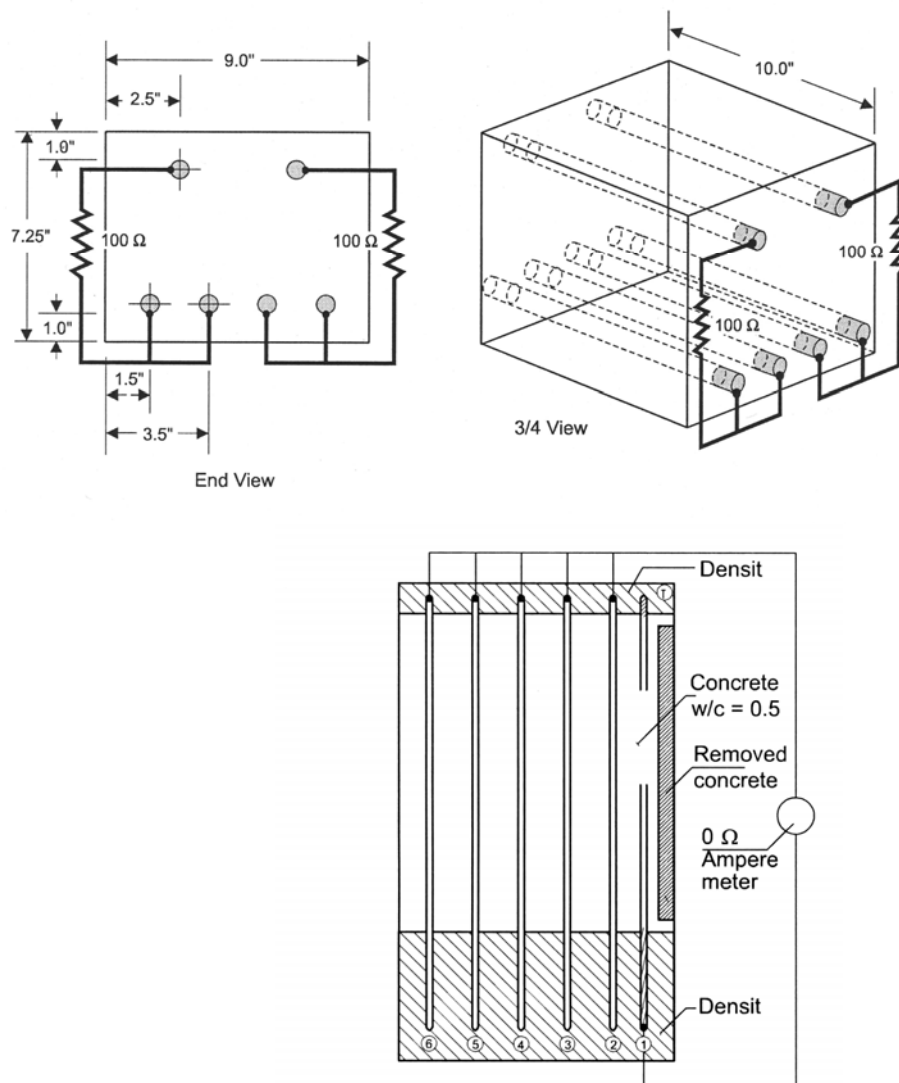


**Fig. 5:** Macrocouple current density exchanged between a corroding bar of carbon steel in 3% chloride contaminated concrete connected with a (parallel) passive bar of: carbon steel in chloride free concrete, on 316L (1.4404) stainless steel in chloride free concrete or in 3% chloride contaminated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

*Figur 4. Inverkan av svetsoxider på makrocellströmmen mellan austenitiskt rostfritt stål (EN 1.4404) och passiverat respektive aktivt kolstål(10).*

I den amerikanska undersökningen (12) har olika rostfria stålqualiteters (ASTM 304, 316LN, 2205 Duplex) galvaniska inverkan på kolstål (både passiverat och aktivt stål) i betong

undersökts. I **figur 5** visas två schematiska beskrivningar av olika försöksuppställningar för kontinuerliga mätningar av makrocellströmmar mellan olika ihopkopplade provmaterial.



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

*Figur 5. Schematisk beskrivning av två olika försöksuppställningar vid mätning av makrocellström (galvanisk ström) mellan olika material(4,12).*

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 12** 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 provstänger 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 12. Medelvärdet av kontinuerligt uppmätta makrocellströmmar under en 700 dagars period (12).

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/CS	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 6-8 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 och kolstål ökar kraftigt efter ca 600 dagars exponering, figur 6. Ökningen av makrocellströmmen mellan de austenitiska rostfria stålerna och kolstål var betydligt mindre än ökningen mellan 2205 Duplex och kolstålet, figur 7 och 8. Den högsta makrocellströmmen uppmättes mellan passiverat kolstål och aktivt kolstål, figur 9.

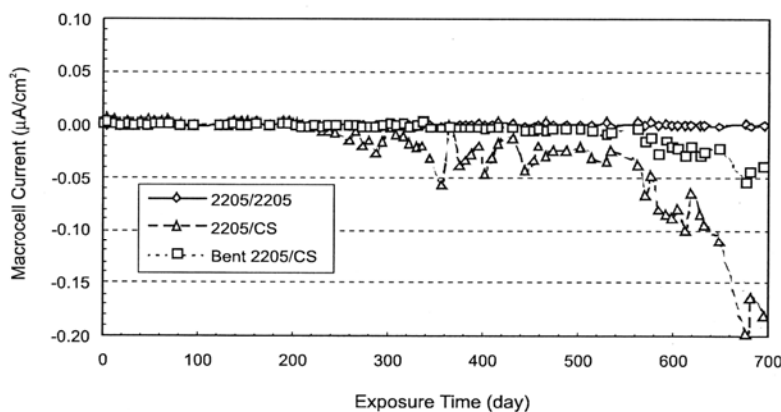
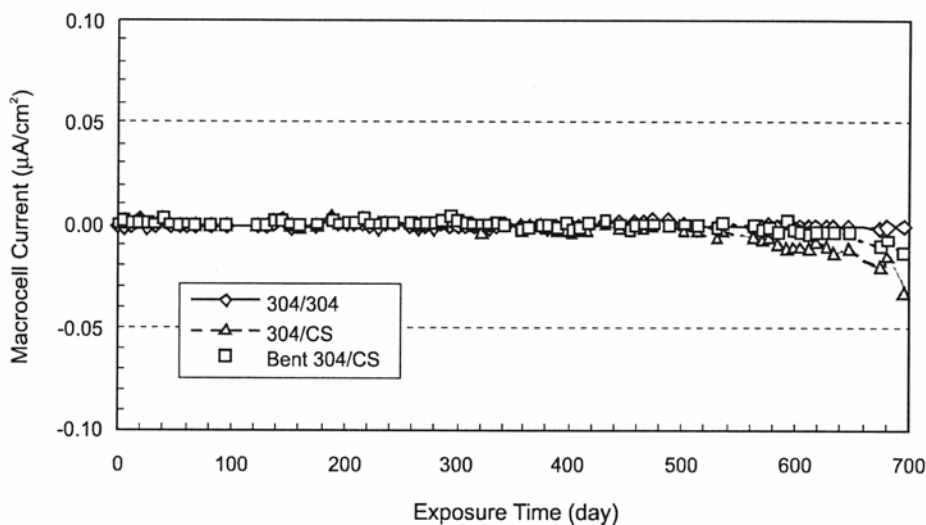


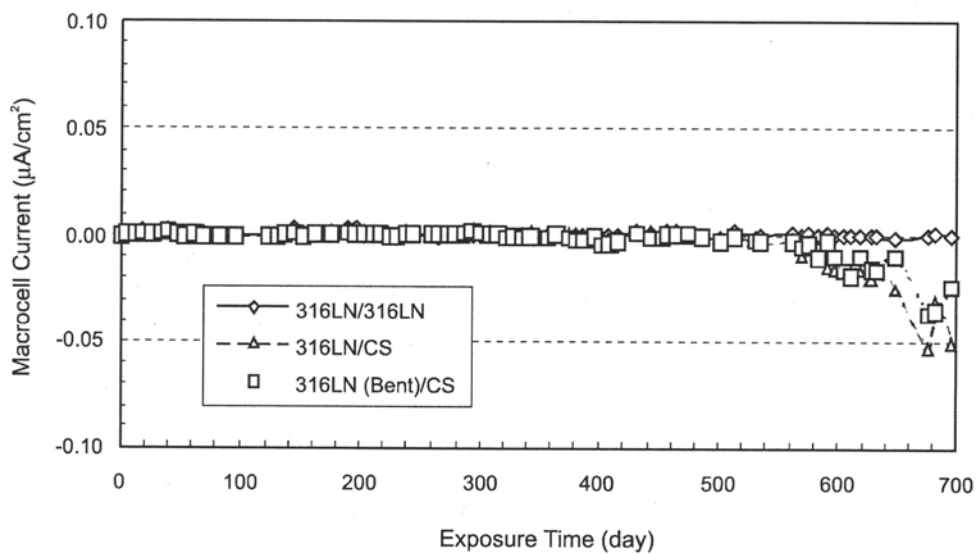
Figure 7. Macrocell Currents of Test Concrete Blocks with 2205 Duplex Stainless Steel Bars in Various Bar Combinations. The macrocell currents were normalized to the surface area of the top bars in the concrete blocks.

Figur 6. Kontinuerliga mätningar av makrocellström mellan 2205 Duplex och kolstål i betong under 700 dagars utomhusexponering (12)



**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.

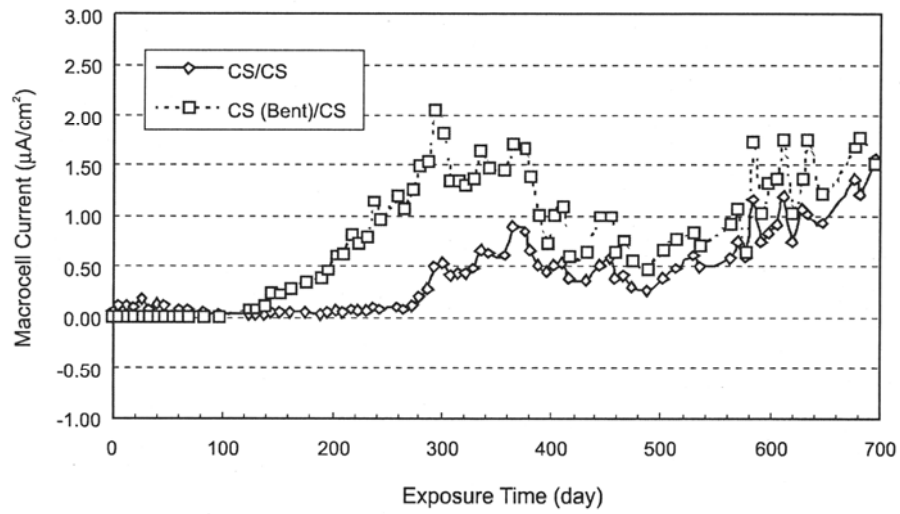
*Figur 7. Kontinuerliga mätningar av makrocellström mellan austenitiskt rostfritt stål (ASTM 304) och kolstål i betong under 700 dagars utomhusexponering (12).*



**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 8. Kontinuerliga mätningar av makrocellström mellan austenitiskt rostfritt stål (ASTM 316LN) och kolstål i betong under 700 dagars utomhusexponering (12).*





**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 9. Kontinuerliga mätningar av makrocellströmmar mellan passiverat kolstål och korroderande kolstål i betong under 700 dagars utomhusexponering (12).*

## 5 EXPERIMENTELLT ARBETE

I undersökningen avsågs att fastställa dels rostfria ståls galvaniska inverkan på kolstål, dels korrosionsegenskaperna hos rostfria stål ingjutna i kloridhaltig betong. Den galvaniska påverkan bestäms dels genom mätningar av makrocellström (galvanisk ström) mellan rostfritt stål och kolstål, dels genom bestämning av kolstålets korrosionshastighet och korrosionstillstånd efter ett respektive två års ihopkoppling med rostfritt stål i kloridhaltig betong.

### 5.1 Provsängar ingjutna i betongblock

I undersökningarna ingår fyra olika rostfria stålqualiteter (två austenitiska och två duplexa), **tabell 11**. I **tabell 12** redovisas de rostfria ståls kemiska sammansättning. De kemiska analyserna har utförts av Outokumpu Stainless AB i Avesta.

Tabell 11. Rostfria provsängar

Stålqualitet (EN)	Stålqualitet (ASTM)	Mikrostruktur	Provsängarnas längd (mm)	Provsängarnas diameter (mm)
1.4301	304	Austenit	100 och 300	16
1.4401	316	Austenit	100 och 300	16
1.4162	S32101	Austenit-ferrit	100 och 300	10
1.4462	S32205	Austenit-ferrit	100 och 300	10

Tabell 12. Kemisk sammansättning av rostfria provsängar (mass-%)

Stålqualitet (EN)	C	N	Cr	Ni	Mo	Mn
1.4301	0,027	0,066	18,12	8,64	0,31	1,43
1.4401	0,017	0,051	16,60	11,03	2,05	1,45
1.4162	0,028	0,02	21,49	1,43	0,14	4,84
1.4462	0,023	0,171	22,24	5,32	3,13	0,99

Som provsängar av kolstål används kamstängar av B500BT från Celsa Steel Service AB. Provsängarnas längd är 100 mm och diametern är 10 mm. I **tabell 13** redovisas kamstängarnas kemiska sammansättning.

Tabell 13. Kemisk sammansättning kolstålsprovsängar (mass-%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N
0,122	0,18	0,82	0,016	0,028	0,18	0,20	0,02	0,38	0,041

## 5.2 Betongblockens sammansättning och utseende

Vid tillverkning av betongblocken användes en reparationsbetong, REP 930, från Maxit Group AB. Betongen innehåller anläggningscement med en ballaststorlek på 0-4 mm. I **tabell 14** redovisas en produktspecifikation för reparationsbetongen REP 930.

Tabell 14. Produktspecifikation, REP 930

Appliceringstemperatur	> 5°C
Utbyte	Ca 13 liter per 25 kg säck
Rekommenderad skiktjocklek	10-50 mm
För utomhusbruk	Ja
Vattenbehov	Ca 2,1 liter per 25 kg säck
Vattencementtal (vct)	0,38
Tryckhållfasthet (Klass)	K 50
Tryckhållfasthet (28 dygn)	> 50 MPa
Bindemedel	Anläggningscement
Ballast	Natursand 0-4 mm
Rekommenderad vattenhalt	2,1 liter/25 kg säck
Börjar härda	Ca 6 timmar
Användningstid	Ca 30 minuter
Vattentät	Ja SS 13 72 14
Vintertillsats	Nej
Lufthalt	ca 7-8 %
Beständighet	Sulfatbeständig
Frostbeständigher	Ja 13 72 44 (salt miljö)

Som blandnings- och härdningsvatten vid betongtillverkningen användes Stockholms tappvatten. För att erhålla en total kloridhalt av 0,5, 1,5, 3,0 och 5,0 % per cementhalt tillsattes olika mängder NaCl (beräknade med utgångspunkt från recept enligt **tabell 14**) i blandvattnet, **tabell 15-18**.

Tabell 15. Betongblockens totala sammansättning (recept) vid en total kloridhalt av 0,5 % per cementvikt.

Anläggningscement	5,526 kg
Ballast+tillsatser	19,474 kg
Vatten	2,763 kg
NaCl (purum)	0,046 kg

Tabell 16. Betongblockens totala sammansättning (recept) vid en total kloridhalt av 1,5 % per cementvikt.

Anläggningscement	5,526 kg
Ballast+tillsatser	19,474 kg
Vatten	2,763 kg
NaCl (purum)	0,137 kg

Tabell 17. *Betongblockens totala sammansättning (recept) vid en total kloridhalt av 3 % per cementvikt.*

Anläggningscement	5,526 kg
Ballast+tillsatser	19,474 kg
Vatten	2,763 kg
NaCl (purum)	0,274 kg

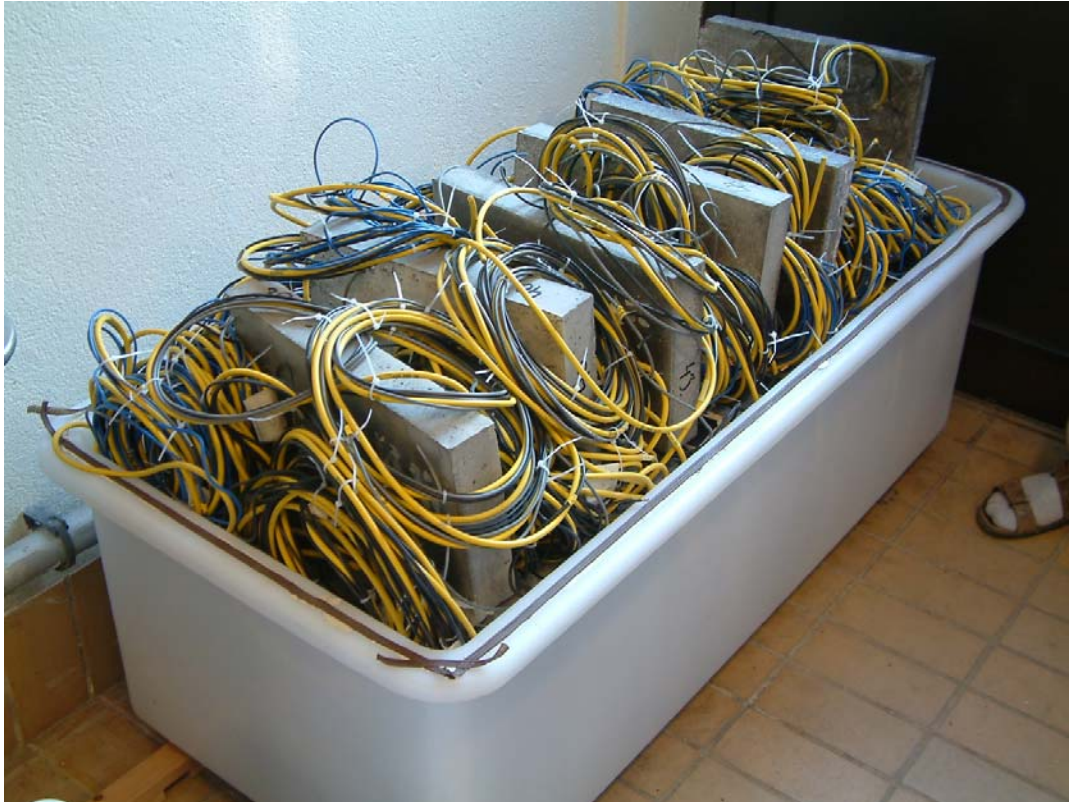
Tabell 18. *Betongblockens totala sammansättning (recept) vid en total kloridhalt av 5 % per cementvikt.*

Cement, Std P Slite	5,526 kg
Ballast+tillsatser	19,474 kg
Vatten	2,763 kg
NaCl (purum)	0,446 kg

I **tabell 19** och **20** ges en sammanställning av betongblockens storlek, täckskikt och vct,

Betongblock med ett täckande betongskikt av 15 mm (vct 0,5) karbonatiserades före exponeringen i en provkammare på laboratorium genom att blocken utsattes för en atmosfär av 99,5 % CO<sub>2</sub>, **figur 10**. Efter sex veckors karbonatisering uppmättes ett karboniseringsdjup på ca 0,5-1 mm, **figur 11**. Detta innebar att en genomkarbonatisering av betongblocken skulle tidigast kunna ske efter ca 15 månader exponering i 99,5 % CO<sub>2</sub>. Karbonatiseringen avbröts därmed efter 6 veckor.

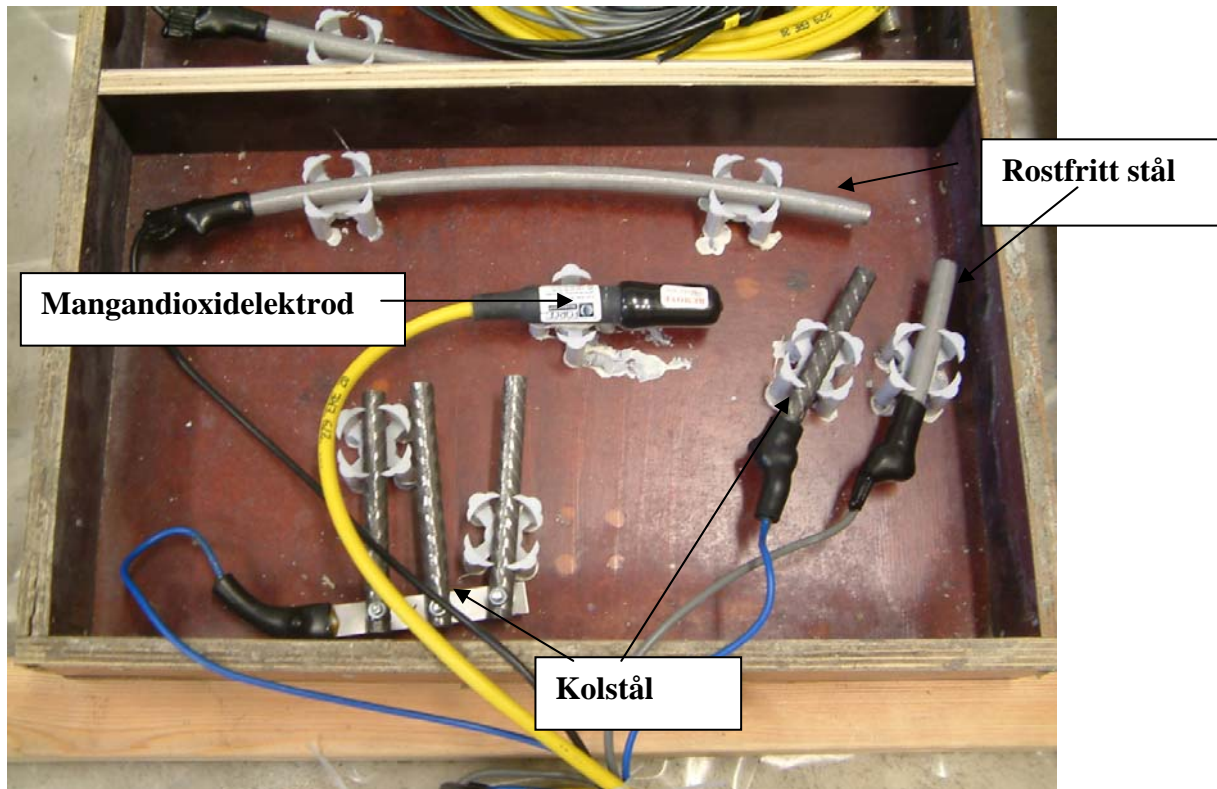
I varje betongblock fanns sex noggrant vägda provstänger av rostfritt stål (två provstänger) och av kolstål (fyra provstänger), **figur 12**. Till varje provstång fanns en mätsladd ansluten för kunna koppla ihop rostfria stänger med stänger av kolstål. En av de rostfria stängarna (längd 30 cm) var ihopkopplad med tre stycken mindre provstänger av kolstål (varje provstång har en längd av 10 cm). I varje betongblock fanns även en referenselektrod av MnO<sub>2</sub> för mätning av elektrokemisk potential på både ihopkopplade och icke ihopkopplade provstänger, **figur 12**.



Figur 10. Provkammare för karbonatisering av betongblock



Figur 11. Maximalt karbonatiseringsdjup efter 6 veckors karbonatisering i 99,5 %  $CO_2$  uppmätt med fenoftaleinlösning (ej karbonatiserad betongyta är rödfärgad).



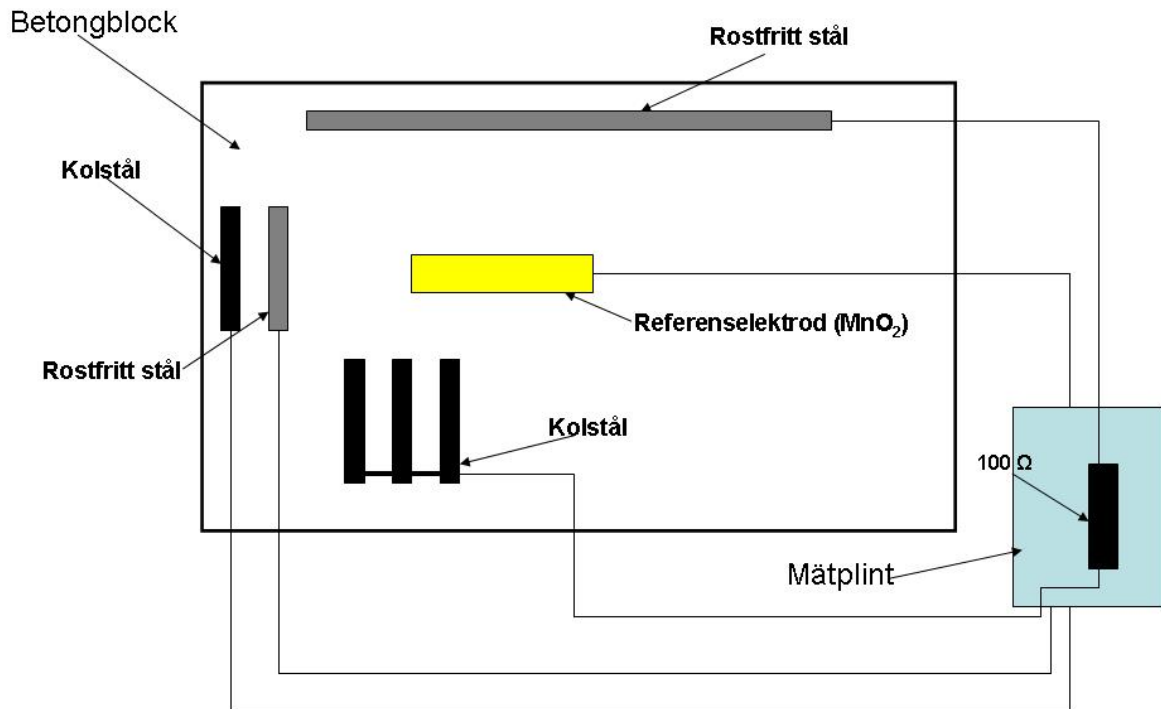
Figur 13. Gjutform med fastmonterade provstänger och referenselektrod.

### 5.3 Försöksutförande och utvärdering av korrosionstillstånd.

För att fastställa rostfria ståls galvaniska inverkan på kolstål i kloridhaltig betong mättes en till två gånger i månaden makrocellströmmen (galvanisk ström) mellan de ihopkopplade provstängerna. Den galvaniska korrosionsströmmen bestämdes genom att kontinuerligt mäta spänningsfallet över ett 100-ohms motstånd, **figur 13**. Den galvaniska strömmen har även kontrollerats vid ett mättillfälle med en nollresistansamperemeter.

Efter ett och två års utomhusexponering slogs betongblocken isär och provstängernas korrosionsutseende och korrosionshastighet utvärderades. Korrosionshastigheten utvärderades genom massförlustbestämning. Provstängerna hade då exponerats i betongblock med olika kloridhalt under en bestämd tid i ett korrosionsmedium, som i detta fall utgjordes av både betong och stadsmiljö. Massminskningen (massförlusten) pga korrosionen bestämdes genom att provstängerna vägdes före exponeringen och vid exponeringens slut, efter det att provstängerna rengjorts från korrosionsprodukter och betongrester genom upprepad betning i ett betmedel, som valts med hänsyn till metallen. Provstänger av kolstål betades 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. Provstänger av rostfritt stål betades i 20 %  $\text{HNO}_3$  i rumstemperatur. Vid beräkning av kolstängernas korrosionshastighet användes densiteten  $7800 \text{ kg/m}^3$  och för de rostfria stängerna användes densiteten  $7900 \text{ kg/m}^3$ .





Figur 13. Betongblock: schematisk figur.

## 6 RESULTAT OCH DISKUSSION

### 6.1 Bestämning av total kloridhalt per cementvikt hos betongblock efter ett och två års exponering

Både efter ett års (24 betongblock) och två års exponering (24 betongblock) uttogs prov för analys av den totala kloridhalten per cementvikt. Analyserna utfördes av Cement och betonginstitutet (CBI). I **tabell 19** och **20** visas resultaten från kloridanalyserna. Tabellen visar även karbonatiseringsdjupet efter 6 veckors karbonatisering inomhus och ett och två års utomhusexponering. Karbonatiseringsdjupet var litet (0,5 - 4 mm) trots att betongblocken utsatts för en hög CO<sub>2</sub>-halt (99,5 %) i sex veckor före utomhusexponeringen.

Som framgår av resultaten i **tabell 19** och **20** uppmättes betydligt lägre total kloridhalt i betongblocken per cementvikt än förväntat. Vid beräkning av den totala halten klorider per cementvikt som skulle tillsättas betongen antogs en cementhalt av 19,9 % (enligt produktinformation). Vid bestämningen av den totala kloridhalten per cementvikt fastställdes cementhalten för varje enskilt betongblock genom att bestämma kalciumhalten genom titrering med EDTA och fotometrisk mätning av färgomslaget med en Murexindikator. Vid beräkning av cementhalten för varje enskilt prov antogs att cementen innehåller 63 % CaO.

Tabell 19. Sammanställning av betongblock efter ett års utomhusexponering.

Betongblock			Betongblockens storlek (mm)	Uppmätt total kloridhalt per cementvikt efter ett års exponering. Cementhalten varierar mellan 23 och 27 % vid olika betongblock. Värden inom parentes gäller vid en cementhalt av 19,9 % enligt recept		Uppmätt karbonatiseringsdjup efter ett års exponering
Nr	vct	täckskikt (mm)		1 år (%)	(Ref) (%)	1 år (mm)
1	0,50	15	400x280x45	0	(0)	0
3	0,50	15	400x280x45	0,4	(0,5)	1
5	0,50	15	400x280x45	0,8	(1,5)	1
7	0,50	15	400x280x45	2,0	(3,0)	1,5
9	0,50	15	400x280x45	3,0	(5,0)	2
11(*)	0,38	50	450x300x115	0	(0)	0,5
13	0,50	15	400x280x45	0	(0)	1
15	0,50	15	400x280x45	0,4	(0,5)	1
17	0,50	15	400x280x45	1,0	(1,5)	1
19	0,50	15	400x280x45	1,8	(3,0)	1,5
21	0,50	15	400x280x45	2,3	(5,0)	2
23(*)	0,38	50	450x300x115	0	(0)	0
25	0,50	15	400x280x45	0	(0)	1
27	0,50	15	400x280x45	0,4	(0,5)	1,5
29	0,50	15	400x280x45	1,0	(1,5)	1,5
31	0,50	15	400x280x45	1,8	(3,0)	1
33	0,50	15	400x280x45	2,6	(5,0)	2
35(*)	0,38	50	450x300x115	0	(0)	0
37	0,50	15	400x280x45	0	(0)	1
39	0,50	15	400x280x45	0,4	(0,5)	1,5
41	0,50	15	400x280x45	0,9	(1,5)	1,5
43	0,50	15	400x280x45	1,8	(3,0)	2
45	0,50	15	400x280x45	2,7	(5,0)	2
47(*)	0,38	50	450x300x115	0	(0)	0

(\*) Ingen karbonatisering har utförts på dessa betongblock

Tabell 20. Sammanställning av betongblock efter två års utomhusexponering



Betongblock			Betongblockens storlek  (mm)	Uppmätt total kloridhalt per cementvikt efter två års exponering. Cementhalten varierar mellan 26 och 30 % vid olika betongblock Värden inom parentes gäller vid en cementhalt av 19,9 % enligt recept		Uppmätt karbonatiseringsdjup efter två års exponering  2 år (mm)
Nr	vct	täckskikt (mm)		2 år (%)	Ref (%)	
2	0,50	15	400x280x45	0	(0)	2
4	0,50	15	400x280x45	0,4	(0,5)	3
6	0,50	15	400x280x45	1,1	(1,5)	3
8	0,50	15	400x280x45	1,8	(3,0)	3,5
10	0,50	15	400x280x45	3,2	(5,0)	4
12(*)	0,38	50	450x300x115	0	(0)	1
14	0,50	15	400x280x45	0	(0)	2
16	0,50	15	400x280x45	0,4	(0,5)	3
18	0,50	15	400x280x45	0,6	(1,5)	3,5
20	0,50	15	400x280x45	2,2	(3,0)	3
22	0,50	15	400x280x45	2,6	(5,0)	4
24(*)	0,38	50	450x300x115	0	(0)	0,5
26	0,50	15	400x280x45	0	(0)	2
28	0,50	15	400x280x45	0,4	(0,5)	3
30	0,50	15	400x280x45	1,1	(1,5)	3
32	0,50	15	400x280x45	2,2	(3,0)	4
34	0,50	15	400x280x45	2,7	(5,0)	3,5
36(*)	0,38	50	450x300x115	0	(0)	1
38	0,50	15	400x280x45	0	(0)	3
40	0,50	15	400x280x45	0,4	(0,5)	2,5
42	0,50	15	400x280x45	0,9	(1,5)	2,5
44	0,50	15	400x280x45	2,2	(3,0)	3
46	0,50	15	400x280x45	2,4	(5,0)	3,5
48(*)	0,38	50	450x300x115	0	(0)	0

(\*) Ingen karbonatisering har utförts på dessa betongblock

## 6.2 Korrosionsutseende hos provstänger efter ett och två års utomhusexponering

I **bilaga 1** och visa utseendet av samtliga provstänger efter ett och två års utomhusexponering i betongblock med olika kloridhalt. Som framgår av **bilaga 1** kunde inga synliga korrosionsangrepp konstateras på provstänger av kolstål ingjutna i betongblock utan klorider. Rödrost konstaterades dock på de provstänger av kolstål som varit ingjutna i betongblock med olika tillsatser av klorider. I **bilaga 2** visas utseendet, efter betning, av samtliga provstänger

av kolstål efter ett och två års utomhusexponering i kloridhaltiga betongblock. Som framgår av både **bilaga 1** och **2** ökade korrosionsangreppen med ökad halt av klorider i betongblocken. Inga större skillnader i synliga korrosionsangrepp kunde dock konstateras mellan icke ihopkopplade och ihopkopplade provstänger av kolstål.

De rostfria provstängernas (både ihopkopplade och icke ihopkopplade) korrosionsutseende efter ett och två års utomhusexponering i betongblock framgår av **bilaga 1** och **2**. Inga synliga korrosionsangrepp kunde konstateras på de rostfria stängernas provyta som varit i kontakt med kloridhaltig betong. På några provstänger (stålqualiteterna EN 1.4301 och EN 1.4401 i hög kloridhalt i betongblocken) förekom dock rödrost på den del av stången som varit skyddad av krympslang. Det framgick att rödrosten härrörde från både stålpartiklar, s.k. främmande rost, som lossnat vid hållborring av de rostfria provstängerna och från de rostfria stängerna (spaltkorrosion).

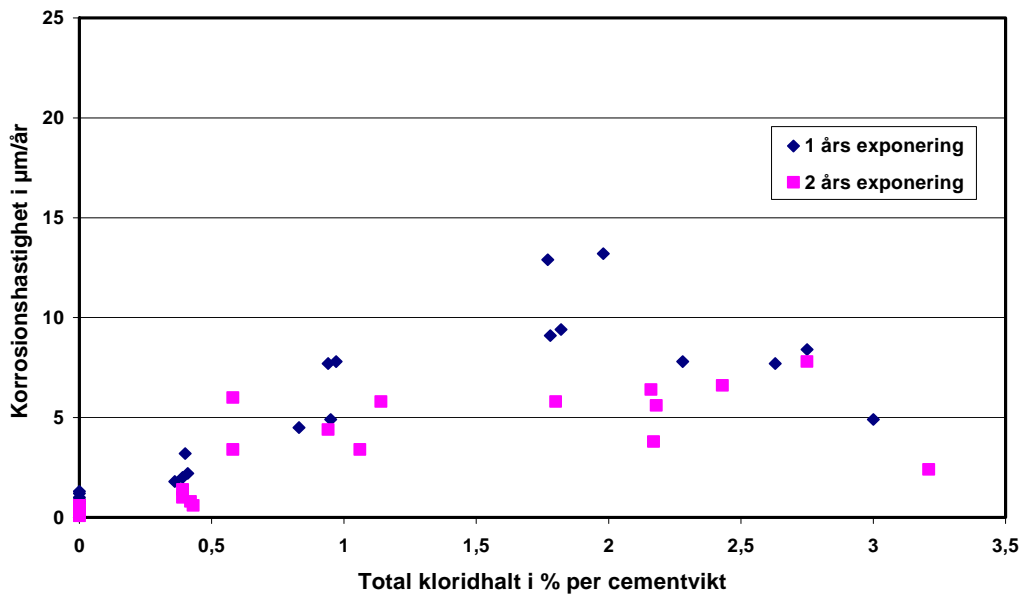
### 6.3 Utvärdering av korrosionshastighet efter ett och två års utomhusexponering

#### Provstänger av kolstål

I **tabell 21-28** visas utvärderingen av korrosionshastigheten, uttryckt som  $\mu\text{m}/\text{år}$ , hos både ihopkopplade och icke ihopkopplade provstänger av kolstål. Som framgår av resultaten i **tabellerna 21-28** var korrosionshastigheten hos både ihopkopplade och icke ihopkopplade provstänger av kolstål betydligt högre efter ett års exponering än efter två års exponering. Korrosionshastigheten, efter ett års exponering, ökade med ökad kloridhalt. Den högsta korrosionshastigheten (medelvärdet av tre stänger) uppmättes vid ihopkoppling med rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4162 vid en total kloridhalt i betongen av 1,8 % klorider per cementvikt. Den högsta uppmätta procentuella ökningen av korrosionshastigheten hos kolstål (medelvärde av tre kolstålsstänger) vid ihopkoppling med provstänger av rostfritt stål uppmättes för den rostfria stålqualiteten EN 1.4401 (81 %) vid den totala kloridhalten av 1,82 % klorider per cementvikt.

I **figur 14** visas korrosionshastigheten hos icke ihopkopplade kolstålsstänger (en stång per betongblock) efter ett och två års utomhusexponering som funktion av betongblockens totala kloridhalt per cementvikt. Som framgår av resultaten efter ett års exponering ökar korrosionshastigheten med ökad kloridhalt i betongen upp till en total kloridhalt av ca 1,8 % klorider per cementvikt, **figur 14**. Vid en total kloridhalt i betongen större än 1,8 % klorider per cementvikt sjunker korrosionshastigheten något hos kolstålsstängerna. En möjlig förklaring till detta är kloridernas förmåga att binda fukt i betongen. En ökad fukthalt (vattenmättad) i betongen minskar syrediffusionen fram till stålytan. En låg syrehalt vid stålytan minskar möjligheten för syrereduktion vid stålytan. Detta innebär i sin tur en lägre korrosionshastighet hos kolstålet (anodreaktionen är hämmad). Av utvärderingen av korrosionshastigheten av kolstålsstängerna efter två års utomhusexponering framgår det att korrosionshastigheten är betydligt lägre efter två års utomhusexponering än efter två års exponering. En möjlig förklaring är att fukthalten i betongen var hög från början men har minskat med tiden vilket resulterat i en lägre korrosionshastighet efter två år jämfört med efter ett års exponering (se avsnitt 6.4).

### Korrosionshastighet hos provstänger av kolstål (ej ihopkopplade)



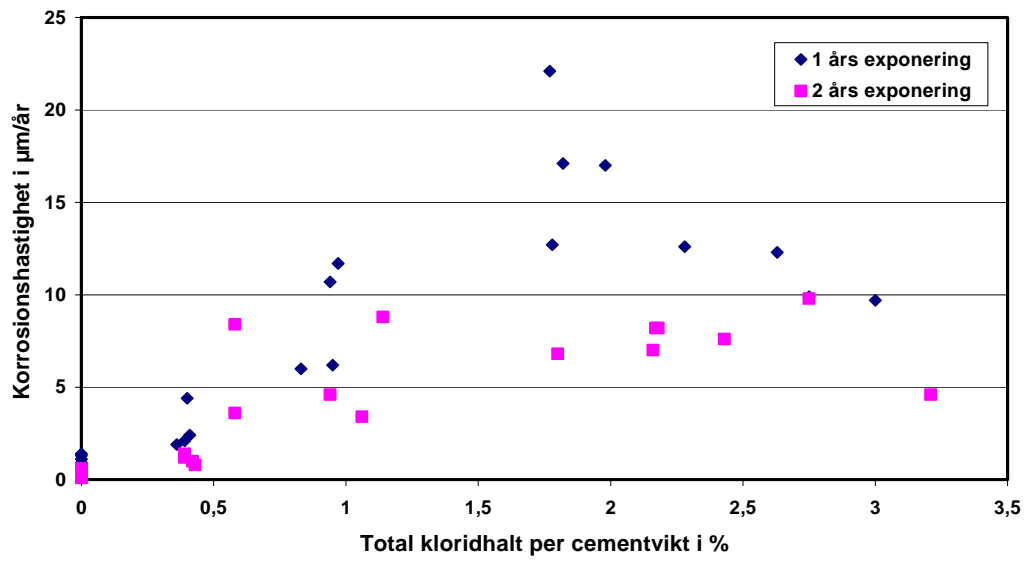
Figur 14. Korrosionshastigheten efter ett och två års utomhusexponering hos betongingjutna provstänger av kolstål som inte är ihopkopplade med rostfritt stål

I **figur 15** visas medelvärdet av korrosionshastigheten hos ihopkopplade kolstålsstänger (tre stänger per betongblock) efter ett och två års utomhusexponering som funktion av betongblockens totala kloridhalt per cementvikt. Som framgår av **figur 15** är korrosionshastigheten hos ihopkopplade provstänger av kolstål betydligt högre efter ett års utomhusexponering än efter två års utomhusexponering.

Vid en jämförelse mellan icke ihopkopplade stänger av kolstål och stänger av kolstål ihopkopplade med rostfria stänger konstaterades en något högre korrosionshastighet hos provstängerna av kolstål vid ihopkoppling med rostfria stänger jämfört med icke ihopkopplade kolstålsstänger. Detta gäller både efter ett och två års utomhusexponering.

Den högsta korrosionshastigheten efter ett års exponering hos ihopkopplade provstänger av kolstål uppmättes till ca 22 µm/år (medelvärde av tre stänger) vid en total kloridhalt av ca 1,8 % klorider per cementvikt. Vid högre kloridhalter i betongen sjunker korrosionshastigheten ned till ca 10 µm/år. Den högsta korrosionshastigheten efter två års exponering hos ihopkopplade provstänger av kolstål uppmättes till ca 4,9 µm/år (medelvärde av tre stänger) vid en total kloridhalt av ca 2,7 % klorider per cementvikt. Den uppmätta korrosionshastigheten hos både ihopkopplade och icke ihopkopplade provstänger av kolstål var betydligt lägre efter två års exponering än efter ett års exponering. Ingen större skillnad i galvanisk påverkan på kolstålet av olika rostfria stålqualiteter kunde konstateras.

### Korrosionshastighet hos provstänger av kolstål ihopkopplade med rostfritt stål av olika stålqualiteter



Figur 15. Korrosionshastigheten efter ett och två års utomhusexponering hos betongingjutna provstänger av kolstål som är ihopkopplade med rostfritt stål.

Tabell 21. Korrosionshastigheten efter ett års utomhusexponering hos ingjutna kolstålsstänger, ihopkopplade samt icke ihopkopplade med rostfria provstänger av stålqualiteten EN 1.4301.

Betongblock		Uppmätt total kloridhalt per cementvikt efter exponering %	Korrosionshastighet hos ihopkopplade provstänger µm/år				Korrosionshastighet hos icke ihopkopplade provstänger µm/år	Korrosionshastighetsökning på grund av ihopkoppling %
Täckskikt (mm)	vct		Stång 1	Stång 2	Stång 3	Medelvärde		
15 (*)	0,5	0	0,9	1,0	0,9	0,9	0,9	0
15 (*)	0,5	0,4	2,7	1,8	1,7	2,1	2,0	5
15 (*)	0,5	0,9	13,8	11,0	7,4	10,7	7,7	39
15 (*)	0,5	1,8	15,6	11,8	10,7	12,7	9,1	40
15 (*)	0,5	2,7	13,7	8,4	7,7	9,9	8,4	18
50	0,38	0	1,0	0,9	0,8	0,9	0,8	13

Tabell 22. Korrosionshastigheten efter två års utomhusexponering hos ingjutna kolstålsstänger, ihopkopplade samt icke ihopkopplade med rostfria provstänger av stålqualiteten EN 1.4301.

Betongblock		Uppmätt total kloridhalt per cementvikt efter exponering %	Korrosionshastighet hos ihopkopplade provstänger µm/år				Korrosionshastighet hos icke ihopkopplade provstänger µm/år	Korrosionshastighetsökning på grund av ihopkoppling %
Täckskikt (mm)	vct		Stång 1	Stång 2	Stång 3	Medelvärde		
15 (*)	0,5	0	0,6	0,8	0,6	0,7	0,6	14
15 (*)	0,5	0,4	1,4	1,2	1,2	1,3	1,0	23
15 (*)	0,5	0,9	6,6	3,8	3,8	4,7	4,4	6
15 (*)	0,5	2,2	7,8	7,0	6,2	7,0	6,4	9
15 (*)	0,5	2,4	6,2	9,2	7,4	7,6	6,6	13
50	0,38	0	0,3	0,4	0,4	0,4	0,3	25

(\*) Betongblock har utsatts i 6 veckor för 99,5 % CO<sub>2</sub> i en sluten provkammare belägen inomhus.

Tabell 23. Korrosionshastigheten efter ett års utomhusexponering hos ingjutna kolstålsstänger, ihopkopplade samt icke ihopkopplade med rostfria provstänger av stålqualiteten EN 1.4401.

Betongblock		Uppmätt total kloridhalt per cementvikt efter exponering %	Korrosionshastighet hos ihopkopplade provstänger µm/år				Korrosionshastighet hos icke ihopkopplade provstänger µm/år	Korrosionshastighetsökning på grund av ihopkoppling %
Täckskikt (mm)	vct		Stång 1	Stång 2	Stång 3	Medelvärde		
15 (*)	0,5	0	1,6	1,5	1,1	1,4	1,3	8
15 (*)	0,5	0,4	3,3	2,8	1,2	2,4	2,2	9
15 (*)	0,5	1,0	12,6	11,4	11,1	11,7	7,8	50
15 (*)	0,5	1,8	22,1	19,2	10,1	17,1	9,4	82
15 (*)	0,5	2,6	15,9	15,8	5,2	12,3	7,7	60
50	0,38	0	0,8	0,7	0,6	0,7	0,7	0

(\*) Betongblock har utsatts i 6 veckor för 99,5 % CO<sub>2</sub> i en sluten provkammare belägen inomhus.

Tabell 24. Korrosionshastigheten efter två års utomhusexponering hos ingjutna kolstålsstänger, ihopkopplade samt icke ihopkopplade med rostfria provstänger av stålqualiteten EN 1.4401.

Betongblock		Uppmätt total kloridhalt per cementvikt efter exponering %	Korrosionshastighet hos ihopkopplade provstänger µm/år				Korrosionshastighet hos icke ihopkopplade provstänger µm/år	Korrosionshastighetsökning på grund av ihopkoppling %
Täckskikt (mm)	vct		Stång 1	Stång 2	Stång 3	Medelvärde		
15 (*)	0,5	0	1,0	0,4	0,6	0,6	0,6	0
15 (*)	0,5	0,4	2,2	0,8	1,2	1,4	1,4	0
15 (*)	0,5	1,1	10,2	9,2	7,2	8,8	5,8	34
15 (*)	0,5	2,2	10,2	8,8	5,6	8,2	3,8	54
15 (*)	0,5	2,7	12,0	9,0	8,4	9,8	7,8	20
50	0,38	0	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0

(\*) Betongblock har utsatts i 6 veckor för 99,5 % CO<sub>2</sub> i en sluten provkammare belägen inomhus.

Tabell 25. Korrosionshastigheten efter ett års utomhusexponering hos ingjutna kolstålsstänger, både ihopkopplade och icke ihopkopplade med rostfria provstänger av stålqualiteten EN 1.4162.

Betongblock		Uppmätt total kloridhalt per cementvikt efter exponering	Korrosionshastighet hos ihopkopplade provstänger				Korrosionshastighet hos icke ihopkopplade provstänger	Korrosionshastighetsökning på grund av ihopkoppling
Täckskikt (mm)	vct		µm/år					
		%	Stång 1	Stång 2	Stång 3	Medelvärde	µm/år	%
15 (*)	0,5	0	1,4	1,2	1,4	1,3	1,2	8
15 (*)	0,5	0,4	4,6	3,4	5,3	4,4	3,2	38
15 (*)	0,5	1,0	11,4	5,7	1,5	6,2	4,9	27
15 (*)	0,5	1,8	25,9	21,4	19,0	22,1	12,9	71
15 (*)	0,5	2,3	18,8	14,7	4,2	12,6	7,8	62
50	0,38	0	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0

Tabell 26. Korrosionshastigheten efter två års utomhusexponering hos ingjutna kolstålsstänger, både ihopkopplade och icke ihopkopplade med rostfria provstänger av stålqualiteten EN 1.4162.

Betongblock		Uppmätt total kloridhalt per cementvikt efter exponering	Korrosionshastighet hos ihopkopplade provstänger				Korrosionshastighet hos icke ihopkopplade provstänger	Korrosionshastighetsökning på grund av ihopkoppling
Täckskikt (mm)	vct		µm/år					
		%	Stång 1	Stång 2	Stång 3	Medelvärde	µm/år	%
15 (*)	0,5	0	0,4	0,2	0,4	0,3	0,2	33
15 (*)	0,5	0,4	1,0	0,8	0,4	0,7	0,6	14
15 (*)	0,5	0,6	3,8	3,8	3,2	3,6	3,4	6
15 (*)	0,5	2,2	5,4	6,0	13,4	8,3	5,6	32
15 (*)	0,5	2,6	11,6	8,6	5,0	8,4	6,0	28
50	0,38	0	0,06	0,04	0,16	0,09	0,08	11

(\*) Betongblock har utsatts i 6 veckor för 99,5 % CO<sub>2</sub> i en sluten provkammare belägen inomhus

Tabell 27. Korrosionshastigheten efter ett års utomhusexponering hos ingjutna kolstålsstänger, både ihopkopplade och icke ihopkopplade med rostfria provstänger av stålqualiteten EN 1.4462

Betongblock		Uppmätt total kloridhalt per cementvikt efter exponering %	Korrosionshastighet hos ihopkopplade provstänger µm/år				Korrosionshastighet hos icke ihopkopplade provstänger µm/år	Korrosionshastighetsökning på grund av ihopkoppling %
Täckskikt (mm)	vct		Stång 1	Stång 2	Stång 3	Medelvärde		
15 (*)	0,5	0	1,1	1,0	1,1	1,1	1,0	10
15 (*)	0,5	0,4	1,8	1,9	2,0	1,9	1,8	6
15 (*)	0,5	0,8	6,1	4,8	7,2	6,0	4,5	33
15 (*)	0,5	2,0	16,6	16,8	17,6	17	13,2	29
15 (*)	0,5	3,0	14,8	9,6	4,8	9,7	4,9	49
50	0,38	0	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0

(\*) Betongblock har utsatts i 6 veckor för 99,5 % CO<sub>2</sub> i en sluten provkammare belägen inomhus

Tabell 28. Korrosionshastigheten efter två års utomhusexponering hos ingjutna kolstålsstänger, både ihopkopplade och icke ihopkopplade med rostfria provstänger av stålqualiteten EN 1.4462

Betongblock		Uppmätt total kloridhalt per cementvikt efter exponering %	Korrosionshastighet hos ihopkopplade provstänger µm/år				Korrosionshastighet hos icke ihopkopplade provstänger µm/år	Korrosionshastighetsökning på grund av ihopkoppling %
Täckskikt (mm)	vct		Stång 1	Stång 2	Stång 3	Medelvärde		
15 (*)	0,5	0	0,2	0,4	0,6	0,5	0,4	25
15 (*)	0,5	0,4	0,2	0,8	1,8	1,0	0,8	20
15 (*)	0,5	1,1	1,4	3,4	5,4	3,4	3,4	0
15 (*)	0,5	1,8	7,2	7,8	5,4	6,8	5,8	15
15 (*)	0,5	3,2	4,0	4,6	5,2	4,6	2,4	77
50	0,38	0	0,1	0,12	0,08	0,1	0,8	20

(\*) Betongblock har utsatts i 6 veckor för 99,5 % CO<sub>2</sub> i en sluten provkammare belägen inomhus



## 6.4 Utvärdering av kontinuerliga mätningar av makrocellström

I **figur 16-21** visas resultat från kontinuerliga mätningar av makrocellström mellan olika rostfria stålqualiteter och kolstål i betong med olika kloridhalt. Mätningar har utförts kontinuerligt en till två gånger i månaden under en två års period.

I betongblock utan klorider och med ett vct 0,38 samt ett täckande betongskikt av 50 mm är makrocellströmmen mellan rostfritt stål och kolstål i princip försumbar ( $0 \text{ mA/m}^2$ ), **figur 16**. Vid ett täckande betongskikt av 15 mm (vct 0,5 och 0 % klorider) ökade makrocellströmmen något mellan rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4162 och kolstål, **figur 17**. För de övriga rostfria stålen (EN 1.4301, EN 1.4401 och EN 1.4462) var makrocellströmmen låg ( $< 1,0 \text{ mA/m}^2$ ) under exponeringen, **figur 17**.

Vid en total kloridhalt av ca 0,4 % per cementvikt i betongblocken (vct 0,5, täckskikt 15 mm) är makrocellströmmen fortfarande låg för de rostfria stålqualiteterna EN 1.4301, 1.4401 och 1.4462, **figur 18**. För den rostfria kvaliteten EN 1.4162 uppmättes en makrocellström mellan 0,5 upp 1,8  $\text{mA/m}^2$ , **figur 18**.

Vid en total kloridhalt per cementvikt av 0,9 % i betongen (vct 0,5 och täckskikt 15 mm) ökade makrocellströmmen kraftigt för den rostfria kvaliteten EN 1.4162, **figur 19**. För de övriga rostfria stålqualiteter var makrocellströmmen fortfarande låg ( $< 3 \text{ mA/m}^2$ ), **figur 19**.

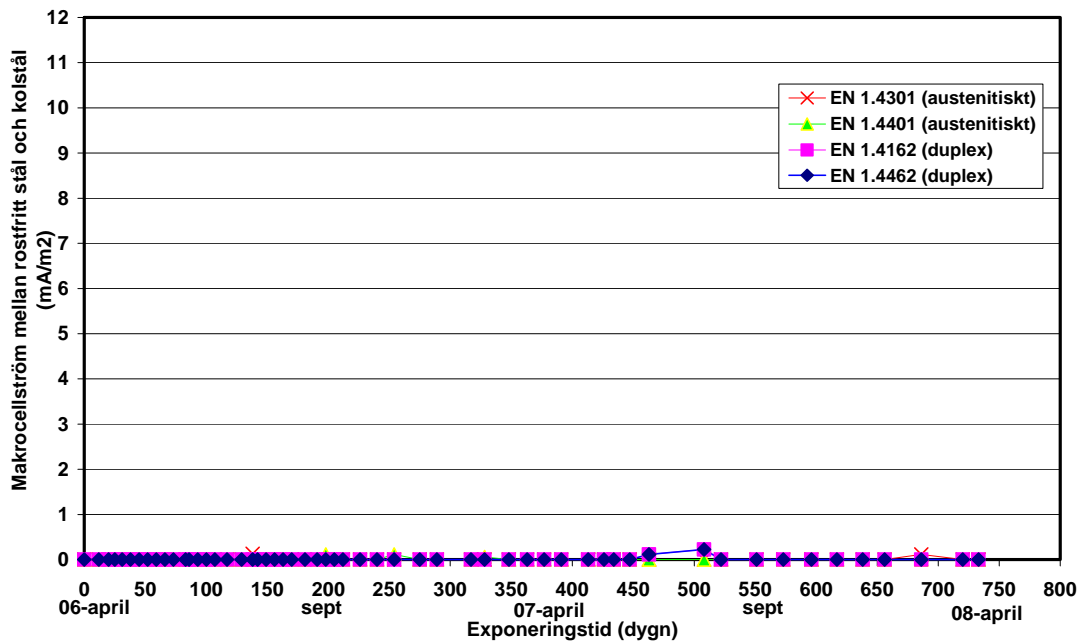
Vid en total kloridhalt 1,8 och 2,7 % per cementvikt i betongen uppmättes under de första 150 dagarna en hög makrocellström mellan kolstål och den rostfria kvaliteten EN 1.4162, **figur 19, 20** och **21**. Därefter, ca 150 dygns exponering, sjönk makrocellströmmen för den rostfria kvaliteten EN 1.4162. För de övriga rostfria stålen var makrocellströmmen relativt låg (ca  $1-3 \text{ mA/m}^2$ ) under hela exponeringen, **figur 20** och **21**.

I **tabell 29** (efter ett års exponering) och **tabell 30** (efter två års exponering) visas resultaten från mätningar av makrocellström mellan ihopkopplade provstänger av rostfritt stål och kolstål. Mätningarna utfördes med både med en multimeter (spänningsfall över 100-ohms motstånd) och med en nollresistansamperemeter. Som framgår av **tabell 29** och **30** förekom inga större skillnader i mätvärdena med olika mätutrustning.

Sammanfattningsvis kan sägas att höga makrocellströmmar (galvaniska strömmar) har endast mätts under de första 150 dagarna mellan den rostfria stålqualiteten EN 1.4162 och kolstål vid en total kloridhalt i betongen  $\geq 0,9 \%$  per cementvikt.

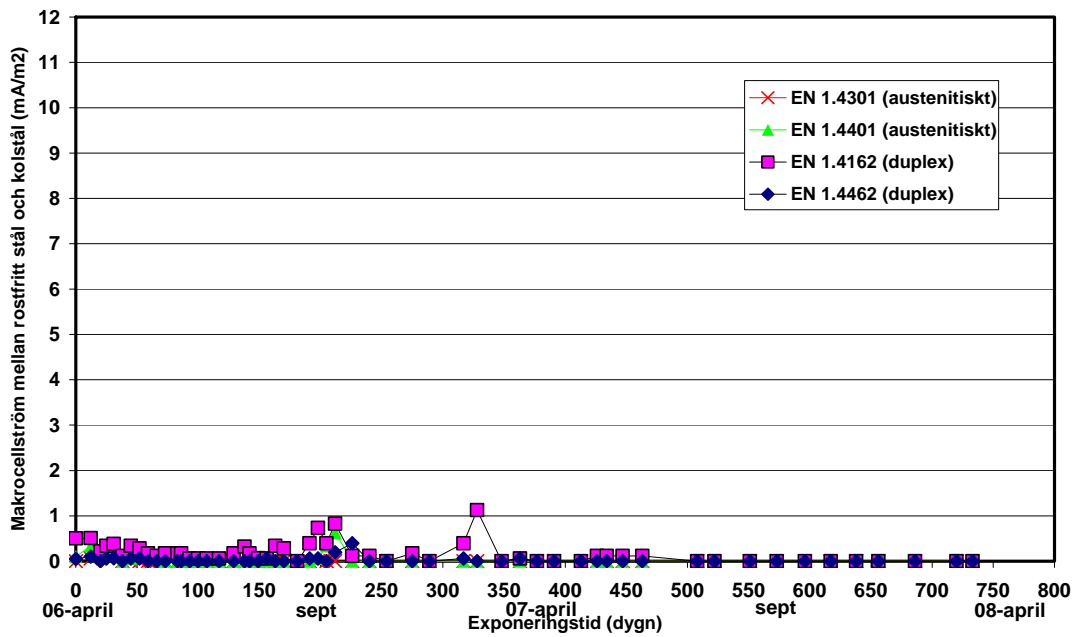
En möjlig orsak till sänkningen av makrocellströmmen efter 150 dagar kan vara att vid exponering i luft torkar den färska betongen och de ifrån början helt vätskefyllda porerna kommer istället att delvis innehålla luft. Detta innebär att motståndet i den galvaniska cellen ökar kraftigt. Om betongen skulle fortsatt vara vattenmättad är det möjligt att den galvaniska strömmen skulle ligga kvar på en högre nivå. Den galvaniska korrosionseffekten kan bli större i betong med mycket hög fukthalt eller i vattenmättad betong.

Referensblock (vct 0,38 och 0 % klorider och täcksikt 50 mm)



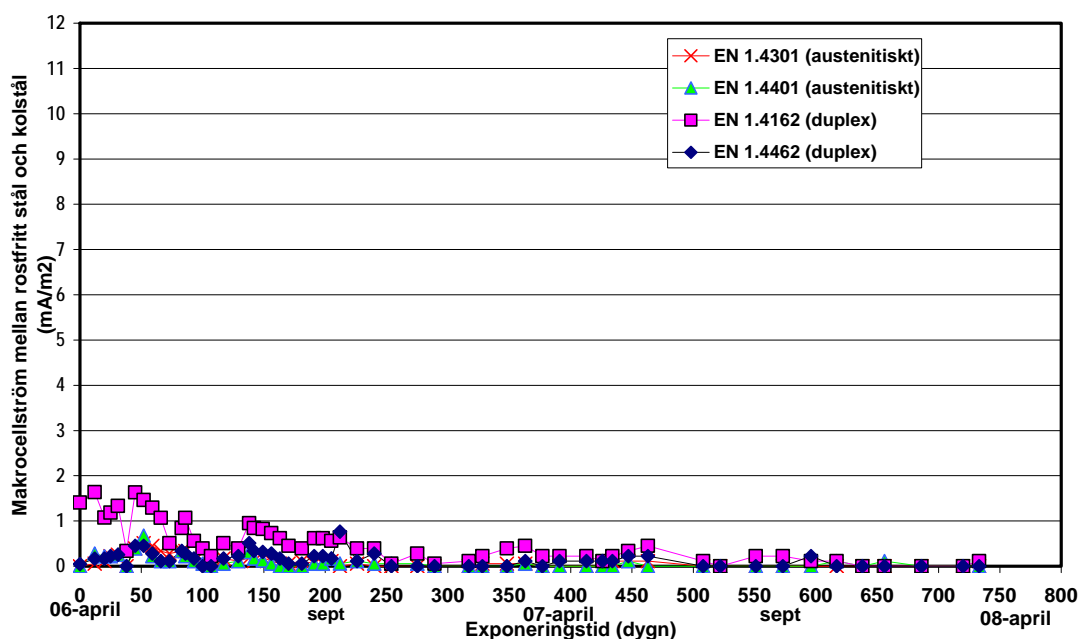
Figur 16 Resultat från kontinuerliga mätningar av makrocellström mellan provstänger av olika rostfria stålqualiteter och provstänger av kolstål i betong.

Betongblock (vct 0,5 och 0 % klorider samt täcksikt 15 mm)



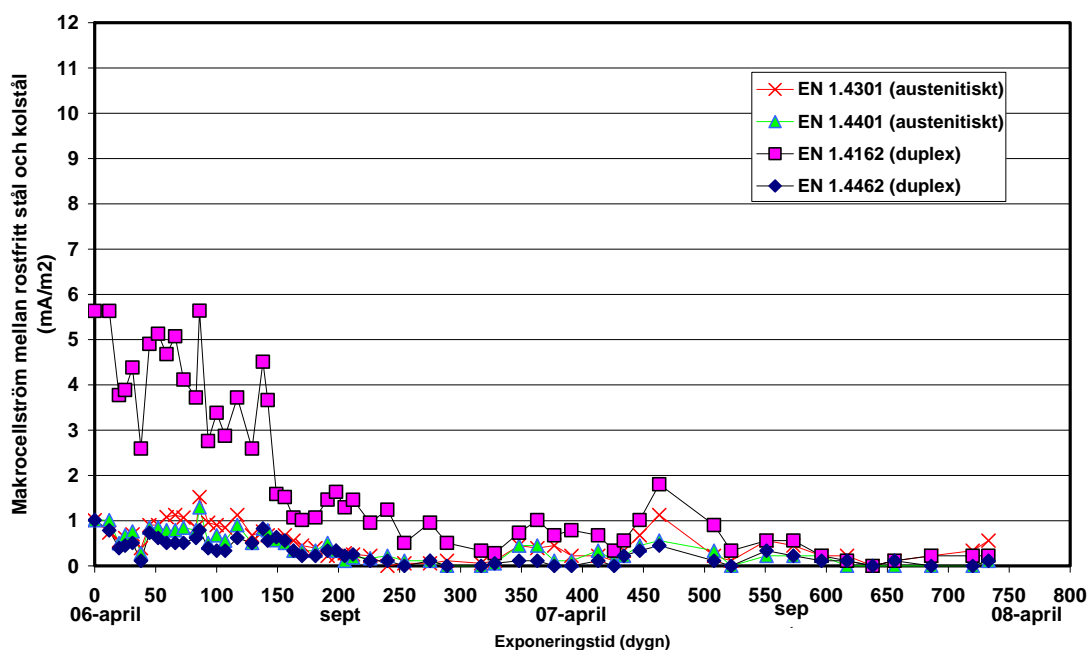
Figur 17 Resultat från kontinuerliga mätningar av makrocellström mellan provstänger av olika rostfria stålqualiteter och provstänger av kolstål i betong

Betongblock (vct 0,5, total kloridhalt 0,4 % per cementvikt och täcksikt 15 mm)



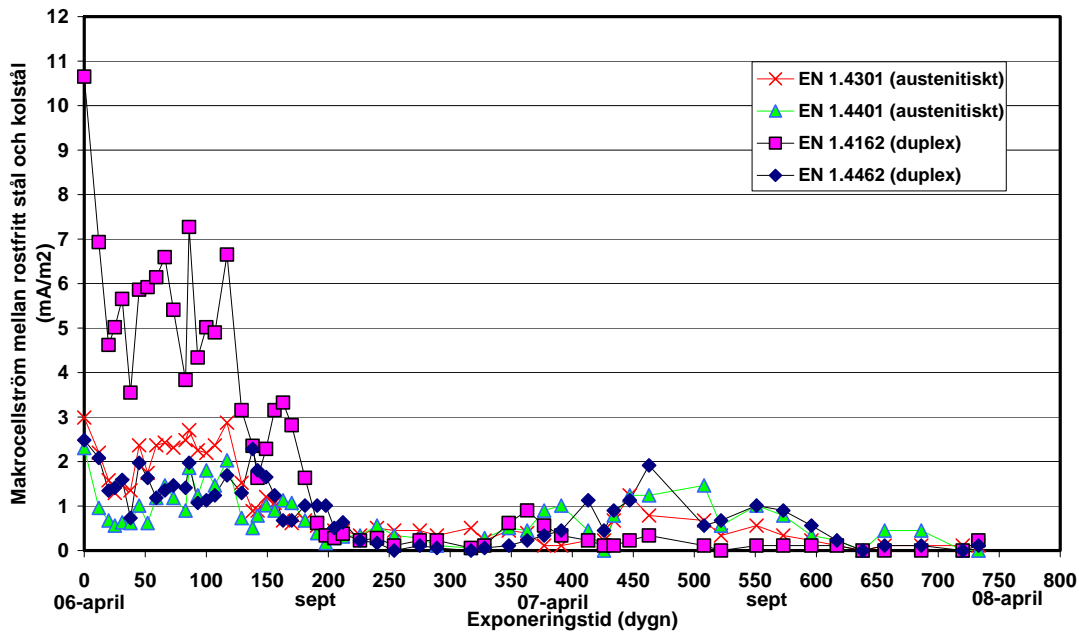
Figur 18 Resultat från kontinuerliga mätningar av makrocellström mellan provstänger av olika rostfria stålqualiteter och provstänger av kolstål i betong.

Betongblock (vct 0,5, total kloridhalt 0,9 % per cementvikt och täcksikt 15 mm)



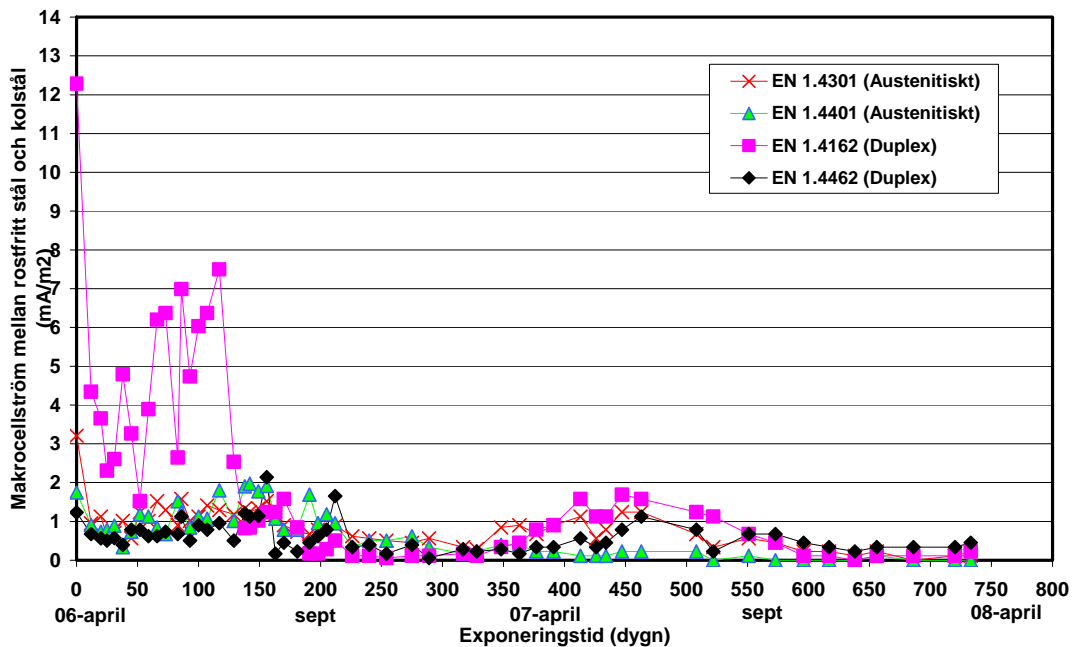
Figur 19 Resultat från kontinuerliga mätningar av makrocellström mellan provstänger av olika rostfria stålqualiteter och provstänger av kolstål i betong.

Betongblock (vct 0,5, total kloridhalt 1,8 % per cementvikt och täcksikt 15 mm)



Figur 20 Resultat från kontinuerliga mätningar av makrocellström mellan provstänger av olika rostfria stålqualiteter och provstänger av kolstål i betong.

Betongblock (vct 0,5, total kloridhalt 2,7 % per cementvikt och täcksikt 15 mm)



Figur 21 Resultat från kontinuerliga mätningar av makrocellström mellan provstänger av olika rostfria stålqualiteter och provstänger av kolstål i betong.

Tabell 29. Resultat från mätningar av makrocellström mellan provstänger av rostfritt och kolstål. Mätningarna har utförts innan blocken slogs isär 10 april 2007 med både en multimeter (spänningsfall över ett 100 ohms motstånd) och med en nollresistansamperemeter.

Betongblock			Uppmätt total kloridhalt per cementvikt efter exponering	Uppmätt makrocellström mellan provstänger av rostfritt stål och kolstål.  (Nollresistansamperemeter)	Uppmätt makrocellström mellan provstänger av rostfritt stål och kolstål.  (Spänningsfall över ett 100-ohmig motstånd)
Nr	vct	täckskikt (mm)	(%)	( $\mu$ A)	( $\mu$ A)
1	0,50	15	0	0,6	1
3	0,50	15	0,4	2,3	2
5	0,50	15	0,8	1,7	2
7	0,50	15	2,0	2,4	2
9	0,50	15	3,0	0,4	0
11(*)	0,38	50	0	0	0
13	0,50	15	0	1,1	1
15	0,50	15	0,4	7,4	7
17	0,50	15	1,0	13,2	13
19	0,50	15	1,8	10,3	10
21	0,50	15	2,3	2,1	2
23(*)	0,38	50	0	-0,1	0
25	0,50	15	0	1,4	1
27	0,50	15	0,4	1,1	1
29	0,50	15	1,0	7,4	7
31	0,50	15	1,8	9,4	9
33	0,50	15	2,6	8,4	8
35(*)	0,38	50	0	0,1	0
37	0,50	15	0	0,2	0
39	0,50	15	0,4	1,9	2
41	0,50	15	0,9	2,4	2
43	0,50	15	1,8	5,4	5
45	0,50	15	2,7	13,7	14
47(*)	0,38	50	0	-0,1	0

Tabell 30. Resultat från mätningar av makrocellström mellan provstänger av rostfritt och kolstål. Mätningarna har utförts innan blocken slogs isär 10 april 2008 med

*både en multimeter (spänningsfall över ett 100 ohms motstånd) och med en nollresistansamperemeter*

Betongblock			Uppmätt total kloridhalt per cementvikt efter exponering	Uppmätt makrocellström mellan provstänger av rostfritt stål och kolstål.  (Nollresistansamperemeter)	Uppmätt makrocellström mellan provstänger av rostfritt stål och kolstål.  (Spänningsfall över ett 100-ohmig motstånd)
Nr	vct	täckskikt (mm)	(%)	( $\mu$ A)	( $\mu$ A)
2	0,50	15	0	0,2	1
4	0,50	15	0,4	0,4	2
6	0,50	15	1,1	1,4	2
8	0,50	15	1,8	1,4	2
10	0,50	15	3,2	4,4	4
12(*)	0,38	50	0	0,1	0
14	0,50	15	0	0,4	0
16	0,50	15	0,4	1,4	1
18	0,50	15	0,6	2,3	2
20	0,50	15	2,2	2,4	2
22	0,50	15	2,6	2,4	2
24(*)	0,38	50	0	0,3	0
26	0,50	15	0	0,1	0
28	0,50	15	0,4	0,4	0
30	0,50	15	1,1	1,4	1
32	0,50	15	2,2	0,4	0
34	0,50	15	2,7	0,3	0
36(*)	0,38	50	0	0	0
38	0,50	15	0	0,1	0
40	0,50	15	0,4	0,4	0
42	0,50	15	0,9	5,4	5
44	0,50	15	2,2	1,4	1
46	0,50	15	2,4	1,3	1
48(*)	0,38	50	0	0,3	0

## 6.5 Utvärdering av kontinuerliga mätningar av elektrodpotential

I **bilaga 3-6** redovisas kontinuerligt uppmätta potentialvärden för ihopkopplade och icke ihopkopplade provstänger ingjutna i olika kloridhaltiga betongblock som funktion av exponeringstiden.

Det framgår av **bilaga 3-6** att de rostfria provstängernas elektropotential i kloridhaltig betong är betydligt mindre negativ än elektropotentialen hos provstänger av kolstål. I betongblock utan klorider är de rostfria provstängernas elektropotential jämförbar med kolstålsstängernas elektropotential i betong utan klorider. För de rostfria provstängerna av stålqualiteterna EN 1.4162 och EN 1.4462 är provstängernas elektropotentialer relativt konstanta under exponeringen, **bilaga 5** och **6**. För de rostfria stängerna av stålqualiteterna EN 1.4301 och EN 1.4401 varierade elektropotentialen kraftigt under exponeringen, **bilaga 3** och **4**. En möjlig förklaring till detta är att dessa provstänger är utsatta för korrosionsangrepp (spaltkorrosion) under krympslangen.

I betongblock utan klorider med vct av 0,38 och täckande betongskikt 50 mm var elektropotentialen hos samtliga provstänger (både rostfria och kolstål) relativt konstant under exponeringen, **bilaga 3-6**.

De betydligt mer negativa potentialvärdena som uppmäts i kloridhaltiga betongblock på provstänger av kolstål jämfört med rostfria stänger beror på att kolstålsstängerna korroderar, **bilaga 3-6**.

Vid ihopkoppling av rostfria provstänger med stänger av kolstål fås en blandpotential som är jämförbar med kolstålets elektropotential, **bilaga 3-6**.

I **tabell 31** visas mätningar av blandpotentialen mellan ihopkopplade provstänger av kolstål och provstänger av rostfritt stål av olika stålqualiteter samt de olika provstängernas elektrokemiska potential efter det att stängerna varit isär kopplade i 5 sekunder, en timme och 24 timmar. Det framgår av resultaten i **tabell 31** att vid en isärkoppling av stängerna blir de rostfria stängernas elektrokemiska potential betydligt mindre negativ än blandpotentialen. För provstänger av kolstål blir den elektrokemiska potential något mer negativ än blandpotentialen när provstängerna kopplas isär. De rostfria stängerna är sålunda betydligt enklare att polarisera än stängerna av kolstål. Blandpotentialen mellan rostfritt och kolstål bestäms i huvudsak av kolstålets elektrokemiska potential.

Tabell 31. Resultat från mätningar av elektrokemisk potential mellan provstänger av rostfritt och kolstål. Mätningarna har utförts både när provstängerna är ihopkopplade och icke ihopkopplade efter olika tider.

Betong-block  (Nr.)	Total kloridhalt per cement-vikt (%)	Rosrfri stål-kvalitet (EN)	Uppmätt elektrod-potential rel. MnO <sub>2</sub> -elektrod vid ihopkoppling mellan stång av rostfritt stål och stång av kolstål (mV)	Uppmätt elektrod-potential rel. MnO <sub>2</sub> -elektrod efter 1 sek. isärkoppling av stång av rostfritt stål och stång av kolstål		Uppmätt elektrod-potential rel. MnO <sub>2</sub> -elektrod efter 1 tim. isärkoppling av stång av rostfritt stål och stång av kolstål		Uppmätt elektrod-potential rel. MnO <sub>2</sub> -elektrod efter 24 tim. isärkoppling av stång av rostfritt stål och stång av kolstål	
				Rostfritt (mV)	Kolstål (mV)	Rostfritt (mV)	Kolstål (mV)	Rostfritt (mV)	Kolstål (mV)
2	0	1.4462	-349	-346	-349	-302	-350	-280	-352
4	0,4	1.4462	-511	-509	-513	-427	-517	-392	-521
6	1,1	1.4462	-655	-646	-659	-480	-663	-449	-673
8	1,8	1.4462	-727	-720	-728	-536	-729	-449	-725
10	3,2	1.4462	-776	-758	-780	-464	-779	-443	-780
12(*)	0	1.4462	-304	-304	-305	-288	-307	-267	-308
14	0	1.4162	-349	-348	-352	-319	-371	-259	-377
16	0,4	1.4162	-567	-565	-571	-483	-581	-365	-590
18	0,6	1.4162	-760	-700	-764	-571	-767	-575	-770
20	2,2	1.4162	-565	-561	-676	-454	-803	-347	-801
22	2,6	1.4162	-719	-715	-720	-586	-721	-422	-704
24(*)	0	1.4162	-256	-255	-256	-239	-272	-214	-275
26	0	1.4401	-331	-328	-334	-309	-372	-273	-395
28	0,4	1.4401	-441	-440	-445	-337	-449	-326	-453
30	1,1	1.4401	-627	-623	-632	-560	-635	-558	-645
32	2,2	1.4401	-492	-487	-517	-452	-628	-487	-654
34	2,7	1.4401	-622	-619	-648	-605	-690	-573	-700
36(*)	0	1.4401	-310	-310	-310	-309	-311	-308	-312
38	0	1.4301	-349	-348	-351	-327	-355	-314	-343
40	0,4	1.4301	-466	-464	-468	-412	-471	-419	-479
42	0,9	1.4301	-740	-725	-754	-559	-758	-507	-763
44	2,2	1.4301	-691	-688	-693	-561	-695	-478	-691
46	2,4	1.4301	-743	-739	-745	-705	-746	-695	-748
48(*)	0	1.4301	-371	-370	-371	-314	-375	-312	-377



## 7 Slutsatser och rekommendationer

Efter upp till två års utomhusexponering av olika rostfria stänger respektive kolstålsstänger i kloridhaltiga betongblock kan följande slutsatser dras:

- Inga korrosionsangrepp kunde konstateras på vare sig ihopkopplade eller icke ihopkopplade provstänger av kolstål som varit ingjutna i betongblock utan klorider.
- Korrosionsangrepp (gropfrätning) konstaterades på både ihopkopplade och icke ihopkopplade provstänger av kolstål som varit ingjutna i kloridhaltiga betongblock.
- Inga korrosionsangrepp kunde konstateras på någon av de rostfria provstängerna som varit i kontakt med kloridhaltig betong.
- I kloridhaltiga betongblock var korrosionshastigheten något högre hos ihopkopplade stänger av kolstål än korrosionshastigheten hos icke kopplade stänger av kolstål. I betongblock utan klorider var korrosionshastigheten hos ihopkopplade stänger av kolstål jämförbar med korrosionshastigheten hos icke kopplade provstänger av kolstål.
- Utvärderingen av korrosionshastigheten hos ihopkopplade och icke ihopkopplade provstänger av kolstål visade att korrosionshastigheten var betydligt högre hos både ihopkopplade och icke ihopkopplade provstänger av kolstål efter ett års exponering än korrosionshastigheten efter två års exponering.
- Från resultaten av de kontinuerliga mätningar av makrocellström (galvanisk ström) mellan rostfritt stål och kolstål framgick det att höga galvaniska strömmar enbart har uppmätts under de första 150 dagarna av den tvååriga exponeringen mellan den rostfria stålqualiteten EN 1.4162 och kolstål vid en total kloridhalt i betongen  $\geq 0,9$  % per cementvikt.
- Från resultaten av kontinuerliga mätningar av elektropotential framgick det att de rostfria provstängernas elektropotential i kloridhaltig betong var betydligt mindre negativa än elektropotentialen hos provstänger av kolstål. De negativa potentialvärdena hos kolstål beror på att stålet är aktivt och korroderar.
- De kontinuerligt registrerade elektropotentialerna hos provstänger av kolstål och rostfritt stål visade att elektropotentialerna är jämförbara för rostfritt stål och kolstål i betong utan klorider. De positiva potentialvärdena hos kolstål beror på att stålet är passiverat och korrosionen är därmed försumbar

Sammanfattningsvis visade undersökningen att rostfritt stål av olika stålqualiteter (EN 1.4301, 1.4401, 1.4162 och 1.4462) kan kopplas ihop med kolstål i betong (med och utan klorider) i konstruktioner utomhus utan att kolstålet nämnvärt påverkas galvaniskt av det rostfria stålet. Inga korrosionsangrepp har konstaterats på någon av de rostfria provstängerna (EN 1.4301, 1.4401, 1.4162 och 1.4462) som har varit i kontakt med kloridhaltig betong efter två års utomhusexponering. Den galvaniska korrosionseffekten kan bli större i betong med mycket hög fukthalt eller i vattenmättad betong

## 8 Referenser

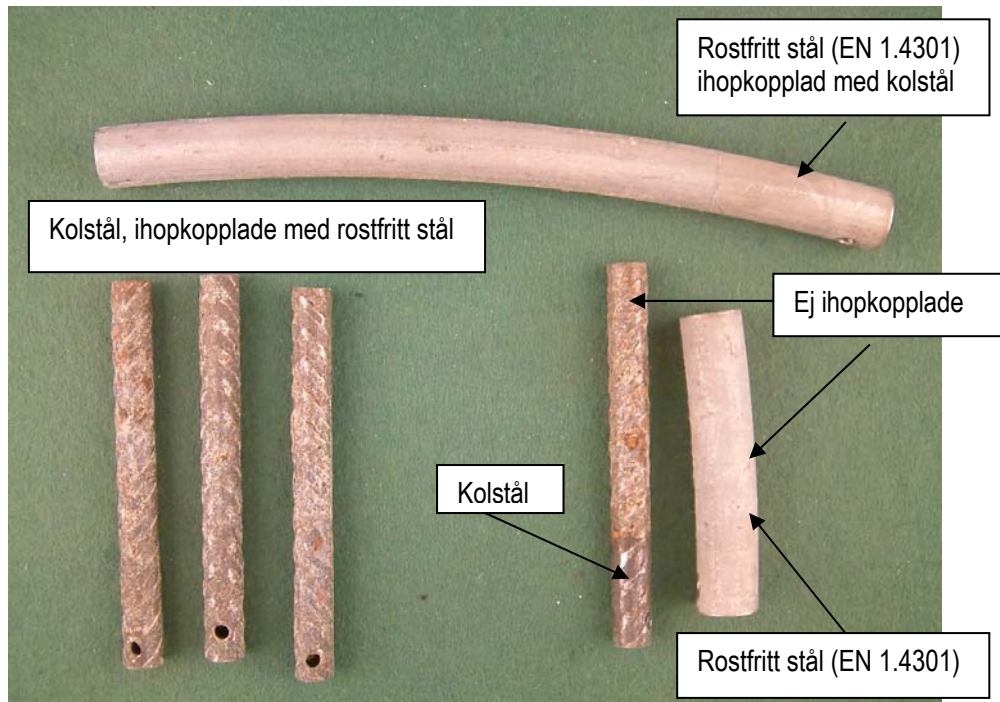
- 1 Outokumpu Stainless AB. Konstruera i Rostfritt-Materialval. Kursmaterial. 2005 Avesta.
- 2 The Institute of Materials, Stainless steel in concrete – State of the art report. European Federation of corrosion publications Nr 18. editor U Nürnberger, 1996 London.
- 3 Bertolini, L & Pedferri, P: Laboratory and Field experience on the Use of stainless steel. Corrosion Reviews. Vol. 20, Nos 1-2, 2002.
- 4 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.
- 5 Sørensen, B & Jensen, P.B & Maahn, E: The corrosion properties of stainless steel reinforcement. *Corrosion of reinforcement in concrete*. Elsevier Applied Science, 1990, sid. 601-610.
- 6 Abbott , C.J: Corrosion-Free Concrete Structures with Stainless Steel. Concrete , vol. 31 Nr.5, Maj 1997 s. 28-32
- 7 Bertolini, L & Gastaldi, M & Pastore, T & Pedferri, M.P & Pedferri, 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
- 8 McGurn, J.F: Stainless Steel Reinforcing Bars in Concrete. Int. Conf. On Corrosion and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures. FHA, Orlando 7-11 December 1998.
- 9 McDonald, D.B & Pfeifer D.W & Virmani Y.P: Corrosion resistans reinforcing bars - findings. Int. Conf. “Corrosion and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures. FHW, Orlando 7-11 December 1998.
- 10 Bertolini, L & Gastaldi, M & Pedferri: Stainless steel in concrete. COST 521 Corrosion of steel in reinforced concrete structures. 18-18 February 2002, Luxembourg.
- 11 The Institute of Materials. Corrosion of reinforcement in concrete – Corrosion mechanisms and corrosion control. European Federation of Corrosion publications Nr 31. Editors J. Mietz & R. Polder & B. Elsener, 1999 London.
- 12 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.
- 13 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.

- 14 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.

**Bilaga 1(1)**

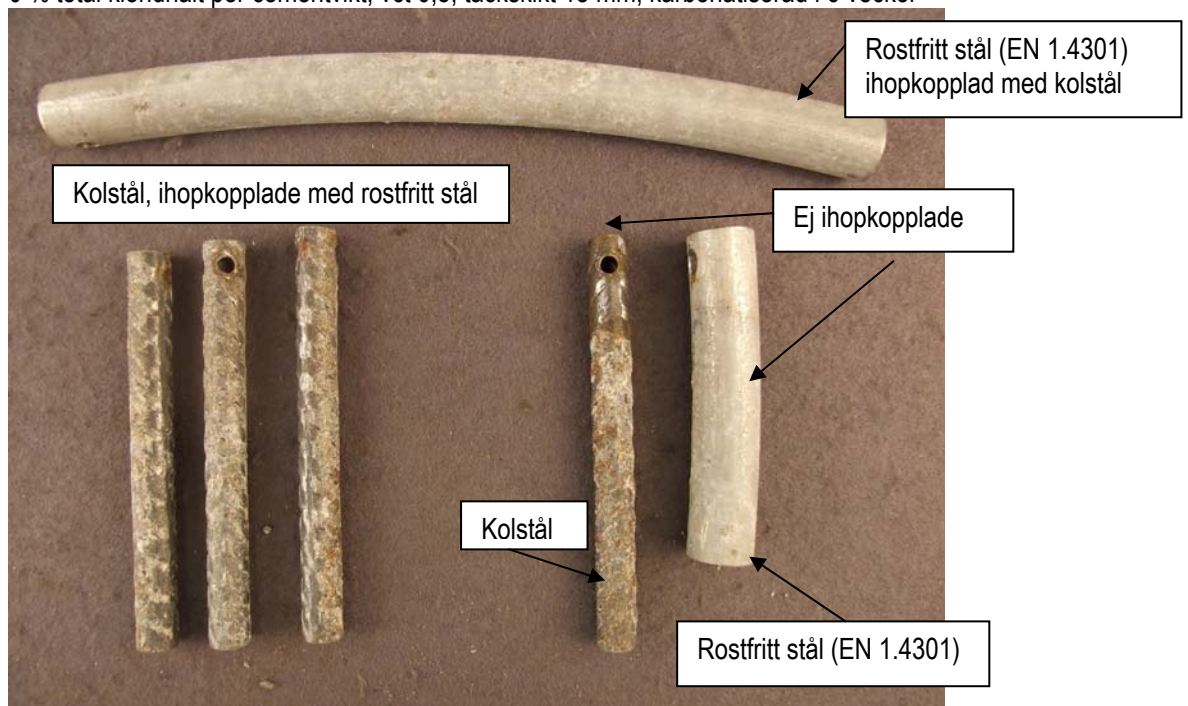
1år

0 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor



2 år

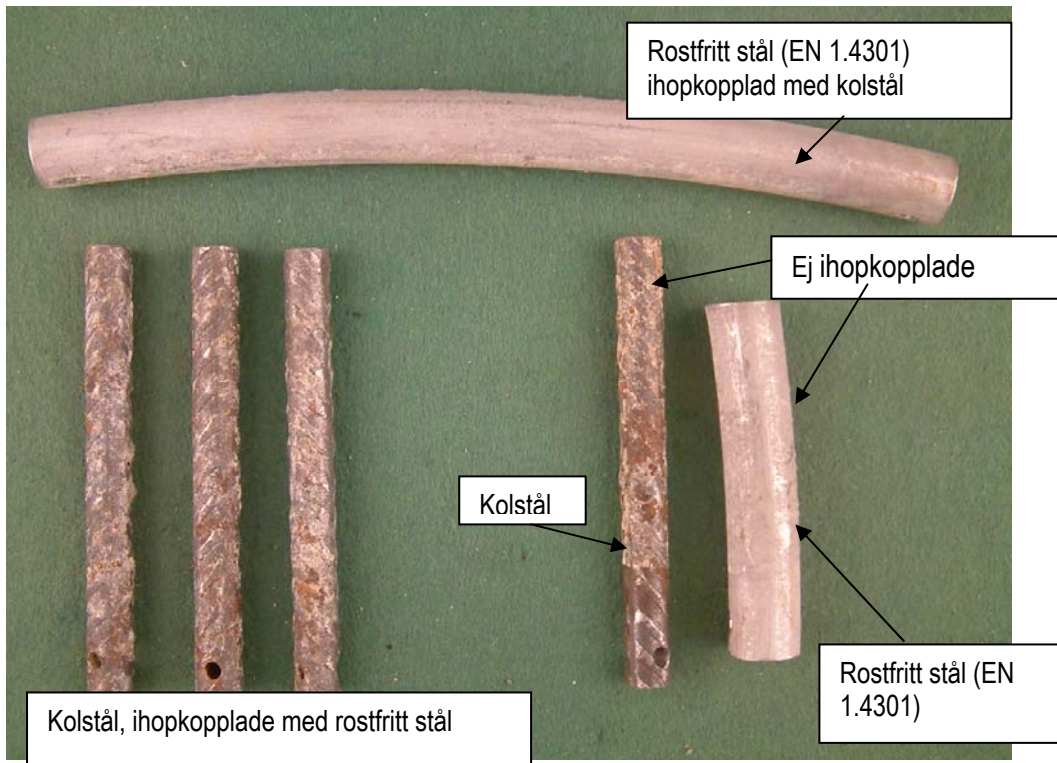
0 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor



1 år

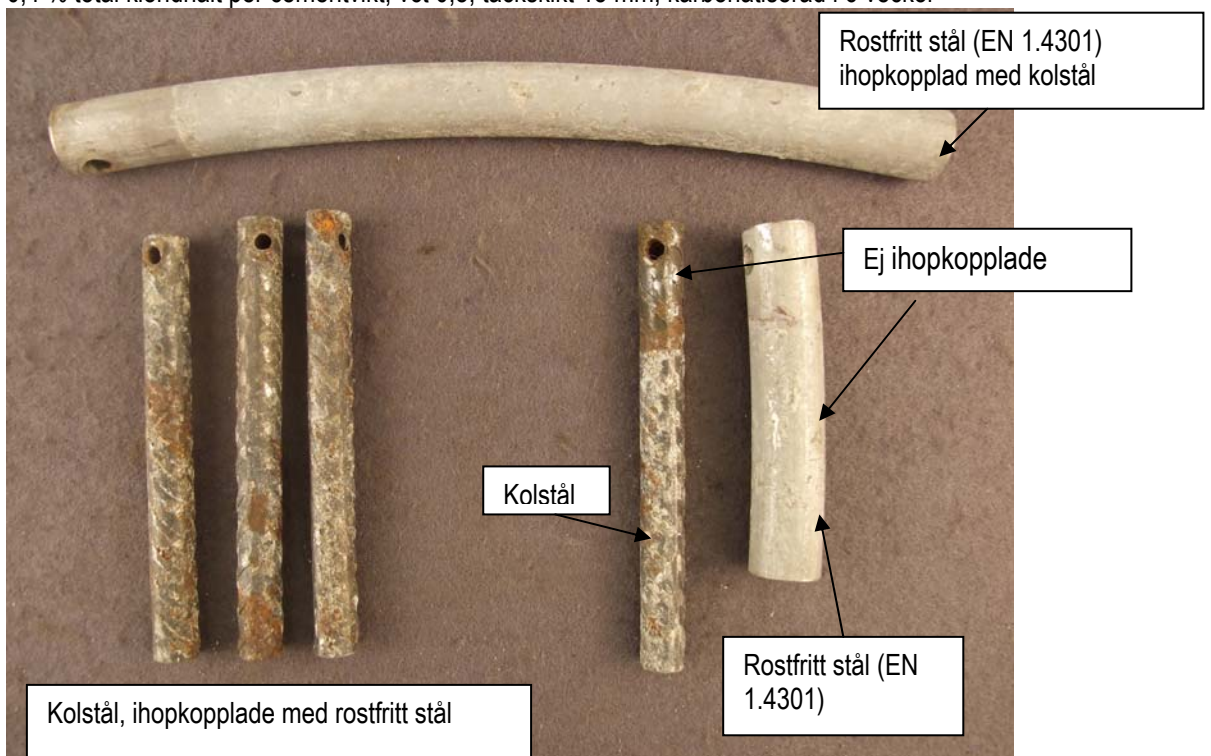
0,4 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor

**Bilaga 1(2)**



2 år

0,4 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor

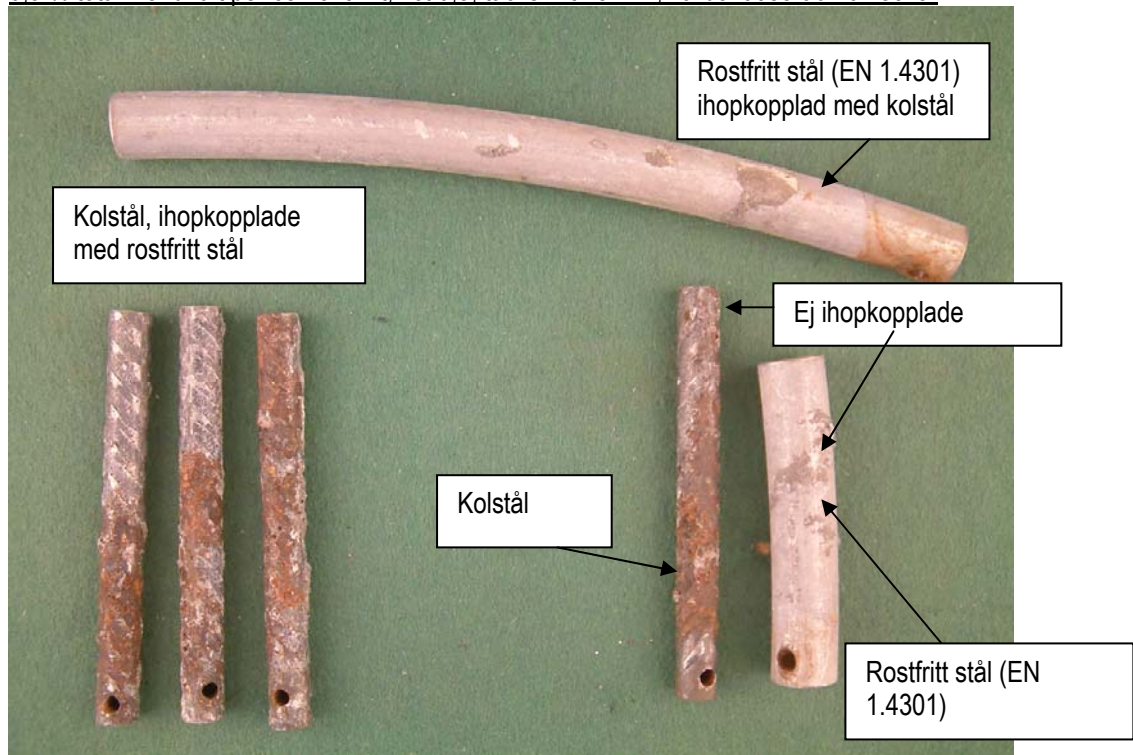


**Bilaga 1(3)**

1 år

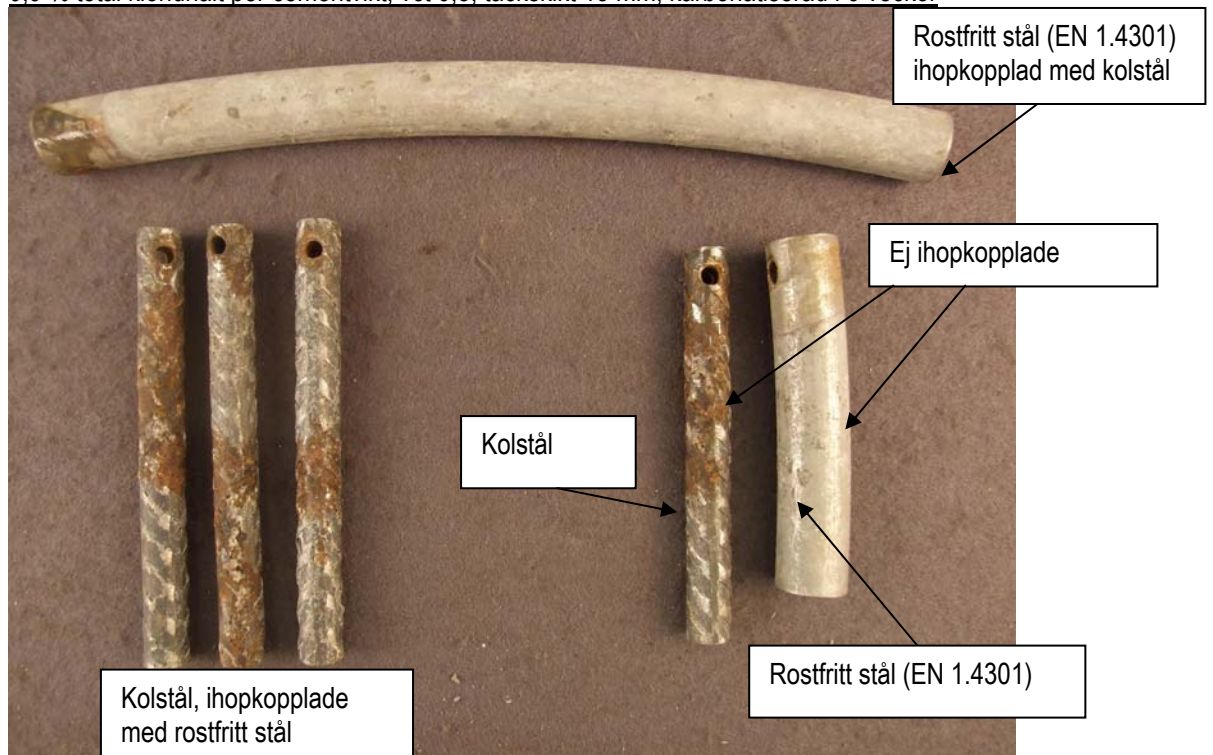


0,9 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor



2 år

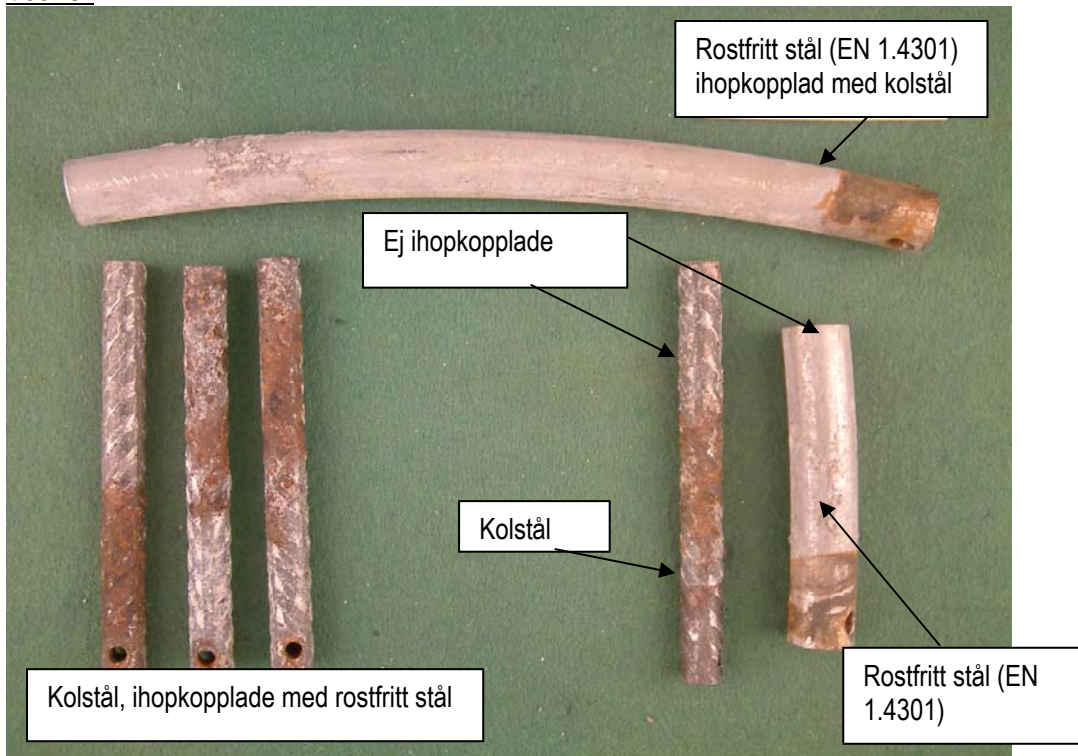
0,9 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor



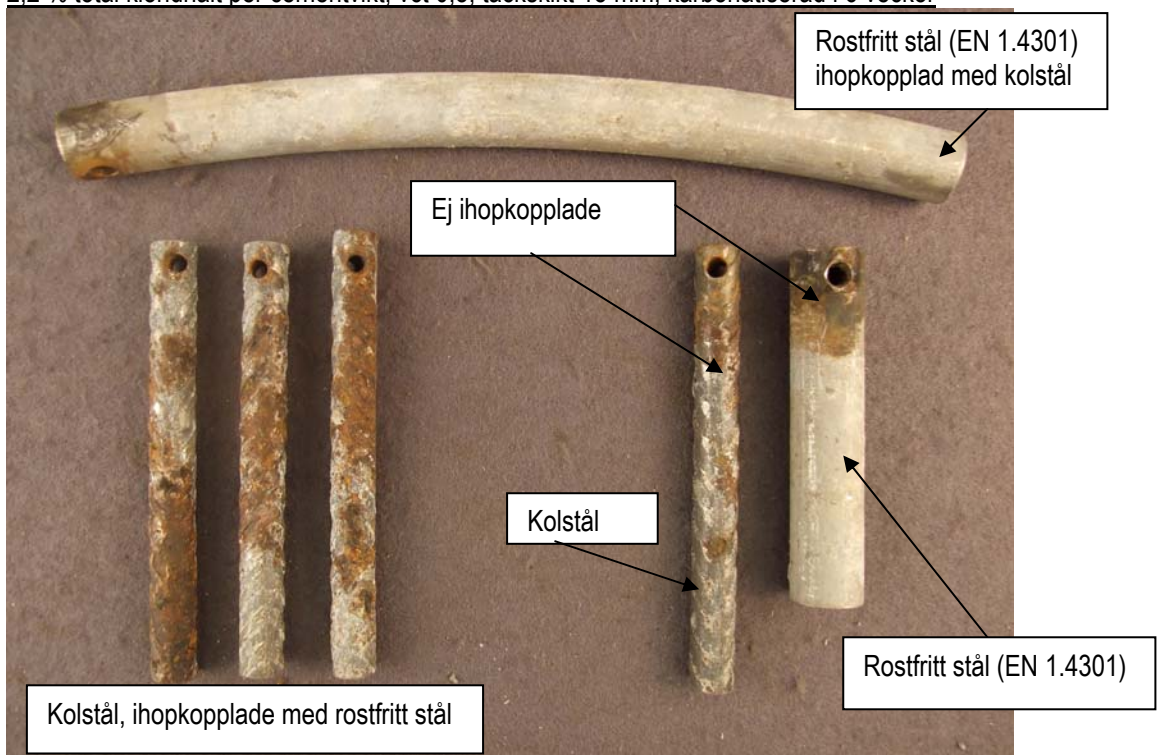
1 år

**Bilaga 1(4)**

1,8 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor



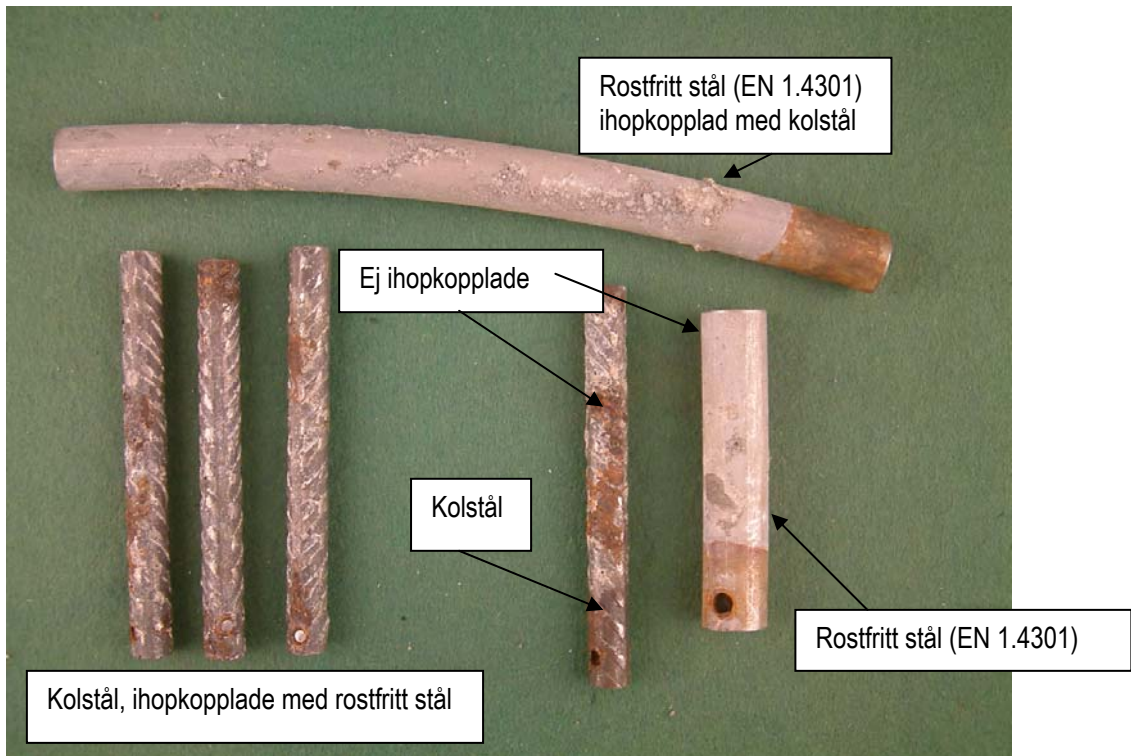
2 år  
2,2 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor



1 år  
2,7 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor

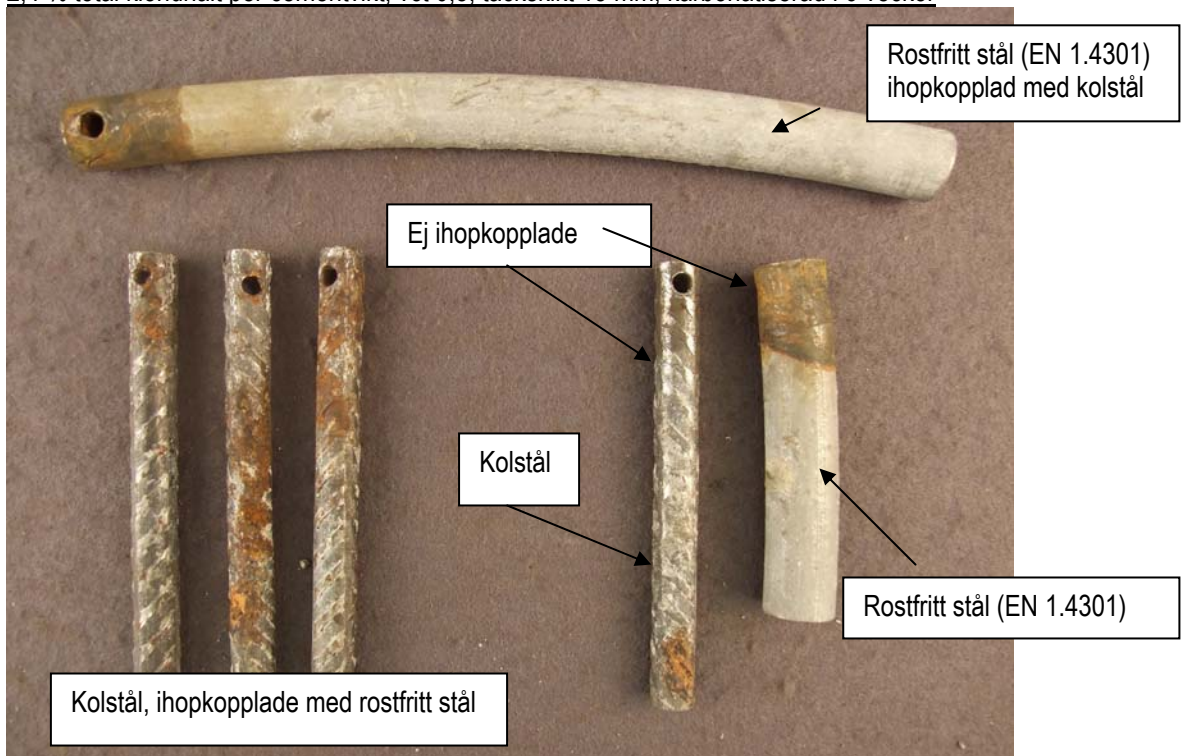
**Bilaga 1(5)**





2 år

2,4 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor

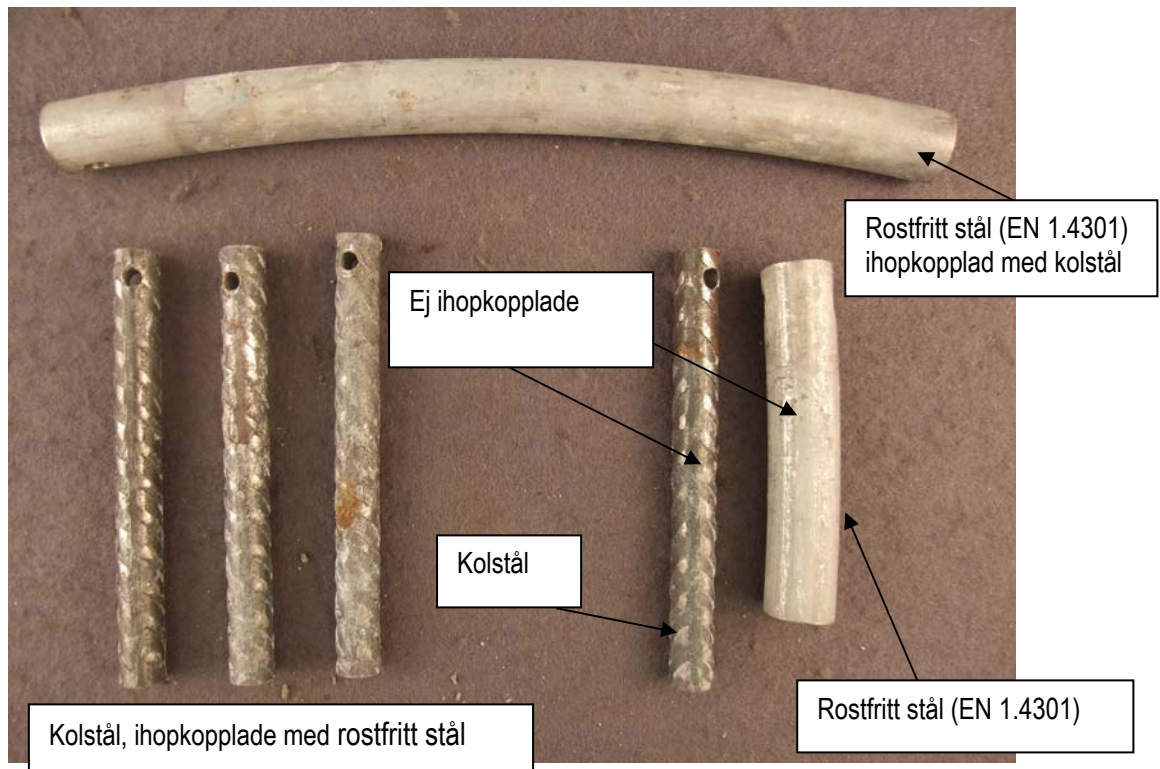
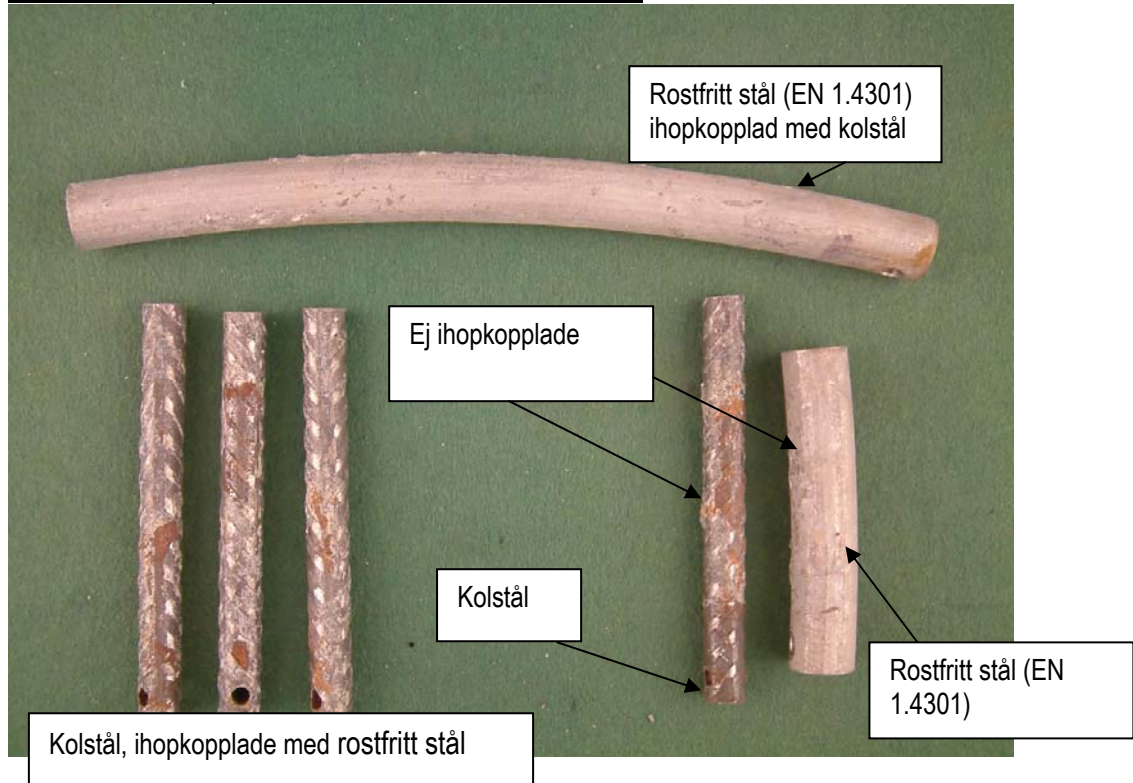


1 år

**Bilaga 1(6)**



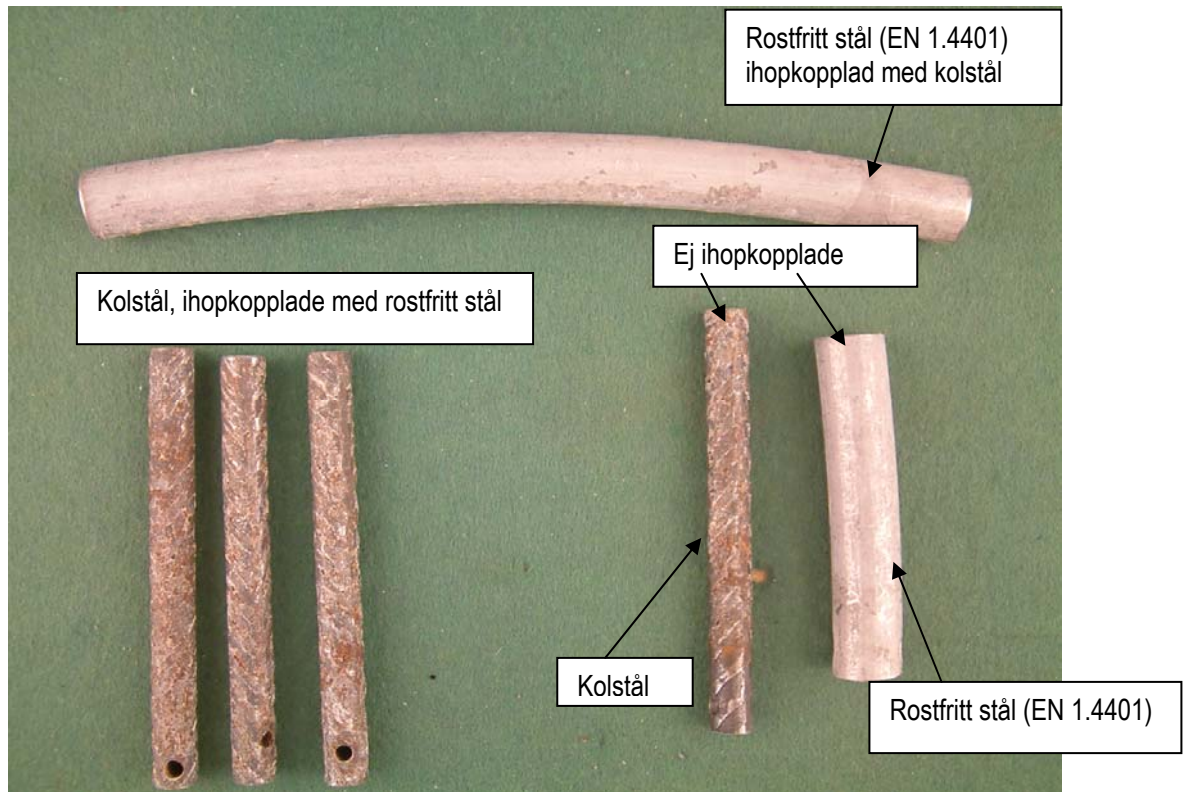
0 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,38 täcksikt 50 mm



### Bilaga 1(7)

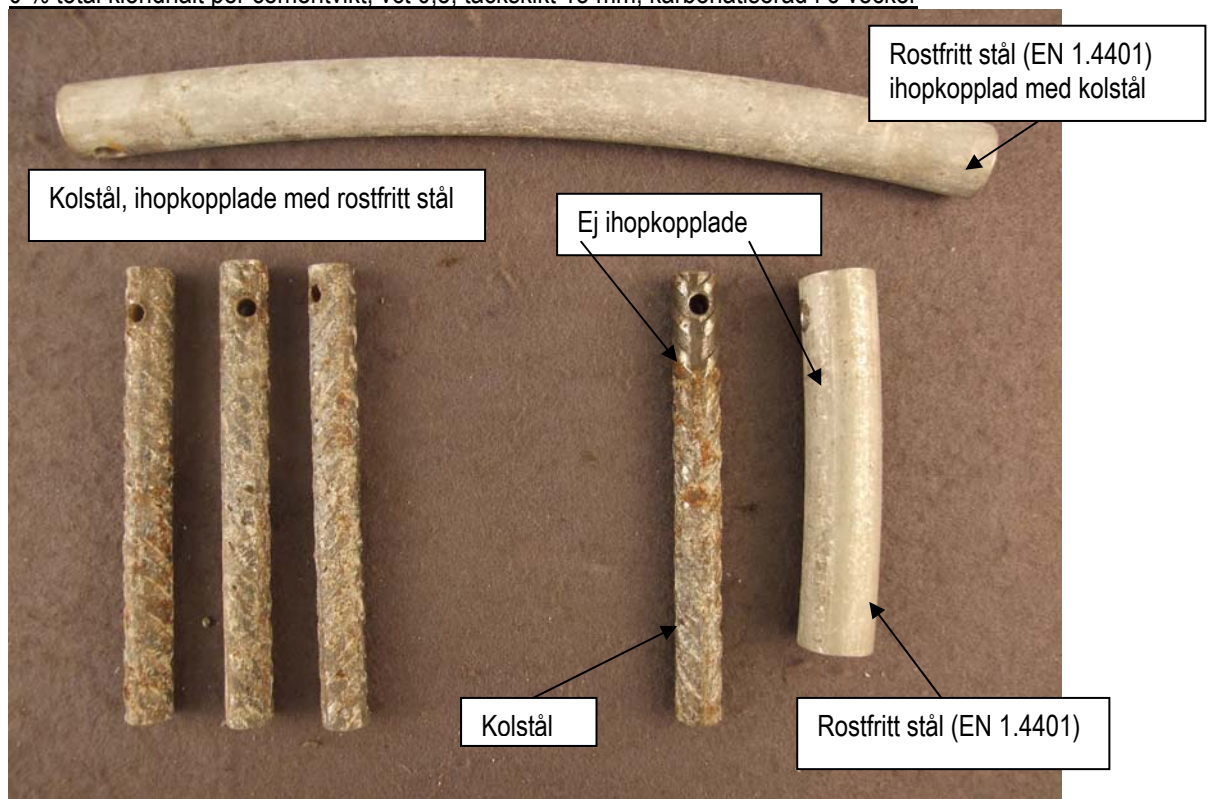
1 år

0 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor



2 år

0 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor

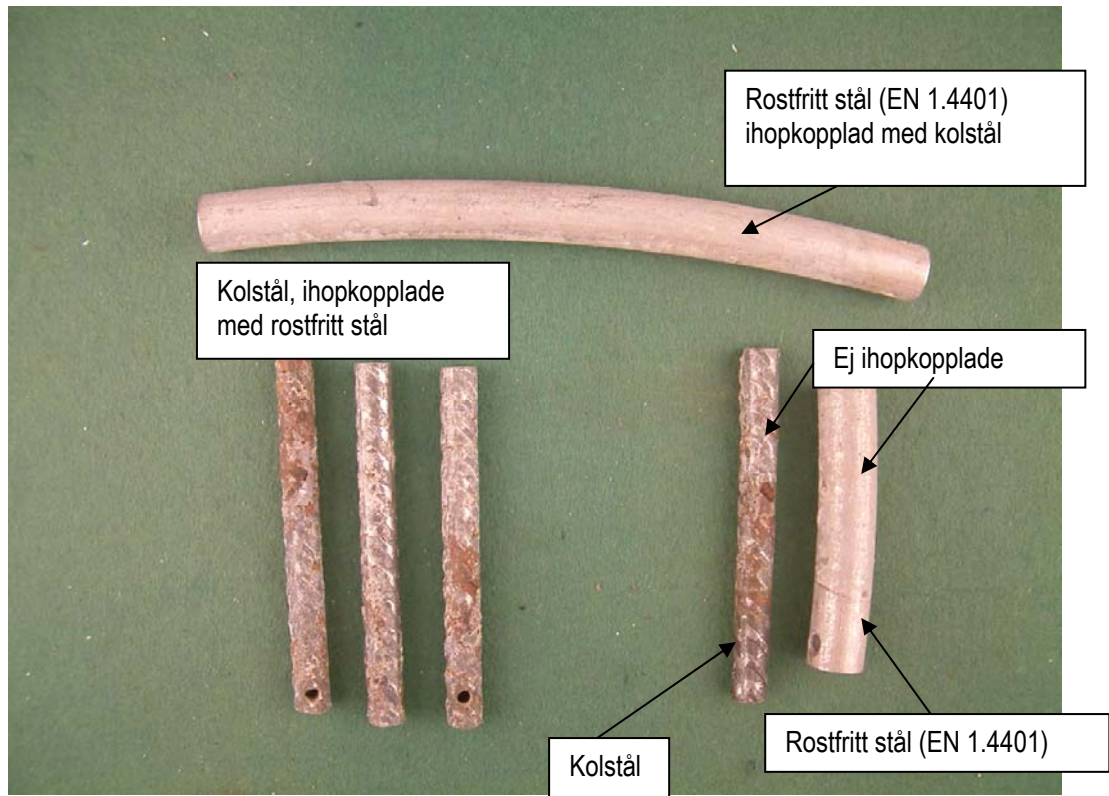


1 år

0,4 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor

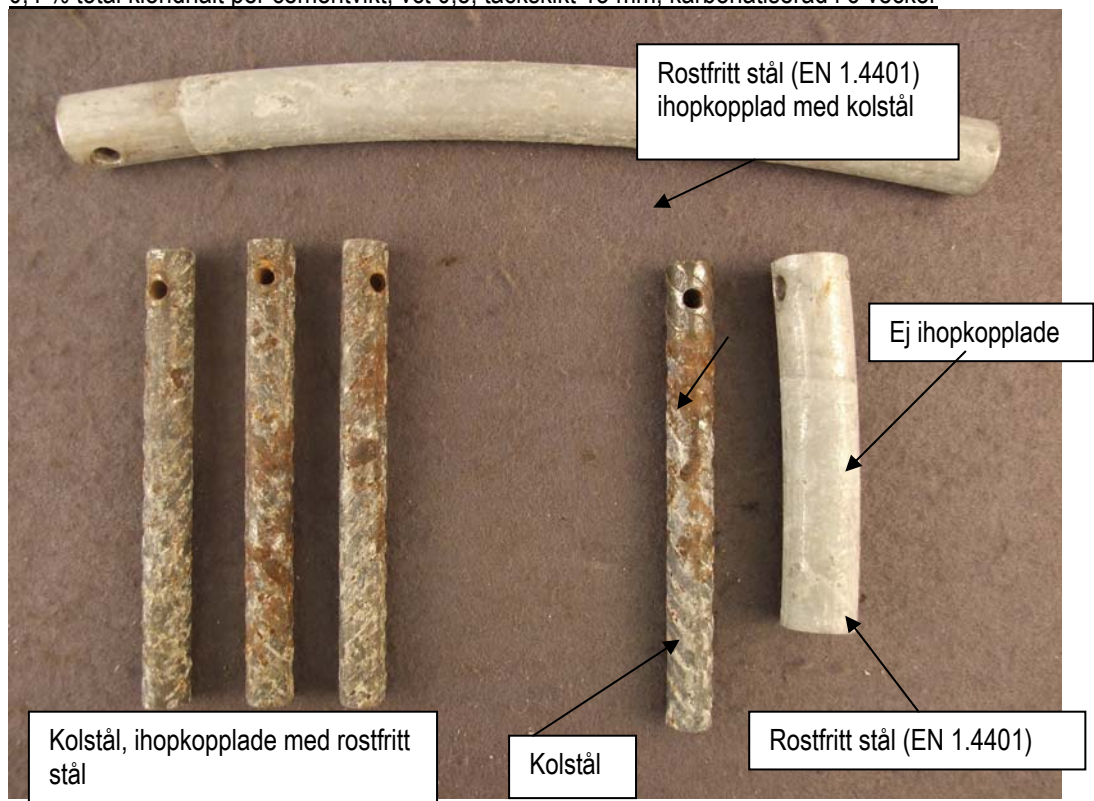
**Bilaga 1(8)**





2 år

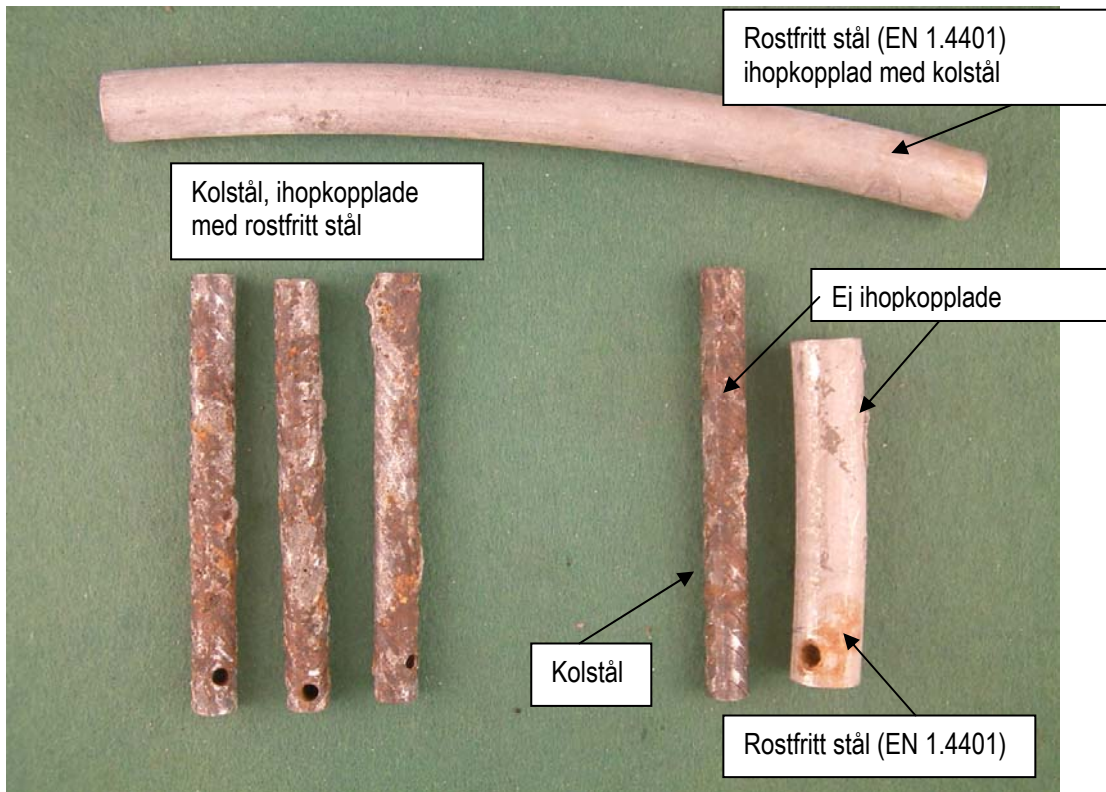
0,4 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor



1 år

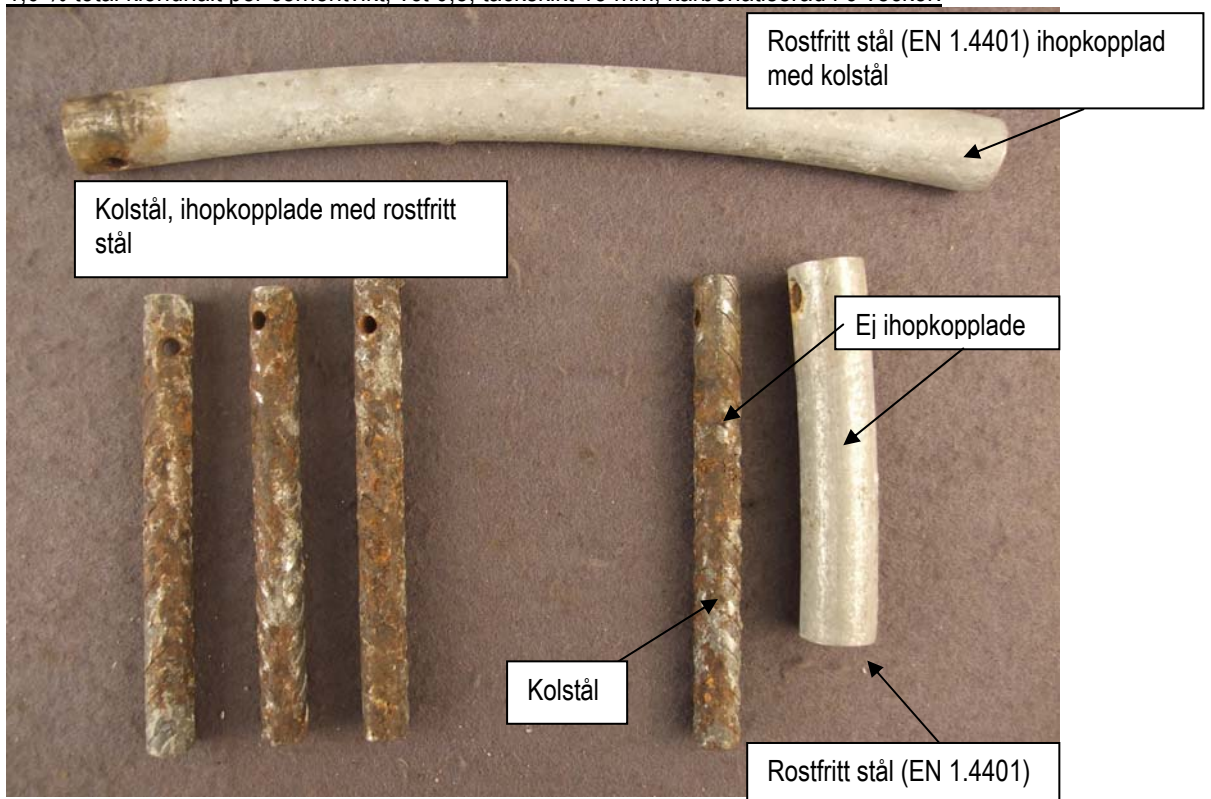
1,0 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor.

**Bilaga 1(9)**



2år

1,0 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor.

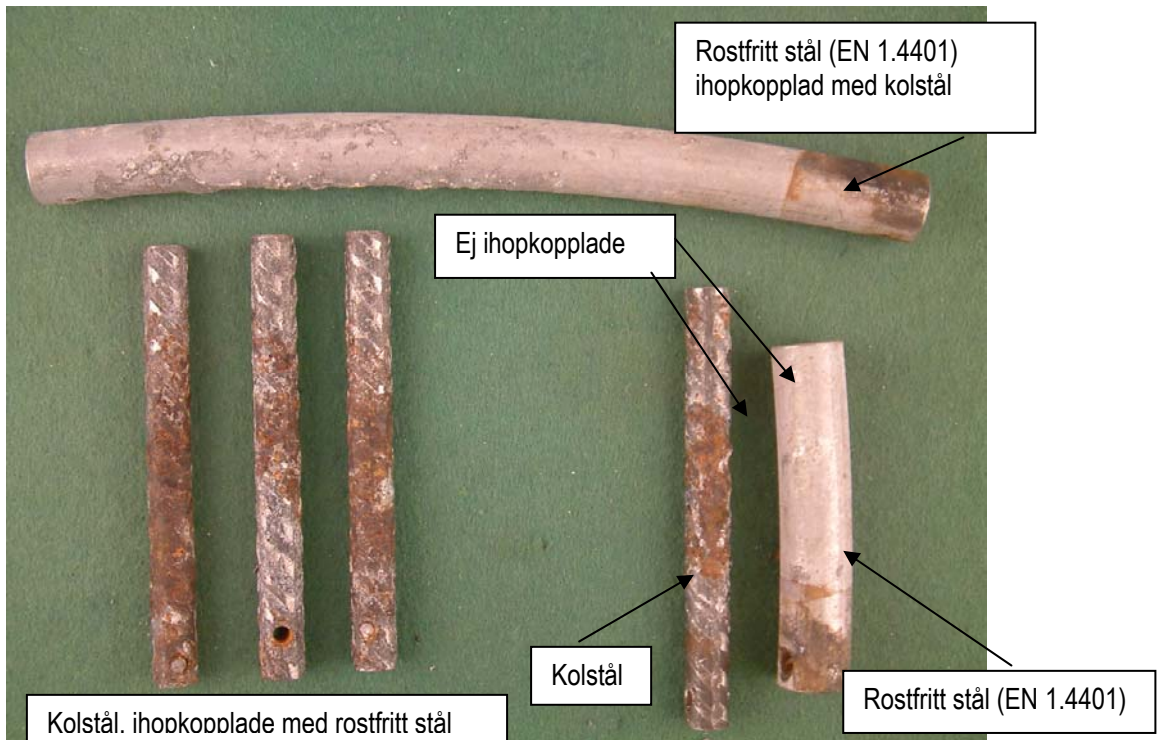


**Bilaga 1(10)**

1år

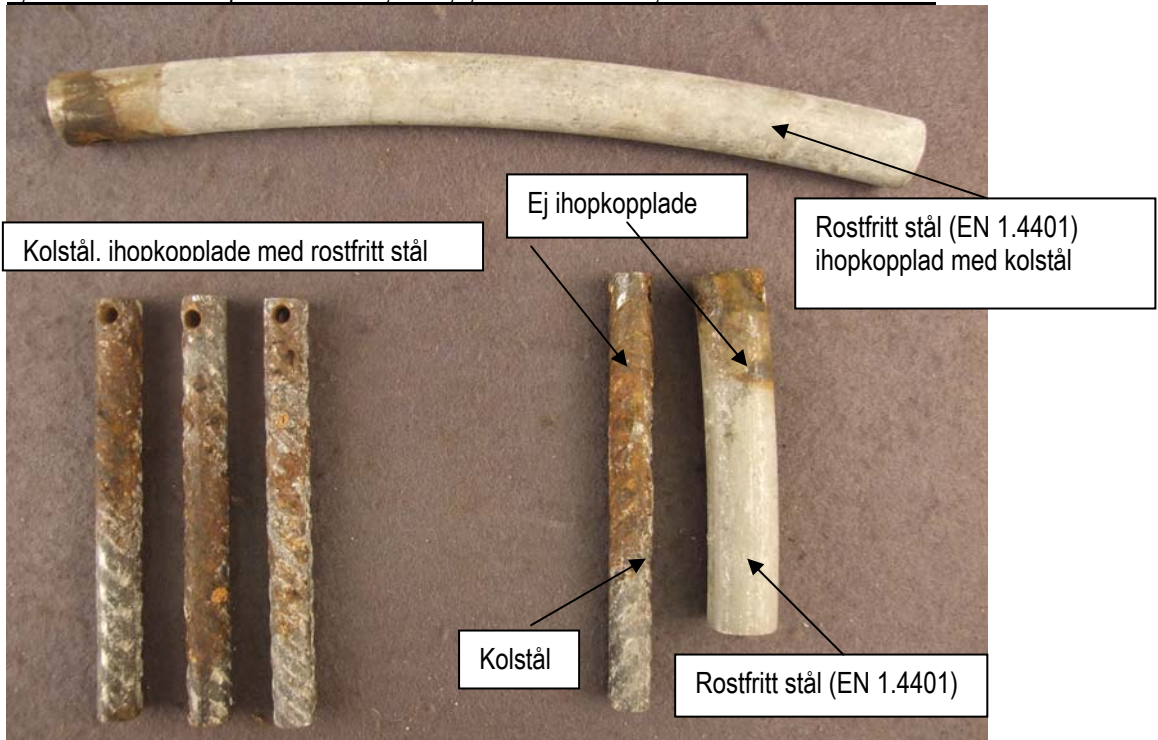
1,8 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor





2 år

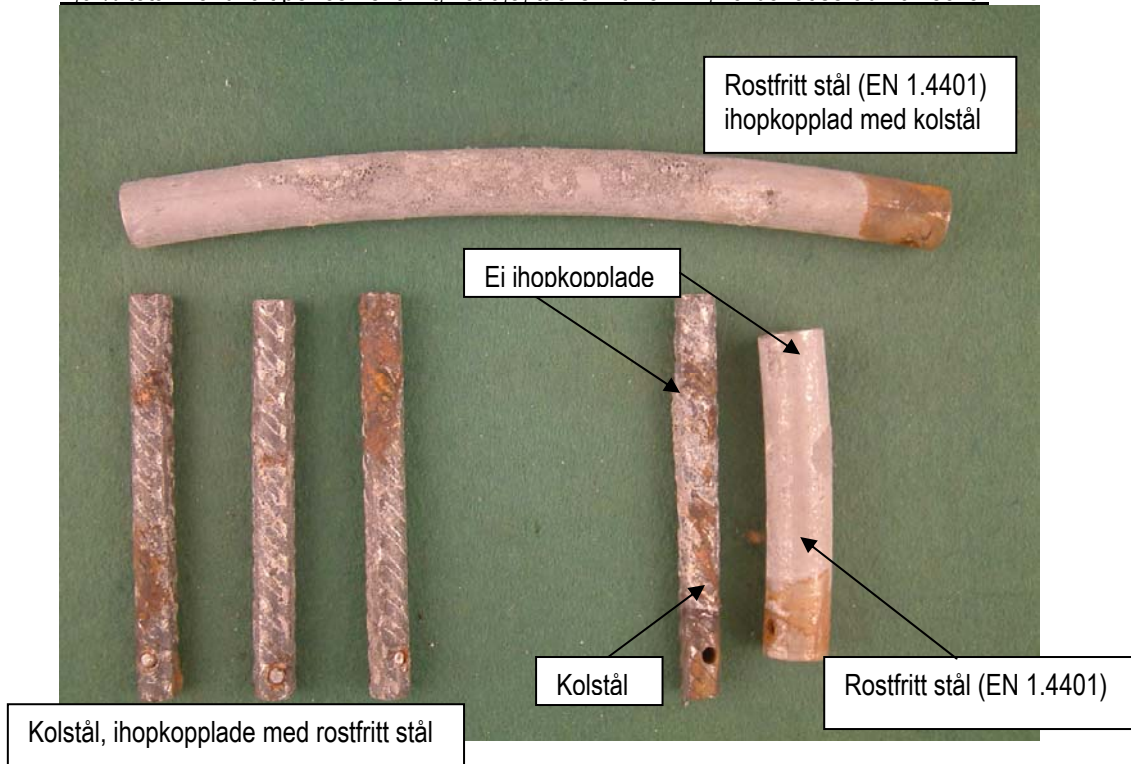
2,2 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor



1 år

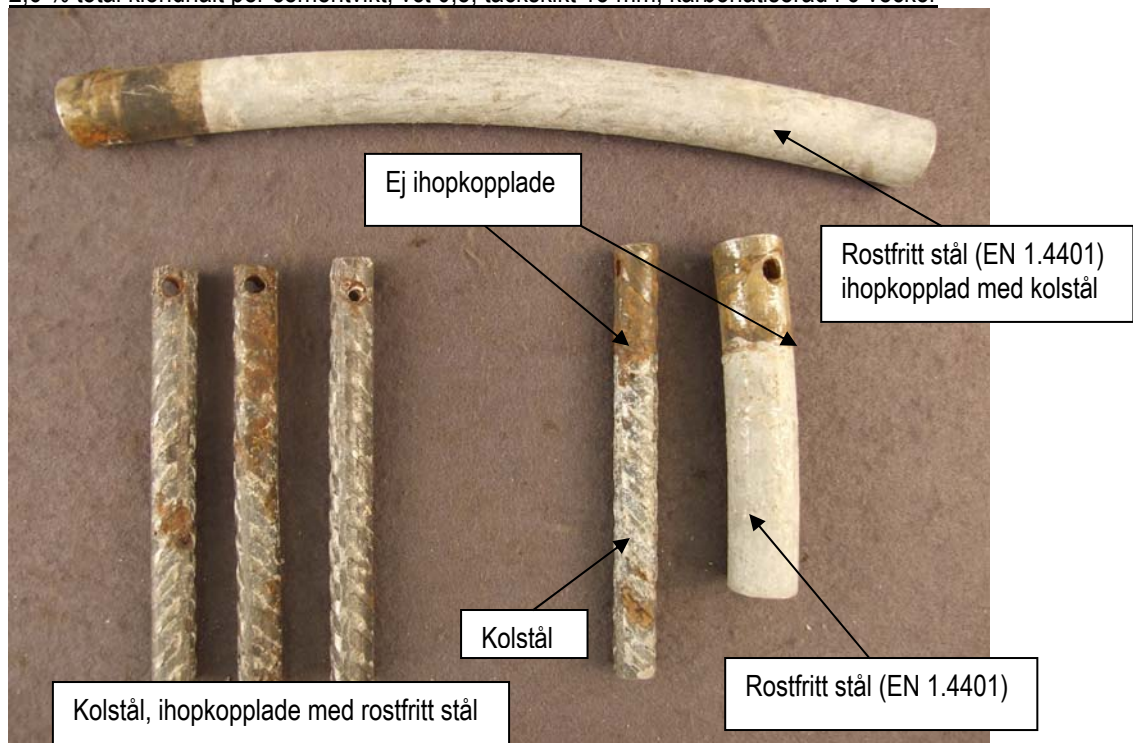
**Bilaga 1(11)**

2,6 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor



2 år

2,6 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor

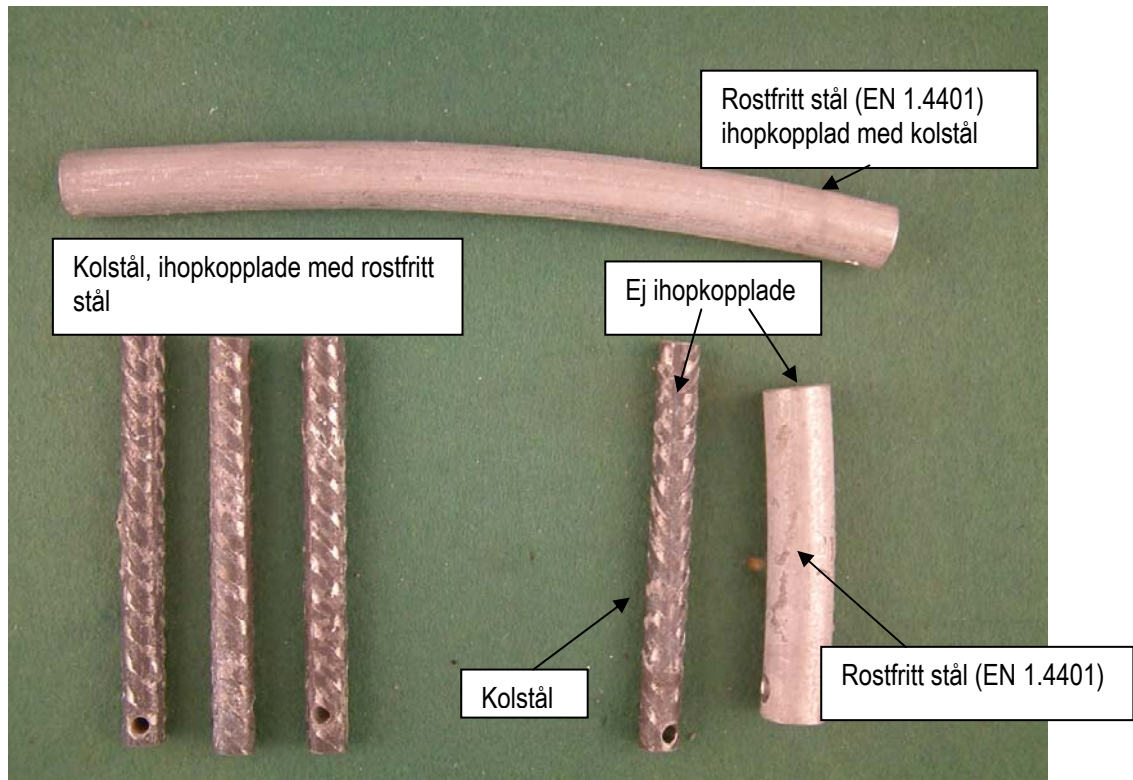


1 år

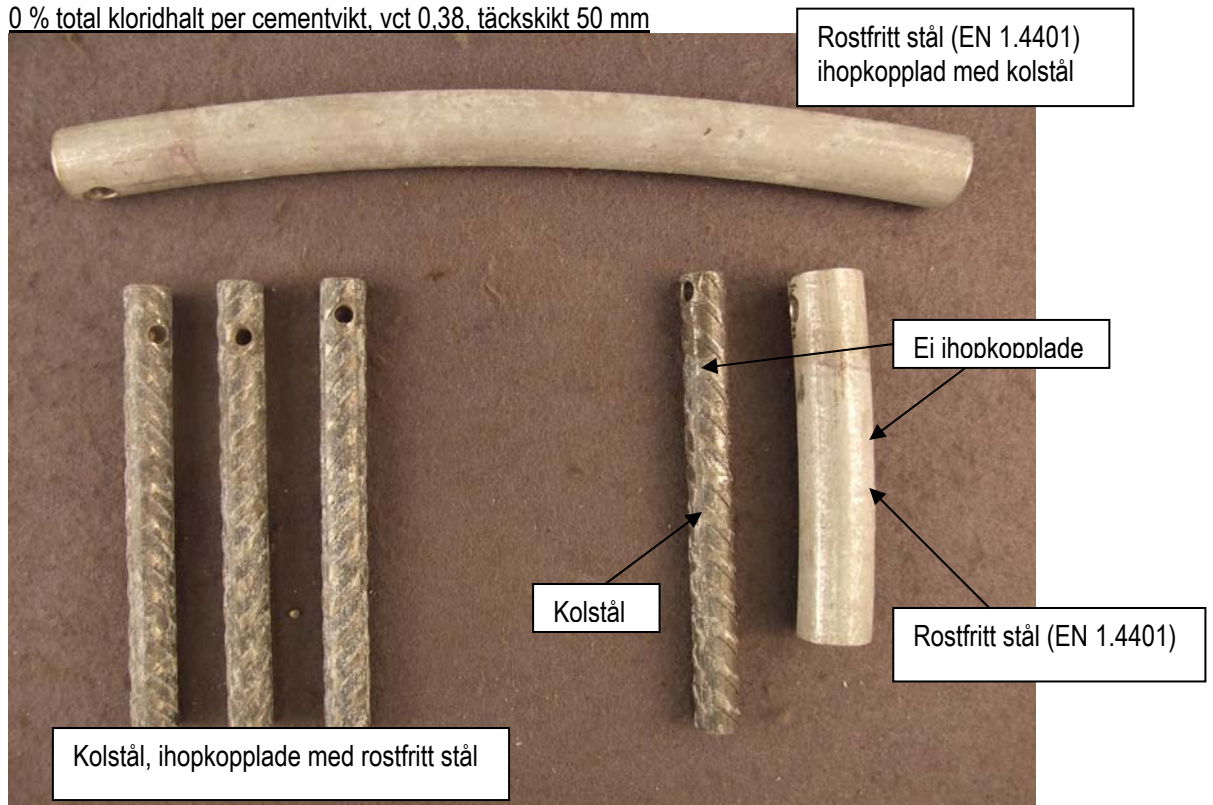
0 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,38, täcksikt 50 mm

**Bilaga 1(12)**



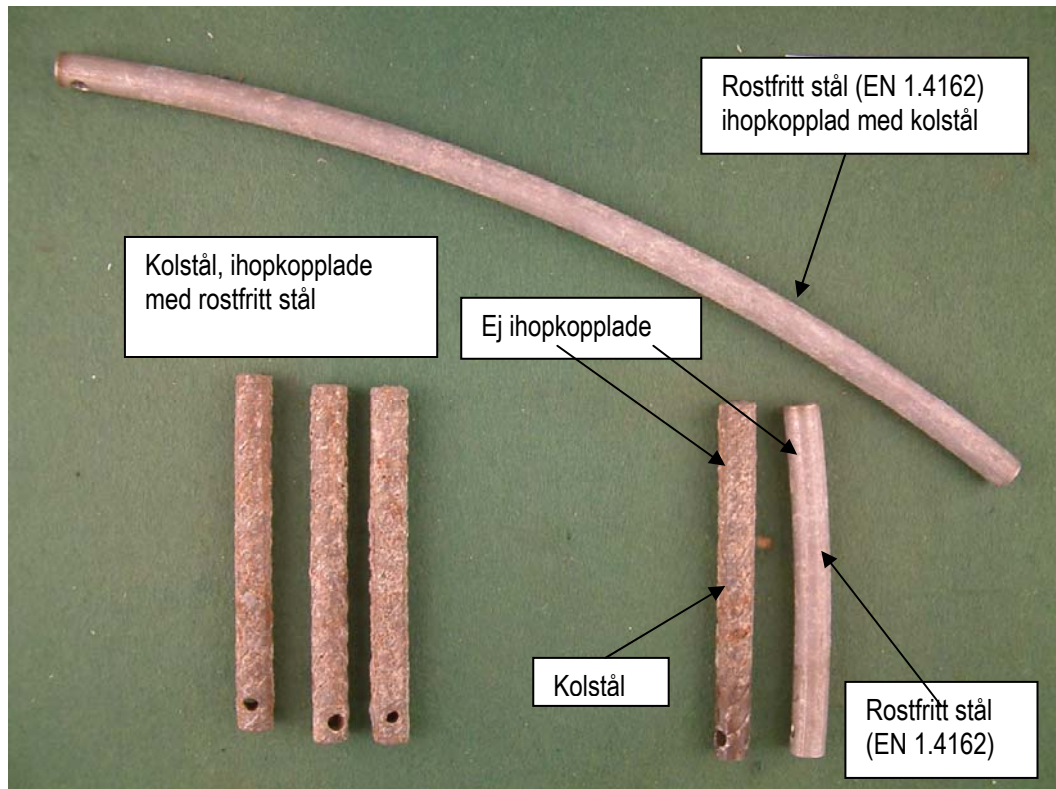


2 år  
0 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,38, täcksikt 50 mm



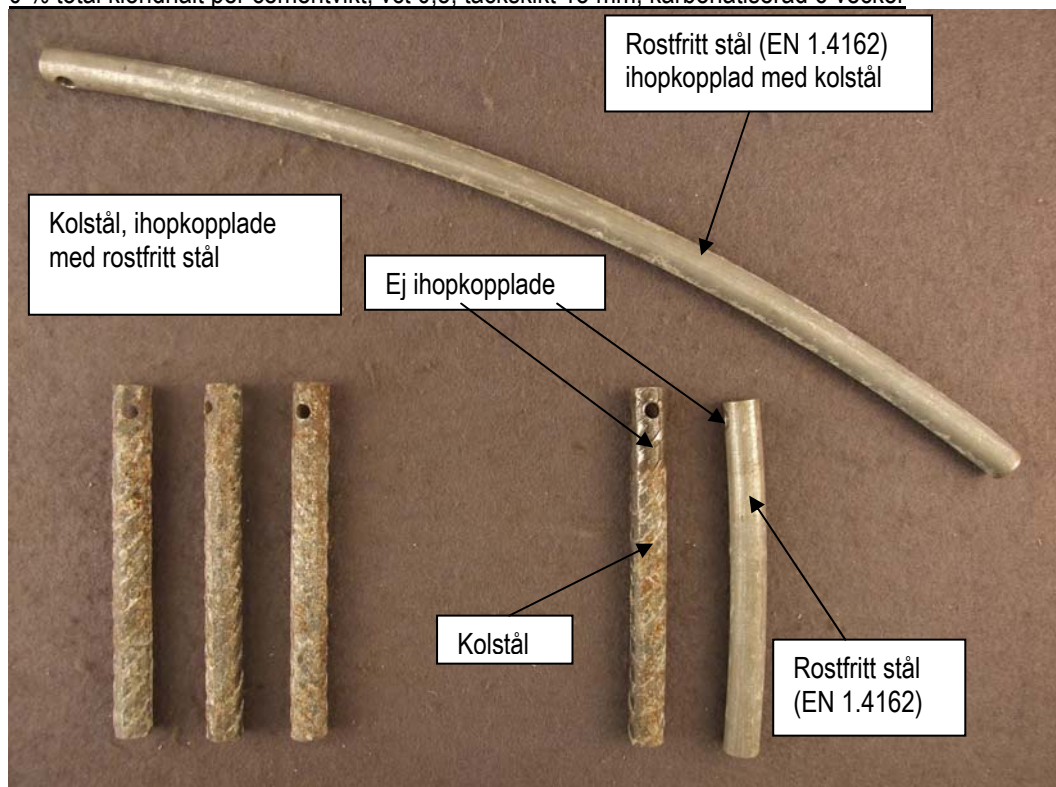
1 år  
0 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad 6 veckor

**Bilaga 1(13)**



2 år

0 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad 6 veckor

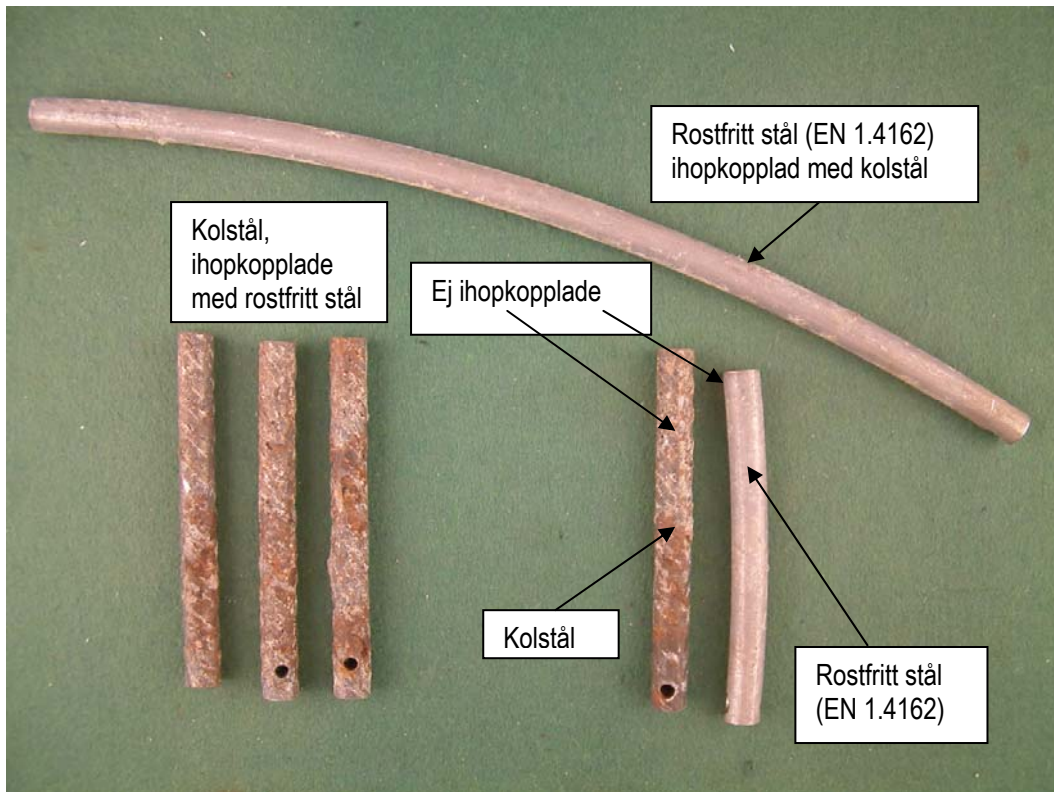


1 år

0,4 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor

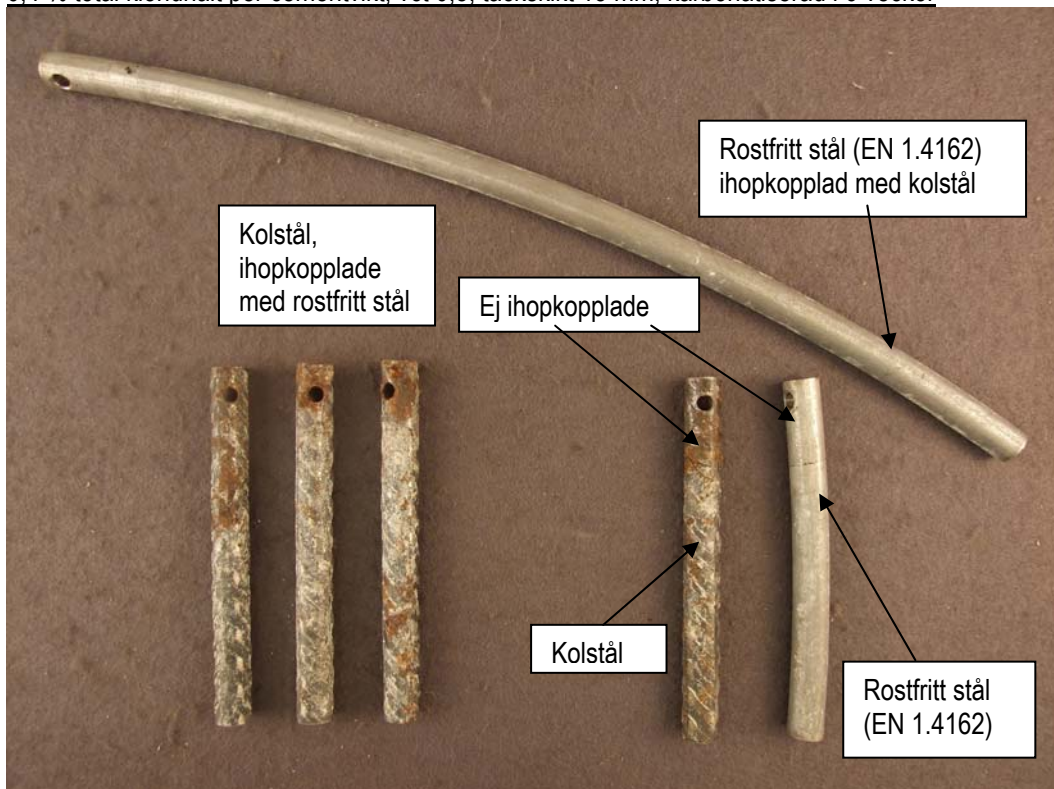
**Bilaga 1(14)**





2 år

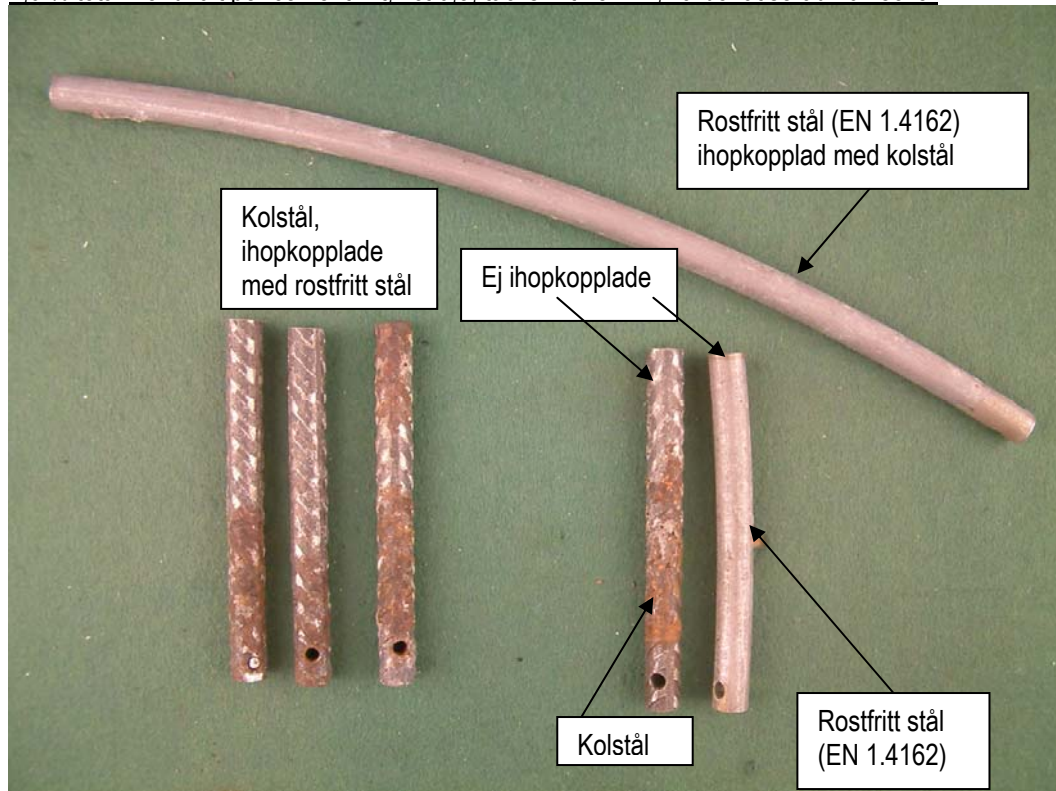
0,4 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor



1 år

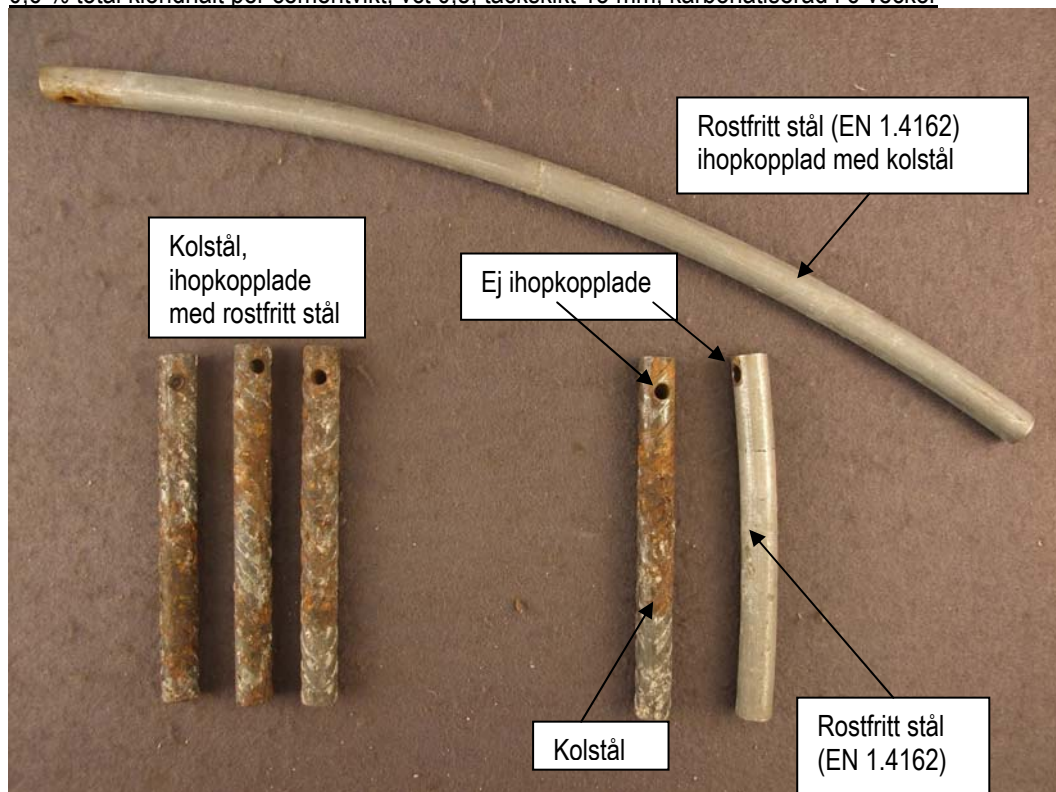
**Bilaga 1(15)**

1.0 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0.5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor



2 år

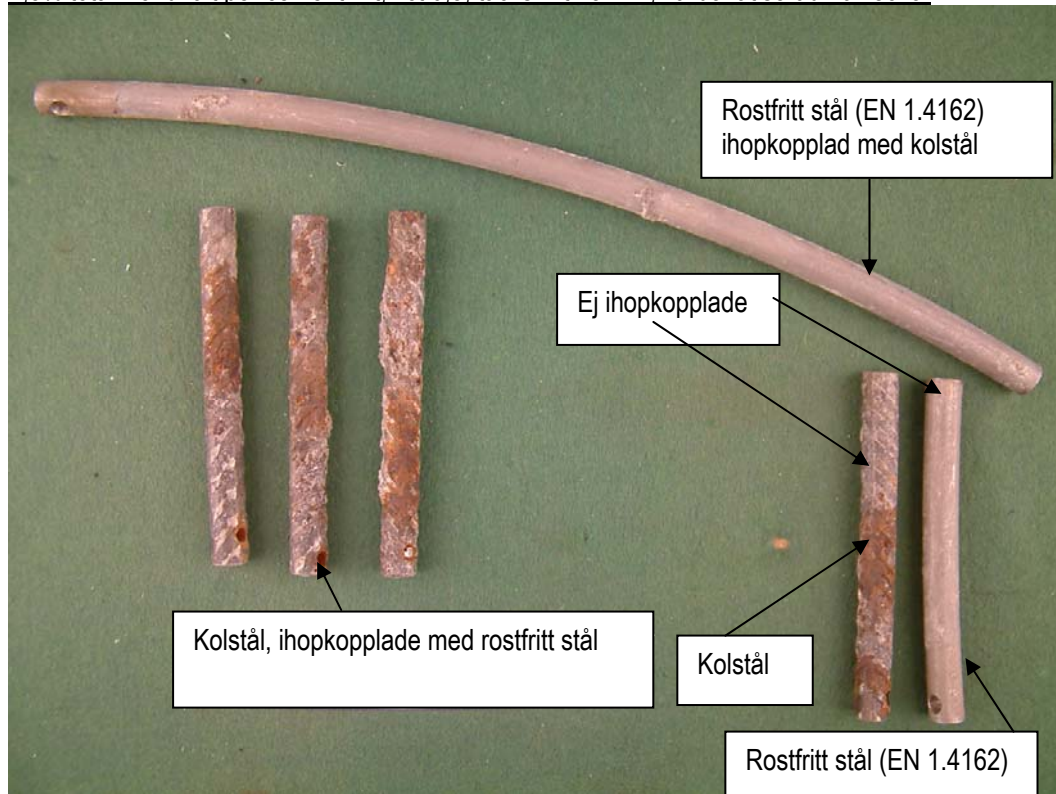
0.6 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0.5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor



1 år

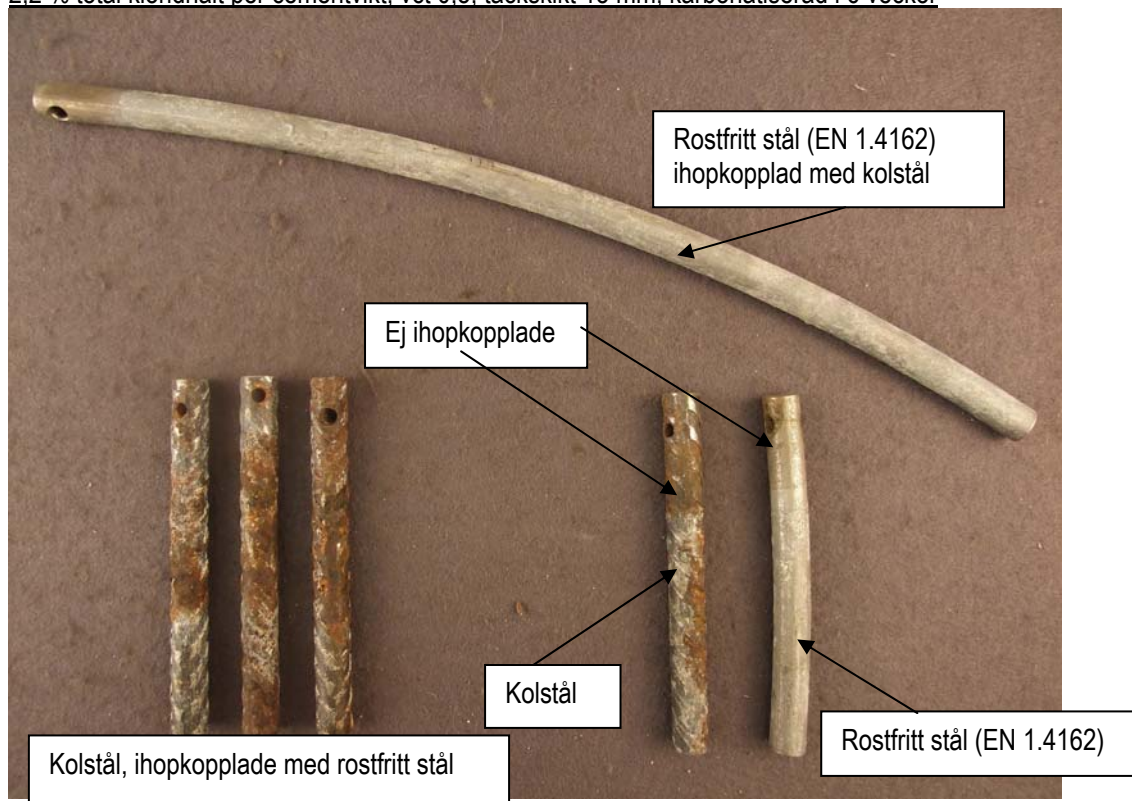


1,8% total kloridhalt per cementvikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor



2 år

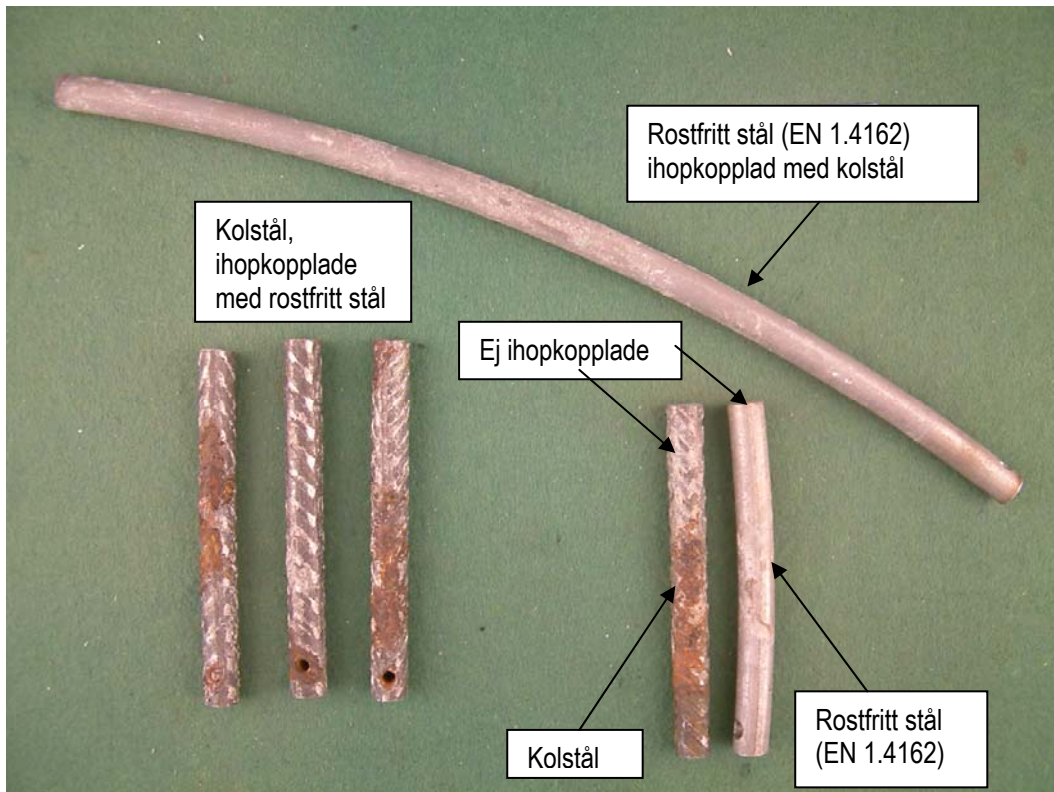
2,2 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor



**Bilaga 1(17)**

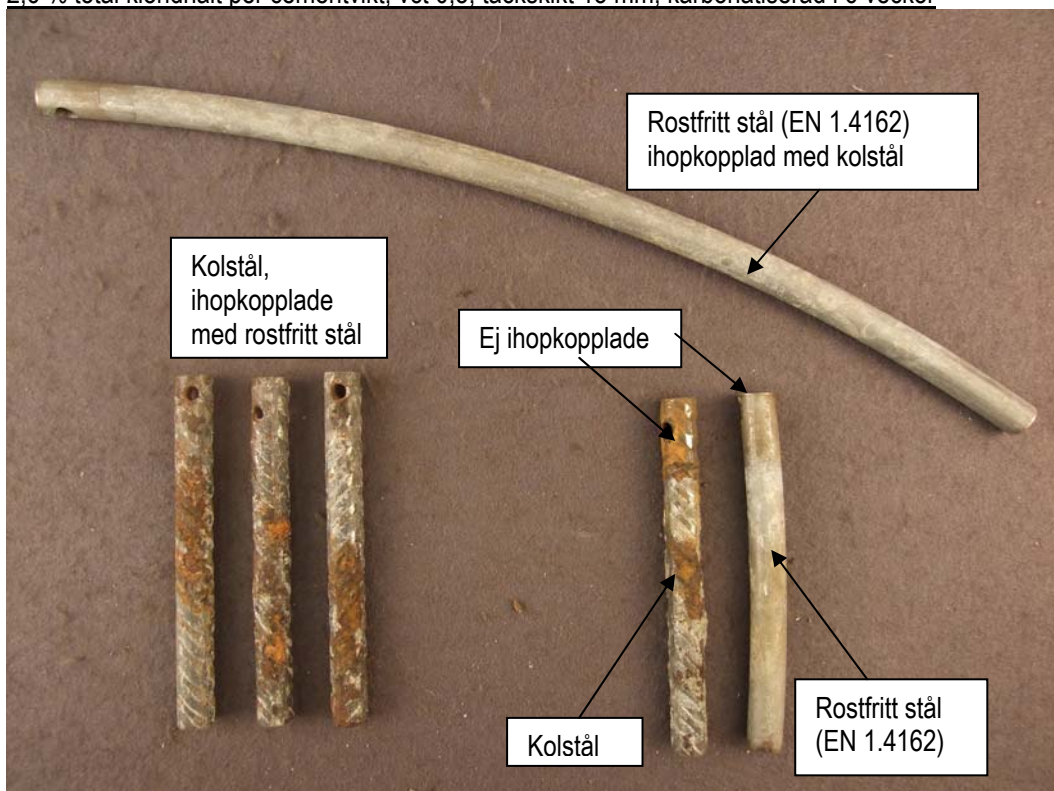
1 år

2,3 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor



2 år

2,6 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor

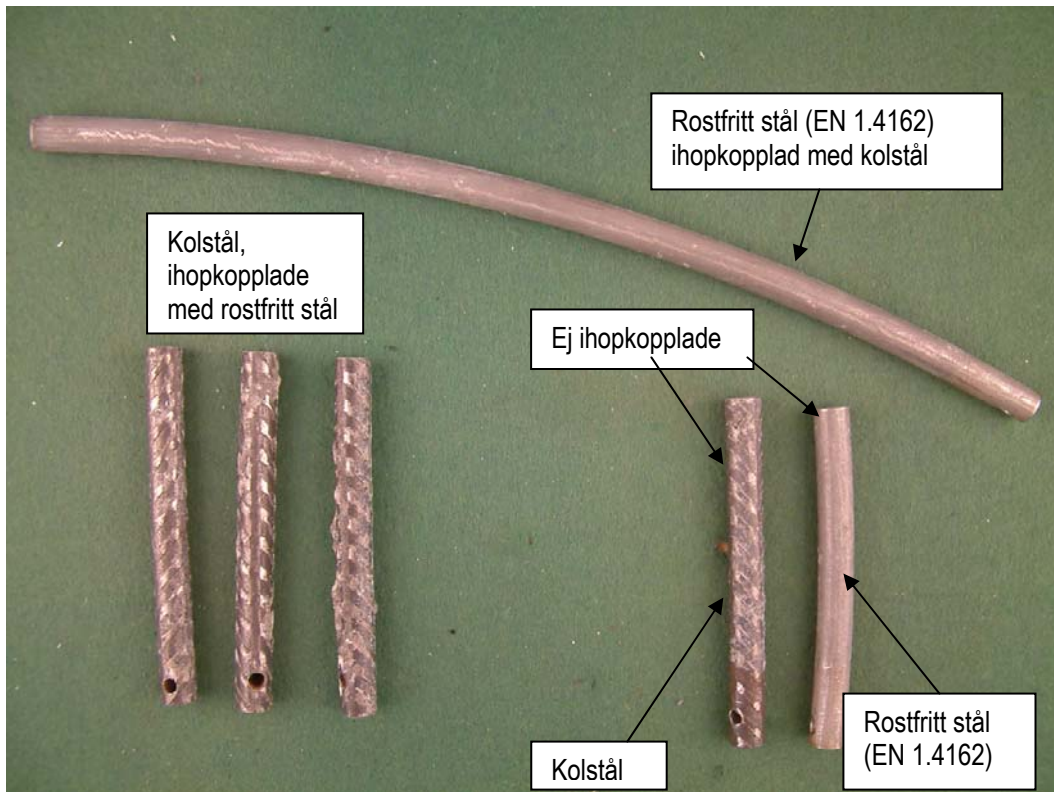


1 år

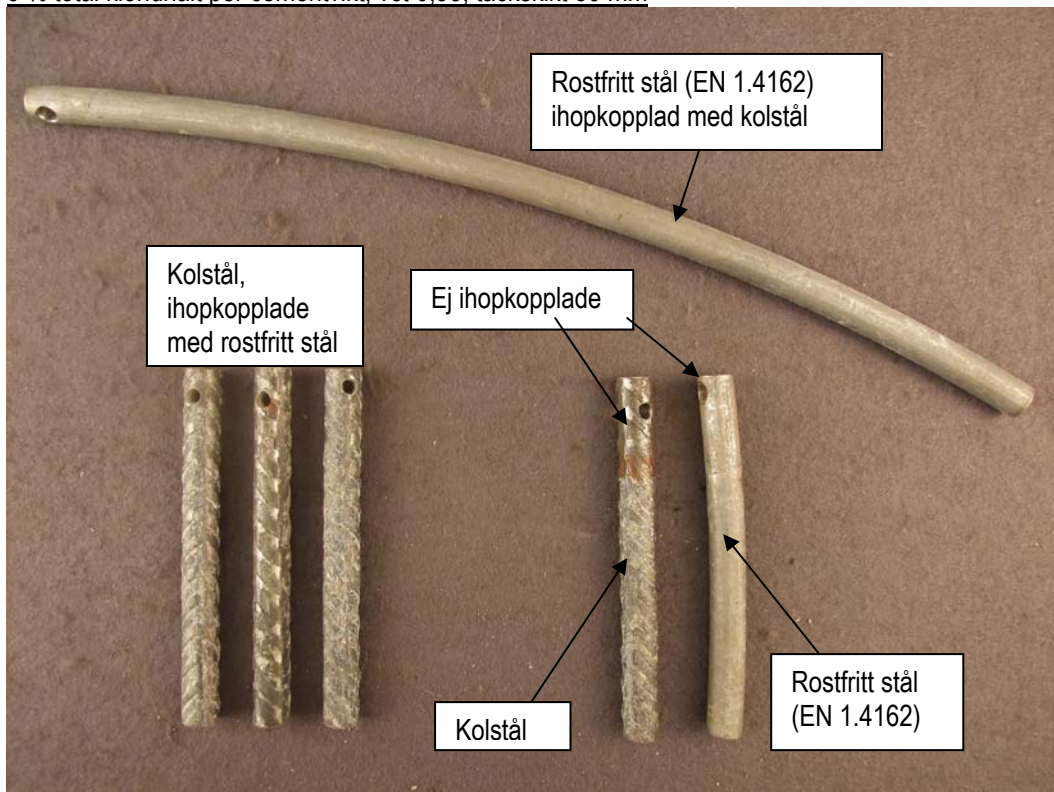
0 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,38, täcksikt 50 mm

**Bilaga 1(18)**



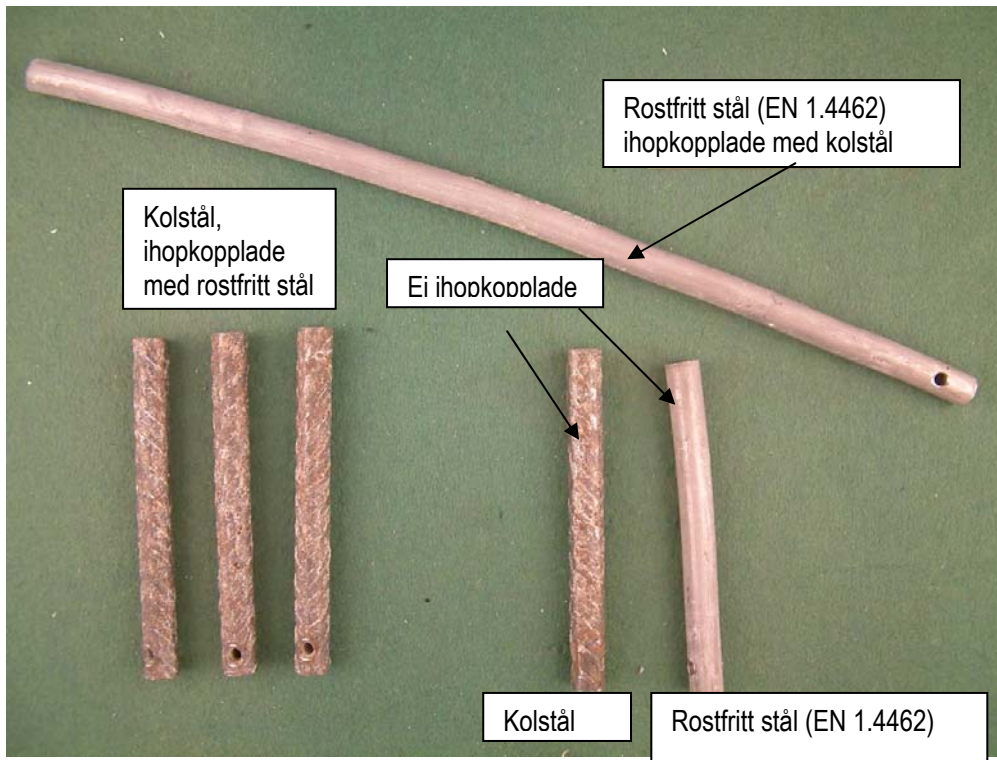


2 år  
0 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,38, täcksikt 50 mm



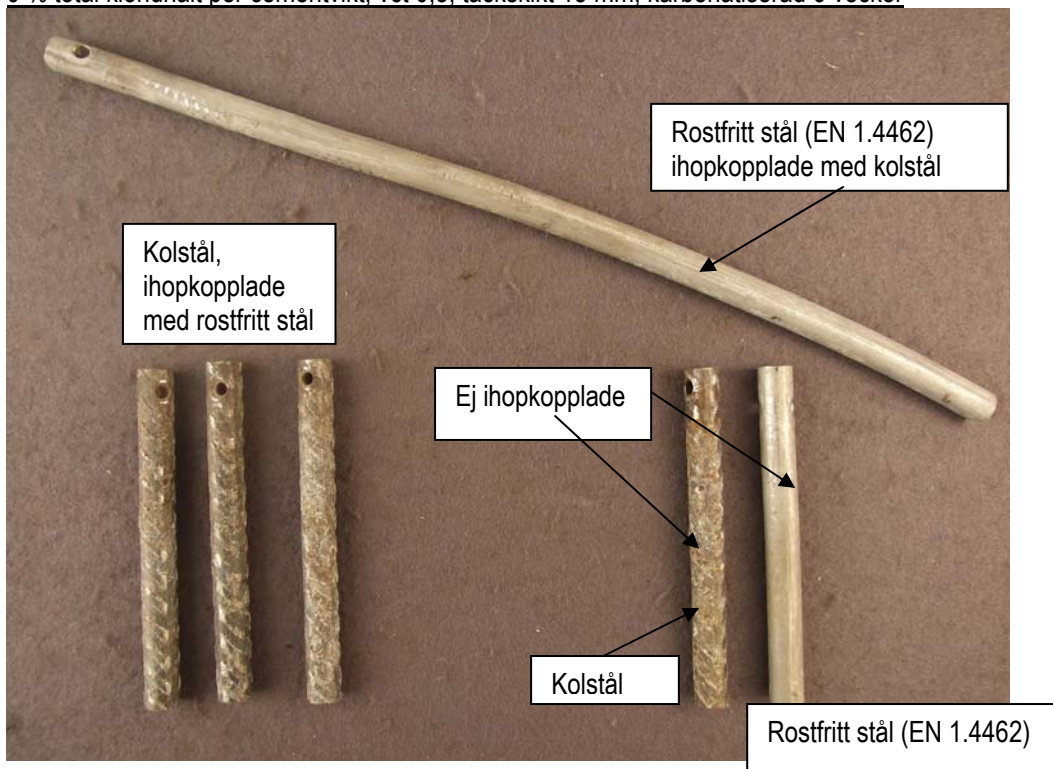
1 år  
0 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad 6 veckor

**Bilaga 1(19)**



2 år

0 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad 6 veckor

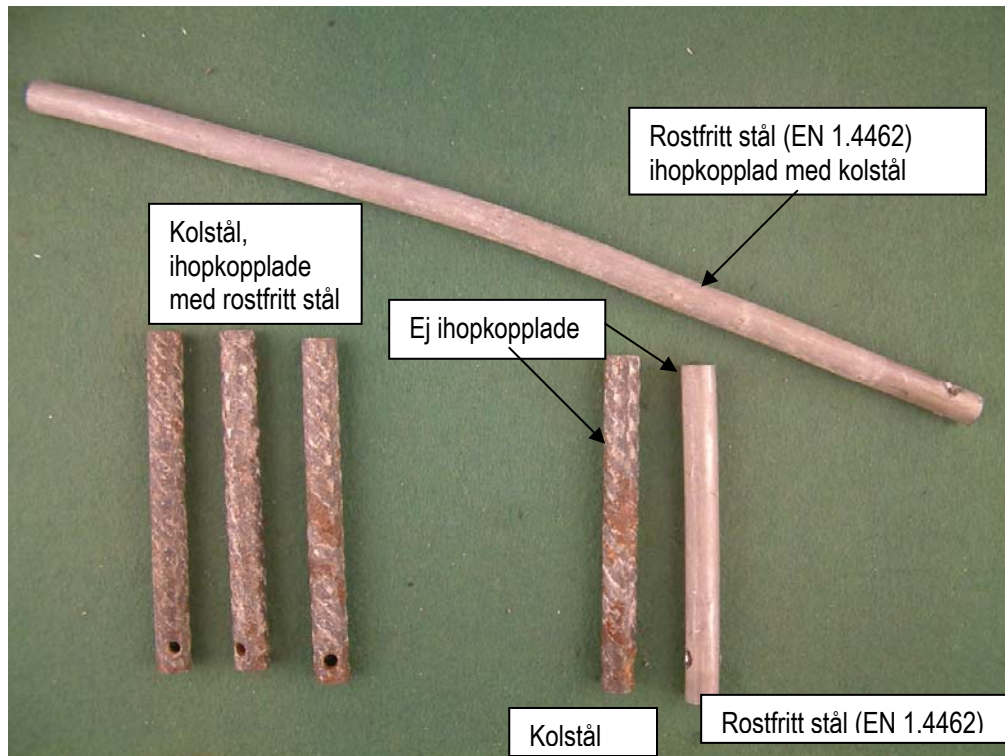


1 år

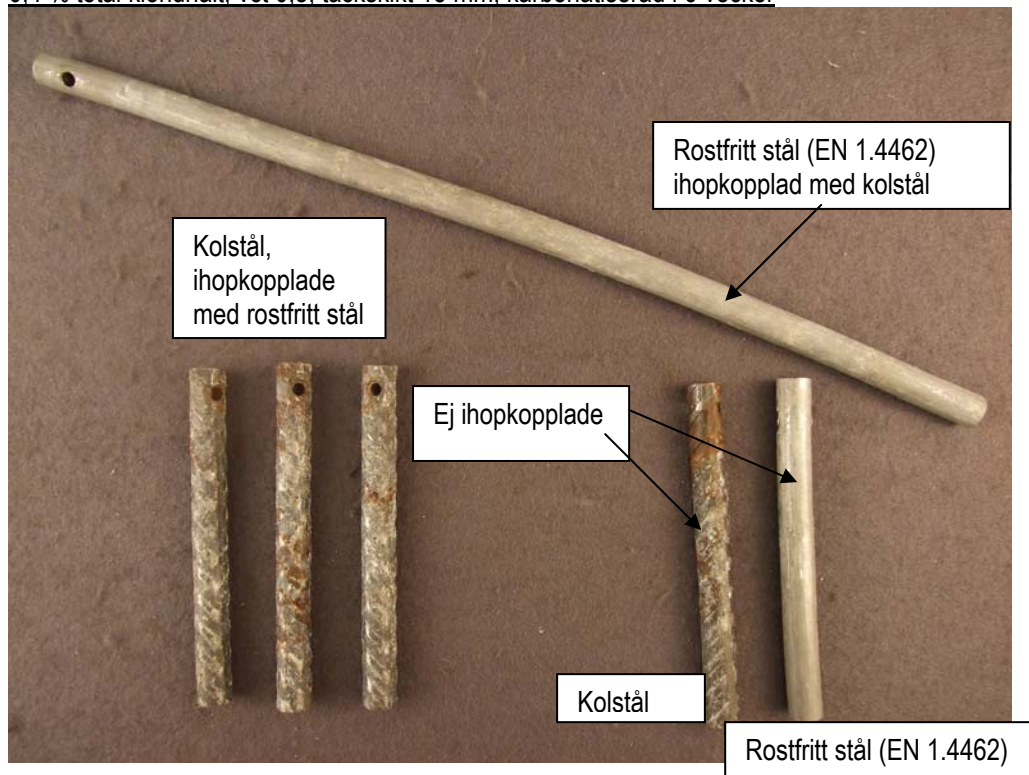
0,4 % total kloridhalt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor

**Bilaga 1(20)**



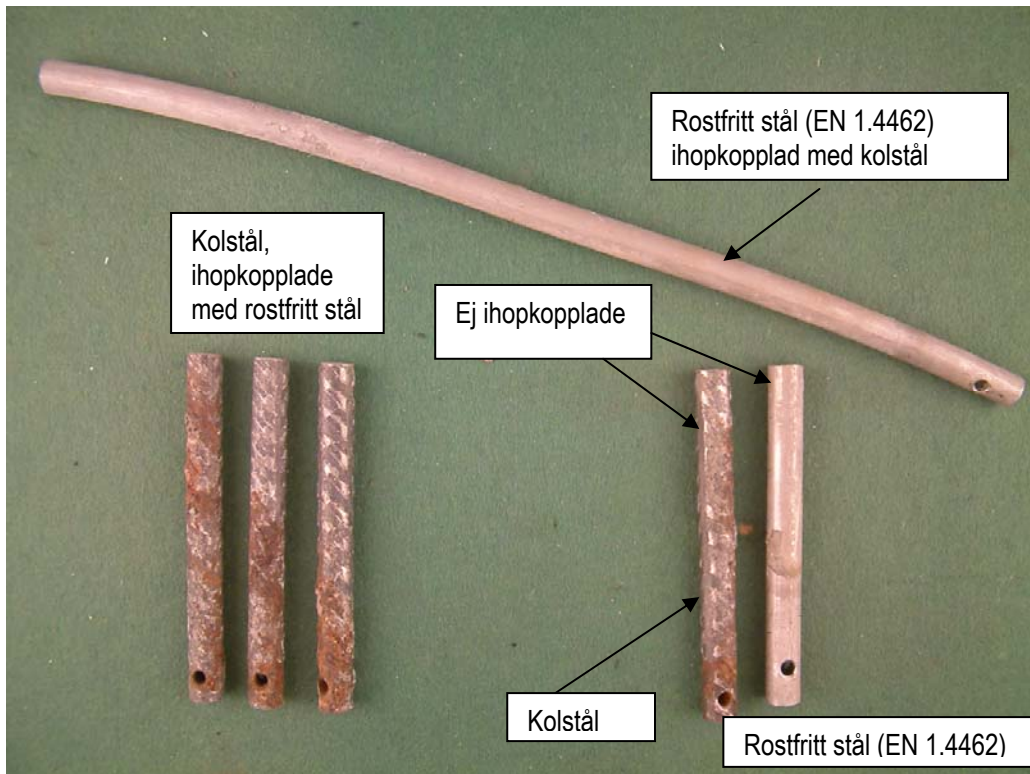


2 år  
0,4 % total kloridhalt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor

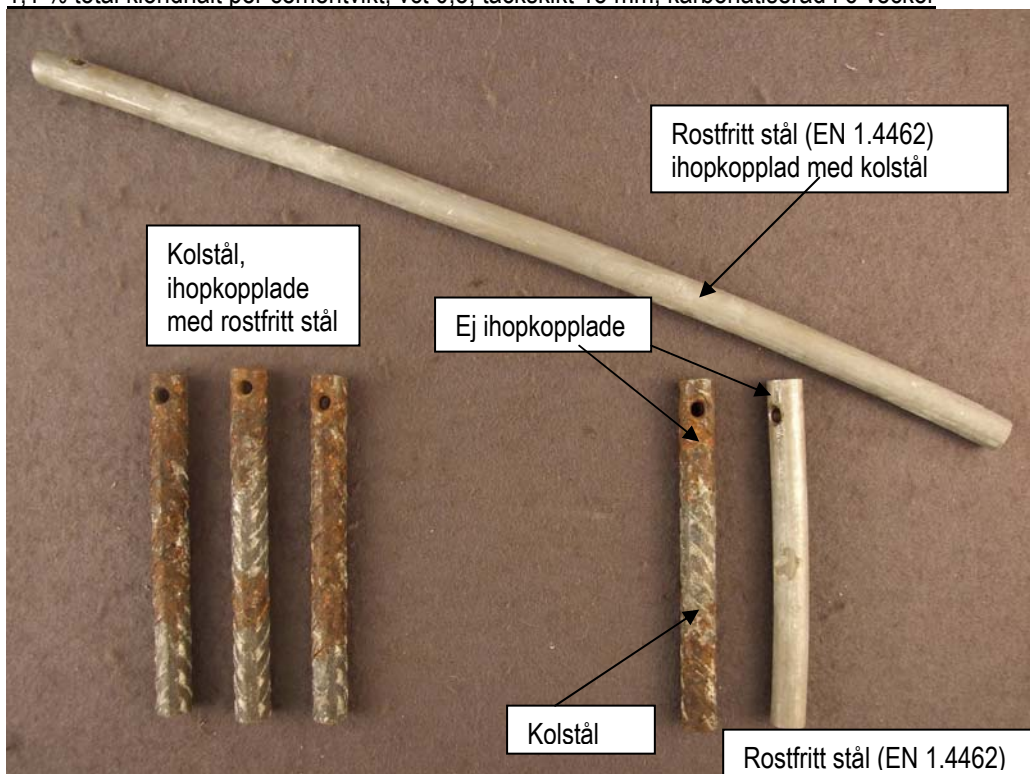


1 år  
0,8 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor

**Bilaga 1(21)**

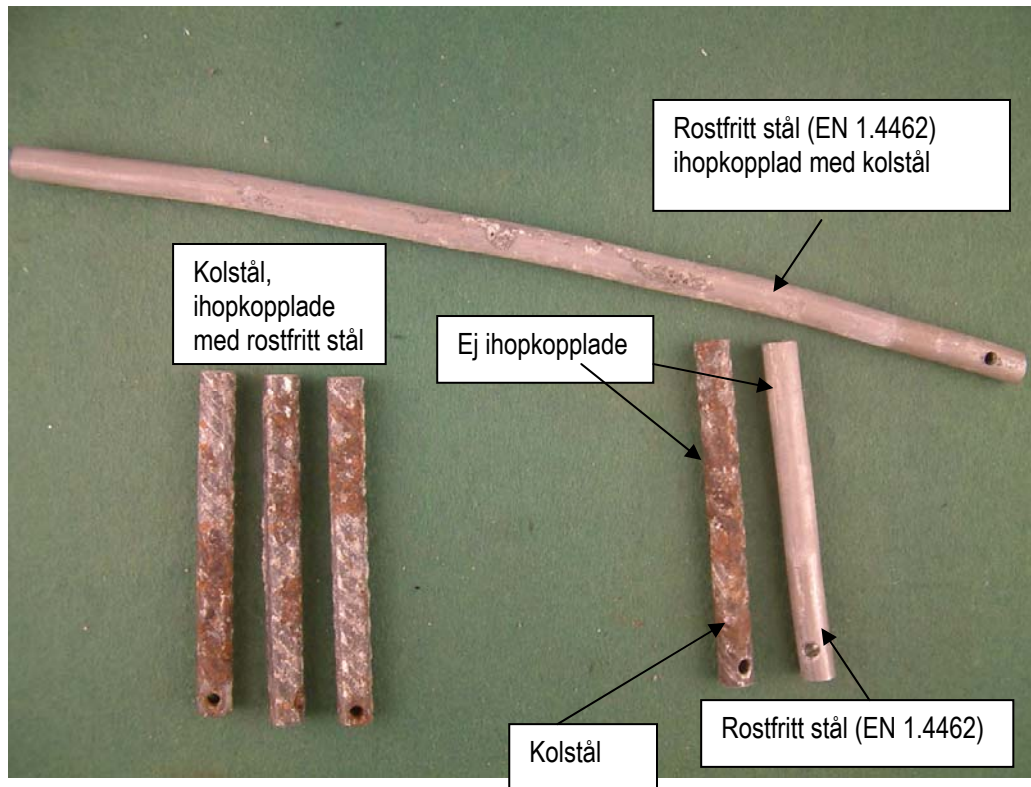


1 år  
1,1 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor



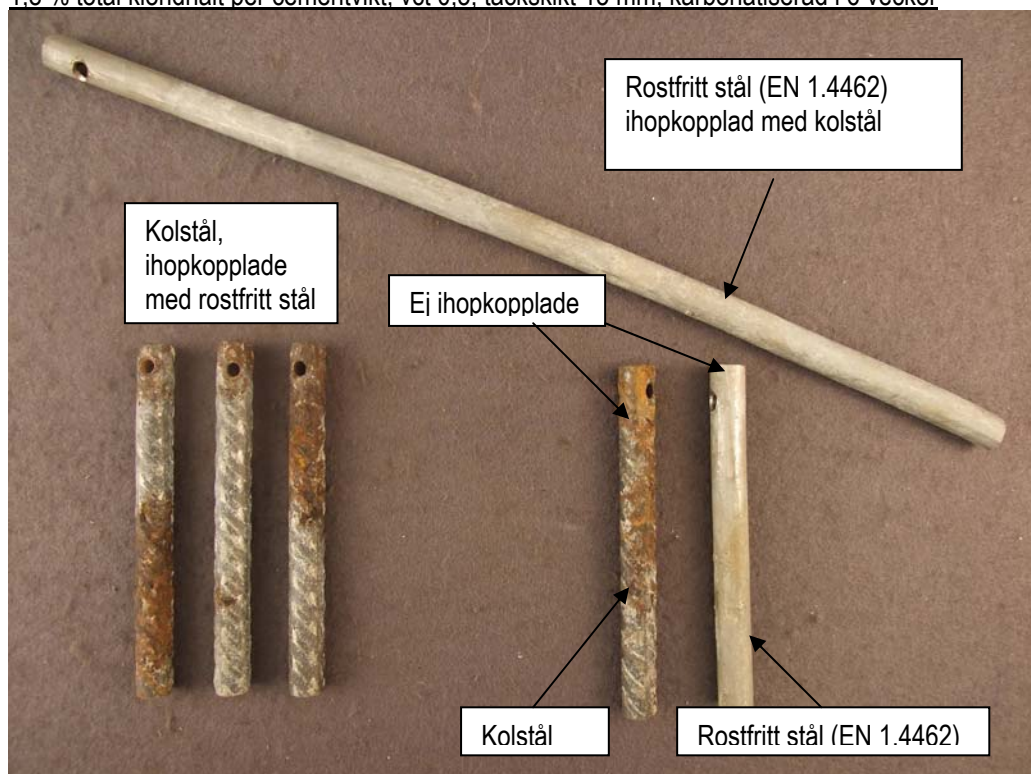
1 år  
2,0 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor





2 år

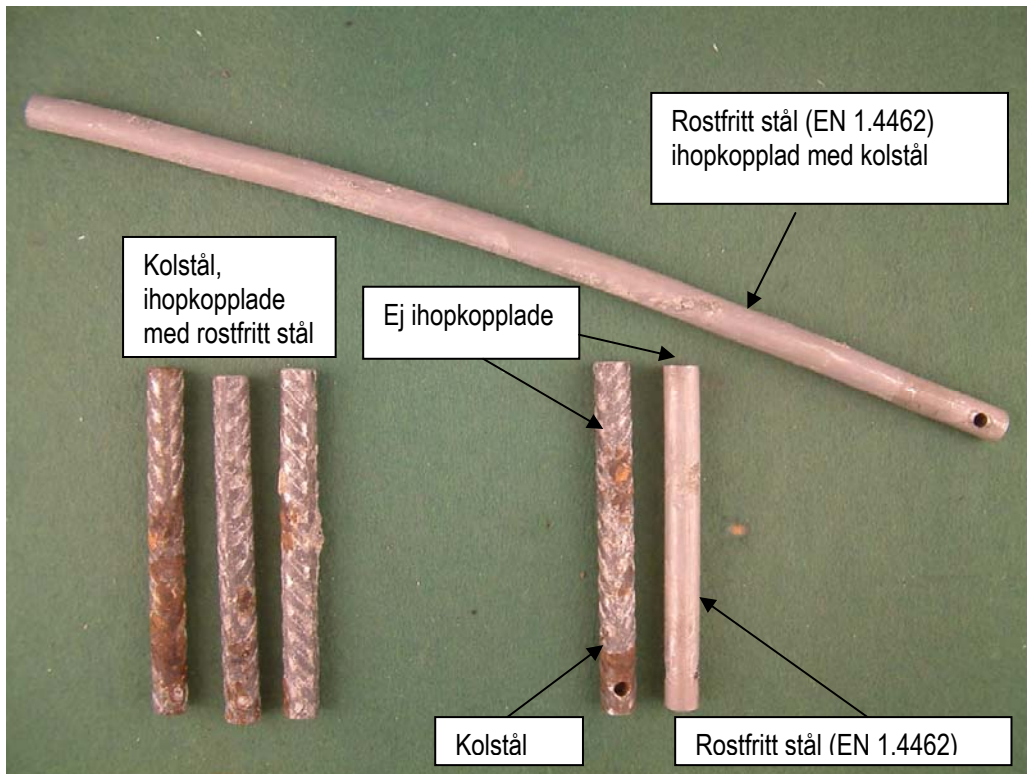
1,8 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor



1 år

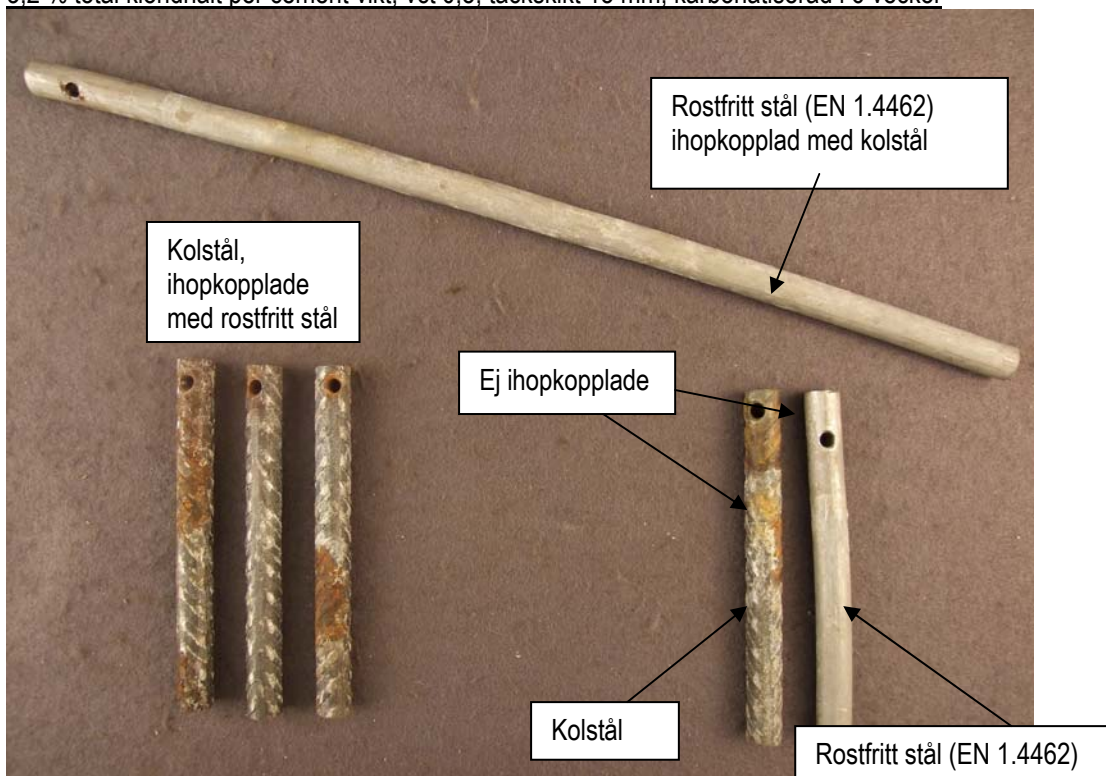
3,0 % total kloridhalt per cement vikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor

**Bilaga 1(23)**



2 år

3,2 % total kloridhalt per cement vikt, vct 0,5, täcksikt 15 mm, karbonatiserad i 6 veckor

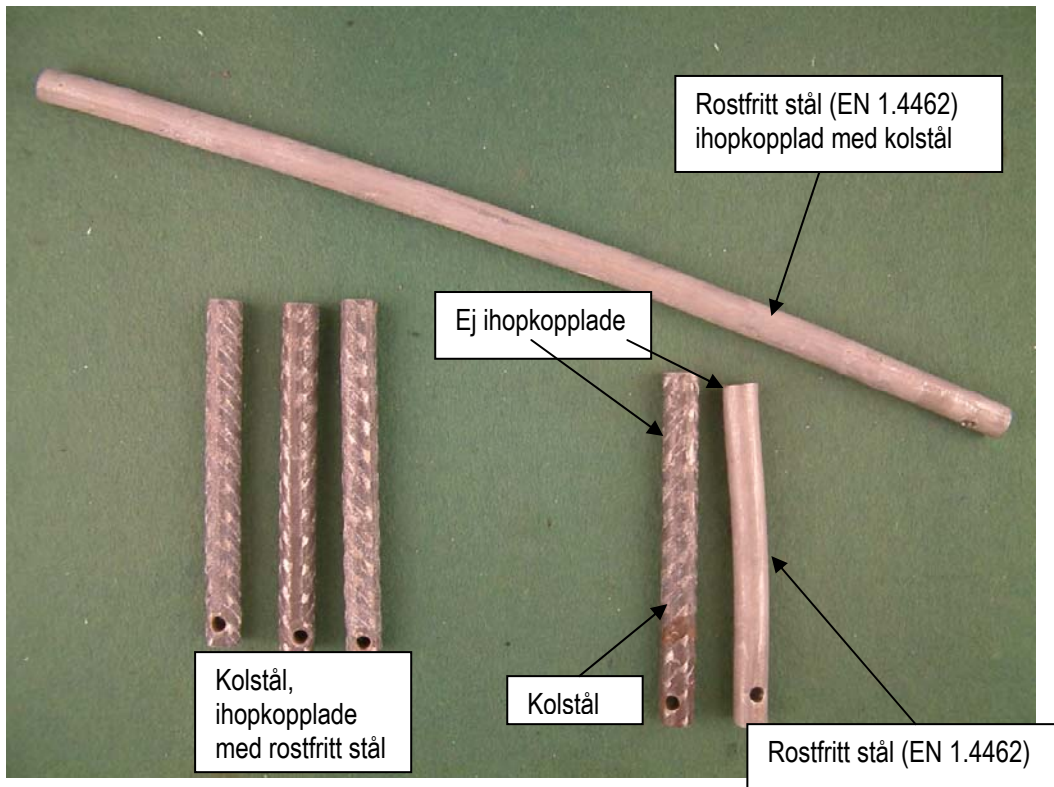


1 år

0 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,38, täcksikt 50 mm,

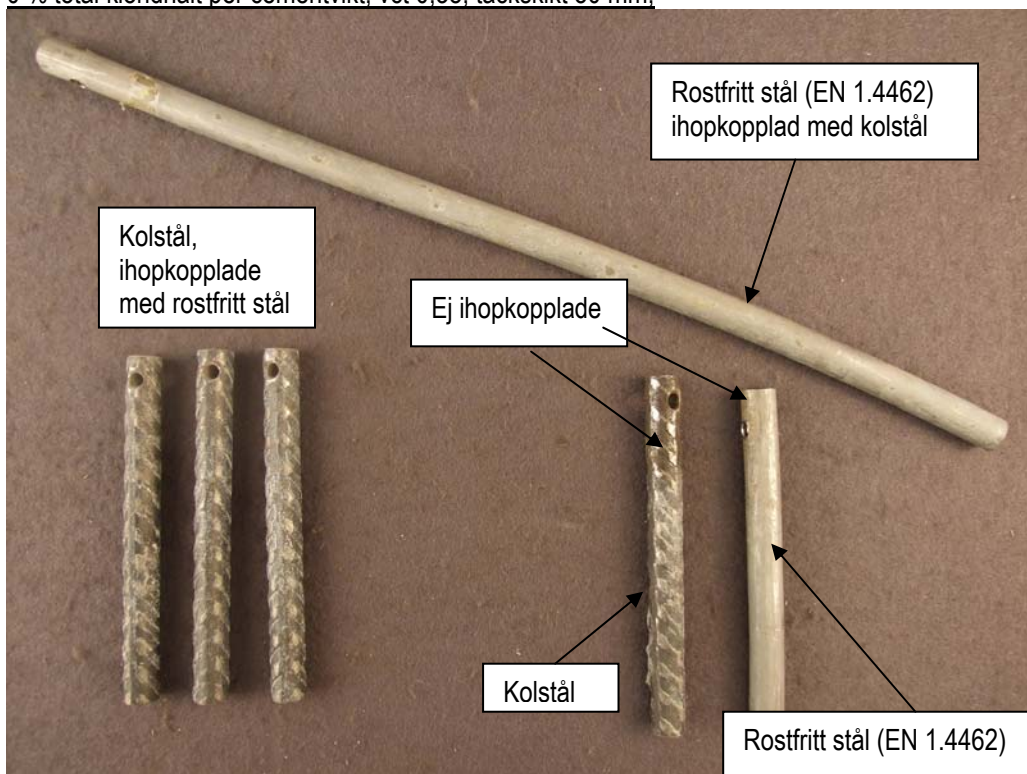
**Bilaga 1(24)**





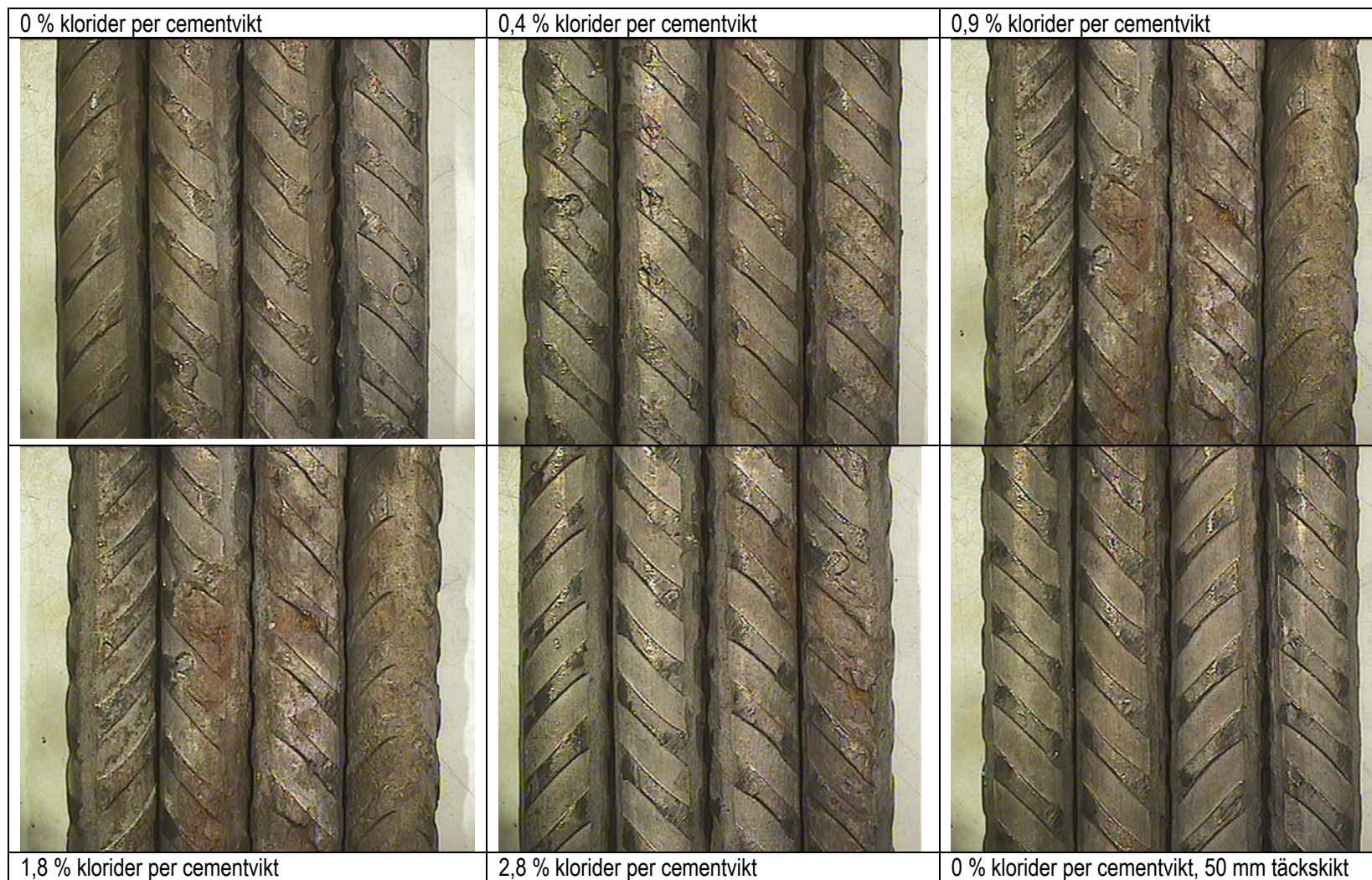
2 år

0 % total kloridhalt per cementvikt, vct 0,38, täcksikt 50 mm,





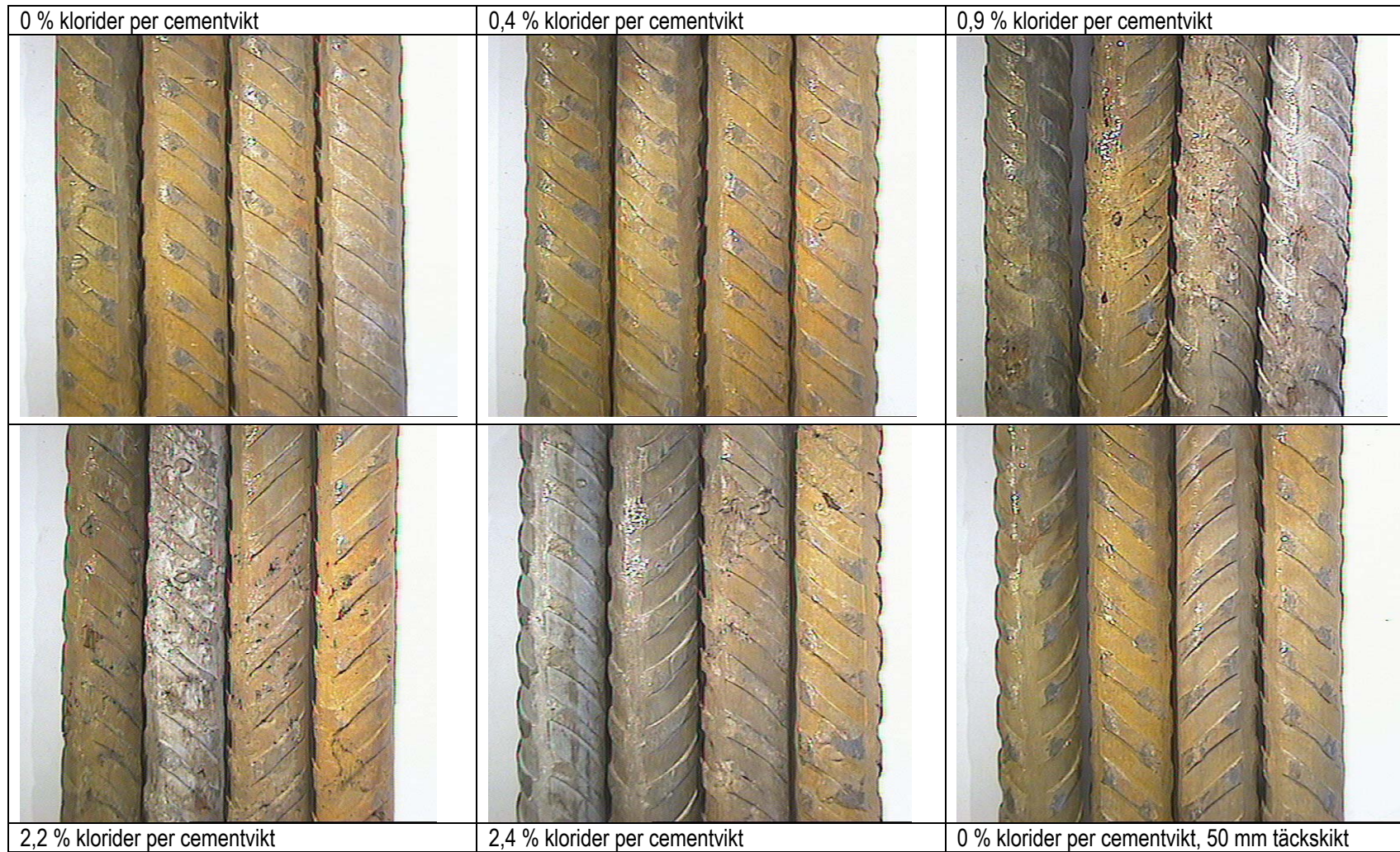
Betade provstänger av kolstål efter ett års utomhusexponering. De tre första provstängerna i varje bild har under exponeringen varit ihopkopplade med en provstång av rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4301. Den fjärde stängen från vänster i varje bild har inte varit ihopkopplat med rostfritt stål





## Bilaga 2(2)

Betade provstänger av kolstål efter två års utomhusexponering. De tre första provstängerna i varje bild har under exponeringen varit ihopkopplade med en provstång av rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4301. Den fjärde stängen från vänster i varje bild har inte varit ihopkopplat med rostfritt stål



Bilaga 2(3)



Betade provstänger av kolstål efter ett års utomhusexponering. De tre första provstängerna i varje bild har under exponeringen varit ihopkopplade med en provstång av rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4401. Den fjärde stängen från vänster i varje bild har inte varit ihopkopplat med rostfritt stål

0 % klorider per cementvikt	0,4 % klorider per cementvikt	1,0 % klorider per cementvikt
		
		
1,8 % klorider per cementvikt	2,6 % klorider per cementvikt	0 % klorider per cementvikt, 50 mm täcksikt

Bilaga 2(4)



Betade provstänger av kolstål efter två års utomhusexponering. De tre första provstängerna i varje bild har under exponeringen varit ihopkopplade med en provstång av rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4401. Den fjärde stängen från vänster i varje bild har inte varit ihopkopplat med rostfritt stål



Bilaga 2(5)



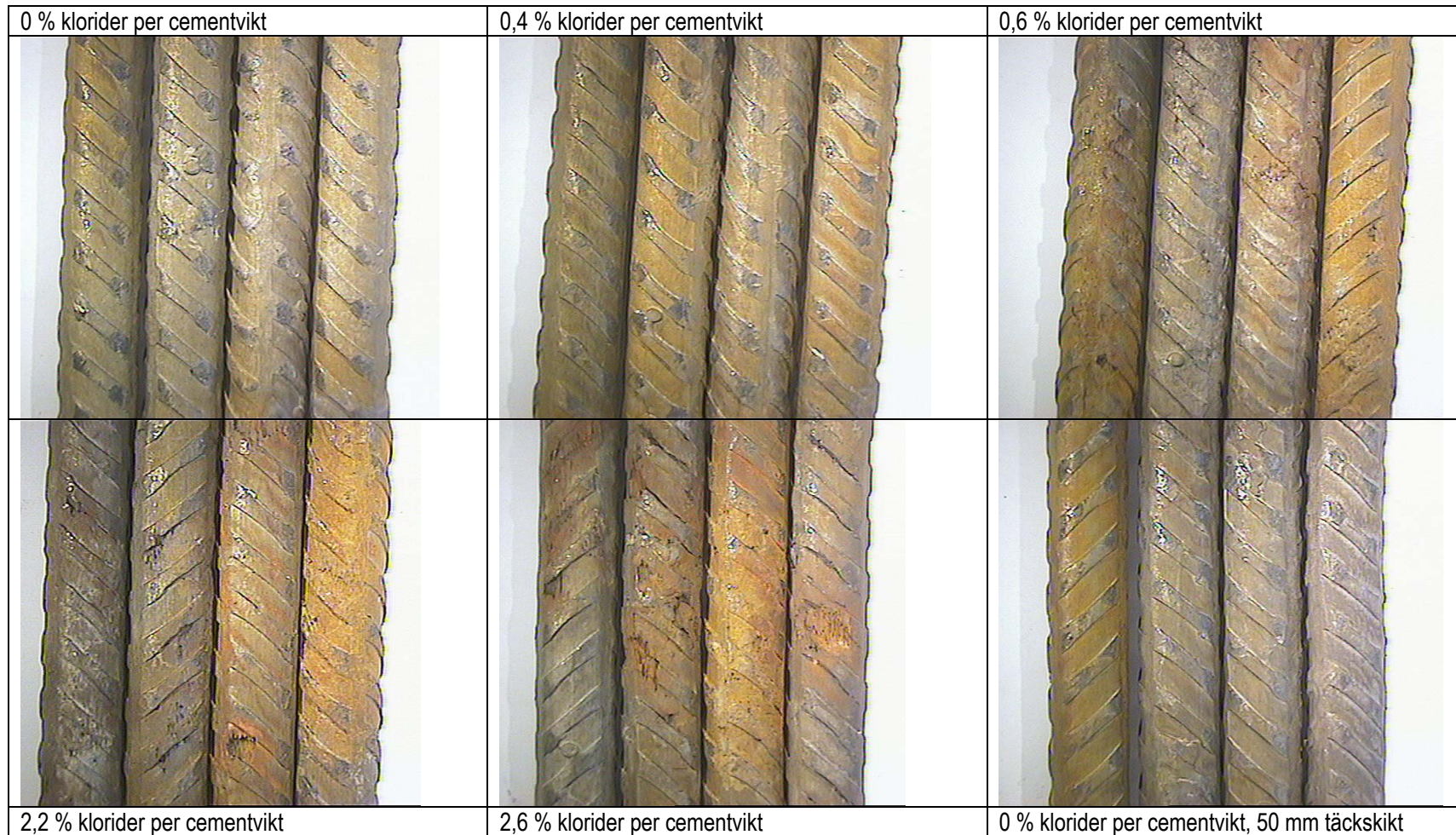
Betade provstänger av kolstål efter ett års utomhusexponering. De tre första provstängerna i varje bild har under exponeringen varit ihopkopplade med en provstång av rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4162. Den fjärde stängen från vänster i varje bild har inte varit ihopkopplat med rostfritt stål



**Bilaga 2(6)**



Betade provstänger av kolstål efter ett års utomhusexponering. De tre första provstängerna i varje bild har under exponeringen varit ihopkopplade en provstång av rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4162. Den fjärde stängen från vänster i varje bild har inte varit ihopkopplat med rostfritt stål





Betade provstänger av kolstål efter ett års utomhusexponering. De tre första provstängerna i varje bild har under exponeringen varit ihopkopplade en provstång av rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4462. Den fjärde stängen från vänster i varje bild har inte varit ihopkopplat med rostfritt stål

0 % klorider per cementvikt	0,4 % klorider per cementvikt	1,1 % klorider per cementvikt
		
		
1,8 % klorider per cementvikt	% klorider per cementvikt	0 % klorider per cementvikt, täcksikt 50 mm

**Bilaga 2(8)**

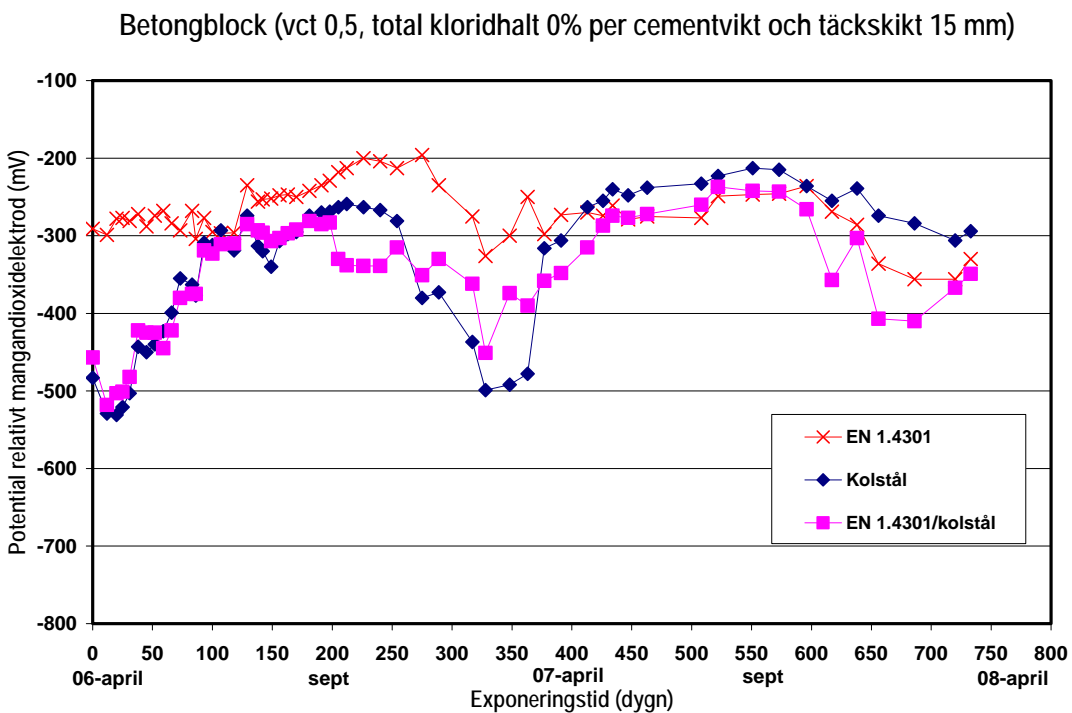
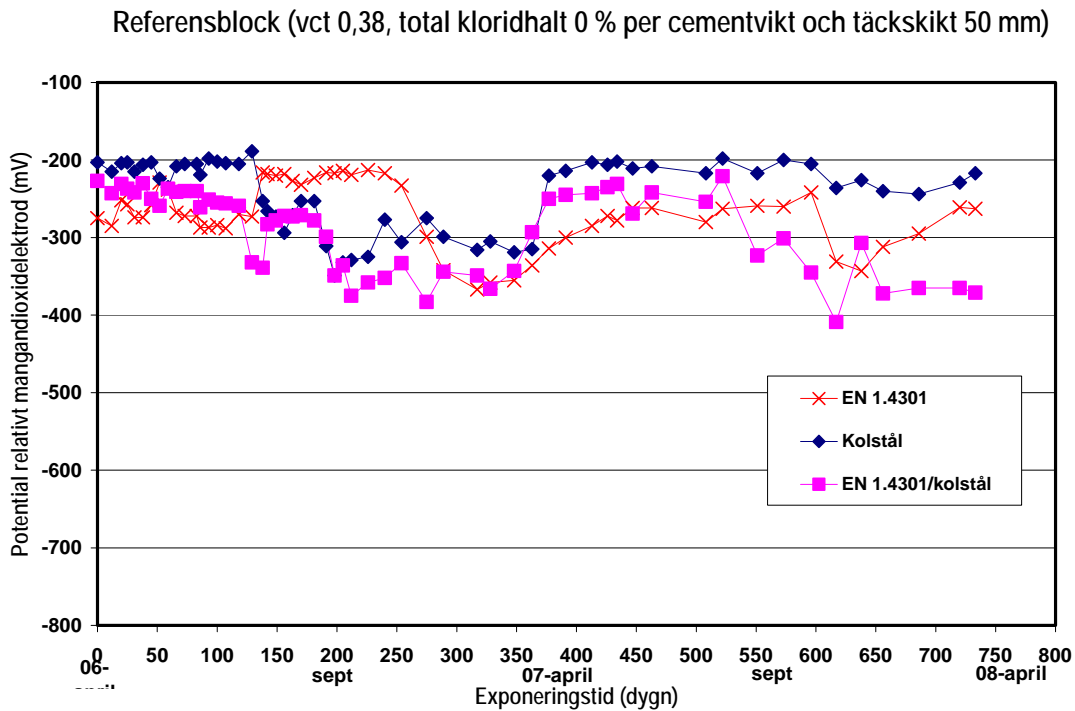


Betade provstänger av kolstål efter ett års utomhusexponering. De tre första provstängerna i varje bild har under exponeringen varit ihopkopplade en provstång av rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4462. Den fjärde stängen från vänster i varje bild har inte varit ihopkopplat med rostfritt stål



**Bilaga 3(1)**

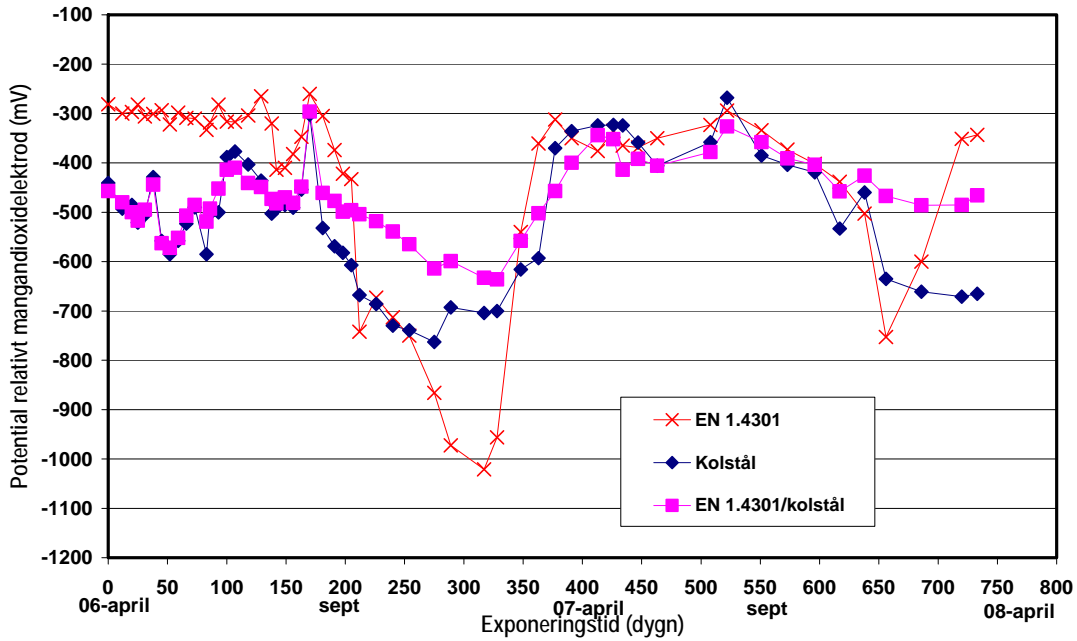
Kontinuerligt registrerade elektropotentialer hos provstänger av kolstål, rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4301 och ihopkopplade provstänger av kolstål och rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4301 som funktion exponeringstid och den totala kloridhalten i betongblock per cementvikt



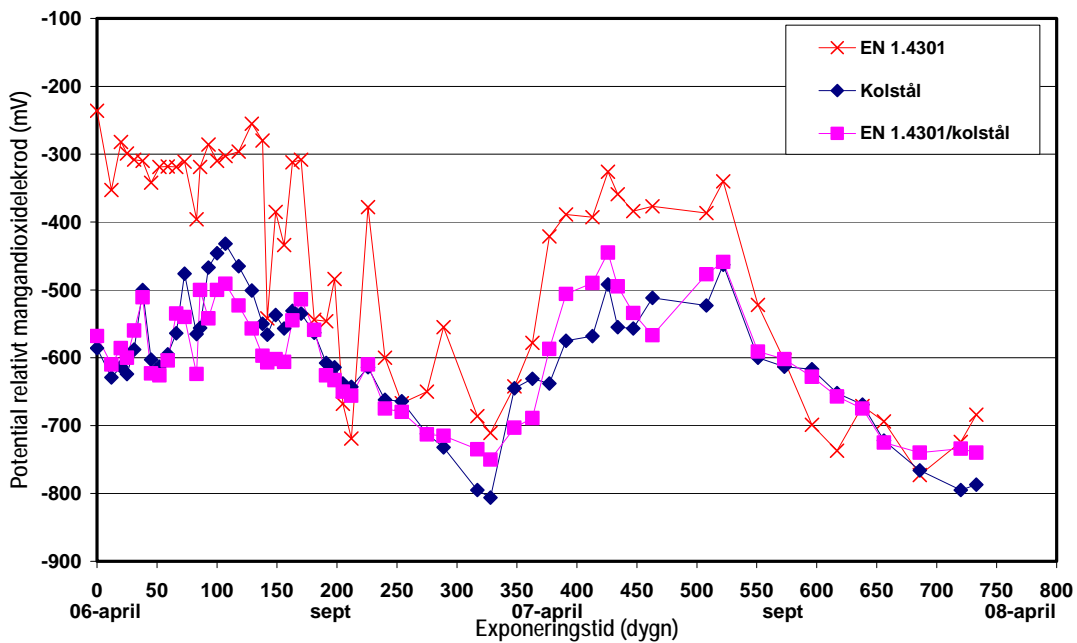
**Bilaga 3(2)**

Kontinuerligt registrerade elektropotentialer hos provstänger av kolstål, rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4301 och ihopkopplade provstänger av kolstål och rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4301 som funktion exponeringstid och den totala kloridhalten i betongblock per cementvikt

Betongblock (vct 0,5, total kloridhalt 0,4 % per cementvikt och täcksikt 15 mm)



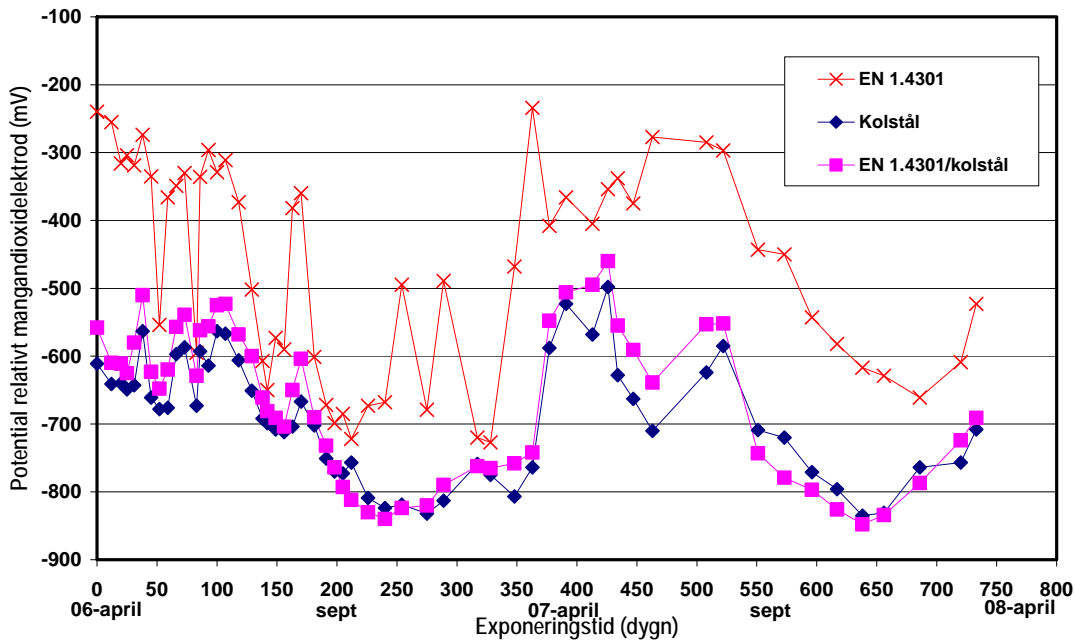
Betongblock (vct 0,5, total kloridhalt 0,9 % per cementvikt och täcksikt 15 mm)



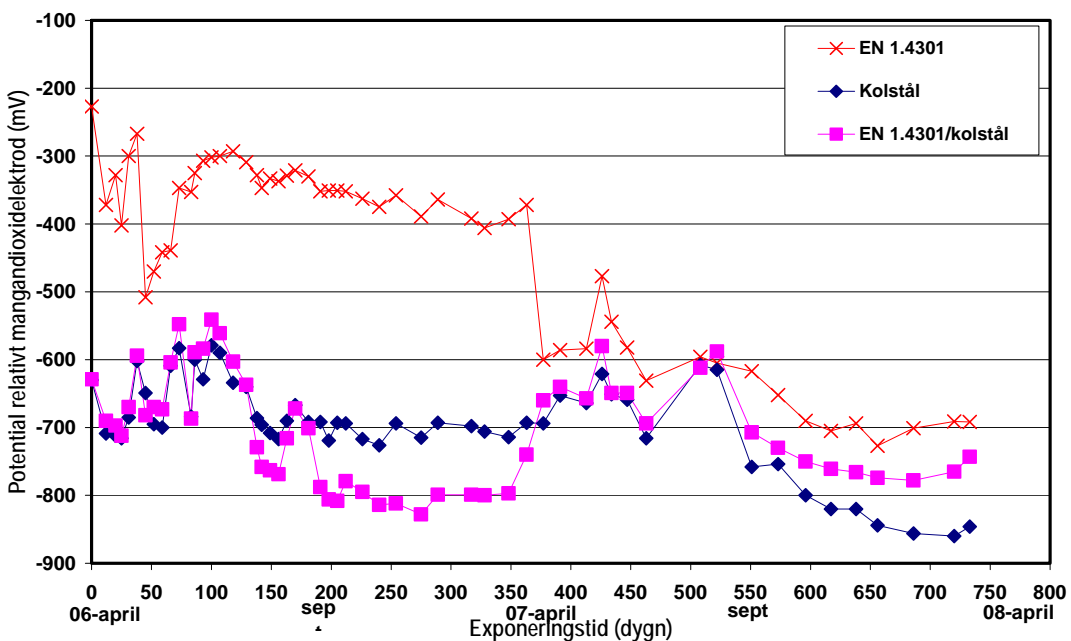
**Bilaga 3(3)**

Kontinuerligt registrerade elektrodpotentialer hos provstänger av kolstål, rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4301 och ihopkopplade provstänger av kolstål och rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4301 som funktion exponeringstid och den totala kloridhalten i betongblock per cementvikt

Betongblock (vct 0,5, total kloridhalt 2,2 % per cementvikt täcksikt 15 mm)



Betongblock (vct 0,5, total kloridhalt 2,4 % per cementvikt och täcksikt 15 mm)

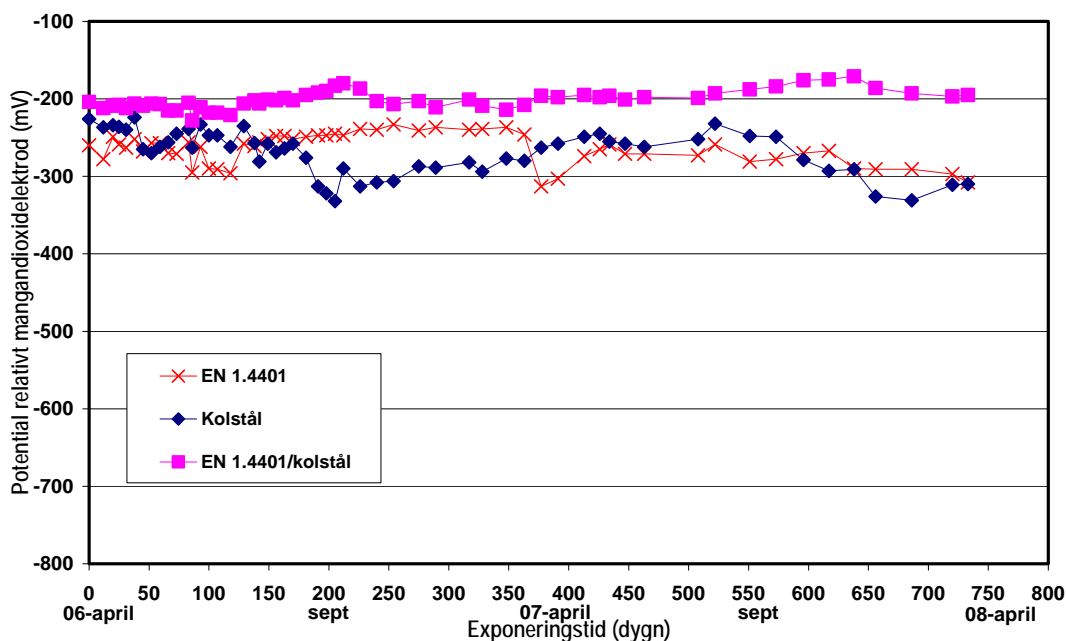




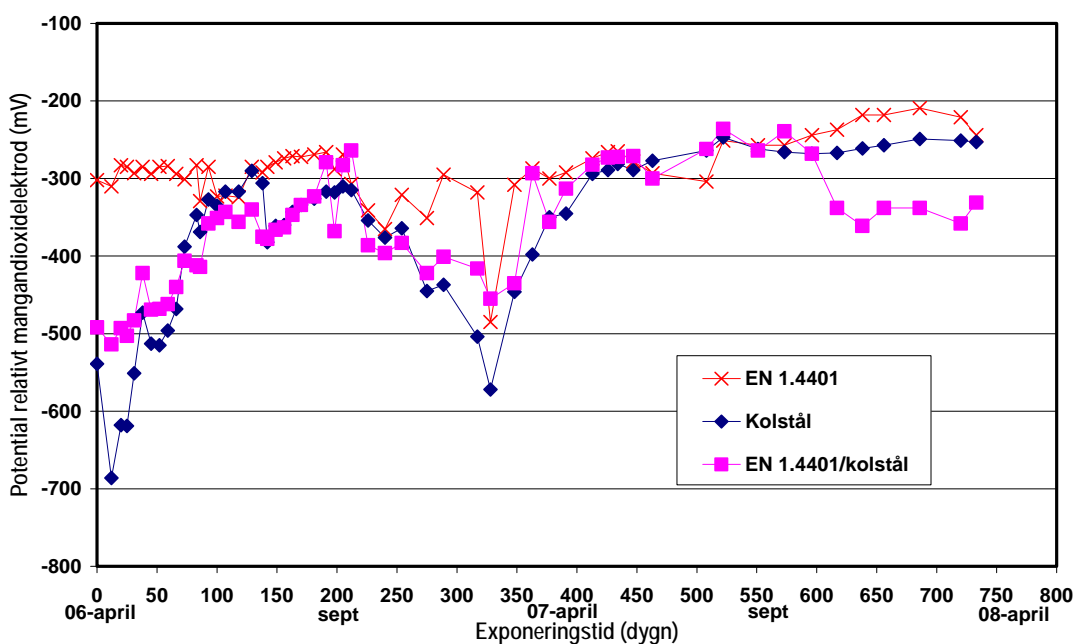
**Bilaga 4(1)**

Kontinuerligt registrerade elektropotentialer hos provstänger av kolstål, rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4401 och ihopkopplade provstänger av kolstål och rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4401 som funktion exponeringstid och den totala kloridhalten i betongblock per cementvikt

Referensblock (vct 0,38, total kloridhalt 0 % per cementvikt och täcksikt 50 mm)



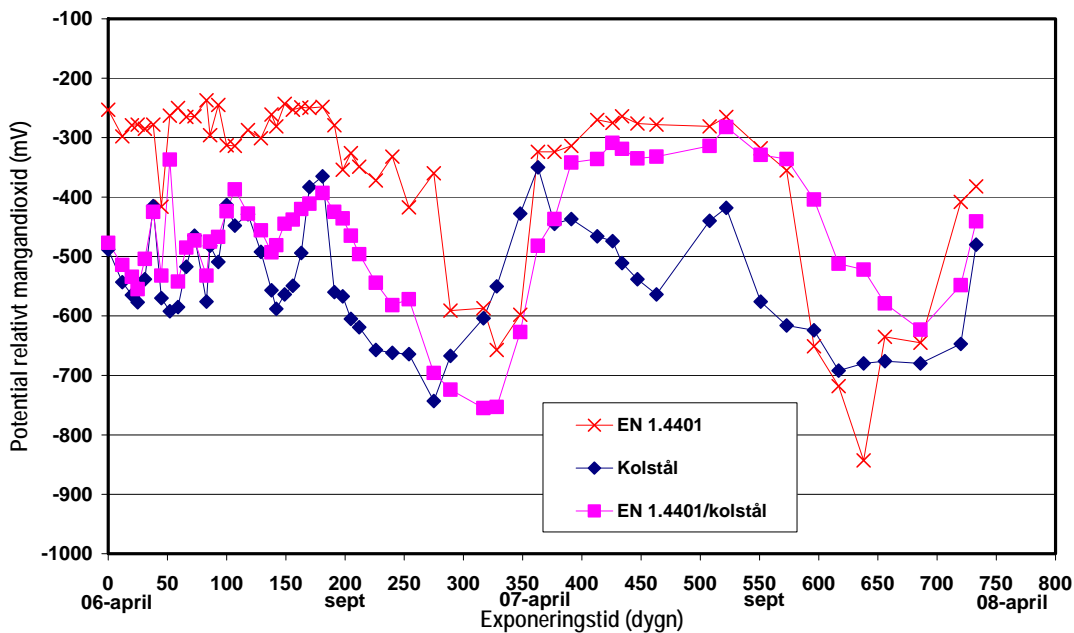
Betongblock (vct 0,5, total kloridhalt 0 % per cementvikt och täcksikt 15 mm)



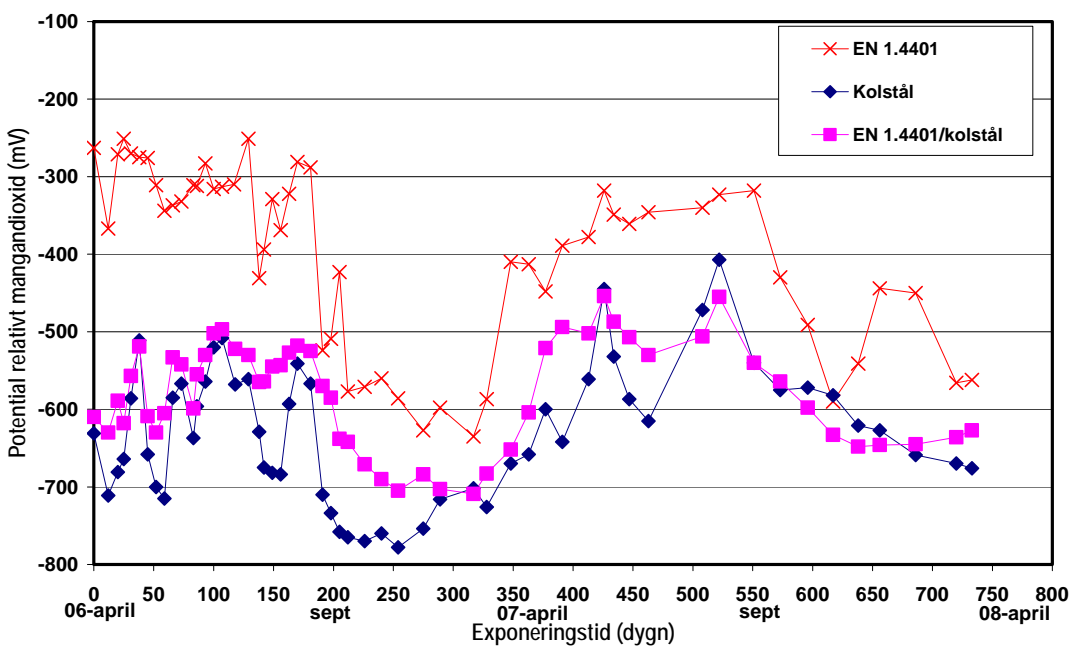
**Bilaga 4(2)**

Kontinuerligt registrerade elektropotentialer hos provstänger av kolstål, rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4401 och ihopkopplade provstänger av kolstål och rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4401 som funktion exponeringstid och den totala kloridhalten i betongblock per cementvikt

Betongblock (vct 0,5, total kloridhalt 0,4 % per cementvikt och täcksikt 15 mm)



Betongblock (vct 0,5, total kloridhalt 1,1 % per cementvikt och täcksikt 15 mm)

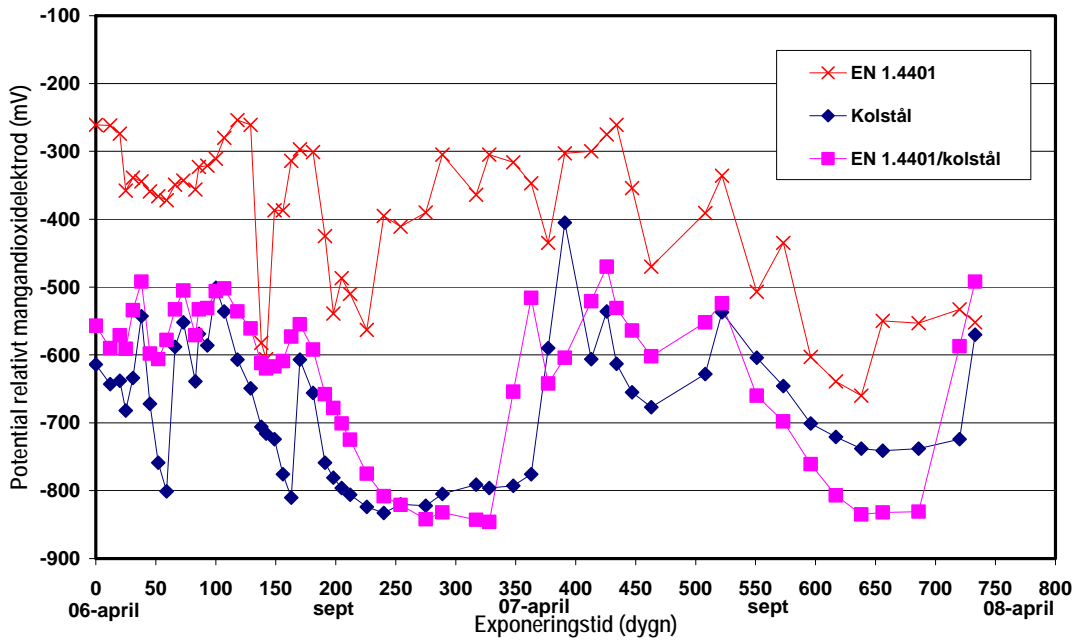




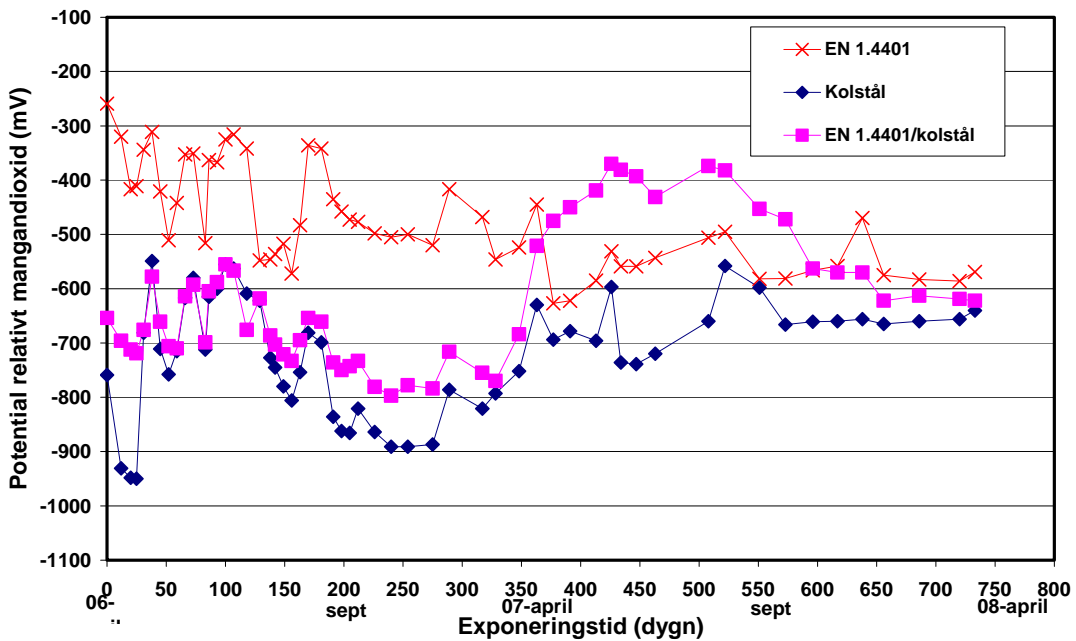
**Bilaga 4(3)**

Kontinuerligt registrerade elektropotentialer hos provstänger av kolstål, rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4401 och ihopkopplade provstänger av kolstål och rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4401 som funktion exponeringstid och den totala kloridhalten i betongblock per cementvikt

Betongblock (vct 0,5, total kloridhalt 2,2 % per cementvikt och täcksikt 15 mm)



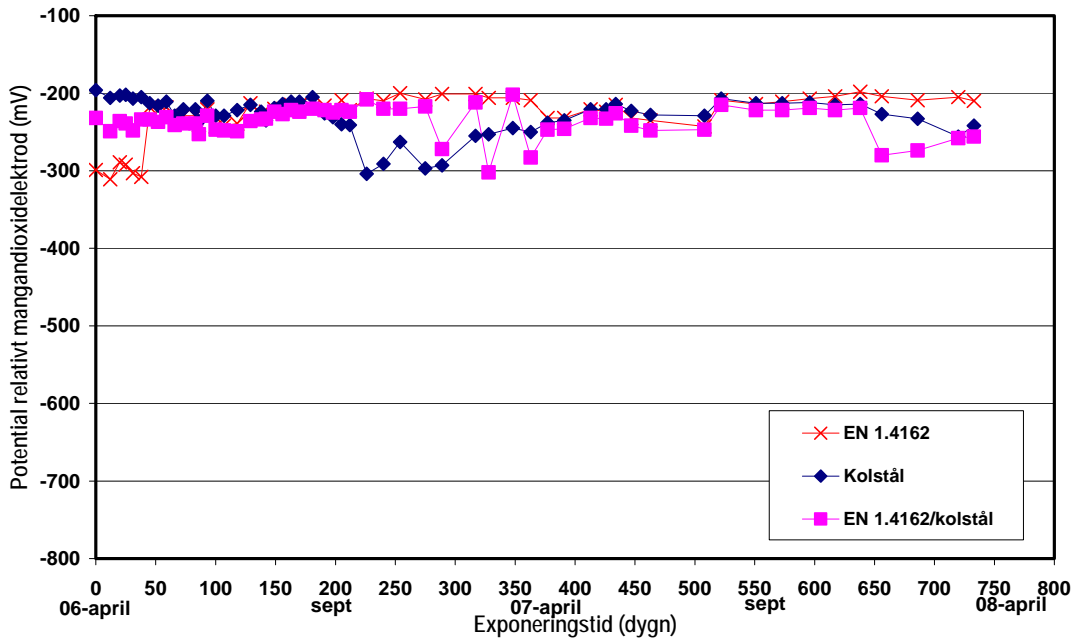
Betongblock (vct 0,5, total kloridhalt 2,7 % per cementvikt och täcksikt 15 mm)



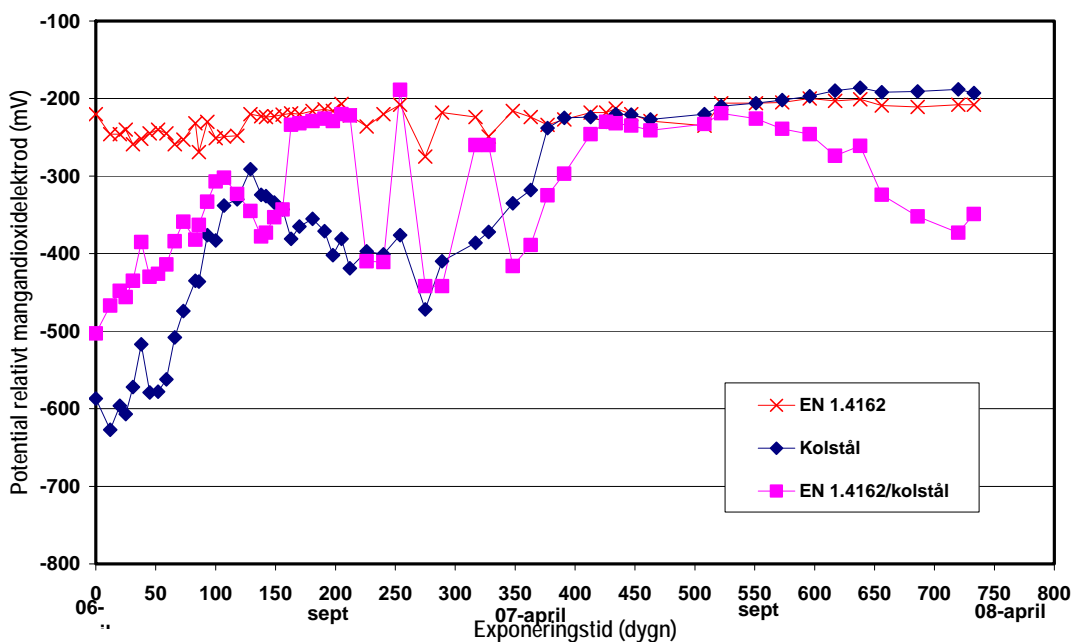
**Bilaga 5(1)**

Kontinuerligt registrerade elektrodpotentialer hos provstänger av kolstål, rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4162 och ihopkopplade provstänger av kolstål och rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4162 som funktion exponeringstid och den totala kloridhalten i betongblock per cementvikt

Betongblock (vct 0,38, total kloridhalt 0 % per cementvikt och täcksikt 50 mm)



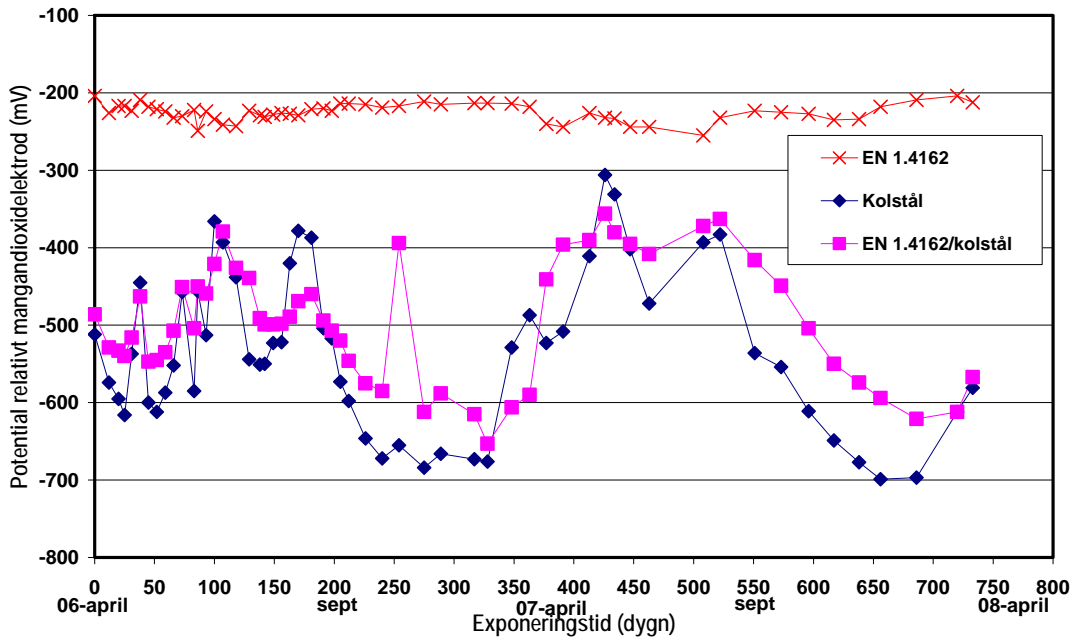
Betongblock (vct 0,5, total kloridhalt 0 % per cementvikt och täcksikt 15 mm)



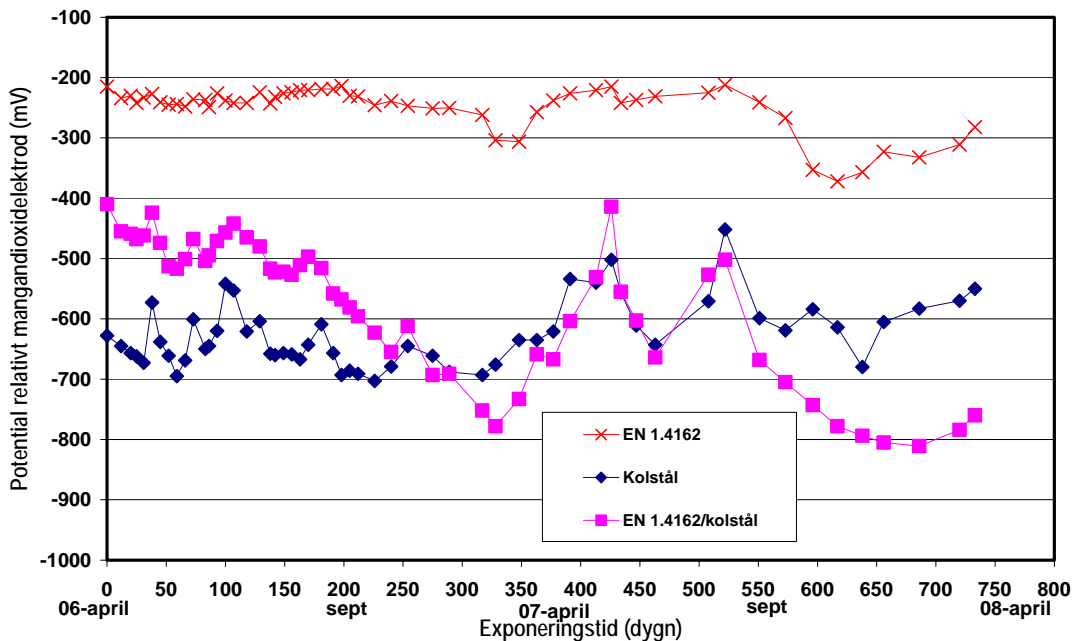
**Bilaga 5(2)**

Kontinuerligt registrerade elektropotentialer hos provstänger av kolstål, rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4162 och ihopkopplade provstänger av kolstål och rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4162 som funktion exponeringstid och den totala kloridhalten i betongblock per cementvikt

Betongblock (vct 0,5, total kloridhal 0,4 % per cementvikt och täcksikt 15 mm)



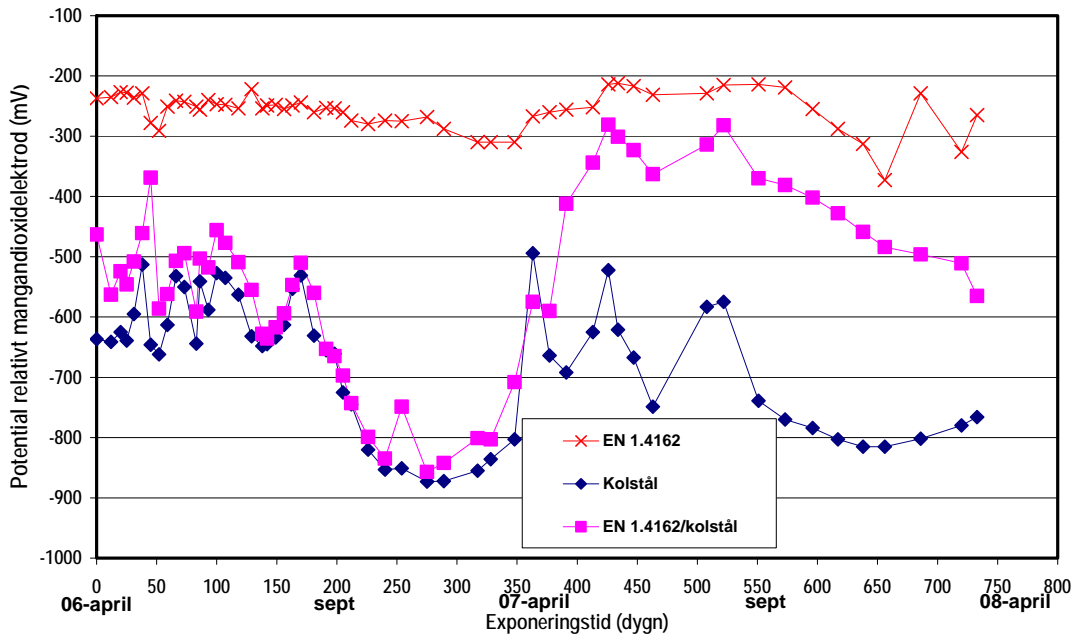
Betongblock (vct 0,5, total kloridhalt 0,6 % per cementvikt och täcksikt 15 mm)



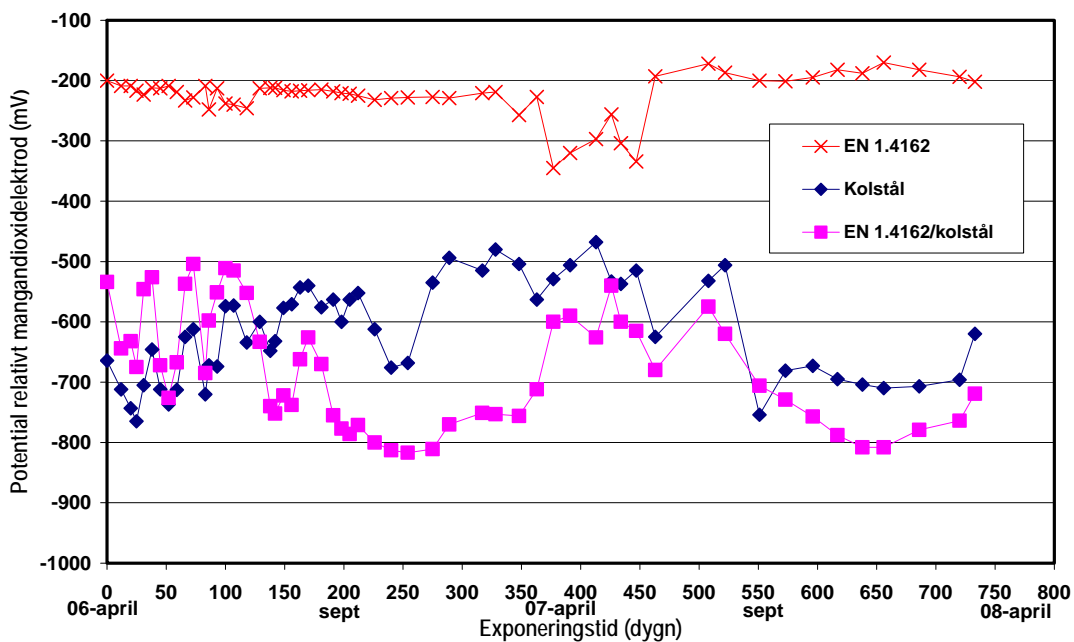
**Bilaga 5(3)**

Kontinuerligt registrerade elektrodpotentialer hos provstänger av kolstål, rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4162 och ihopkopplade provstänger av kolstål och rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4162 som funktion exponeringstid och den totala kloridhalten i betongblock

Betongblock (vct 0,5, total kloridhalt 2,2 % per cement vikt och täcksikt 15 mm)



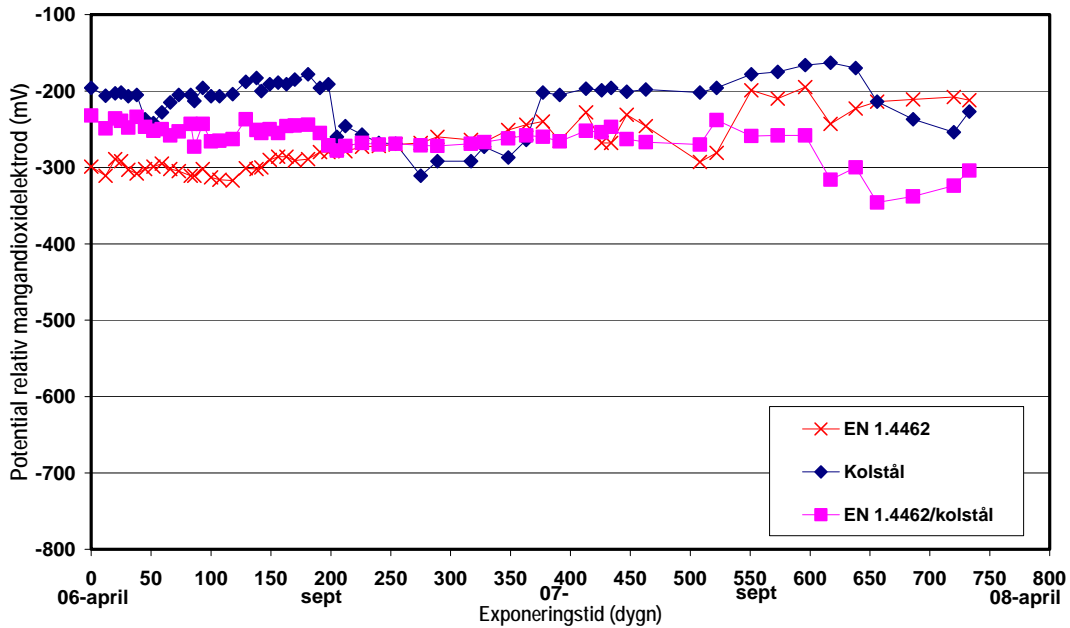
Betongblock (vct 0,5, total kloridhalt 2,6 % per cementvikt och täcksikt 15 mm)



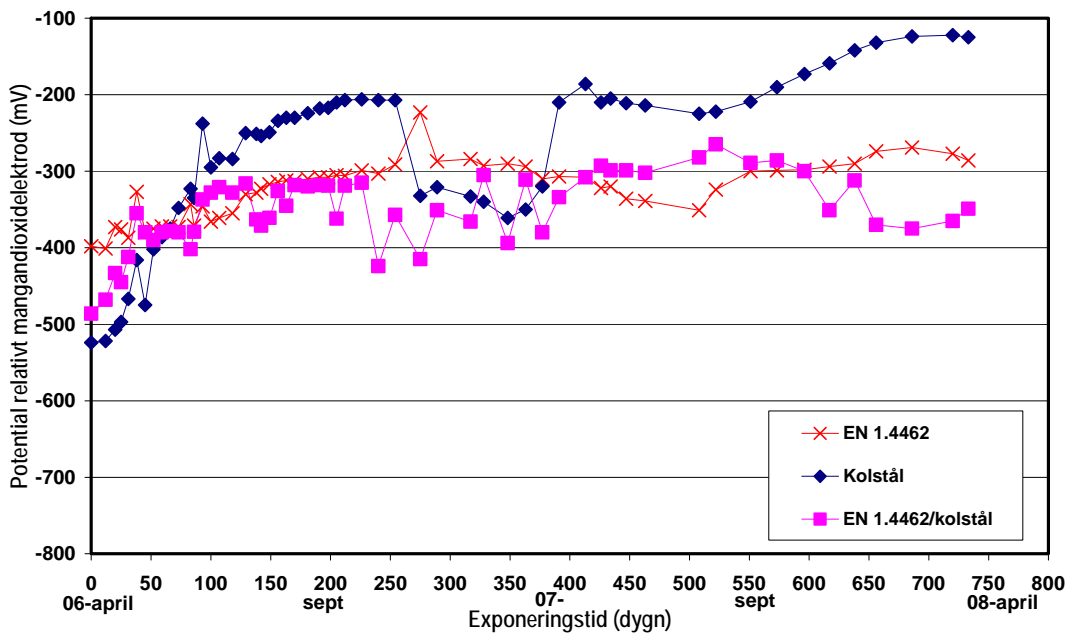
**Bilaga 6(1)**

Kontinuerligt registrerade elektropotentialer hos provstänger av kolstål, rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4462 och ihopkopplade provstänger av kolstål och rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4462 som funktion exponeringstid och den totala kloridhalten i betongblock

Betongblock (vct 0,38, total kloridhalt 0 % per cementvikt och täcksikt 50 mm)



Betongblock (vct 0,5, total kloridhalt 0 % per cementvikt och täcksikt 15 mm)

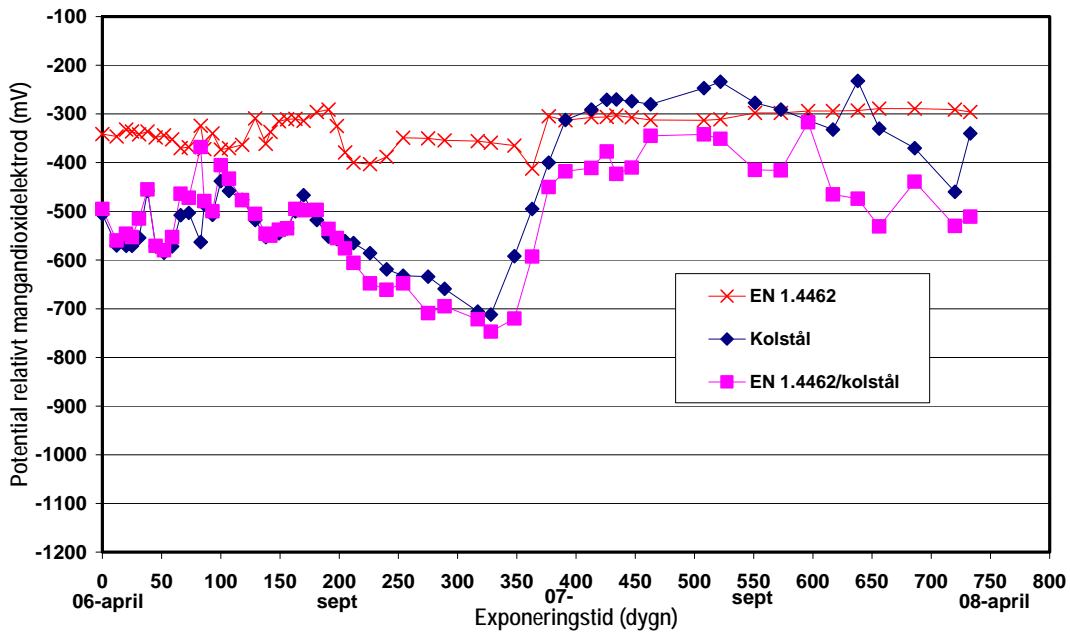




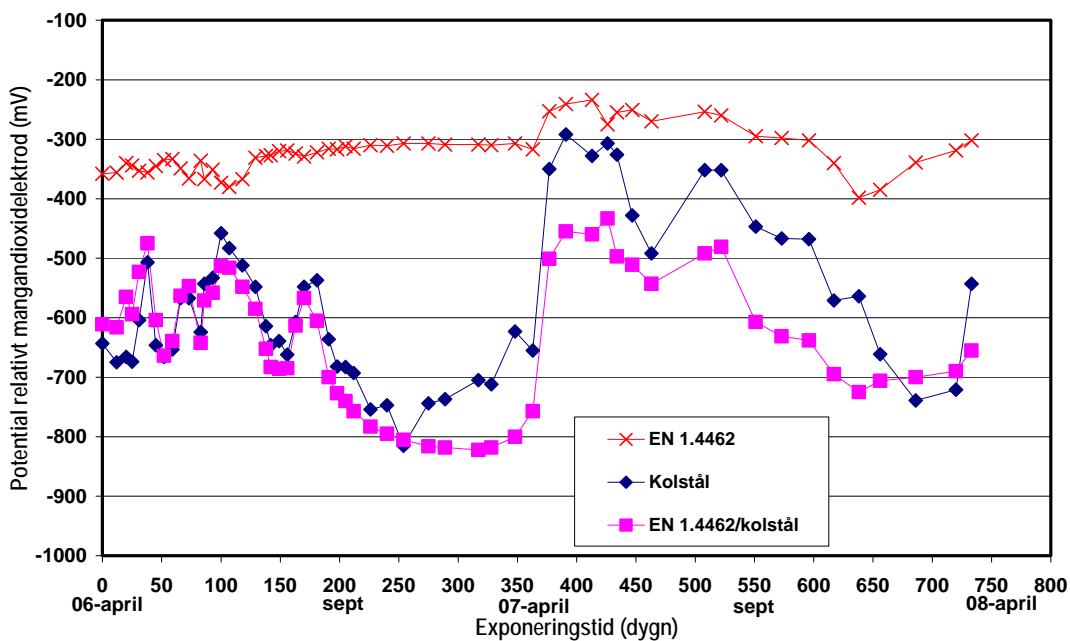
**Bilaga 6(2)**

Kontinuerligt registrerade elektrodpotentialer hos provstänger av kolstål, rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4462 och ihopkopplade provstänger av kolstål och rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4462 som funktion exponeringstid och den totala kloridhalten i betongblock

Betongblock (vct 0,5, total kloridhalt 0,4 % per cementvikt och täcksikt 15 mm)



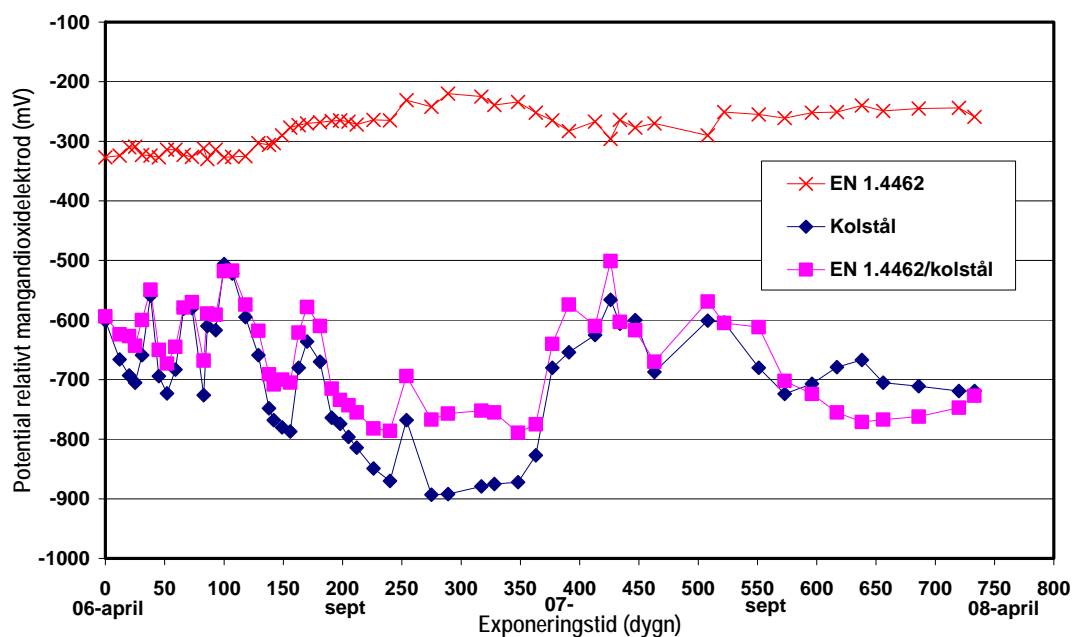
Betongblock (vct 0,5, total kloridhalt 0,8 % per cementvikt och täcksikt 15 mm)



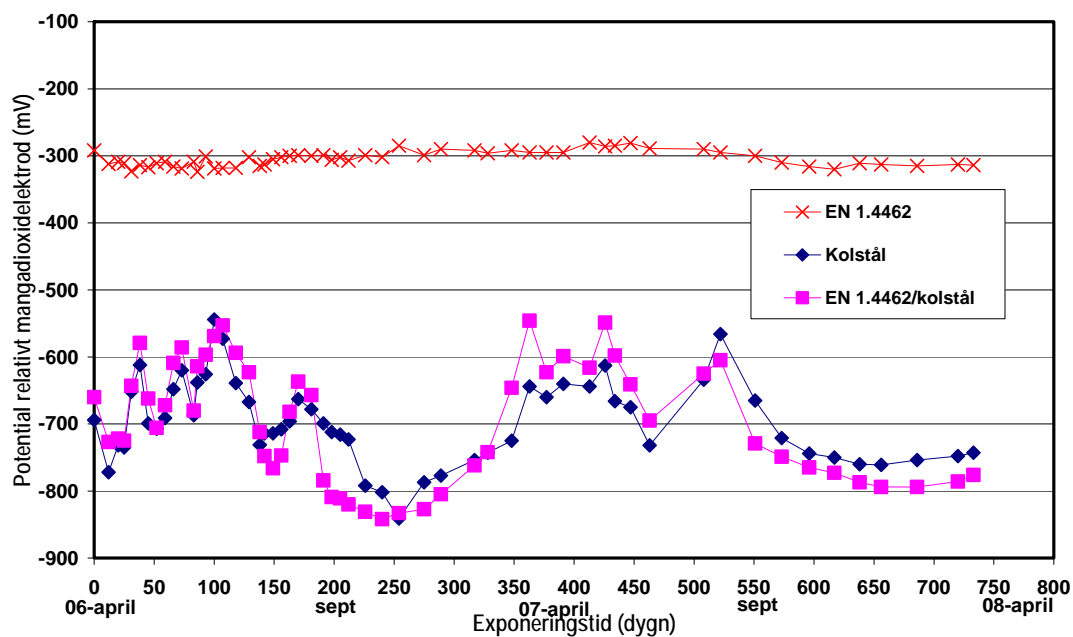
**Bilaga 6(3)**

Kontinuerligt registrerade elektropotentialer hos provstänger av kolstål, rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4462 och ihopkopplade provstänger av kolstål och rostfritt stål av stålqualiteten EN 1.4462 som funktion exponeringstid och den totala kloridhalten i betongblock

Betongblock (vct 0,5, total kloridhalt 1,8 % per cementvikt och täcksikt 15 mm)



Betongblock (vct 0,5, total kloridhalt 3,0 per cementvikt och täcksikt 15 mm)





<b>Datum:</b> 2008	<b>Rapport – Swerea KIMAB AB</b>
<b>Sidor:</b> 101	
<b>Språk:</b> Svenska	
	<b>ISSN:</b> 1403-848X
	<b>ISRN:</b> SIMR/R-08/066-SE
	<b>KIMAB-nr:</b> KIMAB-2008-132
	<b>Status:</b> Slutrapport

<b>Titel:</b>	Rostfritt stål i betong - Galvaniska effekter på kolstål Litteraturundersökning och fältexponering.
<b>Författare:</b>	Bror Sederholm och Jörgen Almqvist
<b>Medlemsprogram:</b>	Korrosionsinstitutet
<b>Swerea KIMAB-projektnr:</b>	731540
<b>Affärsområde:</b>	Korrosion
<b>Godkänd av avdelningschef:</b>	Bertil Sandberg
<b>Finansiering:</b>	Medlemsprogram

<b>Nyckelord:</b>	Rostfritt stål, kolstål, korrosionshastighet, galvanisk korrosion, betong, fältexponering, litteraturundersökning
-------------------	--

<b>Deltagande företag:</b> Banverket Forsmarks Kraftgrupp AB Göteborgs Hamn AB Oskarshamns Kraftgrupp AB Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF) Vattenfall Ringhals AB Outokumpu Stainless AB Vägverket
---



Swerea KIMAB är ett ledande korrosions- och metallforskningsinstitut. 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 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 55970, 102 16 Stockholm  
Tel 08-440 48 00, Fax 08-440 45 35  
E-post [kimab@swerea.se](mailto:kimab@swerea.se), [www.swreakimab.se](http://www.swreakimab.se)

