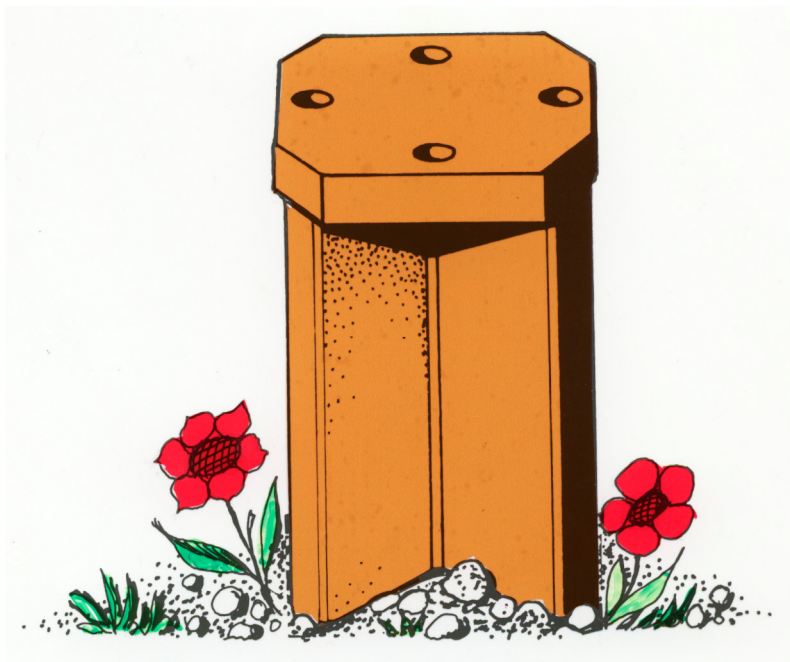


**Swerea KIMAB AB**  
**Statens geotekniska institut**

## **Korrosion på neddrivna stålpålar exponerade i naturliga svenska icke omgrävda jordar**

**Tor-Gunnar Vinka**  
**Ulf Bergdahl**  
**Göran Camitz**  
**David Bendz**





# Innehållsförteckning

Förord .....	4
Sammanfattning .....	5
<b>1. Inledning och syfte .....</b>	<b>7</b>
<b>2. Beskrivning av krysspålarerna .....</b>	<b>9</b>
<b>3. Provningsplatser och exponeringstider .....</b>	<b>13</b>
<b>4. Uppmätning och beräkning av inträffad korrosion .....</b>	<b>23</b>
4.1 Rengöring och vägning av pålarna .....	24
4.2 Mätning med bygelmikrometer och nålmikrometer samt fotografering .....	24
4.2.1 Mätning med bygelmikrometer .....	24
4.2.2 Mätning med nålmikrometer .....	25
4.2.3 Fotografering av korroderade pålar .....	25
4.3 Beräkning av jämn korrosionshastighet baserat på vägning av hela och delar av pålarna .....	27
4.3.1 Beräkning av korrosionshastighet baserat på vägning av hela pålar .....	27
4.3.2 Beräkning av medelkorrosionens fördelning längs pålarna baserat på vägning av påldelar .....	28
4.3.3 Beräkning av korrosionshastighet baserat på mätning med bygelmikrometer .....	28
4.3.4 Beräkning baserat på frätgropsdjup .....	28
<b>5. Resultat .....</b>	<b>30</b>
5.1 Allmänna iakttagelser .....	30
5.1.1 Pålar från Enköping, Ryda .....	30
5.1.2 Pålar från Sollentuna, Rotsunda .....	30
5.1.3 Pålar från Göteborg, Näset .....	30
5.1.4 Pålar från Stockholm, Skå .....	30
5.1.5 Pålar från Linköping, Kolbytte-mon, Övre .....	31
5.1.6 Pålar från Linköping, Kolbytte-mon, Nedre .....	31
5.2 Resultat av massförlustundersökningar .....	31
5.2.1 Resultat av massförlustundersökning av hela pålar .....	31
5.2.2 Resultat av massförlustundersökning av påldelar .....	37
5.3 Resultat av bygelmikrometermätning .....	40
5.4 Resultat av mätning av frätgropsdjup .....	42
5.5 Jämförelse mellan på olika sätt uppmätta korrosionsvärden .....	50
5.6 Foton på korroderade påldelar efter 27 års exponering .....	51
5.7 Jämförelse mellan uppmätt korrosion och jordegenskaper .....	56
<b>6. Resultat från särskilda laboratorieanalyser .....</b>	<b>60</b>
6.1 Inledning .....	60
6.2 Metod .....	60
6.3 Resultat av karakterisering .....	60
6.4 Resultat av geokemisk modellering .....	66
6.6 Slutsatser av särskilda laboratorieanalyser .....	71
<b>7. Diskussion av inverkan av faktorer på korrosion i jord .....</b>	<b>72</b>
7.1 Syretillförsel genom jorden .....	72
7.2 Luftningsceller i jorden .....	73
7.3 Samband mellan korrosionshastighet och jordparametrar .....	75
7.4 Mikrobiell korrosion på kolstål .....	76
7.5 Analys av jordprover och eluat från skaktest .....	77
<b>8. Slutsatser .....</b>	<b>79</b>
8.1 Inträffad korrosion .....	79
8.2 Korrosionens beroende av uppmätningssätt .....	79
8.3 Korrosionens beroende av exponeringstiden .....	80
8.4 Korrosionens beroende av jordens egenskaper .....	80
8.5 Hur utföra korrosionsundersökningar .....	80
<b>9. Referenser .....</b>	<b>84</b>
<i>Bilaga A: Analyser av jord och jordvatten från provningsplatserna .....</i>	<i>87</i>
<i>Bilaga B: Mätning av redoxpotential i fält .....</i>	<i>97</i>
<i>Bilaga C: Mätning av grundvattennivå vid provningsplatserna .....</i>	<i>109</i>
<i>Bilaga D: Bedömningsschema enligt tysk standard DIN 50 929, Del 3 .....</i>	<i>115</i>

## Förord

Under en lång följd av år har Korrosionsinstitutet (KI), numera Swerea KIMAB AB och Statens geotekniska institut (SGI) i samarbete med IVAs Pålkommision/Pålkommisionen och tidigare SJs Geotekniska kontor sökt klarlägga korrosionshastigheterna på stålplåtar i jord och vatten. Detta har resulterat i Pålkommisionens Rapport 93 (1994) och Rapport 98 (2000) med dimensioneringsanvisningar för slagna slanka stålplåtar samt Pålkommisionens Information 2002:1. Nyligen, (2009) har en ny Rapport 105 utkommit från Pålkommisionen, som utgör en senare sammanställning av kunskaper och erfarenheter om korrosion på stålplåtar i jord.

Föreliggande rapport utgör ett andra dokument inom det nya projektet i Swerea KIMAB AB; "Korrosion i jord på stålplåtar och andra bärande konstruktioner – Långtidsprojekt i fält", som syftar till att ta in och utvärdera korrosionen på ett antal stålplåtar och stålstänger, som varit exponerade i svenska naturliga jordar upp till cirka 27 år. Detta projekt finansieras av SBUF, Svenska Kraftnät, Ruukki, Pålkommisionen, Swerea KIMAB AB och Statens geotekniska institut.

Denna rapport inom projektet redovisar resultaten av de korrosionsmätningar, som utförts på krysspålar (100 x 14 mm), som nedslogs 1981 på fem provningsplatser i Sverige och därtill hörande undersökningar av jordens egenskaper. De senaste intagen av plåtar i sand har gjorts 2000 efter cirka 20 års exponering och i lera 2009 och 2010 efter cirka 27 års exponering.

Vid framtagandet av denna rapport har samråd skett med Styrgruppen för projektet: Lillemor Carls-hem, Svenska Kraftnät, Gunnar Holmberg, Skanska Sverige AB och Pålkommisionen samt Harald Ihler, Ruukki Norge AS. Författarna framför härmed ett varmt tack till dåvarande Smedjebackens Valsverks AB, numera Ruukki A/S för att man bidrog med provplåtar 1981. Vidare framförs ett tack till Styrgruppen för de värdefulla synpunkter, som framkommit under arbetet med rapporten.

Författarna  
Stockholm och Linköping i februari 2011

Tor-Gunnar Vinka

Ulf Bergdahl

Göran Camitz

David Bendz

Swerea KIMAB

Statens geotekniska  
Institut

Swerea KIMAB

Statens Geotekniska  
institut

## Sammanfattning

Under 1981 drev Korrosionsinstitutet (numera Swerea KIMAB AB) och Statens geotekniska institut (SGI) ner fem krysspålar 100 x 14 mm på fem olika provstationer i Södra Sverige: Enköping, Sollentuna, Göteborg, Stockholm och Linköping. Provspålar tillhandahölls av dåvarande Smedjebackens Valsverks AB, numera Ruukki A/S. Pålar var 2,5 m långa och drevs ned till cirka 0,5 m under markytan med hjälp av fallhejare eller tryck från en grävmaskin. För att kunna slå eller trycka på pålens övre ände var pålar där försedda med en tryckplatta.

Efter neddrivningen har pålar fått stå i den orörda jorden under cirka 5, 9 och 27 år varefter intag av prover gjorts. På provningsplatserna i Stockholm, Linköping och Enköping gjordes intag också efter cirka 20 år.

I samband med upptagning av pålar utfördes vissa fältmätningar och upptogs jordprover för närmare undersökningar på laboratorium med syftet att klargöra om korrosionens storlek kan härledas till vissa jordegenskaper. Dessa undersökningar omfattade geotekniska och geokemiska bestämningar av olika parametrar. Undersökningarna visade att jordens egenskaper varierade dels mellan de olika provningsplatserna dels med djupet under markytan. Dessutom utfördes grundvattenmätningar och vissa geofysiska mätningar på provningsplatserna såsom bestämning av korrosionspotential och jordresistivitet.

Efter noggrann rengöring av pålar efter upptagning kunde en första mätning av korrosionen utföras genom en noggrann vägning av de hela pålar och jämförelse med ursprungsvikten. Detta ger ett mått på medelavfrätningen som funktion av tiden inklusive korrosionen på tryckplattan.

För att få en uppfattning om hur korrosionen varierade längs pålar utfördes tidigare också uppmätning av pålarnas tvärsnitt med bygelmikrometer och skjutmått. Vid de senaste intagen 2009 och 2010 kapades pålar också i 0,25 m långa delar, vilka också vägdes noggrant. Härigenom erhöles ett mått på tvärsnittets förändring och korrosionshastighetens variation längs pålar.

För att få en uppfattning om förekommande frätgropars djup mättes också de största av dessa på varje del om 0,25 m med en nålmikrometer samt registrerades var de var belägna. Detta ger information om frätgroparnas förekomst och fördelning samt utveckling med tiden. För att få en uppfattning om hur korrosionsangreppen ser ut har rengjorda delar av pålar fotograferats efter 9 och 27 års exponering.

Resultaten av massförlustmätningarna på de hela pålar, som stått i lera på fyra platser visar på en medelkorrosionshastighet på mellan 2,1 och 7,8  $\mu\text{m}/\text{år}$  under de cirka 27 åren. Mätningen av korrosionshastigheten på de 0,25 m långa påldelarna visade på lokala korrosionshastigheter på mellan 2,2 och 18,8  $\mu\text{m}/\text{år}$ . Det största värdet uppmättes på cirka 1,1 m djup på Skå utanför Stockholm medan det minsta erhöles på pålar från Ryda vid Enköping. Man kan således få en viss "midjebildning" på pålar i lera. En jämförelse mellan de uppmätta korrosionshastigheterna visar att dessa är lägre än vad som svarar mot de rostmåner, som rekommenderas i Pålkommisionens Rapport 98. I de flesta fall är medelkorrosionshastigheten mycket lägre än vad som rekommenderas i Rapport 98. En studie av medelkorrosionshastighetens utveckling med tiden tyder på att denna är i det närmaste konstant under den studerade perioden. Den maximala lokala korrosionshastigheten i lera var lägst cirka 30  $\mu\text{m}/\text{år}$  i Enköping och högst cirka 110  $\mu\text{m}/\text{år}$  i Sollentuna efter 9 år. En viss avtagande tendens på gropfrätningshastigheten i lera kan ses efter lång exponeringstid.

Resultaten av massförlustmätningarna på pålar, som stått i sand och grusig sand på Kolbytteomon utanför Linköping visar på en medelkorrosionshastighet på mellan 3,5 och 3,8  $\mu\text{m}/\text{år}$ . Anmärkningsvärda är de stora frätgroparna på pålar i sand över grundvattenytan med en maximal lokal korrosionshastighet på upp till 252  $\mu\text{m}/\text{år}$ .

Försök har också gjorts att med ledning av i litteraturen förekommande metoder för bedömning av jordars korrosivitet bestämma korrosionsriskerna på de olika provningsplatserna. En jämförelse med uppmätta korrosionshastigheter visar att en viss proportionalitet mellan bedömda och uppmätta värden kan erhållas men bedömningarna kan ej ligga till grund för en dimensionering, möjligen för en klassning av olika jordförhållanden efter korrosionsrisk. Resultaten av de särskilda laboratorieanalyserna på jordprover från de olika platserna visar på korrelationer mellan maximal korrosionshastighet

samt redoxpotential, elektrisk konduktivitet, sulfatkoncentration, organisk halt samt löst organiskt kol (DOC) och pH-värden.

# 1. Inledning och syfte

Swerea KIMAB AB (tidigare Korrosionsinstitutet, KI) och Statens geotekniska institut (SGI) har genom en lång följd av år samarbetat för att öka kunskaperna om korrosion på framför allt stålplåtar i jord. Föreliggande rapport utgör resultatet av en del av det fortsatta samarbetet i denna fråga, som påbörjades 2008 och, som syftar till att klarlägga korrosionshastigheterna på långtidsexponerade stålplåtar i jord. Betydelsen av att ha en god kunskap om korrosionens storlek ökar dels beroende på att kraven på olika konstruktioners livslängd ökar, dels beroende på att andelen stålplåtar ökar enligt Pålkommisionens statistik (Pålkommisionen, 2010).

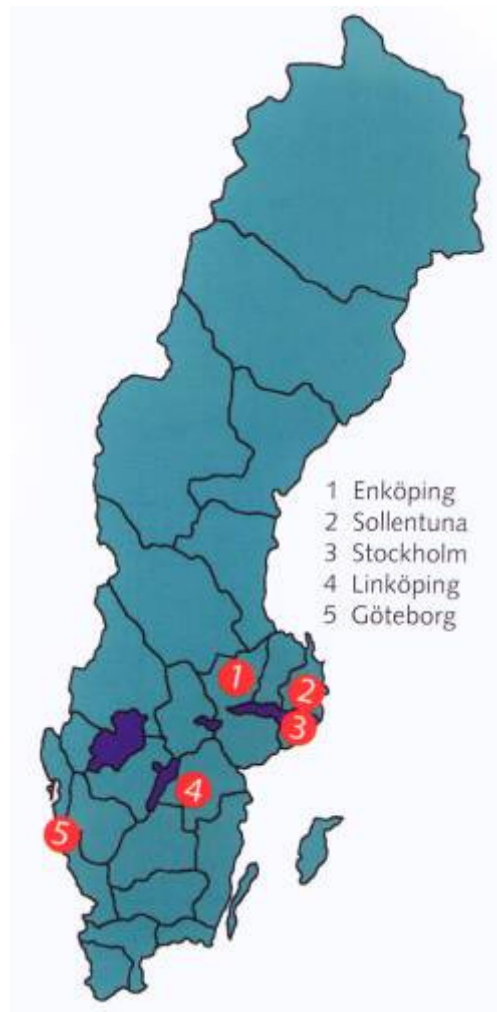
Tidigare mätningar av korrosion på stålplåtar och neddrivna stålstänger till exempel Sandegren (1988), Vinka m.fl. (2002) och Camitz m. fl. (2009) har främst omfattat uppmätning av medelavfrätningen på hela plåtar samt en meter långa stångdelar, Sandegren (1988). Dessutom har gropfrättningsdjupet uppmätts. Vid upptagningen efter nio års exponering utfördes också uppmätning av plåtarnas tvärsnitt med så kallad bygelmikrometer, vilket gav en viss uppfattning om korrosionens fördelning längs plåtarna. För att få en klarare bild av korrosionens fördelning längs plåtarna har därför i föreliggande undersökning plåtarna delats genom sågning i 0,25 m långa delar. Delarnas vikter har noggrant kunnat bestämmas och medelavfrätningen för varje del kunnat beräknas.

Det har länge diskuterats huruvida det kan uppkomma förstärkt korrosion på stålplåtar i området vid grundvattenytan, och om denna korrosion kan bli så kraftig att den kan leda till en utpräglad "midgebildning" på plåtarna och därmed en lokal försvagning av bärförmågan vid grundvattenytan. Det har vidare diskuterats vilka jordegenskaper, som påverkar korrosionshastigheten, och i vilken omfattning. För att klarlägga dessa frågor genomför Swerea KIMAB AB, i samarbete med Statens geotekniska institut, en fältundersökning där massiva valsade stålplåtar långtidsexponeras i jord genom grundvattenytan på fem provningsplatser i södra Sverige: Enköping, Sollentuna, Göteborg, Stockholm och Linköping, **Figur 1.1**. Hittills har plåtar tagits upp för utvärdering av korrosionen efter fem och nio års exponering i jorden samt från tre provningsplatser också efter cirka 20 år. Resultaten från dessa utvärderingar refereras av Camitz m.fl. (2009) .

Man har nu dragit upp och utvärderat ytterligare provplåtar från de fyra provningsplatserna i lera sedan de stått cirka 27 år i jorden. Härmed förfogar man över ett unikt undersökningsmaterial, eftersom det inte genomförts någon liknande undersökning av korrosion på stålplåtar i lera under så lång tid vare sig i Sverige eller utomlands. Dessutom redovisas resultaten från exponeringen under 20 år i sand i Linköping.

Syftet med denna rapport är att redovisa alla de mätningar av korrosionshastigheten på de krysspålar, som drevs ned på fem provningsplatser under 1981 och som vid de nu utförda upptagen stått cirka 20 respektive 27 år i jorden. Försök har också gjorts att på olika sätt bestämma korrosionshastighetens eventuella förändring med tiden och korrosionens fördelning längs plåtarna. Ytterligare ett syfte har varit att söka förklara varför och hur korrosionshastigheten varierar med jordens egenskaper såväl mellan provningsplatserna som längs de enskilda plåtarna. Härför har ett stort antal jordprover tagits upp och analyserats såväl geofysiskt som geokemiskt och geotekniskt.

Resultaten skall också ge ett underlag för att bedöma korrosionshastigheten i olika jordar eller åtminstone för att särskilja enkla och komplexa förhållanden enligt dimensioneringsanvisningarna i Pålkommisionens Rapport 98, Bengtsson m.fl. (2000). Det skulle också vara värdefullt om man kan klarlägga vilka undersökningar, som bör göras vid olika förhållanden enligt Pålkommisionens Rapport 98.



**Figur 1.1** *Provningsplatsernas geografiska lägen i södra Sverige*



## 2. Beskrivning av krysspålar

Stålpålar, som ingår i undersökningen, utgörs av så kallade X-pålar av varmvalsat kolstål enligt SIS 14 13 13 med beteckningen X100 och dimensionen 100 x 14 mm, det vill säga med bredden 100 mm och flänstjockleken 14 mm (nominella mått). Pålarnas längd var cirka 2,5 m exklusive tryckplattan, med undantag för exponeringen i vattenmättad grusig sand i Linköping där pålens längd var cirka 1,5 m.

Pålarna avslutades upptill med en tryckplatta (kallas ibland för skarvplatta) av kolstål med stålsort St 52-3 enligt tysk standard DIN 17 100, men utan bergsspets och dubb. Tryckplattan bestod av 15 mm tjock stålplåt och hade måtten 100 x 100 mm och avfasade hörn, **Tabell 2.1**. Vidare innehöll plattan fyra 14 mm borrhål för skarvning och fäste av dragögla.

Stålpålarna tillhandahölls 1981 av dåvarande Smedjebackens Valsverks AB, Smedjebacken (Broschyr, Smedjebacken, SW-stålpåle Okt 1978). X-pålarna har senare tillverkats av Rautaruukki Profiler AS i Mo i Rana, Norge och bland annat sålts av Rautaruukki (Sverige) AB. Tillverkningen är numera nedlagd. Pålarna hade vid neddrivningen glödskal på metallytan efter tillverkningen. En tabell över den kemiska sammansättningen för påldelar och tryckplatta har sammanställts i **Tabell 2.2**.

**Tabell 2.1** Material och dimensioner för påldel respektive tryckplatta hos X-pålarna.

Parameter	Värde eller beskrivning
<b>Material</b>	<b>Påldel:</b> Kolstål, stål 13 13 enligt svensk standard SIS 14 13 13  <b>Tryckplatta:</b> Kolstål, material St 52-3 enligt tysk standard DIN 17 100
<b>Påldel</b>	
Längd exklusive tryckplatta	cirka 2,5 m med undantag för exponering i vattenmättad grusig sand vid provningsplats Linköping Nedre där längden var cirka 1,5 m
Nominell flänsbredd, mm	100
Nominell flänstjocklek, mm	14
Nominell tvärsnittsarea, mm <sup>2</sup>	2632
Nominell mantelarea per längd hos påldel, m <sup>2</sup> /m	0,383
Nominell massa per längd hos påldel, kg/m	20,6
<b>Tryckplatta</b>	
Form hos tryckplatta	Kvadratisk form (100 x 100 mm) med borttagna hörn och fyra borrhål
Nominell godstjocklek, mm	15
Uppskattad area hos tryckplatta, mm <sup>2</sup>	25447
Uppskattad exponerad area hos tryckplatta, mm <sup>2</sup>	22815

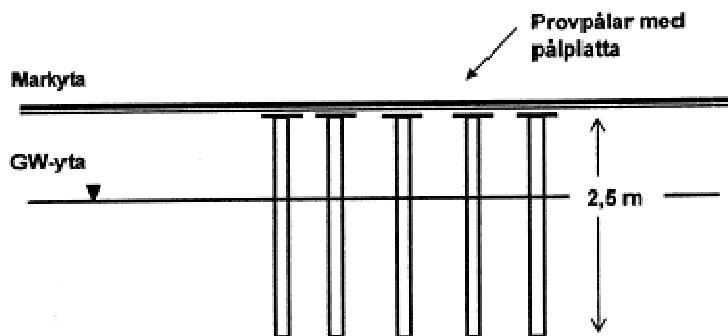
**Tabell 2.2** Kemisk analys av kolstål i påddel respektive tryckplatta hos X-pålar från upptagning 2009.

Grundämne		Halt	
		mass-%	
		Påddel från X-påle	Tryckplatta från X-påle
Analys av påddel och tryckplatta från X-påle (påle nr 24) exponerad i Enköping under 27,2 år			
Analyserat 2009			
Kol	C	0,076	0,197
Mangan	Mn	0,64	1,15
Koppar	Cu	0,23	0,27
Kisel	Si	0,17	0,31
Krom	Cr	0,10	0,09
Nickel	Ni	0,08	0,10
Svavel	S	0,037	0,045
Fosfor	P	0,023	0,010
Kobolt	Co	0,021	0,021
Tenn	Sn	0,021	0,019
Arsenik	As	0,011	0,022
Tantan	Ta	0,011	0,011
Aluminium	Al	0,010	0,002
Molybden	Mo	0,01	0,02
Kväve	N	0,007	0,008
Vanadin	V	0,006	< 0,005
Volfram	W	< 0,01	< 0,01
Niob	Nb	< 0,005	< 0,005
Titan	Ti	< 0,003	< 0,003
Kalcium	Ca	< 0,0005	< 0,0005
Bor	B	< 0,0002	< 0,0002
Järn	Fe	Resterande > 98,5	Resterande > 97,7

Pålarna slogs ned med fallhejare eller trycktes ned i den ostörda jorden med hjälp av en grävmaskin. På varje plats drevs fem pålar ned, vilket medgivit upptagning och utvärdering efter fem olika långa exponeringstider, se **Figur 2.1**. På de fyra provningsplatserna med olika typer av lera står grundvattnen vid pålarnas övre del. På platsen med sand (Linköping) står en serie pålar helt över grundvattnen och en annan serie i grusig sand nästan helt under grundvattnen. Från de fyra provningsplatserna med lera har pålar tagits in och undersökts efter cirka 5, 9 och 27 års exponering. På provningsplatserna i Stockholm, Enköping och Linköping gjordes intag också efter cirka 20 år. Något intag

från provningsplats Linköping efter 27 år har ännu ej gjorts. Denna rapport redovisar resultaten från in-  
tagningarna efter samtliga exponeringsperioder.

Före nedslagning/nedtryckning av pålarna grävdes en cirka 0,5 m djup schakt för att pålarna skulle  
kunna drivas ned helt under markytan i den ostörda jorden. Stålpålarna slogs eller trycktes sedan ned  
vertikalt i jorden från schaktbotten med hjälp av till exempel grävmaskin, **Figur 2.2**. Avståndet från  
markytan till stålpålens tryckplatta kom att variera mellan 0,3 och 0,6 m på de olika provningsplatser-  
na. Efter neddrivning återfylldes och packades jorden över provpålarna och deras lägen utmärktes  
med särskilda märkstolpar.



**Figur 2.1.** På varje provningsplats slogs fem X-pålar intill varandra i den ostörda jorden för senare  
uppdragning och undersökning efter olika långa exponeringstider.



**Figur 2.2** Stålpålar (X-pålar) trycks ned i den ostörda jorden med hjälp av en grävmaskin på prov-  
ningsplats Sollentuna.

För att kunna identifiera pålarna, borrades små hål i en av flänsarna i överkant påle innan de drevs  
ned i marken. Hålen borrades i två rader, en för ental och en för tiotal, enligt en särskild mall. Härige-  
nom kunde pålarnas nummer bestämmas även efter korrosion, upptagning och rengöring.

Vid uppdragningen av provpålarna på varje plats fick först pålhuvudena (tryckplattan) försiktigt grävas fram för att man skulle kunna fästa en dragögla i denna, **Figur 2.3**. Här efter kunde pålarna relativt enkelt dras upp med hjälp av en grävmaskin tack vare den begränsade längden hos pålarna, **Figur 2.4**.



**Figur 2.3.** Förberedelse för uppdragning av X-påle i den blöta gyttjiga leran på Näset utanför Göteborg. Fästans ordning skruvas fast på X-pålens tryckplatta.



**Figur 2.4** Uppdragning av X-påle vid provningsplats Sollentuna efter fem års exponering i lera. Lägga märke till rödrosten på den övre delen av pålen och den mörka nedre delen färgad av gyttjig lera.

### 3. Provningsplatser och exponeringstider

Stålpålarna exponerades på fem olika provningsplatser i Sverige, som valts för att representera typiska svenska jordarter där slagning av stålpålar kan bli aktuellt det vill säga främst lerjord, men även lös till halvfast friktionsjord.

I samband med de olika intagen av krysspålar har det tagits prover på jorden för olika laboratorieundersökningar. Resultaten av de huvudsakliga laboratorieundersökningarna har sammanställts i **Tabell 3.2** nedan medan ytterligare resultat visas i **Bilaga A**. Vidare har vissa geofysiska undersökningar utförts på provningsplatserna såsom mätning av korrosionspotential för krysspålar och mätning av jordens resistivitet. Vidare har grundvattenståndet uppmätts i grundvattenrör med filterspetsar i samband med upptagning av provpålarna, **Tabell 3.1**.

Jordens resistivitet har dels mätts i fält med Wenners fyr-elektrodmeter med elektroderna placerade i rad cirka 5 – 10 m från pålarna och med elektrodavstånd varierande från 0,25 till 4,0 m med mätning varje 0,25 m, dels på laboratoriet på upptagna prover med box-metoden (Camitz, 1980). Exempel på resistivitetsmätningar i fält visas i **Figur 3.1 a** och **b**. Resultaten från mätningarna i fält och på laboratorium, **Figur 3.2 a** och **b**, visar att resistiviteten är högst närmast markytan, speciellt på sommaren, 30 – 80  $\Omega\cdot\text{m}$  och lägre 8 – 10  $\Omega\cdot\text{m}$  på 3 – 4 m djup under markytan, vilket bedöms naturligt med hänsyn till vattenkvotens förändring med djupet.

a)



b)

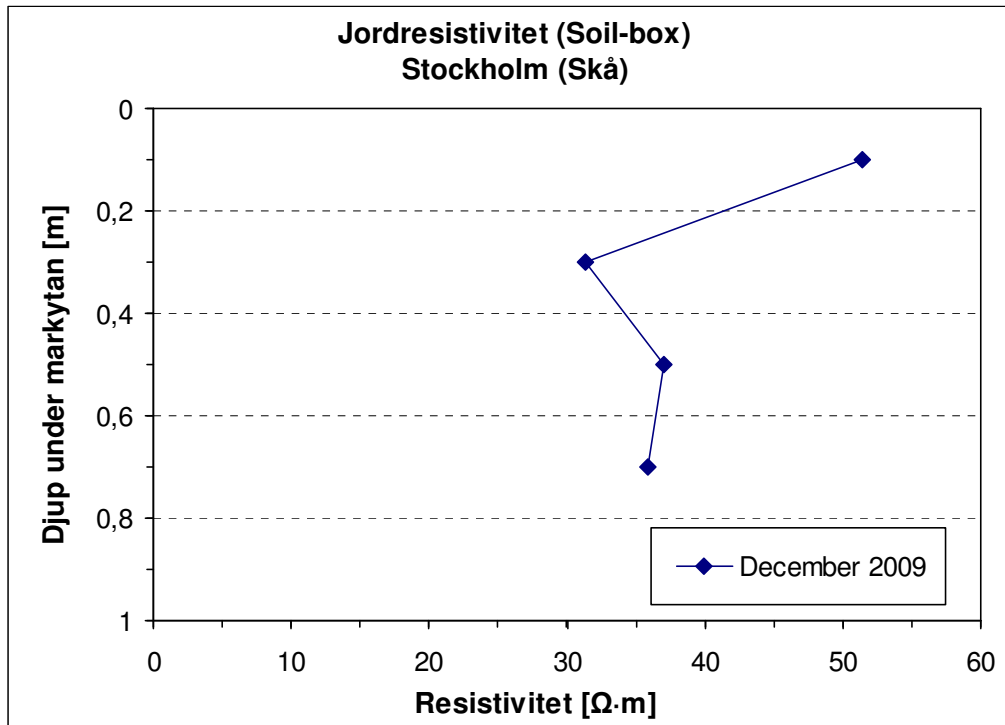


**Figur 3.1** Mätning av jordresistivitet i naturligt lagrad jord med Wenners 4-elektrodmätning på provningsplats Stockholm, Skå.

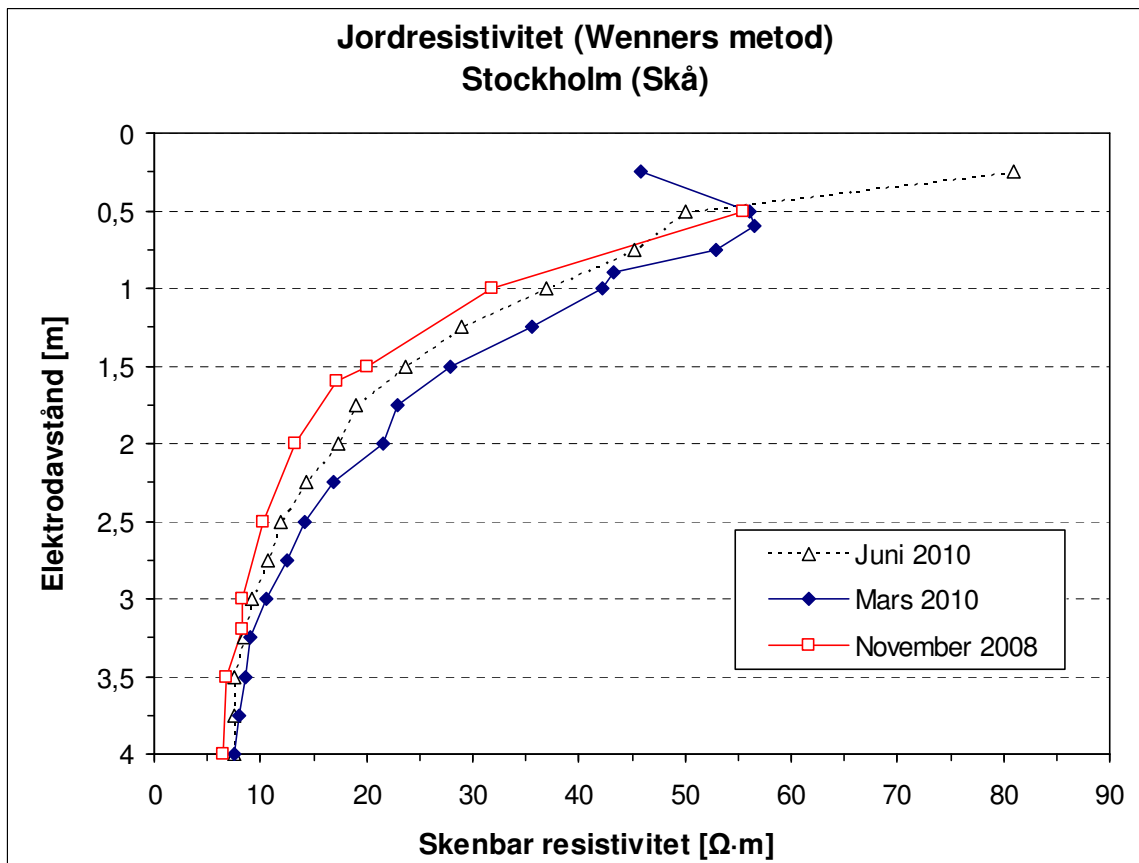
**a)** Mätning av jordresistivitet. Utrustning som krävs är fyra mätelektroder, en fyrpolig resistansmätare, måttband samt mätsladdar. Vid mätning med Wenners 4-elektrodmätning är avståndet lika mellan mätelektroderna. Elektroderna av förzinkat stål skruvas ned för att få god kontakt med jorden.

**b)** Fyrpolig resistansmätare (kallas ibland för jordmegger). I detta fall var den uppmätta resistansen  $5,07 \Omega$  vid elektroavståndet  $1,0 \text{ m}$  (avståndet mellan mätelektroderna var  $1,0 \text{ m}$ ).

a)



b)



**Figur 3.2** Resistivitet uppmätt vid olika tidpunkter hos naturligt lagrad jord, som inte varit uppgrävd på provningsplats Stockholm (Skå).

a) Resistivitet mätt med box-metoden (Soil-box)

b) Resistivitet mätt med Wenners metod vid olika tidpunkter.

Försök har också gjorts att mäta jordens redoxpotential i fält på Skå i Stockholm och i Sollentuna enligt SS-ISO 11 271, se **Bilaga B**. Metoden fick dock överges eftersom resultaten visade sig bero på så många utförandefaktorer.

Pålarnas korrosionspotential mättes relativt en mättad Cu/CuSO<sub>4</sub>-elektrod enligt Bader (1972), som placerades i markytan på avståndet cirka 1 – 2 m från pålarna, **Figur 3.3**. Principen visas i **Figur 3.3**, som dock visar motsvarande mätningar på nedgrävda plattstänger.

Jordprover har tidigare upptagits från icke omgrävd jord på två olika nivåer (0,7 respektive 1,7 m under markytan) i samband med uppdragning av pålarna. Vid det senaste intaget har ytterligare provtagning utförts i samband med uppdragning av pålarna. Denna provtagning har utförts på djup mellan 0,5 och 0,75 m under markytan, där korrosionen bedömts vara störst. På dessa nivåer har dessutom tagits prov med så kallad ytprovtagare, som ger Ø 50 mm jordprov i plasthylsor för analys.

Laboratorieundersökningarna av de nu upptagna jordproverna har omfattat följande analyser:

- Jordartsbenämning efter okulär bedömning enligt Karlsson och Hansbo (1992).
- Bestämning av vattenkvot enligt svensk standard SS-ISO 11465 (1995).
- Bestämning av organisk halt enligt svensk standard SS 02 71 07 (1990).
- Bestämning pH-värdet i jord som pH(H<sub>2</sub>O) enligt svensk standard SS-ISO 10390:2007.
- Bestämning av jordens resistivitet med soil-box (box-metoden) enligt Camitz (1980).
- Bestämning av jordens kloridhalt enligt svensk standard SS-EN ISO 10304-1:2009.
- Bestämning av jordens sulfathalt dels som vattenlösligt sulfat, dels som syralösligt sulfat enligt svensk standard SS-ISO 10304-1:2007.

Någon analys av jordens sulfid- eller karbonathalt har ej utförts vid de senaste undersökningarna dels beroende på att metoden för bestämning av sulfidhalt avvecklats vid SGI eftersom den visat sig kunna vara hälsovådlig dels beroende på att man bedömt att förekomsten av karbonater på de aktuella platserna är mycket liten.

För att kartera de lokala geokemiska förhållandena och för att kunna utvärdera orsakerna till de uppmätta korrosionshastigheterna på de olika provningsplatserna har porvattnet i marken analyserats med de metoder, som redovisats ovan. Eftersom någon provtagning av porvattnet ej kunnat göras på grund av svårigheten att ta vattenprov i täta jordar såsom lera har porvattnets sammansättning i fält simulerats genom skaktest på delprover av upptagna jordprover under 24 timmar. Efter filtrering har bland annat provets pH-värde, redoxpotential och konduktivitet bestämts på de två delproverna liksom den kemiska sammansättningen.

Undersökningarna visar att jordarna utgörs av lera (Enköping, glacial lera och Sollentuna, postglacial något gyttjig lera), postglacial gyttjig lera (Göteborg och Stockholm) och sand (glacial isälvsavlagring) i Linköping. Den gyttjiga leran i Göteborg har avsatts i salt vatten (saltvattenssediment), medan leran i Stockholm har avsatts i bräckt vatten (brackvattenssediment). Kloridhalten i jorden vid provningsplatserna är högst i den marina leran i Göteborg med mycket hög kloridhalt på djupet cirka 1,5 m och därunder.

Vid provningsplatsen i Linköping (sand respektive grusig sand) har stålpålar slagits ned – över och under grundvattenytan – på närliggande platser på cirka 100 m avstånd från varandra. Exponeringen i sand, Linköping Övre, sker således i den omättade, dränerade zonen över grundvattenytan, medan exponeringen i grusig sand, Linköping Nedre, sker på botten av den nedlagda grustäkten i den vattenmättade zonen under grundvattenytan, som ligger cirka 0,2 m under schaktbotten.



a)



b)



**Figur 3.3** Mätning av korrosionspotential hos plattstång av kolstål i omgrävd jord på provningsplats Göteborg. Med korrosionspotential menas potentialskillnaden (spänningen) mellan en korroderande metall och en referenselektrod.

- a) Mätning av korrosionspotential. Utrustning, som krävs, är en höghöglig voltmeter, en referenselektrod (i jord används en mättad koppar/kopparsulfatelektrod), mätspets samt mätsladdar. I övre vänstra hörnet av bilden syns den röda referenselektroden med vit topp.
- b) Det krävs god elektrisk kontakt mellan mätobjektet (plattstången i detta fall) och en mätspets ansluten till voltmeteren vid mätning av korrosionspotentialen. En metallren mätyta har skrapats fram och i detta fall var korrosionspotentialen  $-610$  mV relativt den mättade koppar/kopparsulfatelektroden.

Mätning av grundvattennivån på provningsplatserna har utförts i rör med filterspetsar, **Figur 3.4** och **Tabell 3.1**. Vid provningsplatserna Enköping, Sollentuna och Stockholm varierar grundvattennivån med årstiden. Jämför **Bilaga C**, som redovisar långtidsmätningar för dessa platser. I Enköping varierade grundvattenståndet mellan cirka 0,5 och 1,4 m under markytan, medan den i Sollentuna varierade mellan 0 och 0,75 m under markytan. I Stockholm på Skå varierade grundvattennivån från 0,3 till 1,4 m under markytan. Detta innebär att provpålarna på dessa platser tidvis legat helt under grundvattenytan och tidvis stuckit upp 0,25 – 1,0 m över densamma.

Jorden på provningsplatserna i lera kan också vara vattenmättad från pälens överyta genom kapillär uppsugning från grundvattenytan, dock kan denna effekt försvinna under sommaren då den så kallade torrskorpan spricker upp. Från djupet cirka 1,5 m och nedåt är jorden alltid vattenmättad vid provningsplatserna i lerjord. Vid provningsplatsen i Linköping Övre finns grundvattenytan på 9,5 – 10,2 m djup under ursprunglig markyta. Exponeringen i sand, Linköping Övre, sker således i den omättade, dränerade zonen över grundvattenytan, medan exponeringen i grusig sand, Linköping Nedre, sker i botten av den nedlagda grustäkten i den vattenmättade zonen under grundvattenytan, som ligger cirka 0,2 m under schaktbotten.



**Figur 3.4** Mätning av grundvattennivå i naturligt lagrad jord på provningsplats Stockholm, Skå. Mätningen sker i rör med filterspets. Filterspetsen trycks ned med hjälp av förzinkade stålrör. Filterspetsen är förbunden med en plastslang, som utgör stig- och mätrör för grundvattnet. Avläsning av vattennivån i plastslangen utförs med en elektrisk dubbelledare (vit tunn kabel) kopplad till ett elektriskt avläsningsinstrument. Dubbelledaren sänks ned i slangen och ger utslag på instrumentet när ledaren når vattenytan. Djupet mäts på den vita sladden.

**Tabell 3.1** Grundvattennivåer vid provningsplatserna vid intag av stålplåtar och plattstänger. Grundvattennivåer mättes dels i naturligt lagrad jord, som inte varit omgrävd, dels i omgrävd jord.

Provningsplats	Provställe	Mätförfarande	Djup till filterspets m under markytan	Datum för mätning	Grundvattennivå m under markytan
Enköping	Naturligt lagrad jord	Filterspets	1,5	4 dec 2008	0,47
			1,0		0,21
	Omgrävd jord	Filterspets	2,0	4 dec 2008	0,08
			1,3		0
		Öppet rör	–		0,10
	Sollentuna	Naturligt lagrad jord	Filterspets	2,55	20 nov 2008
2,0				0,32	
Omgrävd jord		Filterspets	2,0	20 nov 2008	0,26
Göteborg	Omgrävd jord	Öppet rör	–	23 feb 2009	0,42
Stockholm	Naturligt lagrad jord	Filterspets	2,95	19 nov 2008	0,51
			2,0		0,40
	Omgrävd jord	Filterspets	2,5	19 nov 2008	0,39
			1,5		0,33

Jordförhållandena och den huvudsakliga kemiska och fysikaliska jordkaraktärstiken på provningsplatserna har sammanställts i **Tabell 3.2**.

**Tabell 3.2.** Jordens huvudsakliga karaktär på provningsplatserna. Olikheterna i redovisade värden beror delvis på att jordanalyser har gjorts på prover tagna från olika djup. Undersökningar från 1986.

Provningsplats	Jordart	Vattenkvot mass-% av torr jord	Resistivitet $\Omega$ m	pH-värde pH(H <sub>2</sub> O)	Kloridhalt mg Cl <sup>-</sup> /kg torr jord	Organisk halt mass- % av torr jord
Enköping Ryda	Glacial lera	31 – 32	32,9 – 34,5	6,6 – 6,9	20	0,7 – 1,6
Sollentuna Rotsunda	Postglacial lera	41 – 48	11,7 – 37,7	4,3 – 6,3	22 – 34	2,2 – 2,9
Göteborg Näset	Gyttjig lera	41 – 54	3,5 – 17,1	4,4 – 7,4	170 – 2200	3,7 – 4,6
Stockholm Skå	Gyttjig lera	43 – 51	10,5 – 52,2	4,2 – 5,4	30 – 140 <sup>*)</sup>	2,8 – 4,5
Linköping Kolbytte- mon Övre	Dränerad sand	7	2620	5,7	20	0,5
Linköping Kolbytte- mon Nedre	Vattenmättad grusig sand	13	179	8,0	20	0,2

<sup>\*)</sup> Den delvis höga kloridhalten på provningsplats Skå utanför Stockholm kan förklaras med att leran dels har avsatts i bräckt vatten (brackvattensediment), dels med många års ogräsbekämpning på platsen med herbiciden "Klorex". Huvudbeståndsdelen i Klorex var natriumklorat NaClO<sub>4</sub>.

Nya undersökningsresultat, ny tabell från 2008 har sammanställts i **Tabell 3.3**. Denna innehåller dock inga uppgifter från Kolbytte-mon i Linköping där några ytterligare provtagningar ännu inte utförts.

**Tabell 3.3** Analyser av naturligt lagrad jord och omgrävd jord på olika provningsplatser. Provtagning under hösten 2008.

Parameter	Provningsplats									
	Enköping		Sollentuna		Göteborg övre nivå		Göteborg nedre nivå		Stockholm	
	Icke om-grävd jord <sup>1</sup>	Om-grävd jord	Icke om-grävd jord <sup>1</sup>	Om-grävd jord	Icke om-grävd jord <sup>1</sup>	Om-grävd jord	Icke om-grävd jord <sup>1</sup>	Om-grävd jord	Icke om-grävd jord <sup>1</sup>	Om-grävd jord
	Djup <sup>2</sup> 0,55 – 0,75 m	Djup <sup>2</sup> 0,70 – 0,90 m	Djup <sup>2</sup> 0,50 – 0,70 m	Djup <sup>2</sup> 0,50 – 0,70 m	Djup <sup>2</sup> 0,50 – 0,70 m	Djup <sup>2</sup> 0,50 – 0,70 m	Djup <sup>2</sup> 1,20 – 1,40 m	Djup <sup>2</sup> 1,60 – 1,80 m	Djup <sup>2</sup> 0,50 – 0,70 m	Djup <sup>2</sup> 0,60 – 0,80 m
<b>Jordart</b> okulär bedömning	Le vx	Le vx	gy Le vx	gy Le vx	gy Le vx	gy Le vx	le Gy vx	le Gy sk	gy Le vx	gy Le vx
<b>Vattenkvot</b> mass-% av torr jord	34	29	85	62	114	106	80	125	92	73
<b>Vattenhalt</b> mass-% av fuktig jord	25	22	46	38	53	51	44	56	48	42
<b>pH(H<sub>2</sub>O)</b>	7,1	7,5	4,5	4,5	5,2	5,2	5,4	8,0	4,1	3,8
<b>Resistivitet</b> soil-box naturfuktig jord Ω·m	37	40	80	115	20,5	8,3	30	3,9	60	41
<b>Organisk halt</b> mass-% av torr jord	0,7	0,6	2,2	3,5	4,4	4,3	5,9	6,4	5,5	2,5
<b>Kloridhalt<sup>3</sup></b> mg Cl <sup>-</sup> /kg torr jord	<1000	<1000	<1000	<1000	325	111	917	3270	<1000	<1000
<b>Sulfathalt</b> vattenlöslig mg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /kg torr jord	46	19	400	290	280	121	5990	3050	540	1010
<b>Sulfathalt</b> syralöslig mg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /kg torr jord	130	63	5300	2300	2400	1300	6700	6600	3100	6700

- 1) Naturligt lagrad jord, som inte varit omgrävd.
- 2) Djup under markytan.
- 3) Det bör noteras att metoden för bestämning av jordens kloridhalt ej haft tillfredsställande upplösning.

De neddrivna stålplåarna har exponerats i jorden på de olika provningsplatserna under cirka 5, 9, 20 och 27 år. På provningsplatserna i Sollentuna och Göteborg gjordes dock inget upptag efter 20 år och på Kolbytte-mon i Linköping har ännu inget intag gjorts efter 27 år. Exponeringstiderna för de olika intagen av prover ges för respektive plats i **Tabell 3.4**

**Tabell 3.4.** Exponeringstider i år för de olika intagen av X-plåar.

Provningsplats	Exponeringstid			
	år			
	Intag 1	Intag 2	Intag 3	Intag 4
Enköping, Ryda lera	5,03	9,16	20,00	27,22
Sollentuna, Rotsunda lera	4,76	8,89	–	26,93
Göteborg, Näset gyttjig lera	5,08	9,26	–	27,44
Stockholm, Skå gyttjig lera	5,03	9,26	20,03	27,19
Linköping, Kolbytte-mon sand över grundvattenytan	5,12	9,30	20,06	–
Linköping, Kolbytte-mon vattenmättad grusig sand under grundvattenytan	5,31	9,30	20,06	–

## 4. Uppmätning och beräkning av inträffad korrosion

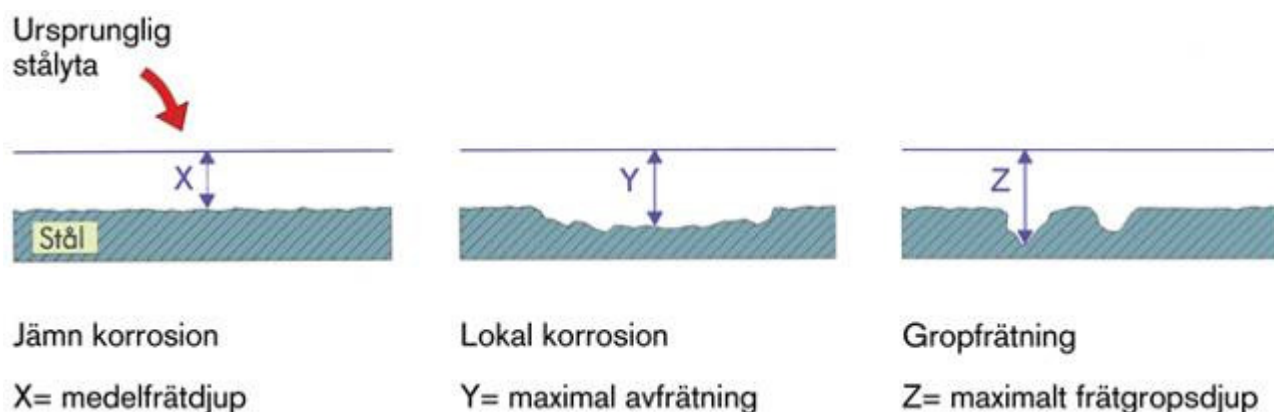
Korrosionen kan indelas i jämn och lokal korrosion samt gropfrätning. Den jämna korrosionen avser den genomsnittliga avfrätningen på stålet och antas ske med ungefär samma hastighet på stora delar av pålytan, medan lokal korrosion är lokaliserad till en del eller vissa delar av ytan och sker med större hastighet inom begränsade områden på metallytan. Gropfrätning är lokal korrosion, som är koncentrerad till vissa punkter på ytan och resulterar i åtskilda frätgropar på stålytan, se **Figur 4.1**. Gropfrätning, som också ibland kallas för punktfrätning eller punktkorrosion, leder till ett angrepp med ringa utbredning men ofta med förhållandevis stort djup.

Det är också viktigt att man kan klargöra om det sker kraftigare korrosion på en viss större del av en påle, som kan ge en "midjebildning", som skulle kunna påverka pålens bärförmåga genom till exempel knäckning i lös jord.

Jämn korrosionshastighet bestäms genom massförlustbestämning där provföremålet vägs dels före och dels efter exponeringen sedan korrosionsprodukterna avlägsnats. Korrosionshastigheten avseende massminskning (massförlust) per exponerad area och exponeringstid brukar anges i enheten ( $\text{g/m}^2\cdot\text{år}$ ), som sedan räknas om till medelavfrätning per tidsenhet i enheten  $\mu\text{m}/\text{år}$  ( $1 \mu\text{m} = 0,001 \text{ mm}$ ). Medelavfrätningen är alltså föremålets massminskning omräknad till utbredd avverkning av hela föremålet per tidsenhet. I detta fall är tryckplattan inkluderad i medelavfrätningen. Vid utvärdering av den lokala korrosionen och gropfrätningen mättes djupet på de avfräta ytorna med nålmikrometer. Pålen indelades i 0,25 m långa segment och det största frättdjupet på varje del uppmättes. Den lokala korrosionshastigheten i enheten  $\mu\text{m}/\text{år}$  erhöles genom att dividera frättdjupet med exponeringstiden samt lägga till den uppmätta medelavfrätningen.

Efter det att rosten hade avlägsnats bestämdes tvärsnittsarean hos pålarna för de mest och minst angripna tvärsnitten längs pålarna för att se om det fanns några tendenser till så kallad midjebildning på pålarna. I vissa tvärsnitt mättes tjockleken hos flänsarna efter 5 och 9 års exponering i 16 punkter med bygelmikrometer och bredden  $b_1$  och  $b_2$  med skjutmått, **Figur 4.2**. Tvärsnittsarean för de mest och minst korroderade tvärsnitten jämfördes sinsemellan och areaminskningen för det mest angripna tvärsnittet beräknades och angavs i procent av det minst korroderade tvärsnittet. Pålarnas exakta ursprungliga dimensioner var inte kända, eftersom verkliga dimensioner hos en ny påle avviker bland annat av valsningstekniska skäl något från de nominella. Areaminskningen kunde på grund härav inte beräknas på basis av ursprungliga dimensioner.

För att få ett bättre grepp om den ovan nämnda risken för "midjebildning" kapades pålarna av efter det senaste upptaget (efter 27 år) i 0,25 m långa bitar sedan tryckplattan skurits bort varefter den jämna korrosionen på varje del kunde bestämmas genom noggrann vägning. Spillet från kapningen beräknat som skillnaden mellan pålens totalvikt och den sammanlagda vikten av påldelarna, har sedan fördelats lika mellan påldelarna inklusive tryckplattan, som först kapats bort.



**Figur 4.1.** Olika former av korrosionsangrepp på kolstål.

## 4.1 Rengöring och vägning av pålarna

Krysspålarna har efter fem och nio års exponering rengjorts på SGI genom tvättning och noggrann manuell stålborstning. Efter 20 års exponering rengjordes pålarna efter grovrengöring på Korrosionsinstitutet med högtrycksspruta med tillsats av kvartssand. Efter 27 års exponering har pålarna rengjorts genom grovrengöring på Swerea KIMAB AB samt därefter torrblästring med olivinsand vid Blästrings AB i Barkarby.

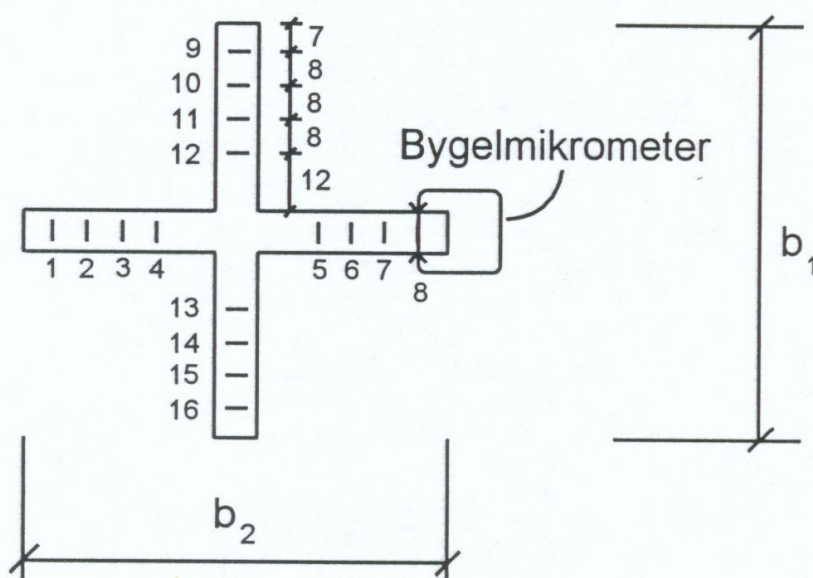
Krysspålarna vägdes efter fem och nio års exponering med den balansvåg, som konstruerades inför vägningen av samma pålar innan de drevs ned i marken. Mellanskillnaden i vikt mellan den stålpåle, som vägs och den fasta vikt, som sitter på balansvågens motstående hävarm uppmättes med hjälp av en elektrisk våg med mätområde 0 – 8 kg och mätnoggrannhet 0,1 g, som användes vid den första vägningen före neddrivning av pålarna 1981. Efter 20 års exponering har pålarna från Enköping, Stockholm och Linköping vägts på Korrosionsinstitutet.

Efter 27 års exponering har först hela pålarna inklusive tryckplattan vägts på en våg med en mätnoggrannhet av 0,5 g på Swerea KIMAB AB. Efter kapning har de 0,25 m långa påldelarna vägts med stor noggrannhet.

## 4.2 Mätning med bygelmikrometer och nålmikrometer samt fotografering

### 4.2.1 Mätning med bygelmikrometer

Skillnaden i avfrätning mellan olika snitt kan bestämmas om flänsarnas tjocklek uppmäts på olika avstånd från pålcentrum tillsammans med flänsbredden, se **Figur 4.2**. Flänstjockleken  $a$  och flänsbredden  $b$  mättes efter fem och nio års exponering för de två snitt längs pålarna där avfrätningen bedömdes vara störst respektive minst. Dessutom mättes den på det mest avfrätta stället på varje halvmeter respektive meter för sträckan 0 – 0,5 m, 0,5 – 1,5 m och 1,5 – 2,5 m. Påle nr 5, från Kolbytteomon övre, mättes dock för varje halvmeter, det vill säga 0 – 0,5 m, 0,5 – 1,0 m och så vidare.

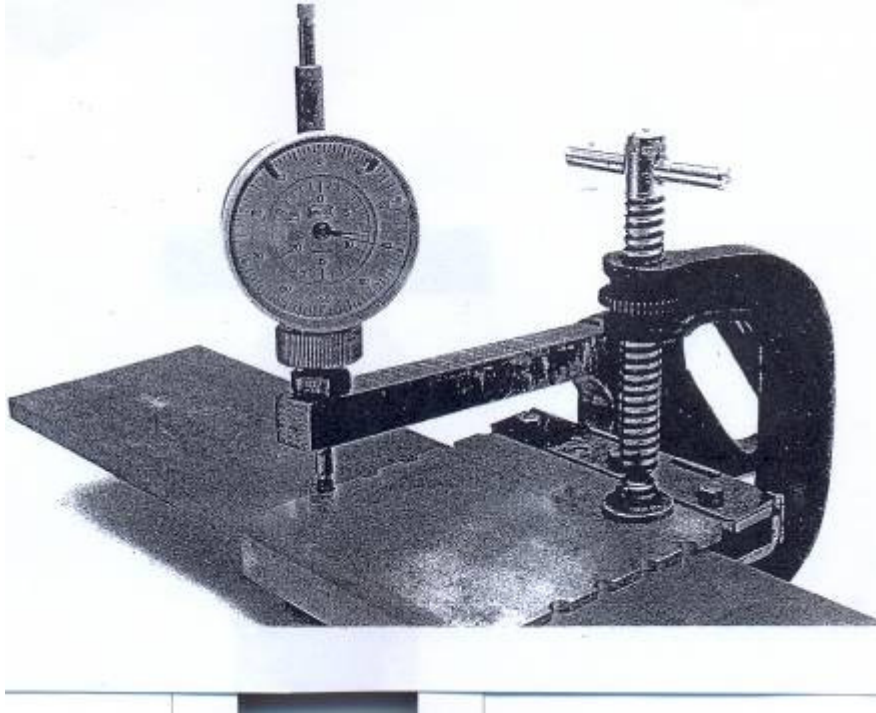


**Figur 4.2** De punkter i vilka flänstjockleken  $a$  mättes med bygelmikrometer. Flänsbredden  $b$  mättes med skjutmått.

Flänstjockleken  $a$  uppmättes för en eller flera flänsar på olika ställen längs pålarna innan det bestämdes var inom varje delområde avfrätningen varit störst samt var längs pålarna avfrätningen varit minst.



Där mättes  $a$  i alla 16 punkterna med mall i princip enligt **Figur 4.3**. Bredden på flänsarna uppmättes med skjutmått.



**Figur 4.3.** Principbild visande tjockleksmätning med mall och bygelmikrometer.

#### 4.2.2 Mätning med nålmikrometer

Frätgropsdjup har uppmätts med en nålmikrometer för alla de pålar, som exponerats i 5, 9, 20 och 27 år. Pålarna delades in i 25 cm långa sektioner och lokalt uppmättes djupet på korroderade ytor samt den djupaste frätgropen inom varje delområde.

#### 4.2.3 Fotografering av korroderade pålar

För att få en uppfattning om hur korrosionsangreppen på pålarna ser ut och fördelas längs pålarna har de med hänsyn till korrosionen mest intressanta delarna av krysspålarna fotograferats. Det rörde sig i de flesta fall om de översta 0,1 – 0,6 m av pålarna, som kunde uppvisa de mest intressanta frätgropsangreppen. På pålen från Kolbyttomon Övre kunde dock intressanta frätgropar också noteras på 1,3 – 1,4 m djup under tryckplattan. Exempel på foton av pålar efter nio års exponering på olika provningsplatser visas i **Figur 4.4 – 4.6**. **Figur 4.4** visar del av pålen från Kolbyttomon, Övre där det största frätgropsdjupet 2,3 mm uppmättes. **Figur 4.5** visar del av pålen från Stockholm, Skå där den största medelavfrätningen uppmätts tillsammans med upp till 0,8 mm frätgropsdjup. **Figur 4.6** visar del av den minst korroderade pålen från Linköping, Kolbyttomon, Nedre där korrosionen var jämn och med små grunda frätgropar. Foton på korroderade påldelar efter 27 års exponering i lera redovisas under **Avsnitt 5.6**.



**Figur 4.4** Påle exponerad 9 år i sand över grundvattenytan på provningsplats Linköping, Kolbytte-  
mon, Övre. Lokala korrosionsangrepp med många förhållandevis djupa frätgropar i posi-  
tion 1,15 – 1,4 m under tryckplattan på pålens övre ände. Den djupaste frätgropen är 2,3  
mm.



**Figur 4.5.** Påle exponerad 9 år i gyttjig lera på provningsplats Stockholm, Skå. Angreppens position:  
0,3 – 0,6 m under tryckplattan på pålens övre ände. Jämnt rostangrepp med en del loka-  
la, djupare angrepp i form av frätgropar. Maximalt frätgropsdjup: 0,8 mm.



**Figur 4.6.** Påle exponerad 9 år i vattenmättad grusig sand under grundvattenytan på provningsplats Linköping, Kolbytte-mon, Nedre. Angreppens position: 0,1 – 0,25 m under tryckplattan på pålens övre ände. Jämn avrostning med små och grunda frätgropar. Maximalt frätgropsdjup: 0,3 mm.

### 4.3 Beräkning av jämn korrosionshastighet baserat på vägning av hela och delar av pålarna

#### 4.3.1 Beräkning av korrosionshastighet baserat på vägning av hela pålar

Då pålarna vägts och deras massförlust bestämts efter de olika upptagningarna kunde korrosionshastigheten beräknas efter olika exponeringstider. Korrosionshastigheten  $v$  uttryckt i enheten  $\text{g/m}^2 \cdot \text{år}$  beräknas enligt

$$v = \frac{\Delta m}{A \cdot t}$$

där  $\Delta m$  = massförlust, g  
 $A$  = exponerad area,  $\text{m}^2$   
 $T$  = exponeringstid, år

Pålarnas exponerade area beräknades som

$$A = 0,025 + 0,383 L$$

där  $L$  = pålarnas längd, tryckplattan oräknad, m

Korrosionshastigheten  $w$  uttryckt som medelavfrätning i enheten  $\mu\text{m}/\text{år}$  beräknades enligt:

$$w = \frac{1000 \cdot v}{\rho}$$

där  $v$  = korrosionshastighet,  $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{år}$   
 $\rho$  = stålets densitet,  $7800 \text{ kg}/\text{m}^3$

#### 4.3.2 Beräkning av medelkorrosionens fördelning längs pålarna baserat på vägning av pådelar

För att beräkna korrosionshastigheten på de kapade pådelarna har man här utgått från pålarnas ursprungliga tvärsnitt på  $2778 \text{ mm}^2$  enligt **Avsnitt 5.3** och den uppmätta längden på pådelen och stålets densitet  $7800 \text{ kg}/\text{m}^3$ , vilket ger den ursprungliga vikten på pådelen. Denna jämförs med den kapade pådelens vikt efter korrigerig för spånförluster vid kapningen, vilket ger en massförlust på den aktuella pådelen, som kan omräknas till en medelkorrosionshastighet på den aktuella pådelen. Resultaten redovisas i **Avsnitt 5.2.2**.

#### 4.3.3 Beräkning av korrosionshastighet baserat på mätning med bygelmikrometer

Vid beräkningarna av flänsarnas genomsnittliga tjocklek togs hänsyn till att mätpunkterna hade olika c-avstånd från flänskanterna enligt **Figur 4.2**

$$a_{medel}^{1-8} = \frac{11}{100} (a_1 + a_8) + \frac{8}{100} (a_2 + a_3 + a_6 + a_7) + \frac{23}{100} (a_4 + a_5)$$

På samma sätt beräknades  $a_{medel}^{9-16}$

Krysspålsens tvärsnittsarea  $A$  beräknades sedan enligt:

$$A = a_{medel}^{1-8} \cdot b_2 + a_{medel}^{9-16} \cdot b_1 - \frac{a_4 + a_5}{2} \cdot \frac{a_{12} + a_{13}}{2} + 28$$

där  $a_1 - a_{16}$  är uppmätta flänstjocklekar i mm enligt **Figur 4.2**

$b_1$  och  $b_2$  = flänsbredder enligt **Figur 4.2**

28 = är effekten av de fyra innerhörnens rundning i  $\text{mm}^2$

Resultaten av bygelmikrometermätningarna redovisas i **Avsnitt 5.3**.

#### 4.3.4 Beräkning baserat på frätgropsdjup

Då man mäter djupet på en lokal avfrätning eller en frätgrop med en nålmikrometer får man ett värde på djupet i förhållande till den redan angripna omgivande ytan. För att få reda på hur djupt en frätgrop grävt sig in i godset från ursprunglig yta, beräknar man den maximala lokala korrosionen i  $\mu\text{m}$  enligt följande, jfr **Figur 4.1**:

$$\text{Maximal lokal korrosion} = \text{uppmätt frätgropsdjup} + \text{medelfrättdjup}$$

Maximal lokal korrosion = uppmätt frätgropsdjup +  $w \cdot t$

där  $w$  = korrosionshastigheten (medelavfrätningen),  $\mu\text{m}/\text{år}$   
 $t$  = exponeringstid, år  
 $w \cdot t$  = pålens medelfrättdjup,  $\mu\text{m}$

Den maximala lokala korrosionshastigheten i  $\mu\text{m}/\text{år}$  fås genom att dividera maximala lokala korrosionen med exponeringstiden.

Resultaten av mätningarna av frätgropsdjup redovisas i **Avsnitt 5.4**.

## 5. Resultat

### 5.1 Allmänna iakttagelser

I samband med mätningen av inträffad korrosion har en allmän bedömning av korrosionen på pålarna gjorts beträffande korrosionens art och läge på pålarna. Dessa allmänna noteringar redovisas nedan under **Avsnitt 5.1.1 till 5.1.6**. Jämför även med foton i **Figur 4.4 till 4.6** samt **Figur 5.11 till 5.14**.

Korrosionen på stålpålarna har nu utvärderats efter cirka 5, 9 och 27 års exponering samt för tre platser även efter 20 år. Vid uppdragning av pålarna efter nio års exponering var pålarna i lerjord rödrosiga längst upp på pålen 0,15 – 0,4 m från tryckplattan, den nedre delen av pålen var svartrostig, **Figur 2.4**. Hela pålen från den omättade sanden i Linköping var rödrosig, medan pålen i vattenmättad grusig sand var helt svartrostig. Rödros består av järn(III)oxidhydroxid, goethit  $\alpha$ -FeOOH och lepidokrokit  $\gamma$ -FeOOH och svartrost av järn(II,III)oxid, magnetit  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

#### 5.1.1 Pålar från Enköping, Ryda

Påle 21 från Enköping uppvisade efter cirka fem års exponering endast en jämn avfrätning. Inga frätgropar kunde mätas upp. Efter cirka 27 års exponering kunde konstateras att den största korrosionshastigheten uppmätts på 1,4 m djup under markytan medan den lägsta uppmättes på 2,1 m djup. Djupet till platsen för den största lokala korrosionshastigheten har varierat genom åren från cirka 1,0 m djup under markytan efter 20 års exponering till 2,1 m djup efter 27 års exponering.

#### 5.1.2 Pålar från Sollentuna, Rotsunda

Påle 28 från Sollentuna uppvisade efter cirka 5 års exponering frätgropar runt hela pålen 0,2 m under tryckplattan. Maximal frätgrop var cirka 0,4 mm motsvarande en maximal gropfrätningshastighet på 92  $\mu\text{m}/\text{år}$ . I övrigt var avfrätningen jämn. Efter cirka 27 års exponering noterades att den största korrosionshastigheten uppmätts på 1,3 m djup under markytan medan den lägsta uppmättes på 1,1 m djup. Djupet till stället för den största lokala korrosionshastigheten har varit 0,5 till 0,6 m under markytan efter såväl 9 som 27 års exponering.

#### 5.1.3 Pålar från Göteborg, Näset

Påle 13 från Göteborg uppvisade efter cirka 5 års exponering cirka 10 frätgropar inom ett avgränsat område 0,63 m från tryckplattan. Frätgropsdjupet var cirka 0,5 mm motsvarande en maximal gropfrätningshastighet på 105  $\mu\text{m}/\text{år}$ . De översta 0,5 m av pålen var ojämnt angripen medan pålen i övrigt hade en jämn avfrätning. Efter 27 års exponering noterades att den största medelkorrosionshastigheten uppmätts på 2,1 m djup under markytan medan den lägsta uppmättes på 1,1 m djup. Djupet till stället för den största lokala korrosionshastigheten har varit 0,6 till 0,7 m under markytan efter såväl 9 som 27 års exponering.

#### 5.1.4 Pålar från Stockholm, Skå

Påle 16 från Skå utanför Stockholm uppvisade efter cirka 5 års exponering en största frätgrop med 0,4 mm djup 1,55 m från pålens övre ände. Detta motsvarar en största gropfrätningshastighet på 91  $\mu\text{m}/\text{år}$ . Pålens nedre hälft var mer anfränt än den övre och pålen hade i sin helhet en porig yta. Hur pålytan ser ut efter 9 års exponering visas i **Figur 4.5**. Efter 27 års exponering noterades att den största korrosionshastigheten uppmätts 1,1 m under markytan medan den lägsta uppmättes på 2,1 m djup. Djupet till stället för den största lokala korrosionshastigheten har varit 0,4 till 1,1 m under markytan för perioden 9 till 27 års exponering. Det skall också noteras att den lokala korrosionshastigheten ökar med exponeringstiden på djupet 2,8 m under markytan.

### 5.1.5 Pålar från Linköping, Kolbytte-mon, Övre

Påle 1 från övre nivån på Kolbytte-mon i Linköping uppvisade efter cirka 5 års exponering de i särklass flesta frätgroparna av alla de upptagna pålarna. Den nedre delen var mer angripen än den övre. Största frätgropsdjup cirka 1 mm påträffades på flera ställen vid 1,95 m djup under tryckplattan. Djupa frätgropar påträffades också på 0,65 m djup under tryckplattan. Den maximala gropfrätningshastigheten blev 199  $\mu\text{m}/\text{år}$ . Pålytans utseende efter 9 års exponering framgår av **Figur 4.4** då den maximala lokala gropfrätningshastigheten ökat till 252  $\mu\text{m}/\text{år}$ . Efter 20 års exponering var gropfrätningshastigheten 193  $\mu\text{m}/\text{år}$ .

### 5.1.6 Pålar från Linköping, Kolbytte-mon, Nedre

Påle 6 från den nedre nivån på Kolbytte-mon utanför Linköping uppvisade efter fem års exponering inga frätgropar utan endast en jämn avfrätning. Pålytans utseende efter 9 års exponering framgår av **Figur 4.6** då den maximala lokala gropfrätningshastigheten uppmättes till 39  $\mu\text{m}/\text{år}$ . Efter 20 år var gropfrätningshastigheten ungefär densamma 34  $\mu\text{m}/\text{år}$ .

## 5.2 Resultat av massförlustundersökningar

### 5.2.1 Resultat av massförlustundersökning av hela pålar

Pålarnas massförlustbestämda korrosionshastigheter och korrosionspotentialer efter cirka 5, 9 och 27 års exponering har sammanställts i **Tabell 5.1 – 5.3**. I tabellerna anges också djupet under markytan till tryckplattan på pålarna och längden exklusive tryckplatta hos pålarna. För Enköping, Stockholm och Linköping anges också värden efter cirka 20 års exponering.

**Tabell 5.1** Korrosionshastigheter och avfrätning efter olika exponeringstider för neddrivna stålplålar (X-plålar) på provningsplatserna Enköping och Sollentuna med jordarten lera.

Provningsplats	Exp. tid	Påle nr	Djup under markytan till tryckplattan	Längd hos pålen exkl. tryckplatta	Korrosionspotential <sup>1)</sup>	Jämn korrosion	
						Korrosionshastighet <sup>2)</sup>	Avfrätning <sup>3)</sup> (medelfrättdjup)
	år		m	m	mV Cu/CuSO <sub>4</sub>	µm/år	µm
<b>Enköping</b> (Ryda)	5,03	21	–	2,496	– 785	2,7	14
	9,16	25	0,55	2,501	– 771	0,4	3
	20,00	22	0,49	2,49	– 777	2,7	53
	27,22	24	0,52	2,505	– 733	2,1	56
<b>Sollentuna</b> (Rotsunda)	4,76	28	–	2,505	– 784	8,0	38
	8,89	27	0,33	2,509	– 764	7,4	66
	26,93	26	0,49	2,51	– 707	7,8	209

- 1) Med korrosionspotential menas potentialskillnaden (spänningen) mellan en korroderande metall och en referenselektrod. Potentialskillnaden mättes relativt en mättad koppar/kopparsulfatelektroden (Cu/CuSO<sub>4</sub>)
- 2) Massförlustbestämd jämn enkelsidig korrosionshastighet (medelavfrätning)
- 3) Enkelsidig avfrätning



**Tabell 5.2** Korrosionshastigheter och avfrätning efter olika exponeringstider för neddrivna stålpålar (X-pålar) på provningsplatserna Göteborg och Stockholm med jordarten gyttig lera.

Provningsplats	Exp. tid	Påle nr	Djup under markytan till tryckplattan	Längd hos pålen exkl. tryckplatta	Korrosionspotential <sup>1)</sup>	Jämn korrosion	
						Korrosionshastighet <sup>2)</sup>	Avfrätning <sup>3)</sup> (medelfrättdjup)
	år		m	m	mV Cu/CuSO <sub>4</sub>	µm/år	µm
<b>Göteborg</b> (Näset)	5,08	13	–	2,511	– 781	6,8	34
	9,26	14	0,55	2,512	– 753	6,7	62
	27,44	11	0,50	2,495	– 706	6,9	189
<b>Stockholm</b> (Skå)	5,03	16	–	2,51	– 780	11,6	58
	9,26	19	0,58	2,504	– 751	8,3	77
	20,03	20	0,55	2,50	– 731	8,8	177
	27,19	17	0,50	2,50	– 605	7,5	203

- 1) Med korrosionspotential menas potentialskillnaden (spänningen) mellan en korroderande metall och en referenselektrod. Potentialskillnaden mätes relativt en mättad koppar/kopparsulfatelektroden (Cu/CuSO<sub>4</sub>)
- 2) Massförlustbestämd jämn enkelsidig korrosionshastighet
- 3) Enkelsidig avfrätning

**Tabell 5.3** Korrosionshastigheter och avfrätning efter olika exponeringstider för neddrivna stålpålar (X-pålar) på provningsplatsen Linköping med jordarten sand.

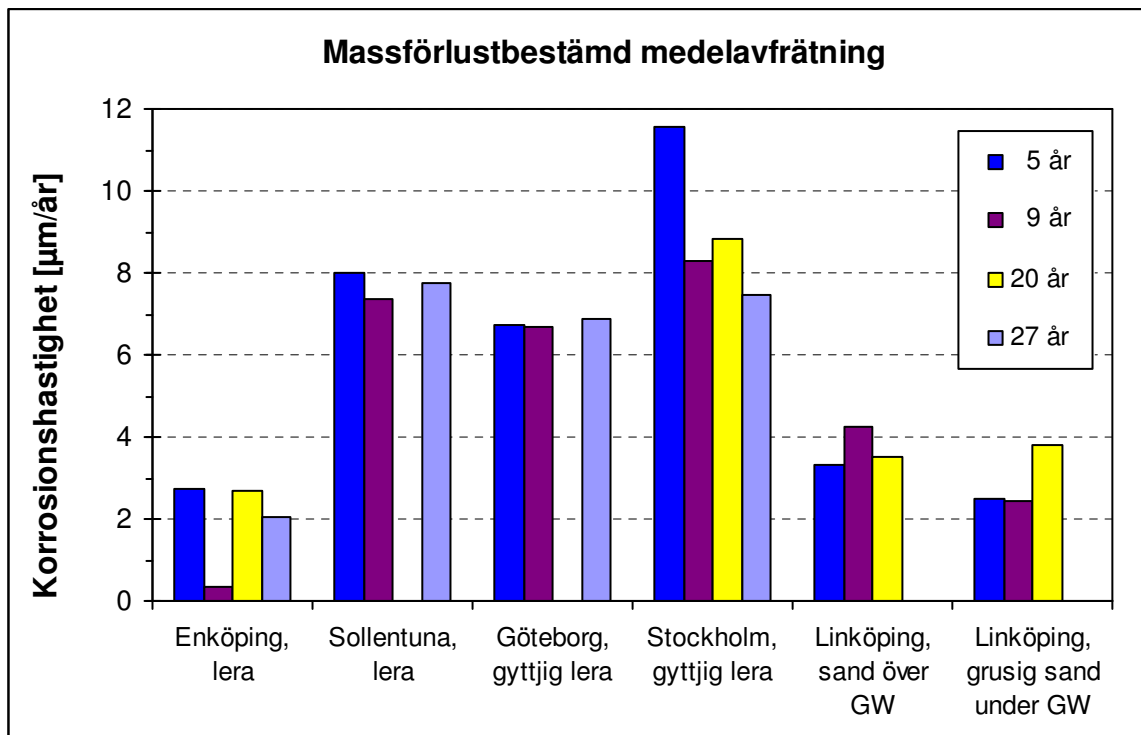
Provningsplats	Exp. tid	Påle nr	Djup under markytan till tryckplattan	Längd hos pålen exkl. tryckplatta	Korrosionspotential <sup>1)</sup>	Jämn korrosion		
						Korrosionshastighet <sup>2)</sup>	Avfrätning <sup>3)</sup> (medelfrättdjup)	
	år		m	m	mV Cu/CuSO <sub>4</sub>	µm/år	µm	
Linköping (Kolbytte- mon)	5,12	1	–	2,504	– 925	3,3	17	
	Sand över grundvattenytan	9,30	5	0,63	2,505	– 268	4,2	39
		20,06	2	0,55	2,49	– 253	3,5	70
Linköping (Kolbytte- mon)	5,31	6	–	1,501	– 782	2,5	13	
	Grusig sand under grundvattenytan	9,30	7	0,50	1,501	–	2,4	23
		20,06	9	0,57	1,50	–	3,8	76

- 1) Med korrosionspotential menas potentialskillnaden (spänningen) mellan en korroderande metall och en referenselektrod. Potentialskillnaden mättes relativt en mättad kopparkopparsulfatelektroden (Cu/CuSO<sub>4</sub>)
- 2) Massförlustbestämd jämn enkelsidig korrosionshastighet
- 3) Enkelsidig avfrätning

Resultaten av vägningarna visar på en medelkorrosionshastighet efter cirka 27 år på mellan 2,1 och 7,8 µm/år med det lägsta värdet från Enköping och det högsta från Sollentuna. Högre korrosionshastigheter har tidigare uppmätts efter till exempel 5 års exponering i Stockholm på Skå där den var som mest 11,6 µm/år.

Medelavfrätningen för pålarna i friktionsjord från Linköping efter cirka 20 år visar på en medelavfrätning på 3,5 – 3,8 µm/år.

Den beräknade medelavfrätningen för samtliga upptagna pålar efter 5 till 27 års exponering har också sammanställts som stapeldiagram i **Figur 5.1**. Härav kan man se att det för medelavfrätningen finns en viss variation i mätresultaten men att de för respektive plats ändå är relativt konstanta om man bortser från andra intaget från Enköping och första intaget från Stockholm Skå.



**Figur 5.1** Korrosionshastighet (medelavfrätning) för nedslagna krysspålar efter olika exponeringstider vid de olika provningsplatserna uttryckt som massförlustbestämd enkelsidig korrosionshastighet.

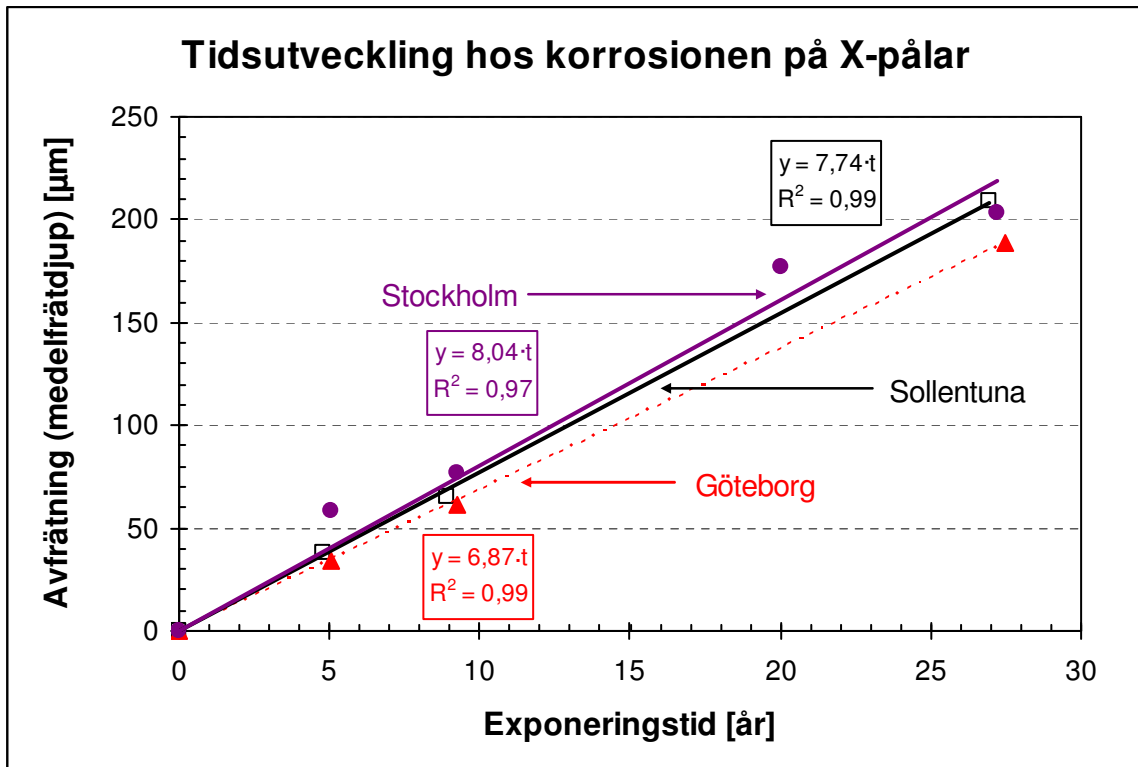
I syfte att undersöka om och hur medelavfrätningarna på de olika platserna förändras med exponeringstiden har resultaten av massförlustundersökningarna av de hela pålarna vid olika tidpunkter och provningsplatser sammanställts i två diagram med uppmätt medelfrättdjup i µm som funktion av exponeringstiden i år, se **Figur 5.2 a** och **b**.

Som framgår av **Figur 5.2** är det en stor skillnad mellan korrosionshastigheterna i sand från Linköping och lera i Enköping å ena sidan och lera från Sollentuna, Göteborg och Stockholm å den andra sidan. I Linköping och Enköping varierar avfrätningen mellan 2,2 och 3,6 µm/år medan den på de övriga platserna varierar mellan 6,9 och 8,0 µm/år. Man kan också notera att medelavfrätningen ökar i stort sett linjärt med tiden och det finns knappast någon tendens till att medelkorrosionshastigheten avtar med exponeringstiden utom möjligen för Stockholm och Enköping där det finns en avtagande avfrätning mot slutet av observationsperioden.

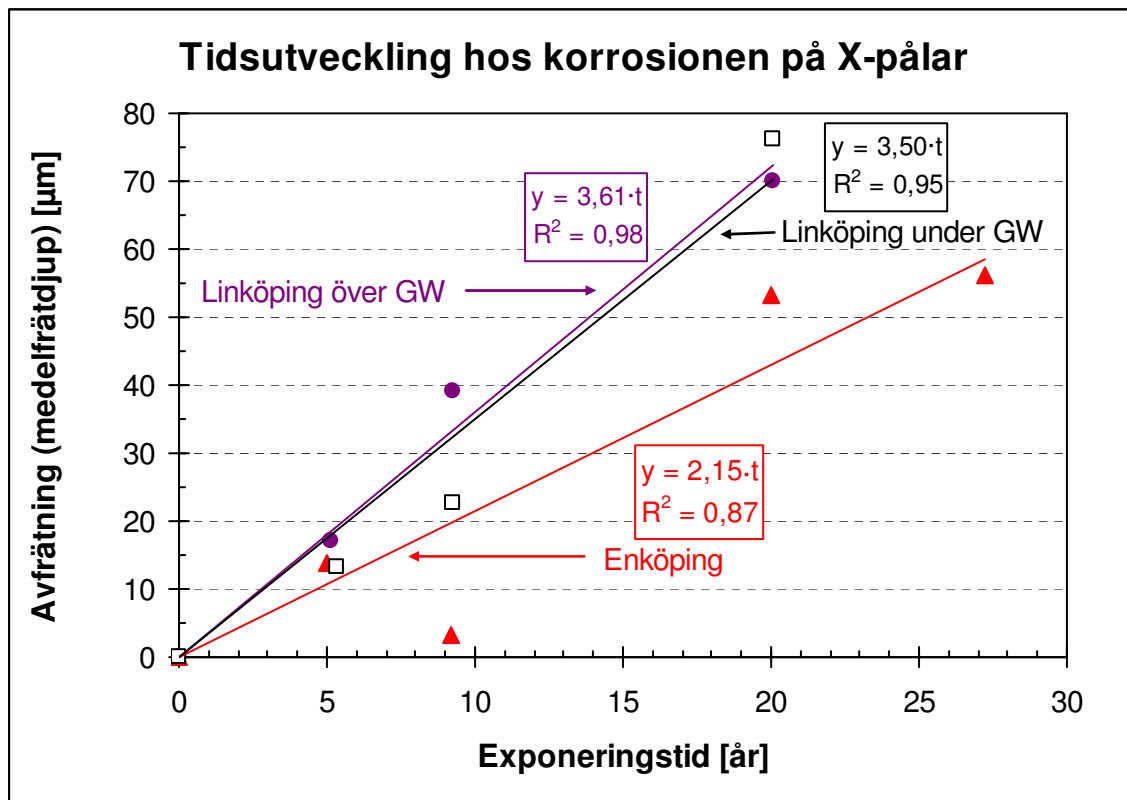
Dessa värden kan jämföras med uppmätta värden, som anges i **Tabell 5.1 – 5.3**. Förklaringsgraderna för de beräknade linjära regressionslinjerna var mellan 0,97 och 0,99 utom för Enköping där den blev 0,87. Detta kan delvis förklaras med att korrosionshastigheten där är så låg att man har svårigheter med mätnoggrannheten.

För stålpålar i sand i Linköping visar resultaten efter 20 års exponering på en medelavfrätning på 3,5 – 3,6 µm/år och är nära lika över och under grundvattenytan. Skillnaden i ytstruktur efter lång tids korrosion är dock påtaglig, som framgår av **Avsnitt 5.4** till **5.6**.

a)



b)



**Figur 5.2** Avfrätning (medelfrättdjup) på stålplålar som funktion av exponeringstiden för neddrivna stålplålar (X-plålar) på provningsplatserna:

- a) Sollentuna, Göteborg och Stockholm.
- b) Enköping och Linköping över och under grundvattenytan.

## 5.2.2 Resultat av massförlustundersökning av påldelar

Resultaten av massförlustundersökningarna av de cirka 0,25 m långa kapade påldelarna efter cirka 27 års exponering i lerjord har sammanställts i **Figur 5.3** och **5.4** med angivande av korrosionshastigheten i  $\mu\text{m}/\text{år}$  för varje påldel. För jämförelse har i diagrammen också inritats den uppmätta massförlustbestämda medelavfrätningen för hela pålarna efter cirka 27 års exponering. Medelavfrätningshastigheterna är baserade på vägning av hela pålar, det vill säga att korrosionen på tryckplattan också är inräknad i massförlusten varför de inte är helt jämförbara med korrosionshastigheten på påldelarna.

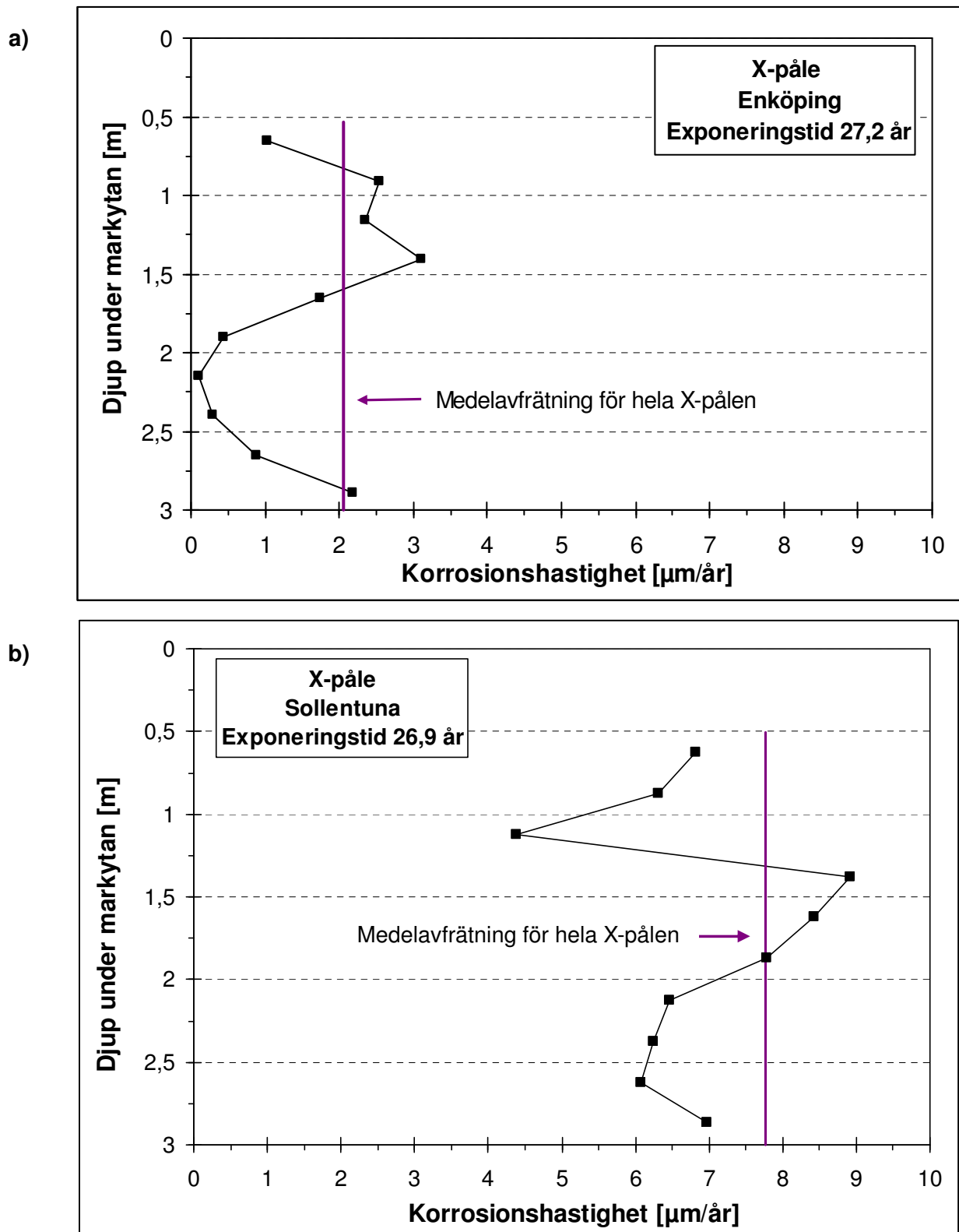
Diagrammen i **Figur 5.3 – 5.4** visar att det kan bli relativt stora skillnader i korrosionshastighet mellan olika delar av pålarna, vilket måste beaktas i till exempel lös lera där risken för knäckning av en påle måste värderas. Den största skillnaden uppmättes på pålarna från Stockholm/Skå där den största korrosionshastigheten 1,1 m under markytan blev  $18,8 \mu\text{m}/\text{år}$  jämfört med korrosionshastigheten för hela pålen på  $7,5 \mu\text{m}/\text{år}$  och den minsta hastigheten på 2,1 m djup, som blev  $0,8 \mu\text{m}/\text{år}$ . Den största korrosionshastigheten har här således blivit 153 % större än den uppmätta korrosionshastigheten för hela pålen. För övriga provningsplatser var skillnaden 16 till 55 % av uppmätt medelkorrosionshastighet. Krysspålarna uppvisar emellertid ingen synlig "midjebildning" och det är endast på stålpålen från Stockholm som den maximala korrosionshastigheten för påldelar ( $18,8 \mu\text{m}/\text{år}$ ) avviker i någon högre grad från medelavfrätningen för hela pålen ( $7,5 \mu\text{m}/\text{år}$ ).

I **Tabell 5.4** har gjorts en sammanställning av storleken på de uppmätta korrosionshastigheterna på påldelarna i lera där de efter 27 år är större än korrosionshastigheten för hela pålen och inom vilka djup dessa noterats. För jämförelse har också grundvattenytans djup under markytan angivits enligt de diagram, som återfinns i **Bilaga C**.

**Tabell 5.4** Uppmätta massförlustbestämda korrosionshastigheter i lera större än medelavfrätningen för påldelar och de djup under markytan där dessa uppmätts och jämförelse med grundvattenytans djup under markytan.

Provingsplats	Massförlustbestämd korrosionshastighet för hela X-pålen  $\mu\text{m}/\text{år}$	Massförlustbestämd korrosionshastighet för påldelar  Korrosionshastigheter för påldelar $\geq$ än korrosionshastigheten för hela X-pålen  $\mu\text{m}/\text{år}$	Djup där större eller lika stor korrosionshastighet uppmätts för påldelar som för hela X-pålen  m under markytan	Grundvattenytans variation <sup>1)</sup>  m under markytan
Enköping (Ryda)	2,1	2,4 – 3,1 2,2	0,9 – 1,4 2,9 (längst ned på pålen)	0,5 – 1,4
Sollentuna (Rotsunda)	7,8	7,8 – 8,9	1,4 – 1,9	0,0 – 0,75
Göteborg (Näset)	6,9	7,0 – 8,7	1,6 – 2,4	ca 0,2 – 0,8
Stockholm (Skå)	7,5	8,6 – 18,8 9,2	0,6 – 1,1 2,9 (längst ned på pålen)	0,3 – 1,4

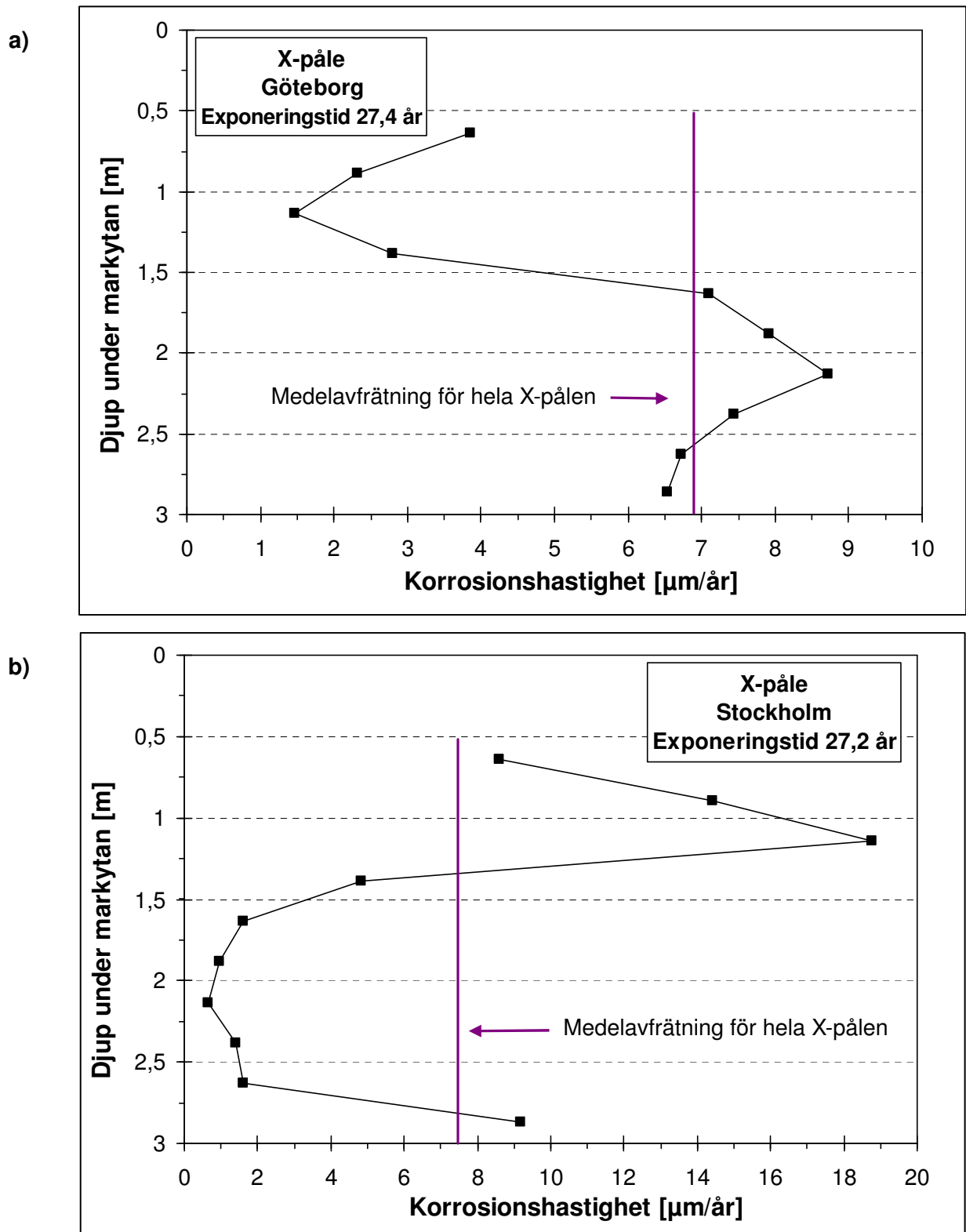
<sup>1)</sup>Jämför **Tabell 3.1**



**Figur 5.3** Uppdelning av massförlustbestämd korrosionshastighet (enkelsidig medelavfrätning) hos X-pålar exponerade vid provningsplatserna i Enköping och Sollentuna med jordarten lera. Korrosionshastigheten (medelavfrätningen) anges för varje 0,25 m lång påddel.

a) X-påle från Enköping (påle nr 24) med exponeringstid 27,2.

b) X-påle från Sollentuna (påle nr 26) med exponeringstid 26,9 år.



**Figur 5.4** Uppdelning av massförlustbestämd korrosionshastighet (enkelsidig medelavfrätning) hos X-pålar exponerade vid provningsplatserna i Göteborg och Stockholm med jordarten gyttig lera. Korrosionshastigheten (medelavfrätningen) anges för varje 0,25 m lång pål-del.

a) X-påle från Göteborg (påle nr 11) med exponeringstid 27,4.

b) X-påle från Stockholm (påle nr 17) med exponeringstid 27,2 år.

Sammanställningen i **Tabell 5.4** visar att djupet under markytan med den maximala korrosionen på påldelar i lera varierar från plats till plats men till stora delar ligger under grundvattenytan, vilket kan förklaras med att pålen här har en anodyta till den luftningscell, som bildas på pålen genom grundvattenytan. Se Camitz (1994). Man kan också notera att det är skillnad mellan provningsplatserna vad gäller djupet under markytan och maximal korrosion för påldelar: från 0,6 – 1,1 m i Stockholm Skå till 1,6 – 2,4 m i Göteborg, Näset. Detta kan möjligen förklaras med den lägre resistiviteten i jorden i Göteborg jämfört med övriga provningsplatser. Se **Tabell 3.2**.

Det skall också noteras att på alla provpålarna i lera utom i Göteborg ökar korrosionshastigheten åter med djupet under markytan det vill säga mot pålspetsen.

### 5.3 Resultat av bygelmikrometermätning

Tyvär utfördes ingen bygelmikrometermätning före installation av pålarna varför deras ursprungliga dimensioner i detalj inte är kända. De nominella måtten på pålen är: flänsbredd = 100 mm och flänstjocklek 14 mm, vilket skulle motsvara en teoretisk tvärsnittsarea på 2604 mm<sup>2</sup>. Enligt tillverkaren skulle pålarna ha en ursprunglig tvärsnittsarea på 2632 mm<sup>2</sup> eftersom innerhörnen på pålen är rundade. Mätningarna visade dock att tillverkningen givit en viss plus-tolerans, det vill säga att såväl flänsbredd som flänstjocklek visade större mått än de nominella. I **Tabell 5.5** anges minsta och största tvärsnittsarea för X-pålar efter cirka 5 och 9 års exponeringstid vid olika provningsplatser. Tvärsnittsskillnaden mellan de mest och minst korroderade delarna var liten efter fem års exponering, men ökar efter cirka 9 års exponering.

Resultaten av bygelmikromätningarna efter cirka 9 års exponering visade också att de mest avfräta tvärsnitten låg mellan 0,35 och 0,49 m under tryckplattan. Endast vid Göteborg låg det mest avfräta snittet bara 0,05 m under tryckplattan.

Bygelmikrometermätningarna visade att areaminskningarna i de mest anfräta tvärsnitten efter cirka 9 års exponering varierade mellan 0,3 % för Linköping Nedre med jordarten grusig sand till 2,6 % för Stockholm (Skå), som också hade den högsta jämna korrosionshastigheten för hel påle. Areaminskningen i det mest korroderande tvärsnittet var liten. Beroende på osäkerheten i detta sätt att bestämma och beräkna korrosionshastigheten har inga ytterligare mätningar med bygelmikrometer senare utförts.



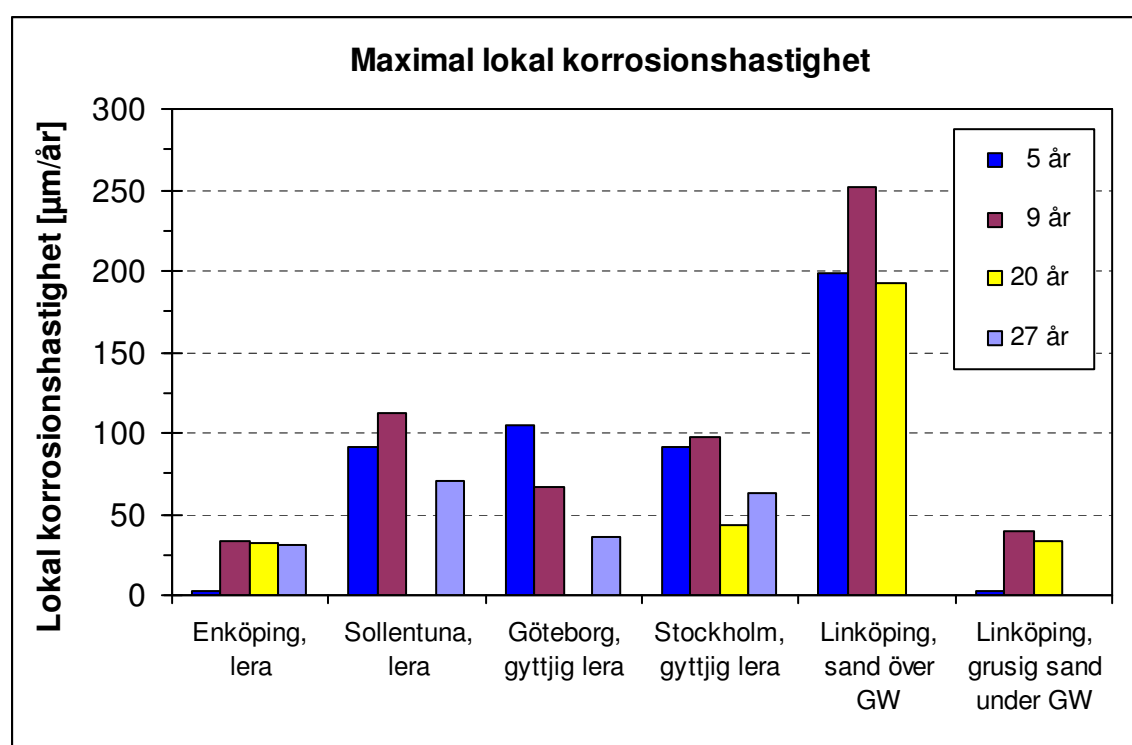
**Tabell 5.5** Areaminskning i de mest korroderade tvärsnitten (minsta tvärsnittet) på X-pålar efter fem och nio års exponering på olika provningsplatser mätt med bygelmikrometer.

Provnings- plats  Jordart	Exp. tid  år	Påle nr	Minsta tvärsnitt på X-pålen		Största tvärsnitt på X-pålen		Skillnad mellan största och minsta tvär- snittsarea  $\Delta A$  mm <sup>2</sup>	Minsk- ning i tvär- snitts- area  %
			Minsta tvär- snitts- area  mm <sup>2</sup>	Avstånd från tryck- plattan  m	Största tvär- snitts- area  mm <sup>2</sup>	Avstånd från tryck- plattan  m		
<b>Enköping</b> (Ryda)	5,03	21	2659	1,555	2661	0,19	2	0,1
	Lera	9,16	25	2557	0,435	2576	2,31	19
<b>Sollentuna</b> (Rotsunda)	4,76	28	2809	0,62	2809	1,50	0	0
	Lera	8,89	27	2740	0,43	2787	2,485	47
<b>Göteborg</b> (Näset)	5,08	13	2795	0,845	2800	1,795	5	0,2
	Gyttjig lera	9,26	14	2757	0,05	2775	2,50	18
<b>Stockholm</b> (Skå)	5,03	16	2793	1,66	2799	0,64	6	0,2
	Gyttjig lera	9,26	19	2708	0,365	2780	1,585	72
<b>Linköping</b> (Kolbytte-mon)	5,12	1	2776	1,92	2794	0,20	18	0,6
	Sand över grundvatten- ytan	9,30	5	2757	0,49	2787	1,385	30
<b>Linköping</b> (Kolbytte-mon)	5,31	6	2802	0,92	2807	0,52	5	0,2
	Grusig sand under grund- vattenytan	9,30	7	2584	0,35	2593	1,485	9

## 5.4 Resultat av mätning av frätgropsdjup

Den maximala lokala korrosionen i  $\mu\text{m}$  beräknas såsom anges i **Avsnitt 4.3.4** som summan av medelfrättdjupet och med nålmikrometer uppmätt frätgropsdjup eller lokal korrosion.

Resultaten av de sålunda utförda mätningarna av de maximala lokala frätgropshastigheterna efter olika exponeringstider har sammanställts i **Tabell 5.6**. Denna visar de lokala korrosionshastigheterna efter 5 till 27 års exponering. Efter cirka 9 års exponering var de mellan 33 och 252  $\mu\text{m}/\text{år}$  med det högsta värdet från Kolbytte-mon Övre. Vid Sollentuna, Göteborg och Linköping Nedre fanns de största frätgropshastigheterna på mellan 0,47 och 0,74 m djup under markytan medan de i Stockholm fanns på 0,84 – 1,14 m djup. Vid Enköping fanns de största frätgropshastigheterna på mellan 0,92 och 1,44 m djup och i sanden i Linköping, Övre på 2,0 – 2,46 m djup. Hur den maximala lokala korrosionshastigheten varierar med tiden och provningsplatserna visas i **Figur 5.5**. Hur den lokala korrosionshastigheten varierar längs pålarna efter cirka 9, 20 och 27 års exponering visas också i **Figur 5.6 – 5.7**.



**Figur 5.5** Maximal lokal enkelsidig korrosionshastighet för nedslagna krysspålar efter olika exponeringstider vid olika provningsplatser.

Den maximala lokala korrosionshastigheten, **Figur 5.5**, visar att denna kan vara många gånger högre än medelavfrätningshastigheten **Figur 5.1**. Resultaten visar också att det finns en viss avtagande tendens i gropfrätningshastigheten med tiden, speciellt om man ser på resultaten från 9 års exponering till 20 och 27 års exponering. En jämförelse med de uppmätta värdena på medelavfrätningen visar att den maximala lokala korrosionshastigheten kan vara 10 till 60 ggr högre än medelavfrätningen. Detta bedöms dock inte ha någon större betydelse för pålars bärförmåga eftersom mindre frätgropar inte bedöms påverka pålarnas totala bärförmåga. För till exempel rörledningar och tankar kan dock gropfrätningen vara avgörande för konstruktionens verkningssätt och livslängd.

Resultaten av uppmätningarna av den lokala korrosionshastigheten i  $\mu\text{m}/\text{år}$  visar att efter 9 års exponering var gropfrätningshastigheten störst i sanden över grundvattenytan på Kolbytte-mon i Linköping mellan 53 och upp till 252  $\mu\text{m}/\text{år}$  på 2,0 m djup under markytan. I övrigt har större lokala korrosionsangrepp efter 9 års exponering noterats från Sollentuna och Stockholm, Skå med upp till 112  $\mu\text{m}/\text{år}$  på djupet 0,5 till 0,9 m. Övriga mätresultat ligger under 50  $\mu\text{m}/\text{år}$ .

Uppmätningarna efter 20 års exponering visar fortfarande på de största lokala korrosionshastigheterna från Linköping, Kolbytte-mon Övre över grundvattenytan på mellan 53 och 192 µm/år. Övriga resultat från detta intag visar frätgropshastigheter under 44 µm/år för provningsplatserna Enköping, Stockholm och Linköping, Nedre under grundvattenytan. Här saknas dock intag från Göteborg och Sollentuna.

Resultaten av uppmätningarna efter 27 års exponering i **Figur 5.7** visar att den största lokala korrosionshastigheten då erhöles i Sollentuna med 71 µm/år på djupet 0,65 m under markytan och i Stockholm, Skå med 56 till 62 µm/år på 0,6 till 1,15 m djup under markytan. I Stockholm har också gropfrätningshastigheten på djupet 2,9 m under markytan ökat jämfört med tidigare intag av pålar.

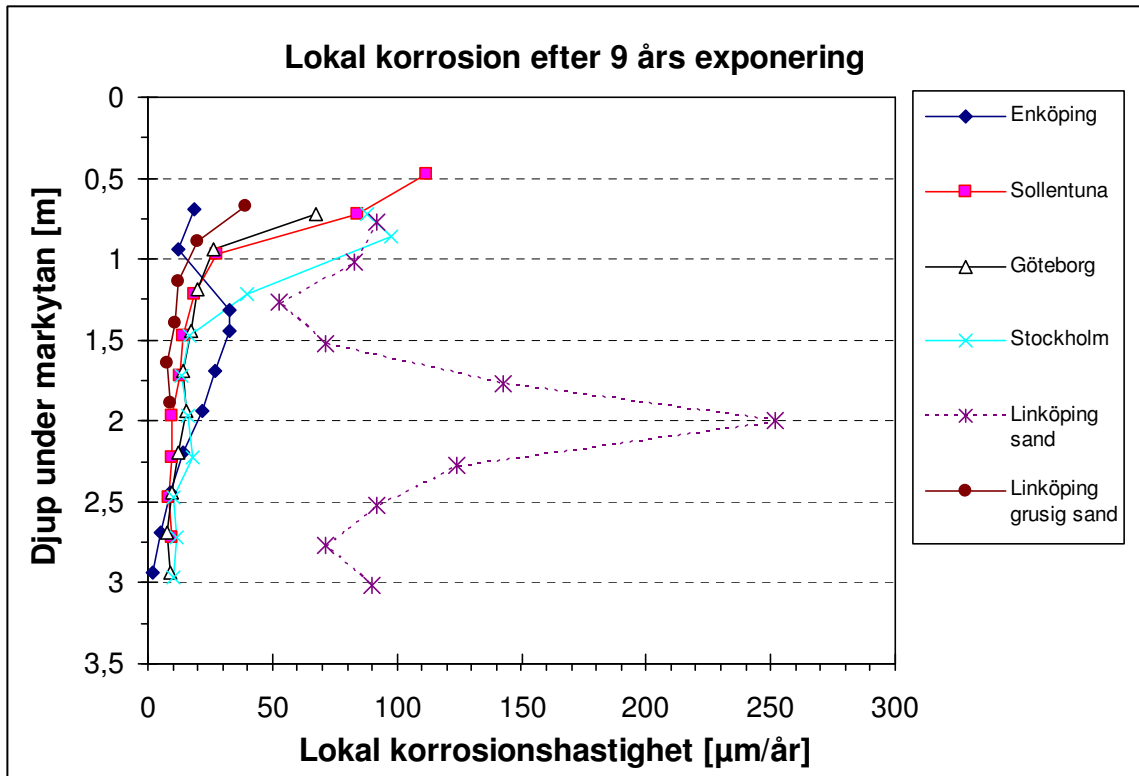
**Tabell 5.6** Maximal lokal korrosionshastighet och läge för den maximala lokala korrosionen på X-pålarna efter 5, 9, 20 och 27 års exponering vid olika provningsplatser.

Provningss-plats	Exponeringstid år	Påle nr	Max lokal korrosions- hastighet <sup>a)</sup> µm/år	Djup under markytan till max frättdjup m under markytan
<b>Enköping</b> (Ryda)	5,03	21	< 5	–
	9,16	25	33	1,32 – 1,44
	20,00	22	33	0,92 – 1,18
	27,22	24	31	2,15
<b>Sollentuna</b> (Rotsunda)	4,76	28	92	0,20 <sup>b)</sup>
	8,89	27	112	0,47
	26,93	26	71	0,63
<b>Göteborg</b> (Näset)	5,08	13	105	0,63 <sup>b)</sup>
	9,26	14	67	0,72
	27,44	11	36	0,64
<b>Stockholm</b> (Skå)	5,03	16	91	1,55 <sup>b)</sup>
	9,26	19	98	0,94
	20,03	20	44	0,84
	27,19	17	63	1,14
<b>Linköping</b> (Kolbytte-mon) Övre	5,12	1	199	1,95 <sup>b)</sup>
	9,30	5	252	2,00
	20,06	2	193	2,46
<b>Linköping</b> (Kolbytte-mon) Nedre	5,31	6	< 5	–
	9,30	7	39	0,68
	20,06	9	34	0,74 och 2,02

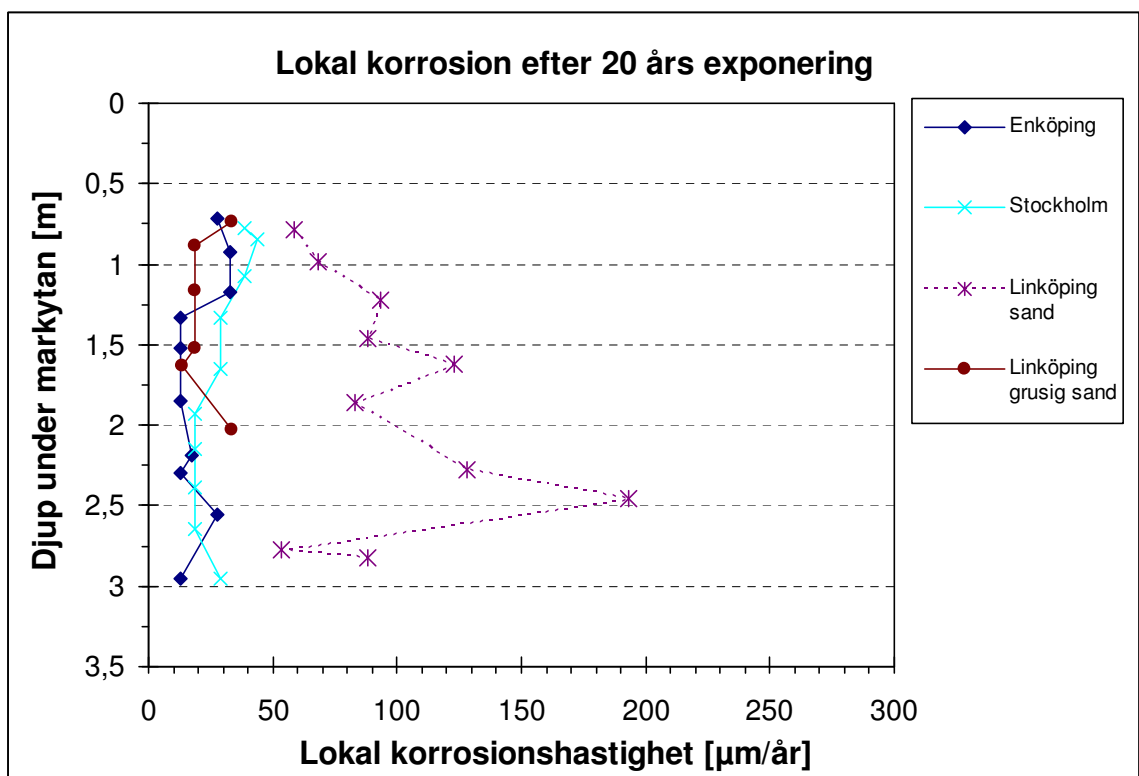
a) Enkelsidig lokal korrosionshastighet

b) Avser avstånd till tryckplattan och inte djup från markytan till största frättdjup.

a)



b)

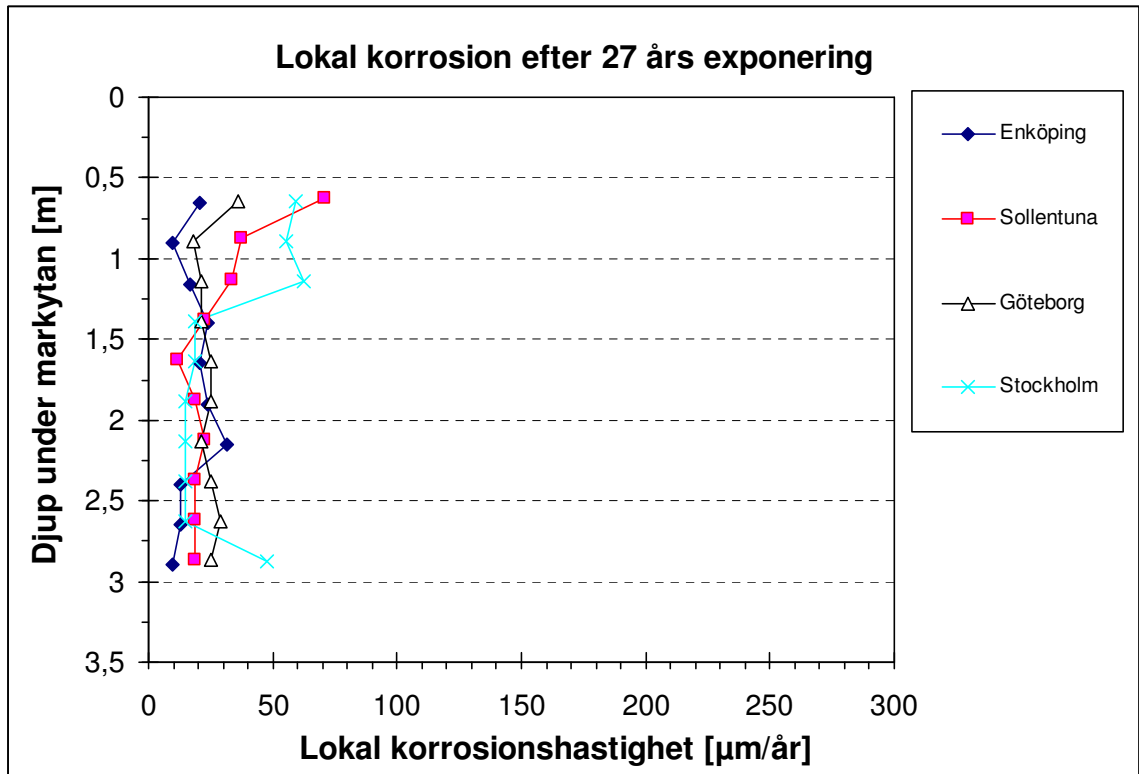


**Figur 5.6** Största lokala enkelsidiga korrosionshastighet längs X-pålar efter 9 och 20 års exponering vid olika provningsplatser. Den största lokala korrosionshastigheten anges för varje 0,25 m lång påddel.

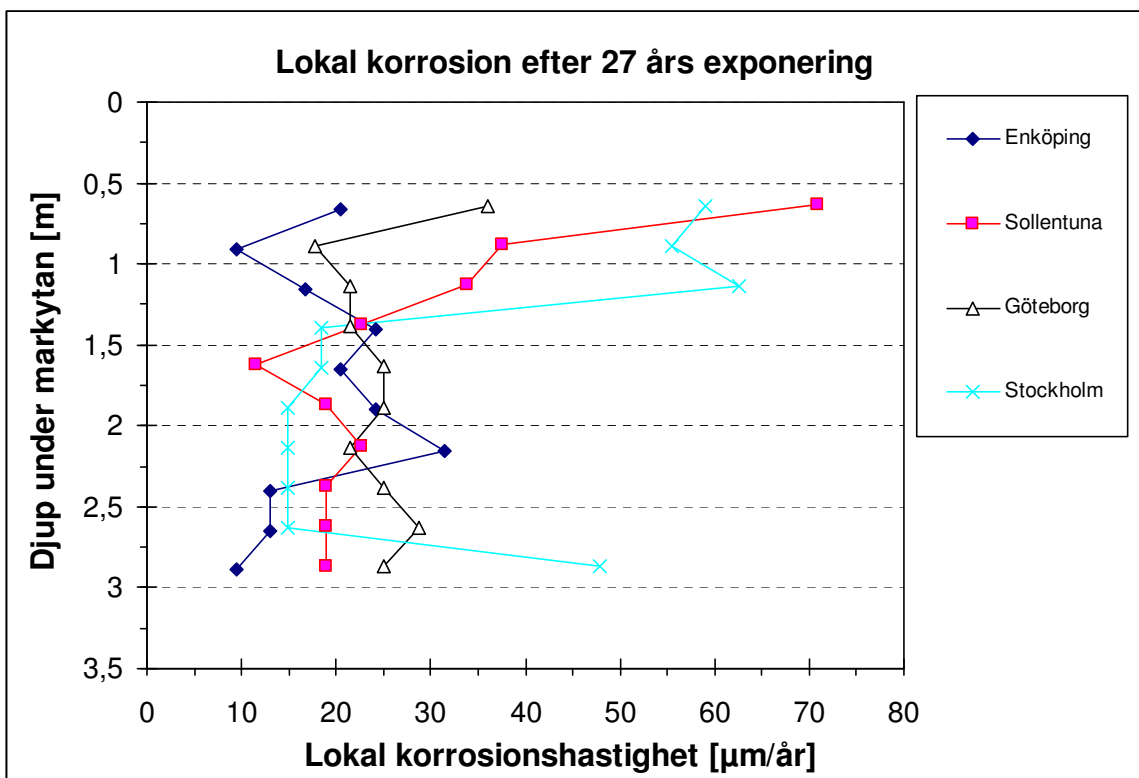
a) 9 års exponering.

b) 20 års exponering.

a)



b)



**Figur 5.7** Största lokala enkelsidiga korrosionshastighet längs X-pålar efter 27 års exponering vid olika provningsplatser. Den största lokala korrosionshastigheten anges för varje 0,25 m lång pådel.

a) 27 års exponering.

b) 27 års exponering. Diagram med större upplösning.

I **Figur 5.8 – 5.10** har gjorts en sammanställning av de med nålmikrometer uppmätta lokala korrosionshastigheterna adderade med medelavfrätningen för X-pålarna på de olika provningsplatserna med lera efter cirka 9, 20 och 27 års exponering som den uppmätts för varje 0,25 m lång pådel. Resultaten redovisas för varje provningsplats för sig för att man skall kunna bedöma eventuella förändringar i den lokala korrosionshastigheten med exponeringstiden och djupet under markytan.

I Enköping, **Figur 5.8 a**, var den lokala korrosionshastigheten som mest 33  $\mu\text{m}/\text{år}$  på 0,9 – 1,5 m djup under markytan efter 9 och 20 år medan den var cirka 31  $\mu\text{m}/\text{år}$  på 2,15 m djup efter cirka 27 år. Huvuddelen av mätpunkterna ligger dock mellan 10 och 30  $\mu\text{m}/\text{år}$ .

I Sollentuna, **Figur 5.8 b**, uppmättes den högsta lokala korrosionshastigheten 112  $\mu\text{m}/\text{år}$  på 0,5 m djup under markytan efter 8,9 års exponering. Efter cirka 27 års exponering var den största lokala korrosionshastigheten 71  $\mu\text{m}/\text{år}$  på 0,62 m djup. På större djup är korrosionshastigheten lägre, mellan cirka 10 och 40  $\mu\text{m}/\text{år}$ . Anmärkningsvärt är att korrosionshastigheten ökar något med exponeringstiden på pålens nedre del.

I Göteborg, **Figur 5.9 a**, uppmättes den högsta lokala korrosionshastigheten 67  $\mu\text{m}/\text{år}$  på 0,72 m djup under markytan efter 9,3 års exponering. Efter 27,4 års exponering var den högsta lokala korrosionshastigheten 36  $\mu\text{m}/\text{år}$  på motsvarande djup. På större djup varierade korrosionshastigheten mellan 8 och 28  $\mu\text{m}/\text{år}$ , också på denna plats med de högre värdena efter 27,4 år. Även på denna plats ökar korrosionshastigheten med tiden på pålens nedre del.

I Stockholm, **Figur 5.9 b**, uppmättes de högsta värdena på den lokala korrosionshastigheten till 98, 62, och 44  $\mu\text{m}/\text{år}$  efter 9,3, 27,2, och 20,0 års exponeringstid respektive på 0,9 till 1,2 m djup under markytan. På större djup varierade korrosionshastigheten mellan 10 och 28  $\mu\text{m}/\text{år}$  på 1,4 – 3,0 m djup utom för djupet 3,0 m där den efter 27,2 år uppmättes till 48  $\mu\text{m}/\text{år}$ . Den lägsta korrosionshastigheten på pålarnas övre del uppmättes således efter 20 års exponering. På pålens nedre del ökade korrosionshastigheten med exponeringstiden.

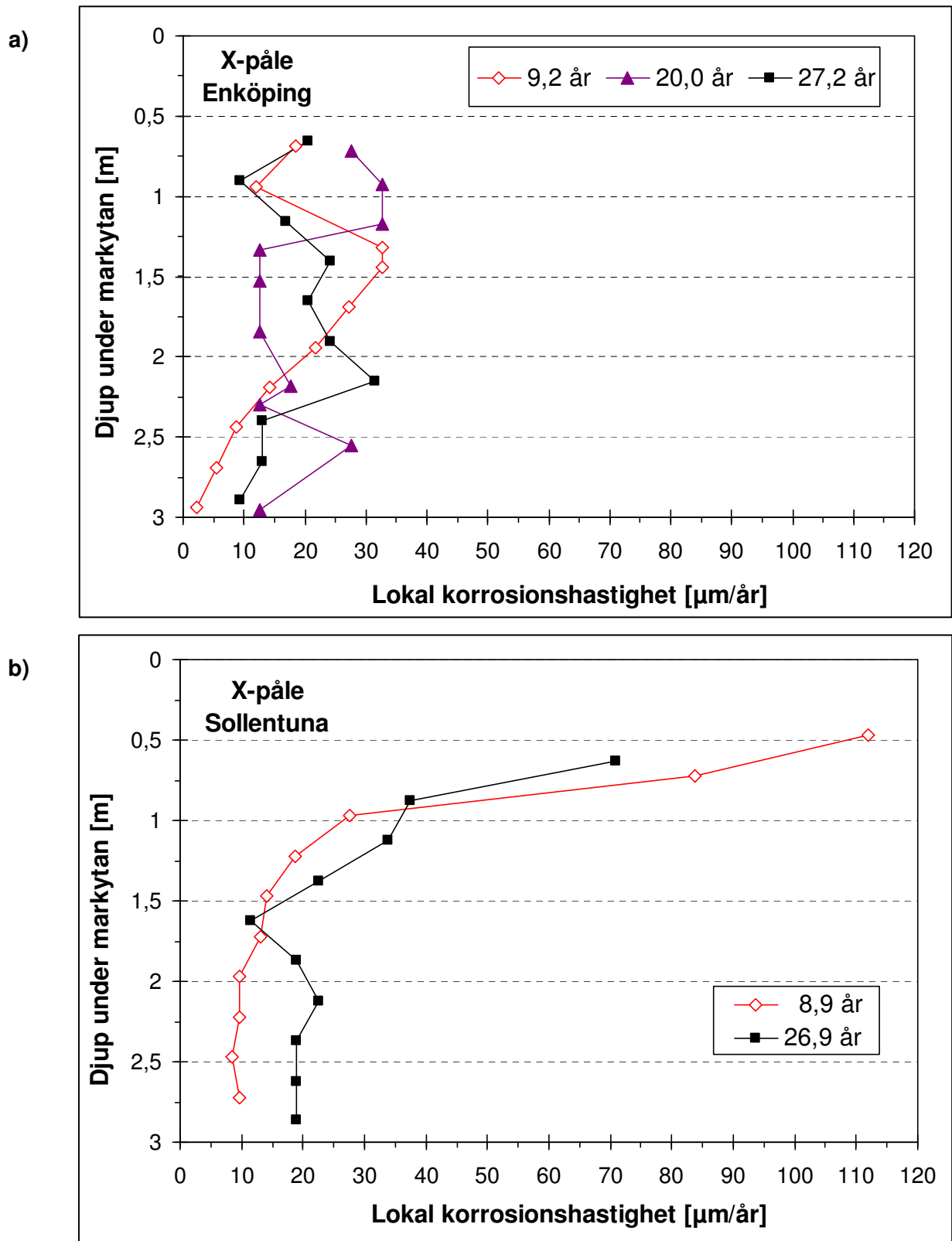
Sammanfattningsvis kan konstateras att de största lokala korrosionshastigheterna i lerjord, cirka 30 till 110  $\mu\text{m}/\text{år}$ , har uppmätts på 0,5 till 1,4 m djup under markytan och minskar något med exponeringstiden. På större djup är de lokala korrosionshastigheterna lägre 10 till 40  $\mu\text{m}/\text{år}$  något avtagande med djupet under markytan men ökar samtidigt något med exponeringstiden.

De högsta lokala korrosionshastigheterna, 252  $\mu\text{m}/\text{år}$  efter 9 års exponering och 193  $\mu\text{m}/\text{år}$  efter 20 års exponering, uppmättes på pålarna från Linköping i sand över grundvattenytan. Motsvarande jämna korrosionshastighet för pålarna var 4,2 respektive 3,5  $\mu\text{m}/\text{år}$ . Pålarna hade flera djupa frätgropar längs hela sin längd, **Figur 5.10 a**. Det var endast på dessa pålar från Linköping Övre, som det fläckvis förekom egentlig gropfrätning tillsammans med mer utbredd lokal korrosion.

Ett exempel är jämförelsen mellan korrosionsangreppen på pålarna från provningsplatsen Linköping; den ena med pålar exponerade i sand i omättad zon långt över grundvattenytan och den andra med pålar exponerade i vattenmättad grusig sand under grundvattenytan. Det var endast på pålarna över grundvattenytan, som det fanns kraftiga lokala korrosionsangrepp. På pålarna i vattenmättad grusig sand fanns inga djupa frätgropar och den största lokala korrosionshastigheten var låg, 39  $\mu\text{m}/\text{år}$  efter 9 års exponering och 34  $\mu\text{m}/\text{år}$  efter 20 års exponering, **Figur 5.10 b**. Pålarnas jämna korrosionshastighet var 2,4  $\mu\text{m}/\text{år}$  efter 9 års exponering och 3,8  $\mu\text{m}/\text{år}$  efter 20 års exponering.

De kraftiga lokala korrosionsangreppen i välluftad sand torde bero på verkan av luftningsceller, både små luftningsceller (mikro- och miniluftningsceller) och större luftningsceller (korta makroluftningsceller). För att luftningsceller skall uppkomma och lokala korrosionsangrepp uppstå krävs att en del av pålen befinner sig i väl luftad jord under en längre tid, Vinka m.fl. (2002).

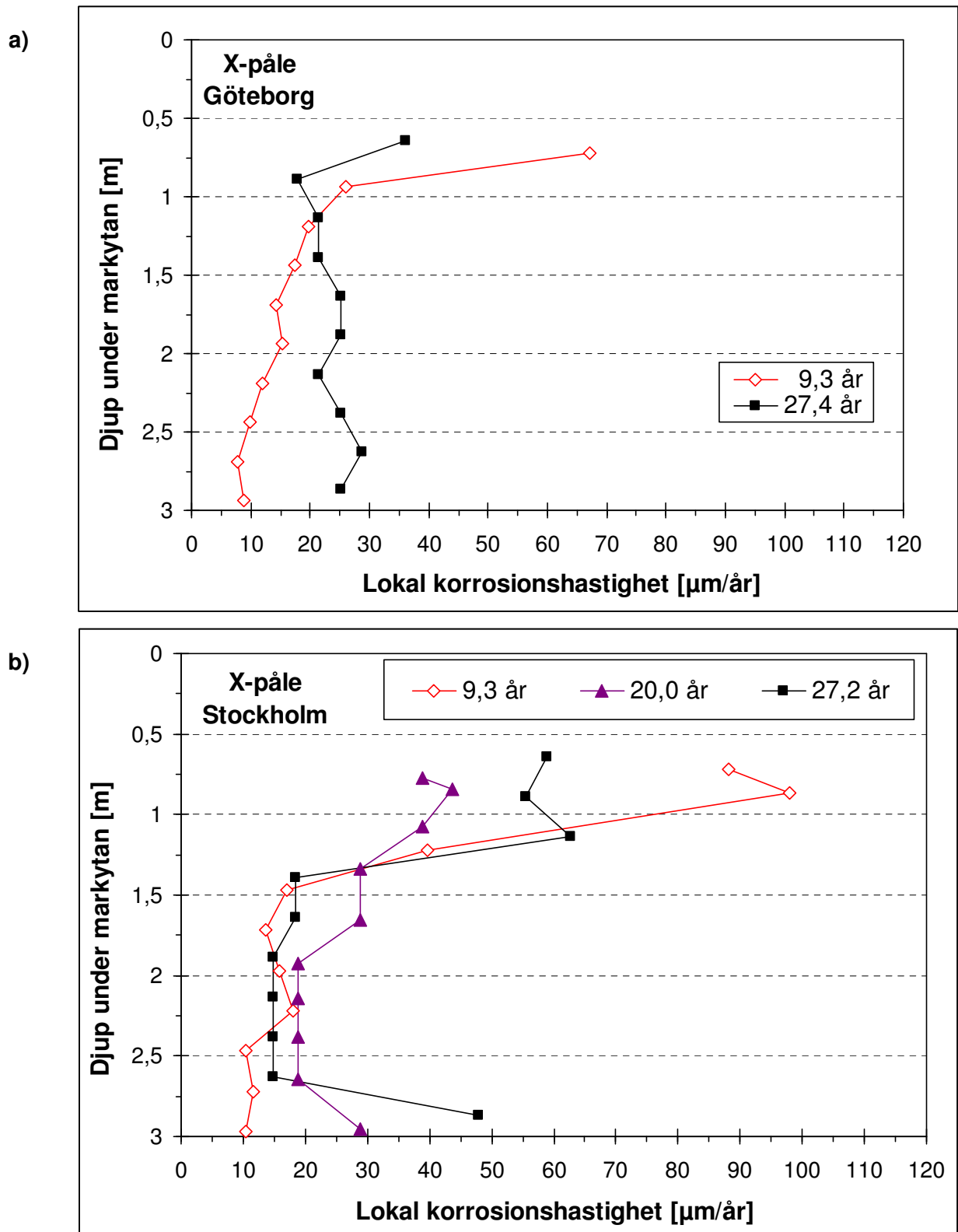
En annan teori, som anförts är att korrosionen också lokalt påverkats av alunskifferkorn i sanden på Linköping Övre till följd av skifferns svavelinnehåll. Teorin har ännu inte kunnat verifieras.



**Figur 5.8** Största lokala enkelsidiga korrosionshastighet längs X-pålar, efter olika exponeringstider, exponerade vid provningsplatserna i Enköping och Sollentuna med jordarten lera. Den största lokala korrosionshastigheten anges för varje 0,25 m lång påddel.

a) X-pålar från Enköping med exponeringstid 9,2, 20,0 och 27,2 år.

b) X-pålar från Sollentuna med exponeringstid 8,9 och 26,9 år.

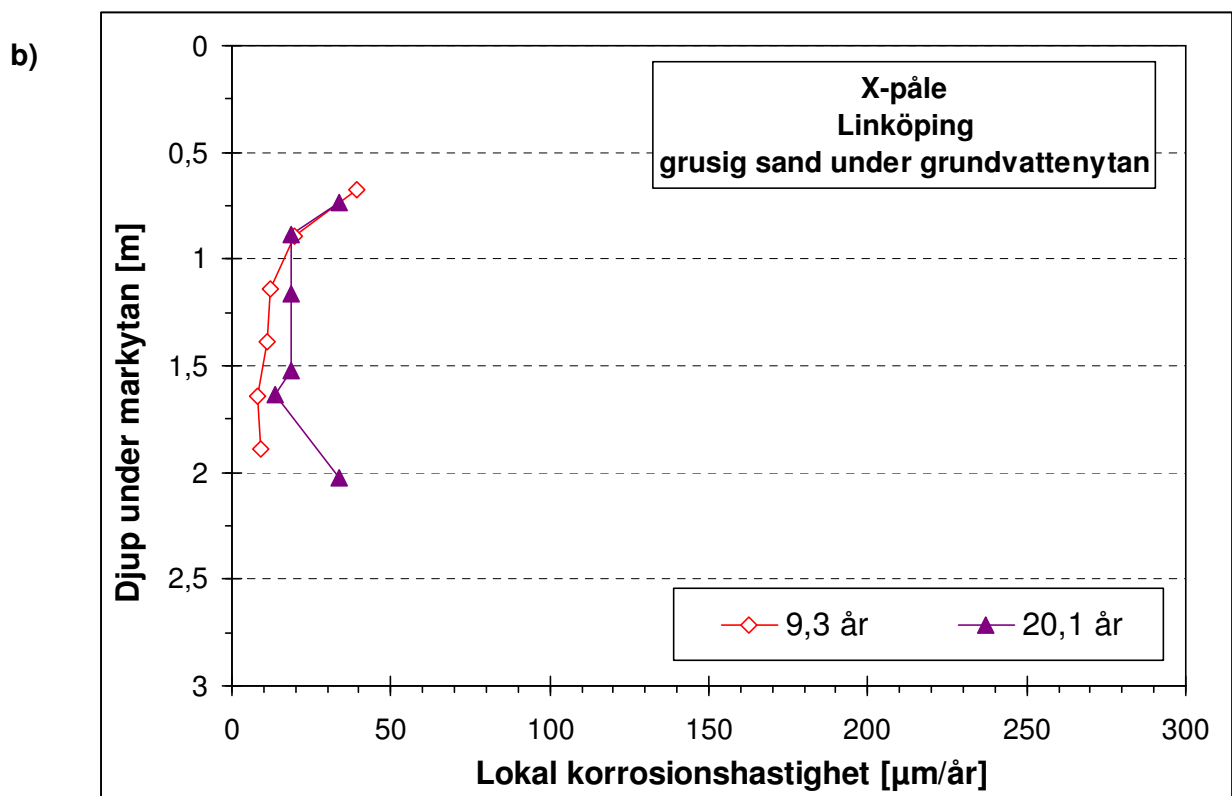
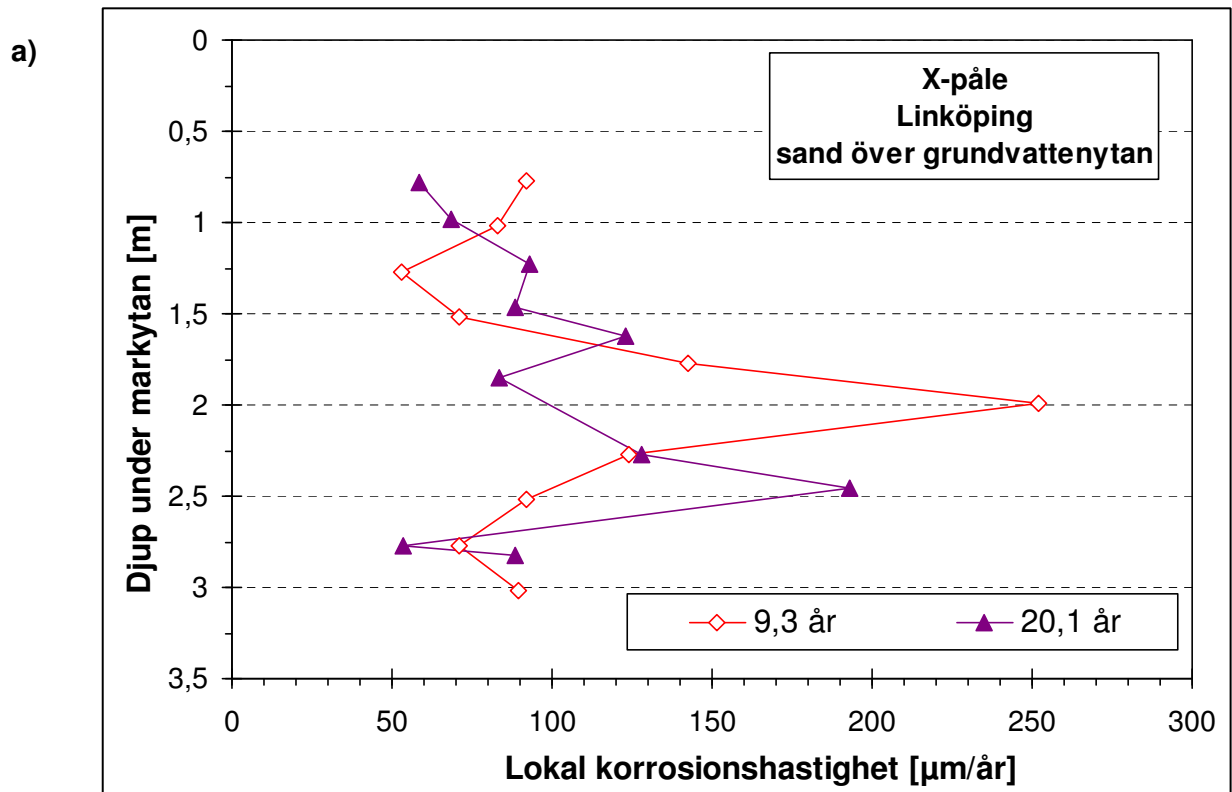


**Figur 5.9** Största lokala enkelsidiga korrosionshastighet längs X-pålar, efter olika exponeringstider, exponerade vid provningsplatserna i Göteborg och Stockholm med jordarten gytjig lera. Den största lokala korrosionshastigheten anges för varje 0,25 m lång påddel.

a) X-pålar från Göteborg med exponeringstid 9,3 och 27,4.

b) X-pålar från Stockholm med exponeringstid 9,3, 20,0 och 27,2 år.





**Figur 5.10** Största lokala enkelsidiga korrosionshastighet längs X-pålar, efter olika exponeringstider, exponerade vid provningsplatsen i Linköping med jordarten sand. Den största lokala korrosionshastigheten anges för varje 0,25 m lång påddel.

a) X-pålar i sand över grundvattenytan med exponeringstid 9,3 och 20,1 år.

b) X-pålar i grusig sand under grundvattenytan med exponeringstid 9,3 och 20,1 år.

## 5.5 Jämförelse mellan på olika sätt uppmätta korrosionsvärden

I **Tabell 5.7** visas en sammanställning av uppmätta korrosionshastigheter uppdelat på uppmätningssätt.

**Tabell 5.7** Sammanställning av uppmätta korrosionshastigheter uppdelat på uppmätningssätt.

Provningsplats	Exponeringstid år	Påle nr	Korrosionshastighet $\mu\text{m}/\text{år}$			
			Massförlustbestämd jämn korrosion			Lokal korrosion
			Massförlust för hel påle (vägning av hela pålar)	Massförlust för 0,25 m långa påldelar (vägning av påldelar)		Mätning av frättdjup med nålmikrometer <sup>1)</sup>  max värde
				max värde	min värde	
<b>Enköping</b> (Ryda)	5,03	21		–	–	< 5
	9,16	25		–	–	33
	20,00	22		–	–	33
	27,22	24		3,1	0,1	31
<b>Sollentuna</b> (Rotsunda)	4,76	28		–	–	92
	8,89	27		–	–	112
	26,93	26		8,9	4,4	71
<b>Göteborg</b> (Näset)	5,08	13		–	–	105
	9,26	14		–	–	67
	27,44	11		8,7	1,5	36
<b>Stockholm</b> (Skå)	5,03	16		–	–	91
	9,26	19		–	–	98
	20,03	20		–	–	44
	27,19	17		18,8	1,0	63
<b>Linköping</b> (Kolbytte-mon) övre	5,12	1		–	–	199
	9,30	5		–	–	252
	20,06	2		–	–	193
<b>Linköping</b> (Kolbytte-mon) nedre	5,31	6		–	–	< 5
	9,30	7		–	–	39
	20,06	9		–	–	34

1) Till det med nålmikrometer uppmätta frättdjupet adderades medelfrättdjupet, som erhållits vid massförlustbestämningen av korrosionshastigheten för hela X-pålar.

Sammanställningen i **Tabell 5.7** visar att de maximala korrosionshastigheterna mätt på 0,25 m långa påldelar var mellan 1,14 och 2,51 gånger medelkorrosionshastigheten mätt genom massförlust på de hela pålarna.

De pålar, som hade den minsta korrosionen, hade en korrosionshastighet på 0,05 till 0,56 gånger medelkorrosionshastigheten.

Den maximala lokala korrosionshastigheten uppmätt med nålmikrometer och adderad medelkorrosionshastighet var 5 till 15 gånger större än medelavfrättningshastigheten för pålar i lera efter 27 års exponering. För pålarna i sand var den maximala lokala korrosionshastigheten 9 till 55 gånger högre

än medelkorrosionshastigheten. Det högre värdet gäller för pålar exponerade i sand över grundvat-  
tenytan.

## **5.6 Foton på korroderade påldelar efter 27 års exponering**

För att få en uppfattning om hur korrosionsangreppen på pålarna ser ut och fördelas längs pålarna har de med hänsyn till korrosionen mest intressanta delarna av pålarna från Enköping, Sollentuna, Göteborg och Stockholm fotograferats också efter 27 års exponering och rengöring medelst blästring, **Fi-  
gur 5.11 till 5.14.**

a)



b)



**Figur 5.11** Påldelar med nominell längd 0,25 m från X-pålar, som exponerats neddrivna i jord under 27 år på provningsplatserna Enköping (påle nr 24) och Stockholm (påle nr 17).

- a) Påldelar från Enköping. Det övre fotografiet visar den minst angripna påldelen på djupet 2,03 – 2,28 m under markytan med den enkelsidiga massförlustbestämda korrosionshastigheten  $0,1 \mu\text{m}/\text{år}$  och det nedre fotografiet den mest angripna påldelen på djupet 1,28 – 1,52 m med korrosionshastigheten  $3,1 \mu\text{m}/\text{år}$ . Medelkorrosionshastigheten för hela pålen var  $2,1 \mu\text{m}/\text{år}$ .
- b) Påldelar från Stockholm. Det övre fotografiet visar den minst angripna påldelen på djupet 2,01 – 2,26 m med korrosionshastigheten  $0,7 \mu\text{m}/\text{år}$  och det nedre fotografiet den mest angripna påldelen på djupet 1,01 – 1,26 m med korrosionshastigheten  $18,8 \mu\text{m}/\text{år}$ . Medelkorrosionshastigheten för hela pålen var  $7,5 \mu\text{m}/\text{år}$ .

a)



b)



**Figur 5.12** X-påle (påle nr 26), som exponerats neddriven i naturligt lagrad jord på provningsplats Sollentuna under 26,9 år. Djupet under markytan till tryckplattan var 0,49 m. Tumstocken på bilderna visar avståndet från tryckplattan. Medelkorrosionshastigheten för hela pålen var  $7,8 \mu\text{m}/\text{år}$ .

- a) Del av påle i närheten av tryckplattan på avståndet 0,08 – 0,21 m med något skrovlig metallyta och med en del lokala angrepp och frätgropar. Maximalt frättdjup var 1,9 mm på den 0,25 m långa påldelen, som var närmast tryckplattan.
- b) Del av påle på avståndet 0,74 – 0,89 m från tryckplattan. Metallytan var här slät utan lokala angrepp eller frätgropar. Maximalt frättdjup var 0,6 mm på den 0,25 m långa påldelen med märkning C4, som delvis visas på fotografiet.

a)



b)



**Figur 5.13** X-påle (påle nr 11), som exponerats neddriven i naturligt lagrad jord på provningsplats Göteborg under 27,4 år. Djupet under markytan till tryckplattan var 0,5 m. Tumstocken på bilderna visar avståndet från tryckplattan. Medelkorrosionshastigheten för hela pålen var  $6,9 \mu\text{m}/\text{år}$ .

**a)** Del av påle vid tryckplattan med något skrovlig metallyta. Maximalt frätdjup var 1,9 mm på den 0,25 m långa påldelen, som låg närmast tryckplattan, som delvis visas på fotografiet.

**b)** Del av påle på avståndet 0,83 – 1,0 m från tryckplattan. Metallytan var här slät med små lokala angrepp. Maximalt frätdjup var 0,6 mm på den 0,25 m långa påldelen, som delvis ses på fotografiet.

a)



b)



**Figur 5.14** X-påle (påle nr 17), som exponerats neddriven i jord på provningsplats Stockholm Skå under 27,2 år. Djupet under markytan till skarvplattan var 0,5 m. Tumstocken på bilderna visar avståndet från skarvplattan. Medelkorrosionshastigheten för hela pålen var  $7,5 \mu\text{m}/\text{år}$ .

a) Del av påle vid skarvplattan med skrovlig metallyta. Maximalt frätdjup var 1,6 mm på den 0,25 m långa påldelen, som var närmast skarvplattan och som nästan visas helt på fotografiet.

b) Del av påle på avståndet 1,04 – 1,23 m från skarvplattan. Metallytan var här slät utan lokala angrepp och frätgropar. Maximalt frätdjup var 0,5 mm på den 0,25 m långa påldel som delvis visas på fotografiet.

## 5.7 Jämförelse mellan uppmätt korrosion och jordegenskaper

Genom åren har många försök gjorts att söka klarlägga sambandet mellan jords egenskaper och uppmätt korrosion på olika stålkonstruktioner i jord men inga klara samband har hittills kunnat visas. Detta sammanhänger sannolikt med att det finns så många egenskaper i jord, som teoretiskt kan påverka korrosionen i jord såväl geologiska som geotekniska, kemiska och fysikaliska. Enligt till exempel den tyska standarden DIN 50 929, del 3 (1985), **Bilaga D**, kan följande 12 egenskaper påverka sannolikheten för utvändiga korrosionsskador på rörledningar och pålar:

- Jordart
- Jordresistivitet
- Vattenkvot
- pH-värde
- Buffertkapacitet
- Sulfidhalt
- Neutralsalter (vattenextrakt). Beräknas från jordens kloridhalt och jordens sulfathalt.
- Sulfathalt (saltsyraextrakt)
- Läge i förhållande till grundvattnet
- Jordens homogenitet horisontellt
- Jordens homogenitet vertikalt
- Konstruktionsmetallens (kolstål, låglegerat stål och gjutjärn) korrosionspotential

För varje egenskap finns i standarden bedömningstal från + 4 till - 12 beroende på förhållandena för de olika egenskaperna. Negativa värden på bedömningstalen ökar risken för korrosion. En summering av bedömningstalen ger underlag för en bedömning av risken för korrosionsskador. Enligt en bedömning av Vinka (2000 a) har i **Tabell 5.8** gjorts en sammanställning av de summerade bedömningstalen enligt DIN 50 929, del 3 baserad på de undersökningar av jordegenskaperna, som då förelåg vid provningsplatserna. Vid bedömning av jordarna har jordanalyserna, som anges i **Bilaga A** använts. I tabellen anges också extrapolerade värden på medelfrättdjupet efter 27 års exponering i  $\mu\text{m}$ .

Av **Tabell 5.8** framgår att den största korrosionen (uttryckt som medelfrättdjupet) på 185 – 220  $\mu\text{m}/27$  år inträffat där summa bedömningstal  $B_1$  legat mellan - 23 och - 34 (Sollentuna, Göteborg och Stockholm). Den mindre korrosionen 58 – 108  $\mu\text{m}/27$  år har inträffat där det sammanlagda bedömningstalet  $B_1$  ligger mellan - 12 och + 6 (Enköping och Linköping). Det tycks därför, som om denna standard kan ge en indikation på var man får större eller mindre korrosionshastighet.

Jordkorrosiviteten vid alla fyra provningsplatserna, Enköping, Sollentuna, Göteborg och Stockholm, med lerjord klassas som starkt korrosiva vid summering av  $B_1$ -summan enligt standarden, se **Bilaga D**. Trots den betydligt mer positiva summan av bedömningstal än vid övriga provningsplatser med lerjord blir alltså jordkorrosiviteten starkt korrosiv vid provningsplats Enköping. Jordkorrosiviteten vid provningsplats Linköping, gäller både för sanden och för den vattenmättade grusiga sanden, att de klassas som praktiskt taget "icke korrosiva".

För svenska förhållanden kommer många jordar att få kraftigt negativa bedömningstal för jordens buffertkapacitet eftersom svenska jordar i allmänhet har låg karbonathalt (låg kalkhalt). Buffertkapaciteten kan ge upp till - 10 i bedömningstal. Det är endast torv-, gytte-, myr- och marskjordar samt starkt förorenad jord, som ger mera negativa bedömningstal (- 12). Många svenska jordar kommer därför att klassas som starkt korrosiva eller som korrosiva. Det är sannolikt så att den tyska standarden inte är anpassad till jordar med låg karbonathalt.

En annan sak att diskutera är användningen av den tyska standarden för nedslagna vertikala stålplåtar eftersom standarden i första hand tagits fram för korrosionsriskbedömningar av nedgrävda horisontella rörledningar.



**Tabell 5.8** Summor av olika bedömningstal för jorden vid provningsplatserna och uppmätt medelfrätdjup på stålplåtar efter 27 års exponering. Medelfrätdjupet på stålplåtarna från Linköping har extrapolerats från massförlustundersökningar efter 20 års exponering

Provningss-plats	Summa av bedömningstal				Medelfrätdjup på stålplåte efter 27 års exponering  µm
	B <sub>0</sub> Bedömning av fri korrosion <sup>1)</sup> utan inverkan av stora luftningsceller	B <sub>1</sub> Bedömning av fri korrosion och korrosion orsakad av stora luftningsceller	B <sub>A</sub> Bedömning av den anodiska funktionen vid korrosion orsakad av stora luftningsceller	B <sub>K</sub> Bedömning av den katodiska funktionen vid korrosion orsakad av stora luftningsceller	
<b>Enköping</b>					
övre nivå	- 12	- 12	- 9	- 5	56
nedre nivå	- 11	- 11	- 9	- 5	
<b>Sollentuna</b>					
övre nivå	- 27	- 27	- 4	- 16	209
nedre nivå	- 32	- 32	- 30	- 16	
<b>Göteborg</b>					
övre nivå	- 31	- 31	- 28	- 14	189
nedre nivå	- 34	- 34	- 32	- 14	
<b>Stockholm</b>					
övre nivå	- 23	- 23	- 20	- 16	203
nedre nivå	- 31	- 31	- 29	- 15	
<b>Linköping</b>					
Sand över grundvattentyan	+ 6	+ 6	+ 6	- 2	95
Grusig sand under grundvattentyan	+ 3	+ 3	+ 4	+ 4	103

1) Med fri korrosion avses korrosion, som inte orsakas av läckströmmar och främmande katod (bimetallkorrosion eller galvanisk korrosion). Korrosionen sker utan inverkan av stora luftningsceller med stort avstånd mellan anodiska och katodiska partier.

Enligt Decker m. fl. (2008), som har undersökt 34 – 38 år gamla stålplåtar under en väg i USA, mätte man medelkorrosionshastigheter på mellan 2 och 9 µm/år medan den maximala var 19 µm/år. För plåtar, som drivits genom fyllning vid ett brolandfäste uppmättes 13 µm/år i fyllningen, 22 µm/år i den naturliga jorden och som högst 48 µm/år i jorden i den zon där grundvattentyan fluktuerar. Den höga korrosionshastigheten tillskrivs här effekten av saltning på vägen för halkbekämpning.

Vissa kopplingar till jordparametrar görs också i artikeln. Sålunda varnas för jordar där pH-värdet ≤ 5,0 eller ≥ 8,5, där resistiviteten < 340 Ω-cm eller kloridhalten > 450 ppm. Man varnar också för pålning genom fyllning speciellt där jorden kan bli aggressiv genom till exempel vägsaltning.

Sandegren (1988) anger att i ungefär hälften av de undersökta fallen har den maximala korrosionen uppmätts över eller något under grundvattenytan. I övriga fall var korrosionsangreppen störst på större djup under grundvattenytan.

Enligt Bengtsson m. fl. (2002) kan korrosionshastigheter bedömas med stöd av jordartstyp. Mindre korrosion har uppmätts i sandiga/grusiga jordar medan något större värden erhålls i leriga/siltiga jordar och störst korrosion i jordar med organiskt material.

Av den statistiska bearbetningen framgår följande slutsatser:

- Resistiviteten minskar med ökande vattenkvot
- Korrosionshastigheten tycks vara oberoende av vattenkvoten
- Det finns en viss trend att korrosionshastigheten minskar med ökande resistivitet
- Man kan inte dra någon slutsats om effekten av jordens pH-värde. Möjligen beror detta på en anhopning av höga korrosionsvärden vid pH-värden omkring 7.

För att klargöra huruvida korrosionshastigheterna på de olika provningsplatserna kan bedömas från de jordparametrar, som bestämts i detta projekt, har jämförelser också gjorts med det samband, som presenterades av Bergdahl (1990) och som innehåller många av de egenskaper, som den tyska standarden anger. Denna funktion har dock främst utvecklats för att bedöma korrosionen på nedgrävda varmförzinkade kraftledningsstolpar för dåvarande Sydkraft AB. Det bör också påpekas att en stor del av kraftledningsstolpen står i luft ovanför markytan.

Enligt detta samband kan korrosionshastigheten bedömas från värdet på följande korrosionsfunktion:

$$w_{\text{kor}} = f\left(\frac{\log w \cdot (7,0 - 2,5 \cdot h_w) \cdot |\Delta U|}{\text{pH} \cdot \log \rho}\right)$$

- där
- $w_{\text{kor}}$  = korrosionshastighet (medelavfrätning),  $\mu\text{m}/\text{år}$
  - $w$  = vattenkvot i jorden, mass-% av torr jord
  - $h_w$  = grundvattenytans minsta djup under markytan, m
  - $\Delta U$  = pålens (konstruktionens) korrosionspotential före uppdragning, V (Cu/CuSO<sub>4</sub>)<sup>1)</sup>
  - $\rho$  = resistivitet i jorden,  $\Omega \cdot \text{m}$  mätt med Wengers 4-elektrodmeter
  - $\text{pH}$  = uppmätt pH-värde i jorden.

Värdena på de flesta av dessa parametrar har sammanställts i **Avsnitt 3, Tabell 3.1** och **3.2** ovan med högsta och lägsta värden. I **Tabell 5.9** nedan redovisas den uppmätta korrosionshastigheten dels som medelavfrätning dels största och minsta korrosionshastigheter. Vidare visas värdena på korrosionsfunktionen även här med medelvärden samt största och minsta värden. Tyvärr saknas uppgifter om korrosionspotentialen för pålarna från Linköping varför korrosionsfunktionens värde för dessa beräknats endast med antagna värden.

En jämförelse mellan de sålunda uppmätta korrosionshastigheterna och värdena på korrosionsfunktionen visar på en proportionalitet: korrosionshastigheten ökar med värdet på korrosionsfunktionen men spridningen i värdena på såväl korrosionsfunktionen som uppmätta korrosionshastigheter är stor. Detta innebär att korrosionsfunktionen skulle kunna användas för att skilja mellan olika jordar med hänsyn till risken för korrosion på stålplåtar. Samma slutsats har man också kommit till när det gäller de så kallade Sandviksrören, se Vinka och Bergdahl (2010).

<sup>1)</sup> I den ursprungliga utredningen har här insatts potentialskillnaden mellan den förzinkade kraftledningsstolpen och ett förzinkat grundvattenrör, som satts ned minst två veckor före potentialmätningen.

Enligt Bengtsson m. fl. (2000) kan den dimensionerande rostmånen för försöksplatserna bestämmas från Tabell 7.52 i Pålkommisionens Rapport 98 för 100 år för enkla förhållanden, som här bedömts föreligga på försöksplatserna. För Enköping och Sollentuna där jorden utgörs av lera anges dimensionerande rostmån till 3 mm över grundvattenytan och 2 mm därunder. För Göteborg och Stockholm där jorden består av gytjig lera anges dimensionerande rostmån till 4 mm över grundvattenytan och till 3 mm därunder.

För Linköping där jorden består av sand och grusig sand anges dimensionerande rostmån till 2 mm såväl över som under grundvattenytan. Vid en antagen säkerhetsfaktor på 1,5 för rostmånen skulle angivna värden motsvara en korrosionshastighet på mellan 13,3 och 26,7  $\mu\text{m}/\text{år}$  eller en total korrosion på 360 till 720  $\mu\text{m}$  på 27 år. Dessa värden på korrosionen kan jämföras med värdena på den uppmätta massförlustbestämda korrosionshastigheten enligt **Tabell 5.7** på 2,1 till 7,8  $\mu\text{m}/\text{år}$  i lerjordar eller ett medelfrättdjup på 57 till 211  $\mu\text{m}$  på 27 år. Om hänsyn tas till den ojämna fördelningen av korrosionen längs pålarna erhålls de största korrosionshastigheterna i lerjord till mellan 3,1 och 18,8  $\mu\text{m}/\text{år}$  eller ett medelfrättdjup på 89 till 518  $\mu\text{m}$ . Den största uppmätta korrosionen är således lägre än den som används vid dimensionering idag medan den lägsta uppmätta är betydligt lägre än den som antas vid dimensionering.

**Tabell 5.9** Uppmätta korrosionshastigheter på krysspålar och värden på korrosionsfunktionen enligt Bergdahl (1990).

Provningsplats	Korrosionshastighet massförlustbestämd efter 20 respektive 27 år exponering $\mu\text{m}/\text{år}$			Värden på korrosionsfunktionen		
	Medel- avfrätning	Största värde	Minsta värde	Medel- värde	Största värde	Minsta värde
Enköping, Ryda	2,1	3,1	0,1	0,69	0,74	0,64
Sollentuna, Rotsunda	7,8	8,9	4,4	1,25	1,79	0,71
Göteborg, Näset	6,9	8,7	1,5	2,17	3,55	0,78
Stockholm, Skå	7,5	18,8	1,0	1,30	1,95	0,66
Linköping, Kolbytte-mon, Övre	3,5	–	–	0,4 <sup>a)</sup>	–	–
Linköping, Kolbytte-mon, Nedre	3,8	–	–	0,24 <sup>a)</sup>	–	–

a) Korrosionspotential ej uppmätt. Antaget värde - 600 mV relativt den mättade koppar/koppar-sulfat-elektroden.

För pålarna i sandjord i Linköping finns ännu ej några uppgifter om korrosionens fördelning längs pålarna varför motsvarande jämförelser ännu ej kan göras för dessa.

Enligt svensk standard SS-EN 1993-5:2007, Eurokod 3, del 5, **Tabell 4.1** är de rekommenderade värdena för avrostning i ostörd naturlig jord 324  $\mu\text{m}/27$  år (interpolerat värde): Detta motsvarar en korrosionshastighet på 12,0  $\mu\text{m}/\text{år}$ . Om man förutsätter att "rekommenderade" värden är desamma som "dimensionerande" värden enligt Pålkommisionens Rapport 98, Bengtsson m. fl. (2000), finner man att den i Eurokod 3, del 5 rekommenderade är lägre än den som anges i Pålkommisionens Rapport 98 men samtidigt högre än den som uppmäts under 27 år i svenska lerjordar. Värdet är dock lägre än vad som uppmäts på den mest korroderade delen av en påle i lera, 18,8  $\mu\text{m}/\text{år}$ .

## 6. Resultat från särskilda laboratorieanalyser

### 6.1 Inledning

Särskilda laboratorieanalyser har genomförts för att simulera porvattenkemin på de olika provningsplatserna och för att utvärdera orsakerna till korrosionen genom analys av porvattnets kemiska sammansättning.

Sedan tidigare undersökningar, se till exempel Mattsson och Kucera (2009), vet man att porvattnet i korrosiva jordar innehåller höga koncentrationer av lösliga salter, sulfat, klorid, karbonater och kan både vara sura och alkaliska (porvattnet i alkaliska jordar innehåller höga koncentrationer av Na, K, Mg, Ca). I det neutrala pH-området är pH-värdet en mindre viktig parameter för korrosionen. Syre är viktigaste oxidationsmedlet (elektronacceptor), och styr redoxpotentialen. Men även mikroorganismer (sulfatreducerande bakterier) kan vara viktiga elektronacceptorer vilket gör att korrosion även kan ske under anaeroba förhållanden. Detta gäller under förutsättning att det finns tillgängligt sulfat (vilket mikrobiellt reduceras till sulfid), ett pH på 5 – 9 och lämpligt organiskt material (kolkälla). Korrosionsprodukten är järnsulfid på ytorna vilket tillsammans med järnytorna bildar en galvanisk cell, som accelererar korrosionsprocessen, Li m. fl. (2001).

Bildandet av andra korrosionslager och mineralutfällningar på järnytorna och kinetiken i borttransport av korrosionsprodukter kan vara begränsande för korrosionshastigheten. Vanliga mineraler, som kan bildas på järnytorna, är goethit, magnetit, maghemit, ferrihydrit, pyrit och siderit. Även klorid- och fosfat innehållande faser kan bildas, Gerwin & Baumhauer (2000) och Vinka (1997).

### 6.2 Metod

Laktestning av jordprover från Ryda, Skå, Sollentuna och Göteborg (övre provnivån) har utförts enligt svensk standard SS-EN12457-1 vid Liquid/Solid (L/S) förhållande 2 (l/kg torrs substans). Analys av den kemiska kompositionen av eluatet gjordes med avseende på följande element:  $\text{Ca}^{2+}$ , Fe,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , Mn,  $\text{Na}^+$ , F, Cl,  $\text{NO}_3^-$ -N,  $\text{PO}_4^{2-}$ -P,  $\text{SO}_4^{2-}$ -S,  $\text{HCO}_3^-$ -C, DOC (ICP-AES, jonkromatografi och en TOC-analysator). Eluatets kemiska sammansättning antas vara en god uppskattning av porvattenkemin in situ och därmed den kemiska miljön, som pålarna är exponerade i.

Den organiska halten i jorden har bestämts med kolorimetermetoden SS 02 71 07, pH-värdet med SS-ISO 10390:2007 och sulfathalten enligt SS-ISO 10304-1:2007.

Det geokemiska programmet PHREEQC version 2.15.02, och MINTEQ databas, har använts för att bestämma löslighetsindex, SI (Solubility Index), och lösta förekomstformer (så kallad speciering) av järn ( $\text{Fe}^{2+}$  och  $\text{Fe}^{3+}$ ) i eluatet.

### 6.3 Resultat av karakterisering

I **Tabell 6.1** redovisas resultat från karakterisering av jordprover från naturligt lagrade jordar och i **Tabell 6.2** och **6.3** samt i **Figur 6.1** och **6.2** resultaten av analys av eluat från laktest, vilka alltså antas representera porvattenkemin in situ.

**Tabell 6.1** Kemiska analyser av naturligt lagrad och icke omgrävd jord på olika provningsplatser. Provtagning från hösten 2008.

Parameter	Provningsplats				
	Enköping	Sollentuna	Göteborg övre nivån	Göteborg nedre nivån	Stockholm
	Naturligt lagrad och icke omgrävd jord	Naturligt lagrad och icke omgrävd jord	Naturligt lagrad och icke omgrävd jord	Naturligt lagrad och icke omgrävd jord	Naturligt lagrad och icke omgrävd jord
	Djup under markytan 0,55 – 0,75 m	Djup under markytan 0,50 – 0,70 m	Djup under markytan 0,50 – 0,70 m	Djup under markytan 1,20 – 1,40 m	Djup under markytan 0,50 – 0,70 m
<b>pH-värde</b> pH(H <sub>2</sub> O)	7,1	4,5	5,2	5,4	4,1
<b>Organisk halt</b> mass-% av torr jord	0,7	2,2	4,4	5,9	5,5
<b>Kloridhalt<sup>1)</sup></b> mg Cl <sup>-</sup> /kg torr jord	< 1000	< 1000	325	917	< 1000
<b>Sulfathalt</b> vattenlöslig mg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /kg torr jord	46	400	280	5990	540
<b>Sulfathalt</b> syralöslig mg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /kg torr jord	130	5300	2400	6700	3100

1) Det bör noteras att metoden för bestämning av jordens kloridhalt inte haft tillfredsställande upplösning.

**Tabell 6.2** Skaktest (enstegslakning: SS-EN 12457-1) av jordar från olika provningsplatser. Jordarna skakades med avjoniserat vatten och sammansättningen hos laklösningen (eluatet) har analyserats. Den utlakade mängden anges i enheten mg/kg torr jord. Provtagning utfördes under hösten 2008 från naturligt lagrad jord, som inte varit omgrävd.

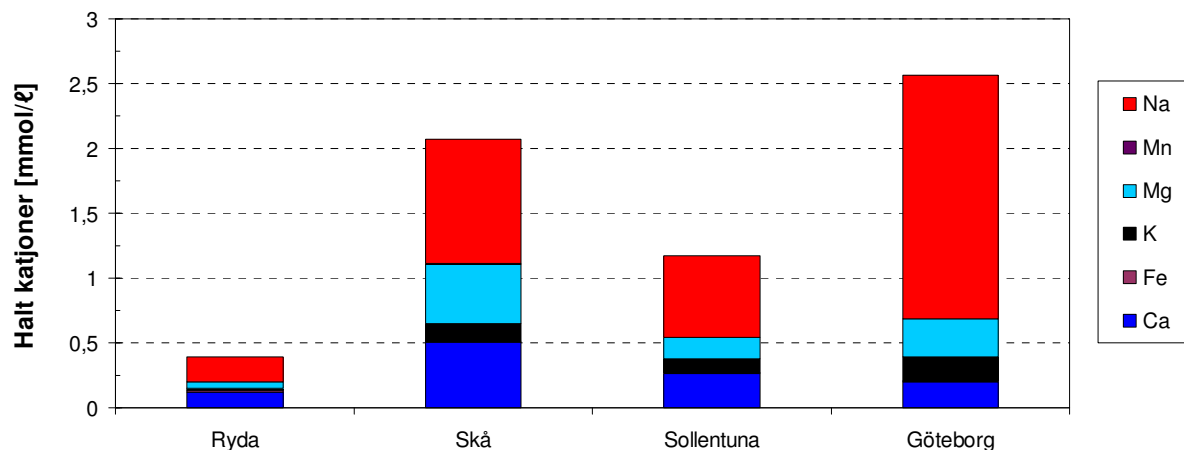
Analysparameter	Enhet	Provningsplats							
		Enköping		Sollentuna		Göteborg		Stockholm	
		Prov A	Prov B	Prov A	Prov B	Prov A	Prov B	Prov A	Prov B
		Djup under markytan: 0,55 – 0,75 m		Djup under markytan: 0,50 – 0,70 m		Djup under markytan: 0,50 – 0,70 m		Djup under markytan: 0,50 – 0,70 m	
<b>Parametrar i eluat</b>									
pH-värde		6,4	6,4	4,3	4,1	5,7	5,7	3,6	3,8
Konduktivitet	mS/m (25 °C)	16,3	9,4	25,0	28,9	24,1	33,9	47,6	46,6
Redoxpotential, E <sub>h</sub>	mV rel. NHE	330	399	507	506	389	393	531	539
<b>Utlakad mängd</b>									
<b>Anjoner</b>									
Kalcium, Ca <sup>2+</sup>	mg/kg torr jord	13,4	6,6	21,6	21,0	18,2	13,8	41,4	40,2
Magnesium, Mg <sup>2+</sup>	mg/kg torr jord	2,8	1,6	8,2	7,8	16,2	12,0	22,4	22,0
Kalium, K <sup>+</sup>	mg/kg torr jord	1,4	1,0	8,3	8,3	16,5	12,6	10,7	10,5
Natrium, Na <sup>+</sup>	mg/kg torr jord	12,0	6,2	29,2	28,4	100	72,8	44,6	43,4
Järn, Fe	mg/kg torr jord	1,4	1,1	0,3	0,4	0,5	1,7	0,4	0,3
Mangan, Mn	mg/kg torr jord	0,02	0,01	0,5	0,5	0,3	0,2	1,1	1,1
<b>Katjoner</b>									
Klorid, Cl <sup>-</sup>	mg/kg torr jord	2,1	1,4	24,4	24,2	164	123	37,2	39,2
Fluorid, F <sup>-</sup>	mg/kg torr jord	0,9	0,6	0,5	0,5	0,4	0,1	1,4	1,5
Vätekarbonat, HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -C	mg/kg torr jord	1,0	0,8	< 0,2	< 0,2	< 1	< 1	< 0,2	< 0,2
Nitrat, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	mg/kg torr jord	2,8	1,4	4,6	5,4	2,8	2,8	9,2	6,4
Fosfat, PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -P	mg/kg torr jord	< 0,02	< 0,02	0,02	0,02	0,08	0,06	0,06	0,04
Sulfat, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -S	mg/kg torr jord	13,2	8,0	38,4	36,2	32,4	26,8	93,8	98,4
<b>Övriga parametrar</b>									
Löst organiskt kol, DOC	mg/kg torr jord	8,2	6,6	17	18	15	32	50	44
Kväve, totalt, N-tot	mg/kg torr jord	3,6	1,8	–	–	–	–	–	–

**Tabell 6.3** Skakttest (enstegslakning: SS-EN 12457-1) av jordar från olika provningsplatser. Jordarna skakades med avjoniserat vatten och sammansättningen hos laklösningen (eluatet) har analyserats och anges i enheten mg/l. Resultaten anges som medelvärden från två analyser. Provtagning utfördes under hösten 2008 från naturligt lagrad jord, som inte varit omgrävd.

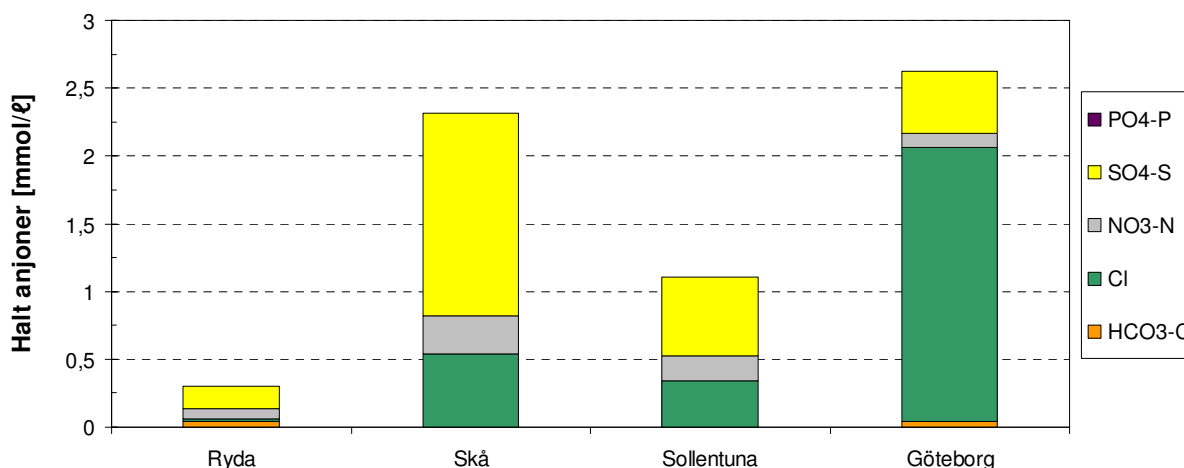
Analysparameter	Enhet	Provningsplats			
		Enköping	Sollentuna	Göteborg	Stockholm
		Djup under markytan: 0,55 – 0,75 m	Djup under markytan: 0,50 – 0,70 m	Djup under markytan: 0,50 – 0,70 m	Djup under markytan: 0,50 – 0,70 m
<b>Parametrar i eluat</b>					
pH-värde		6,4	4,2	5,7	3,7
Konduktivitet	mS/m (25 °C)	12,8	27,0	29,0	47,1
Redoxpotential, E <sub>h</sub>	mV rel. NHE	+ 364	+ 506	+ 391	+ 535
<b>Halt i eluat</b>					
<b>Anjoner</b>					
Kalcium, Ca <sup>2+</sup>	mg/l	5,0	10,6	8,0	20,4
Magnesium, Mg <sup>2+</sup>	mg/l	1,1	4,0	7,0	11,1
Kalium, K <sup>+</sup>	mg/l	0,6	4,2	7,3	5,3
Natrium, Na <sup>+</sup>	mg/l	4,6	14,4	43,2	22,0
Järn, Fe	mg/l	0,63	0,18	0,54	0,16
Mangan, Mn	mg/l	0,01	0,26	0,14	0,54
<b>Katjoner</b>					
Klorid, Cl <sup>-</sup>	mg/l	0,9	12,2	71,7	19,1
Fluorid, F <sup>-</sup>	mg/l	0,4	0,2	0,1	0,7
Vätekarbonat, HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -C	mg/l	0,4	< 0,1	< 0,5	< 0,1
Nitrat, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	mg/l	1,1	2,5	1,4	3,9
Fosfat, PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -P	mg/l	< 0,01	0,01	0,04	0,02
Sulfat, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -S	mg/l	5,3	18,6	14,8	48,0
<b>Övriga parametrar</b>					
Löst organiskt kol, DOC	mg/l	3,7	8,7	11,8	23,6

Vid så låga pH-värden, som uppvisades i Skå, Sollentuna, och Göteborg, uppvisar eluatet inga detekterbara karbonathalter. I eluatet från lakttesten med jord från Ryda bestämdes alkaliniteten,  $\text{HCO}_3^-$ , till 0,5 mg/l (0,04 mmol/l). Vid tidigare redovisade provtagningar av uppsamlat grundvatten i provgröpar i Ryda har en alkalinitet,  $\text{HCO}_3^-$ , bestämts till 189 mg/l (3,1 mmol/l).

I **Figur 6.1** och **6.2** redovisas resultaten från de analyserade katjonerna och anjonerna (mmol/l).



**Figur 6.1** Halt av katjoner (mmol/l) i eluat vid olika provningsplatser.



**Figur 6.2** Halt av anjoner (mmol/l) i eluat vid olika provningsplatser.

Elektrisk konduktivitet är konduktans per längdenhet och mäts i siemens per meter (S/m) och är inversen till resistivitet. I jord styrs resistiviteten av framför allt jonstyrka och vattenhalt men även kornstorlek och lermineralinnehåll har betydelse. Den elektriska konduktiviteten i en lösning kan approximeras från fysikaliska data som summan av de enskilda konduktivetsbidragen från alla joner i lösningen enligt:

$$EC = \sum \lambda_i c_i \quad (\text{mS/m})$$

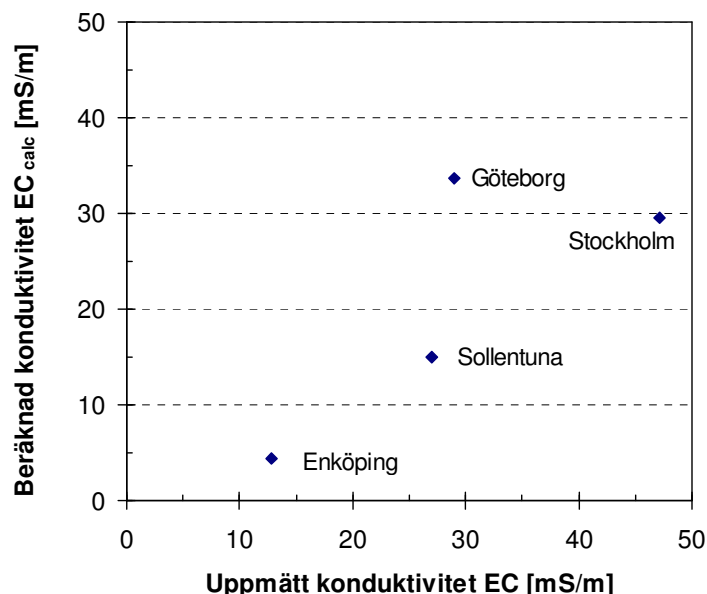
där  $\lambda_i$  ( $\text{mS}^2/\text{mol}$ ) är den ekvivalenta jonkonduktiviteten för jonen  $i$  och  $c_i$  ( $\text{mmol/l}$ ) är koncentrationen för jonen  $i$ . De ekvivalenta jonkonduktiviteterna för de huvudsakliga anjonerna och katjonerna har angivits i **Tabell 6.4** enligt CRC (2002).



**Tabell 6.4** Ekvivalenta jonkonduktiviteter  $\lambda_0$  för olika jonslag (CRC, 2002).

Jon	Ekvivalent jon- konduktivitet mS·m <sup>2</sup> /mol)
Ca <sup>2+</sup>	5,95
Fe <sup>2+</sup>	5,40
K <sup>+</sup>	7,35
Mg <sup>2+</sup>	5,30
Mn <sup>2+</sup>	5,35
Na <sup>+</sup>	5,01
F <sup>-</sup>	5,54
Cl <sup>-</sup>	7,63
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	7,14
PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	9,28
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	8,00
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	4,45

Den beräknade elektriska konduktiviteten kan jämföras med den uppmätta konduktiviteten som en kvalitetskontroll. I **Figur 6.3** redovisas relationen mellan den uppmätta (se **Tabell 6.3**) och den beräknade konduktiviteten. Den högst beräknade konduktiviteten är från Göteborg (33,6 mS/m) och ligger nära den uppmätta. För övriga jordar är den beräknade konduktiviteten lägre än den uppmätta, vilket möjligen kan bero på utfällningar i provflaskan, som i så fall skett mellan tidpunkten för mätning av konduktiviteten på SGIs laboratorium till tidpunkten för analys av den kemiska kompositionen.



**Figur 6.3** Relation mellan uppmätt elektrisk konduktivitet (EC) och beräknad elektrisk konduktivitet ( $EC_{calc}$ ) i eluaten från de olika provningsplatserna.

## 6.4 Resultat av geokemisk modellering

I **Tabell 6.5** redovisas löslighetsindex (uttryckt som  $\log SI$ ) för de mineralfaser där minst ett av eluaten (Ryda, Skå, Sollentuna eller Stockholm) uppvisar ett positivt löslighetsindex ( $\log SI \geq 0$ ) vid åtminstone en av provningsplatserna. Ett positivt löslighetsindex indikerar att eluatet är övermättat med avseende på mineralen i fråga. Detta tolkas så att: (i) antingen förekommer mineralen i jorden i kontakt och i jämvikt med eluatet eller (ii) förekommer mineralen inte, men det föreligger en hög sannolikhet för att mineralen kan bildas genom utfällning. De mineral, som uppvisar ett positivt löslighetsindex, skall alltså uppfattas som mineral, som potentiellt styr koncentrationen i eluatet för de grundämnen, som mineralen består av.

Ett negativt löslighetsindex indikerar att eluatet är undermättat med avseende på mineralen i fråga. Ett stort negativt löslighetsindex innebär en låg sannolikhet för att mineralen i fråga förekommer eller är på väg att bildas genom utfällning (om inte de geokemiska förhållandena ändras, till exempel genom en pH-förändring eller tillskott av någon jon, genom till exempel korrosion). De järninnehållande mineralerna kan sannolikt bildas på järnytorna genom lokalt tillskott på Fe vid kontaktytorna så att  $\log SI > 0$  lokalt, även om porvattnet är undermättat ( $\log SI < 0$ ).

**Tabell 6.5** Löslighetsindex (log SI) för de mineralfaser, som uppvisar ett positivt löslighetsindex vid en eller flera av provningsplatserna.

Mineralfaser	Löslighetsindex			
	(log SI)			
	Provningsplats			
	Enköping Ryda	Stockholm Skå	Sollentuna Rotsunda	Göteborg Näset
Ferrihydrit Fe(OH) <sub>3</sub>	2,0	- 3,0	- 3,1	0,61
Goethit FeOOH	6,4	1,4	1,2	5,0
Hematit Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,8	7,8	7,5	15
Jarosit-K KFe <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	3,7	- 1,0	- 2,5	3,5
Jarosit-Na NaFe <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	1,2	- 3,8	- 5,3	0,88
Lepidocrocit FeOOH	5,5	0,5	0,38	4,1
Maghemit Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,4	- 2,6	-2,9	4,6
Magnetit Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	17,4	2,0	2,0	13,6
Mg-Ferrit MgFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	5,4	- 8,8	- 9,3	2,0
Strengit FePO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	1,5	- 1,3	- 1,9	0,67
Fe(III)/Fe(II)	1,73	0,022	0,0076	0,17

Från andra studier där utfällningar på korroderade järnytor studerats med bland annat Raman-spektroskopi är det känt att vanliga mineraler, som kan bildas på järnytorna är goethit, magnetit, maghemit, ferrihydrit och siderit (FeCO<sub>3</sub>). Även klorid- och fosfat innehållande faser kan bildas.

Atmosfärisk koldioxid löser sig i vatten så att jämvikt mellan karbonatkoncentrationen i vattnet och koldioxidens partialtryck inställer sig. Jämvikten beror av pH-värdet och ju högre pH-värde desto mer atmosfärisk koldioxid kan lösa sig i vattnet. De gjorda pH-mätningarna visar att endast i jorden från Ryda kan man förvänta sig signifikanta karbonathalter i porvattnet på grund av jordens neutrala pH-värde. De övriga jordarna från Skå, Sollentuna och Göteborg är så sura att endast mycket små mängder koldioxid kan lösa sig i porvattnet.

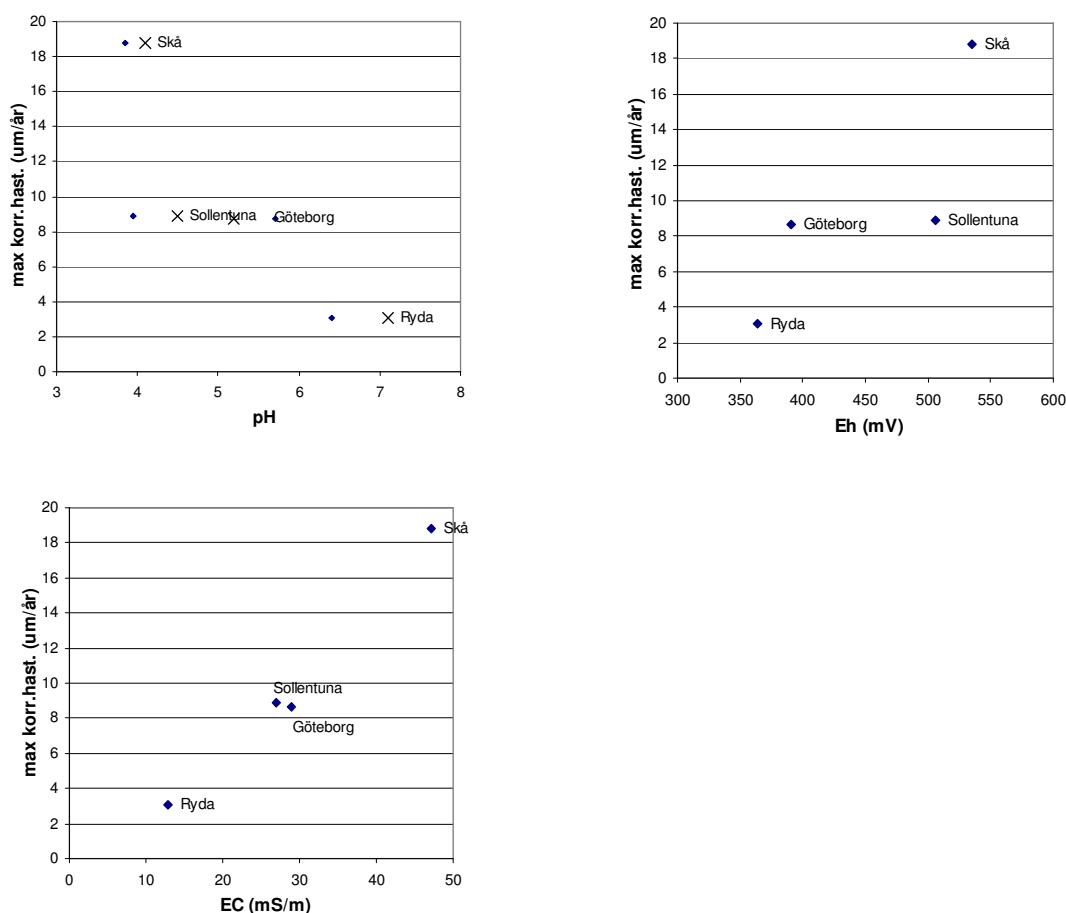
Eluaten från jordarna från Stockholm, Sollentuna och Göteborg är, enligt den geokemiska modelleringen, följaktligen signifikant undermåttade med hänsyn till siderit (och har därför ej tagits med i **Tabell 6.5**). Eluaten från jorden i Ryda befanns vara något undermåttade med avseende på siderit, log SI = - 2. Men, då ett lokalt tillskott på Fe vid kontaktytorna sker, tillsammans med en lokal pH-höjning på grund av korrosionsprocessen, kan troligtvis siderit fällas ut i Ryda. Detta har bekräftats genom de undersökningar, som utförts av Vinka (2001). Genom pulvverröntgendiffraktion har korrosionsprodukter analyserats från stål, som korroderat på provtagningsplatserna Ryda, Skå, Sollentuna och Göteborg. På samtliga platser har magnetit kunnat bestämmas, i Skå även goethit och i Ryda siderit.

## 6.5 Resultat av jämförelse mellan uppmätt korrosion och geokemiska parametrar

Den massförlustbestämda medelkorrosionshastigheten för hela pålar var praktiskt taget lika stor för tre provningsplatser: Göteborg, Stockholm och Sollentuna med korrosionshastigheterna 6,9, 7,5 respektive 7,8 µm/år. Korrosionshastigheten vid provningsplats Enköping avvek från de övriga provningsplatserna och var betydligt lägre; 2,1 µm/år **Tabell 5.7**.

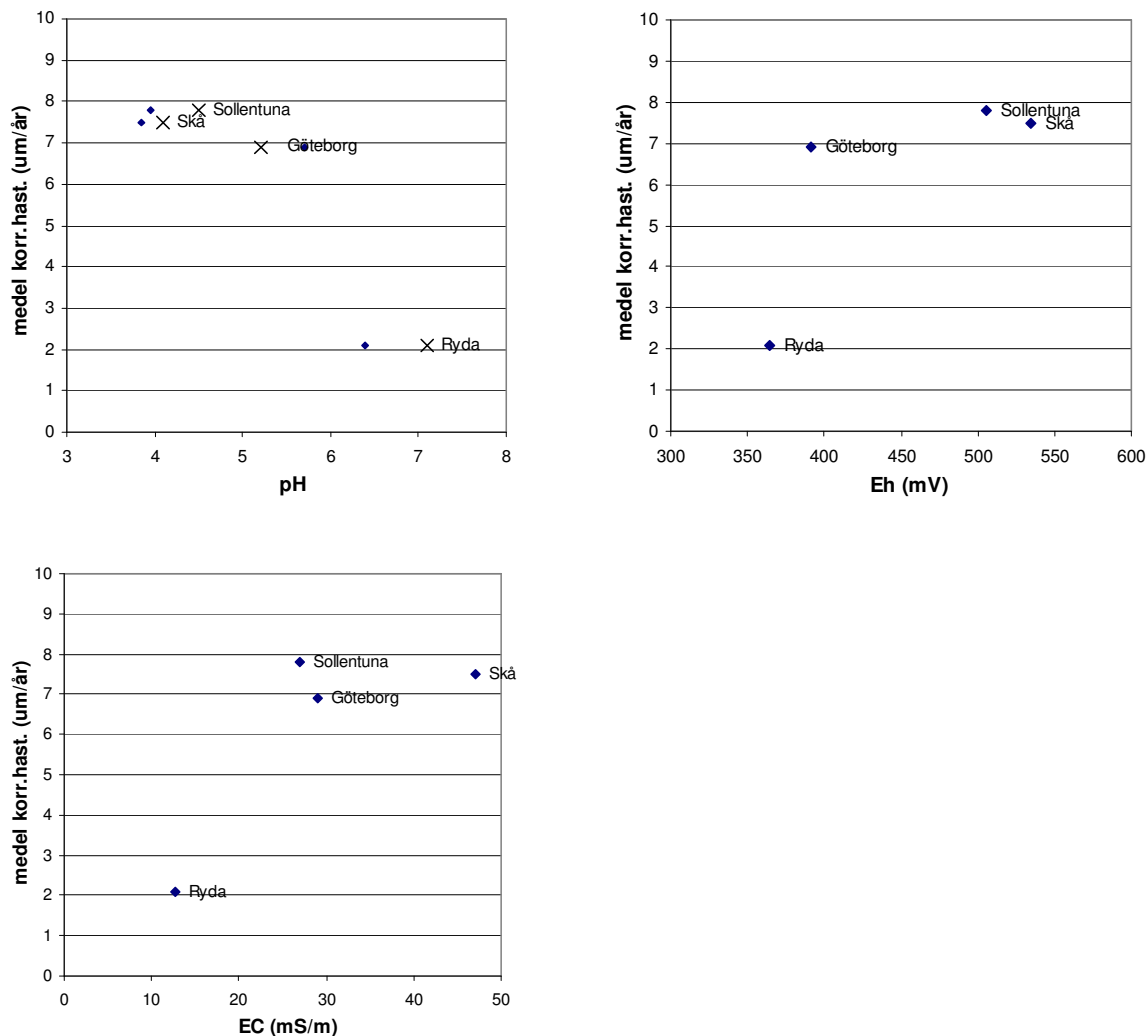
För de maximala massförlustbestämda korrosionshastigheterna för påldelar fanns två avvikande korrosionshastigheter: ett lågt värde, 3,1  $\mu\text{m}/\text{år}$ , för provningsplats Enköping och högt värde, 18,8  $\mu\text{m}/\text{år}$ , för provningsplats Stockholm. För provningsplatserna Göteborg och Sollentuna var korrosionshastigheterna lika stora: 8,7 respektive 8,9  $\mu\text{m}/\text{år}$ .

I **Figur 6.4** och **Figur 6.5** har den uppmätta korrosionshastigheten ( $\mu\text{m}/\text{år}$ ), som maximala respektive medelkorrosionshastighet (se **Tabell 5.7**), i Ryda, Skå, Sollentuna och Göteborg plottats som funktion av pH-värde, redoxpotential  $E_h$  (mV) och konduktivitet EC (mS/m).



**Figur 6.4** Maximal korrosionshastighet för påldelar som funktion av pH-värde, redoxpotential  $E_h$  (mV) och konduktivitet EC (mS/m) i eluatet från jordarna från Ryda, Skå, Sollentuna och Göteborg. Observera att pH har mätts enligt SS-ISO 10390:2007 i jordarna (markerade som kryss) och i eluat vid skaktest.

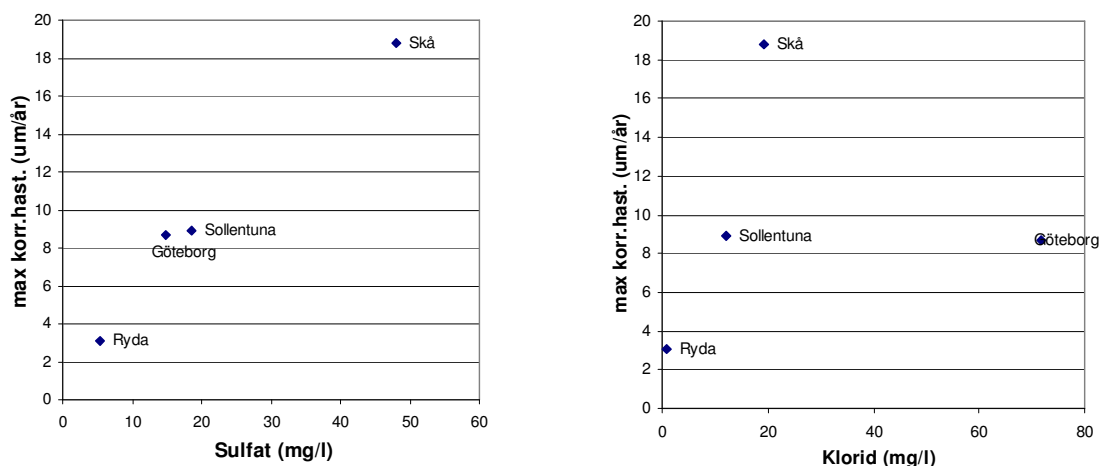
**Figur 6.4** redovisar en positiv korrelation mellan den maximala korrosionshastigheten och en negativ korrelation med pH-värdet, vilket bekräftar betydelsen av dessa parametrar som styrande för korrosionen. Även redoxpotentialen visar en positiv korrelation med den maximala korrosionshastigheten, men uppvisar en större spridning.



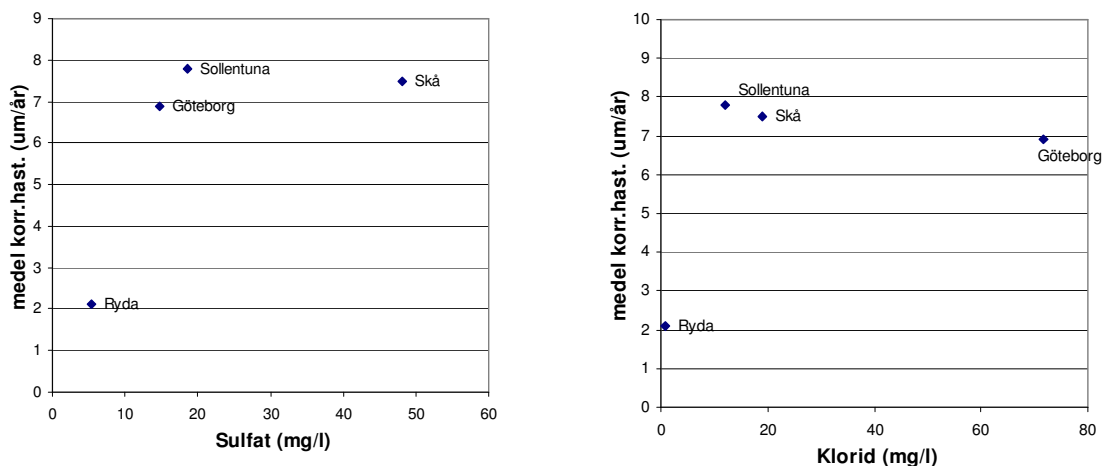
**Figur 6.5** Korrosionshastighet (medelavfrätning) för hela pålar som funktion av pH-värde, redoxpotential  $E_h$  (mV) och konduktivitet EC (mS/m) i eluatet från jordarna från Ryda, Skå, Sollentuna och Göteborg. Observera att pH har mätts enligt SS-ISO 10390:2007 i jordarna (markerade som kryss) och i eluat vid skaktest.

**Figur 6.5** redovisar att även medelavfrätningen för hela pålarna visar ett beroende av redoxpotential, elektrisk konduktivitet och pH-värde.

I **Figur 6.6** och **Figur 6.7** har den uppmätta korrosionshastigheten ( $\mu\text{m}/\text{år}$ ) som maximal respektive medelkorrosionshastighet (se **Tabell 5.7**), plottats som funktion av sulfat- och kloridkoncentration ( $\text{mg}/\ell$ ) i eluatet. Figureerna visar ett nästan linjärt beroende mellan den maximala korrosionshastigheten och sulfatkoncentrationen och ett svagare beroende med avseende på korrosionshastigheten för hela pålar (medelavfrätning). Beroendet mellan den maximala korrosionshastigheten och kloridkoncentrationen är oklar. För korrosionshastigheten för hela pålar föreligger inget beroende av kloridkoncentrationen.

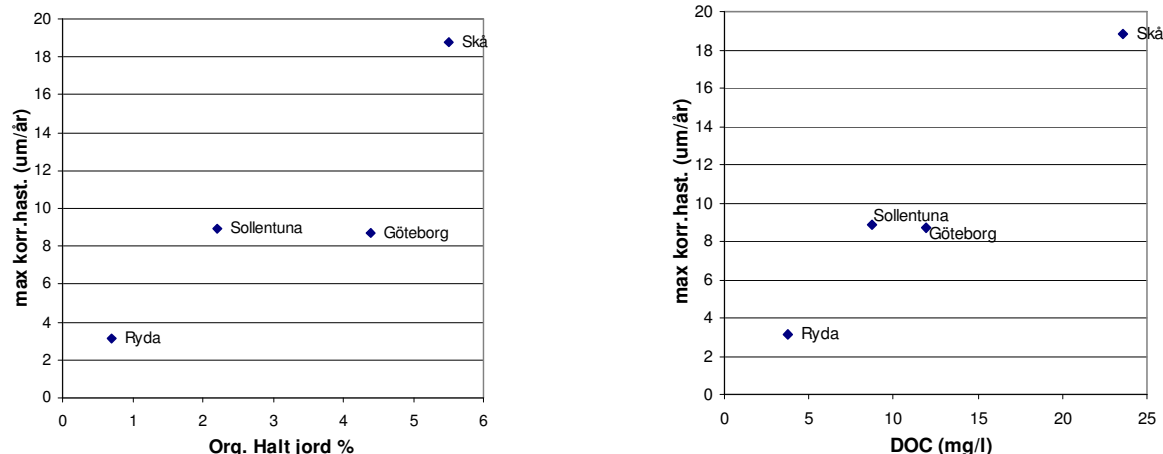


**Figur 6.6** Maximal korrosionshastighet för påldelar som funktion av sulfat- och kloridhalt (mg/l) i eluatet från jordarna från Ryda, Skå, Sollentuna och Göteborg.



**Figur 6.7** Korrosionshastighet (medelavfrätning) för hela pålar som funktion av sulfat- och kloridhalt (mg/l) i eluatet från jordarna från Ryda, Skå, Sollentuna och Göteborg.

I **Figur 6.8** har den uppmätta maximala korrosionshastigheten ( $\mu\text{m}/\text{år}$ ) (se **Tabell 5.7**) plottats som funktion av organisk halt (%) i jorden och löst organiskt kol, DOC (Dissolved Organic Carbon) (mg/l) i eluatet. Det föreligger en tydlig positiv korrelation vilket tillsammans med en korrelation med sulfatkoncentrationen kan indikera förutsättningar för mikrobiell korrosion.



**Figur 6.8** Maximal korrosionshastighet för påldelar som funktion av organisk halt (%) i jorden och DOC (mg/l) i eluatet från jordarna från Enköping, Sollentuna, Göteborg och Stockholm.

## 6.6 Slutsatser av särskilda laboratorieanalyser

De särskilda laboratorieanalyser, som genomförts för att simulera porvattenkemin på de olika provningsplatserna genom laktest och utvärdera orsakerna till korrosion genom analys av eluatets kemiska sammansättning, har visat sig ge goda resultat, som styrker slutsatser från tidigare undersökningar. En tydlig positiv korrelationen mellan den maximala korrosionshastigheten och redoxpotential, elektrisk konduktivitet, sulfatkoncentration, organisk halt samt DOC, och den negativa korrelationen med pH-värdet, bekräftar betydelsen av dessa parametrar som styrande för korrosionen. Det föreligger även en positiv korrelation mellan medelkorrosionshastigheten och redoxpotential, elektrisk konduktivitet och pH-värde. I övrigt uppvisar medelkorrosionshastigheten inget uppenbart beroende av sulfatkoncentration, organisk halt i jord samt DOC. Inget samband mellan korrosionshastighet och kloridkoncentration upptäcktes.

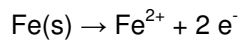
Den högsta korrosionshastigheten uppmättes på Skå. Den positiva korrelationen med organisk halt, DOC och den höga sulfatkoncentration i eluatet från Skå indikerar att sulfatreducerande mikroorganismer utgör elektronacceptorer, vilket kan förklara den höga (maximala) korrosionshastigheten. Tillgängligt sulfat reduceras mikrobiellt till sulfid och organiskt material utnyttjas som kolkälla. I tidigare studier (Vinka, 1988) uppmättes också pyrit som korrosionsprodukt i frätgroparna i Skå efter 3 års exponering vilket accelererar korrosionsprocessen (Li m. fl., 2001).

Den lägsta korrosionshastigheten uppmättes i Ryda, där man också har låg organisk halt och uppmätte neutralt pH, låg jonstyrka och låg sulfatkoncentrationen. Det enda eluat där karbonathalt kunde uppmätas var i eluatet från Ryda (0,5 mg/l). Vid tidigare redovisade provtagningar (se **Bilaga A**) av uppsamlat grundvatten i provgropar i Ryda har en alkalinitet,  $\text{HCO}_3^-$ , bestämts till 189 mg/l (3,1 mmol/l). Differensen kan möjligen förklaras av det låga pH och en koldioxidavgång vid hantering av eluatet. Den geokemiska modelleringen visade att eluatet var övermättat med avseende på ett stort antal mineraler, (bland annat hematit och magnetit) och nära mättnad med avseende på siderit. Den lokala höjningen av pH-värdet och löst järn, som erhålls vid korrosionsprocessen, bedöms vara tillräcklig för att erhålla en utfällning av siderit. Detta bekräftas av fältstudier, eftersom både magnetit och siderit i tidigare undersökningar har detekterats med XRD på kolstål i Ryda (Vinka, 2001). Dessa mineralutfällningar kan ha en reducerande inverkan på korrosionshastigheten.

## 7. Diskussion av inverkan av faktorer på korrosion i jord

### 7.1 Syretillförsel genom jorden

Korrosionsprocessen kan uppdelas i anod- respektive katodreaktioner. Vid korrosion av kolstål och låglegerat stål innebär anodreaktionen oxidation och upplösning av järn, Fe, till järn(II)joner,  $\text{Fe}^{2+}$ , under avgivning av elektroner  $e^-$  enligt:



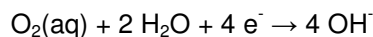
Vid god syretillförsel kan  $\text{Fe}^{2+}$  joner oxideras och bilda "rödrost" som korrosionsprodukt på metallytan. Rödrosten består av järnoxidhydroxid  $\text{FeOOH}$  i form av goethit  $\alpha\text{-FeOOH}$  och lepidokrokit  $\gamma\text{-FeOOH}$ . Vid reaktionen bildas också vätejoner,  $\text{H}^+$ . Reaktionen kan skrivas:



Vid sämre syretillförsel bildas "svartrost" som korrosionsprodukt på metallytan. Svartrosten består av järn(II,III)oxid i form av magnetit  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Reaktionen kan skrivas:



Katodreaktionen vid korrosionsprocessen består till övervägande del av syrgasreduktion. Vid syrgasreduktionen reduceras löst syrgas i jordvattnet,  $\text{O}_2(\text{aq})$ , till hydroxidjoner,  $\text{OH}^-$ , under upptagning av elektroner  $e^-$  enligt:



Syrgasen fungerar som "bränsle" för korrosionsprocessen. Själva syrgasreduktionen är beroende av transporthastigheten av syrgas genom jorden fram till metallytan. I det totala reaktionsförloppet kan olika delsteg urskiljas:

- Transport av syrgas genom jorden fram till konstruktionen
- Transport av syrgas genom "rostpansaret" på metallytan
- Adsorption av syremolekyler på metallytan
- Laddningsöverföring.

Syrgas kan transporteras i jord genom diffusion på grund av koncentrationsskillnader och strömning (konvektion). Både diffusionen och strömningen kan ske i vätskefas (porvatten i jorden) och i gasfas (porgas i jorden). Syretransporten genom strömning kan alltså indelas i luftströmning och vattenströmning.

Diffusion är den viktigaste transportmekanismen. Diffusion i gasfas dominerar över syretransport via luftströmning. Diffusionskoefficienten för syrgas är fyra tiopotenser lägre i vatten än i luft. Man kan härvid konstatera att diffusionen blir mycket snabbare i luft än i vatten och alltså är diffusionen mycket beroende av vattenmättnadsgraden hos jorden.

Korrosionshastigheten begränsas ofta antingen av korrosionsprocessens katodiska delprocess eller anodiska delprocess, se Mattsson & Kucera (2009). Om den katodiska delprocessen begränsar korrosionshastigheten brukar man tala om katodisk reglering och om den anodiska delprocessen begränsar korrosionshastigheten råder anodisk reglering. Om graden av katodisk reglering är ungefär lika stor som graden av anodisk reglering råder blandad reglering.

Enligt Tomashov (1966) är korrosionen till helt övervägande delen katodiskt reglerad (graden av katodisk reglering är mycket större än graden av anodisk reglering) i de allra flesta jordar med undantag



för mycket torr jord, där graden av anodisk reglering något överväger. I torra jordar råder därför närmast blandad reglering.

Det finns ytterligare en form av korrosionsreglering nämligen resistiv reglering. Resistiv reglering kan inträffa om elektrolytens (jordens eller vattnets) resistans eller en resistans på metallytan, från någon form av beläggning på metallytan, ger upphov till ett spänningsfall, som begränsar korrosionsströmmen i en galvanisk korrosionscell. Ett exempel på kombinerad katodisk och resistiv reglering av korrosionshastigheten uppkommer vid luftningsceller (makroluftningsceller) på en rörledning i jord, Tomashov (1966).

Vattenhalten i jorden har en mycket stor inverkan på korrosionshastigheten hos kolstål. Vid laboratorieundersökningar i sand vid Korrosionsinstitutet av Sederholm, Svensson & Vinka (1992), framkom att maximal jämn och lokal korrosionshastighet på provplåtar av kolstål uppstod vid en viss, för korrosionen, optimal vattenhalt på cirka 6 mass-% (som motsvaras av vattenkvoten 6,4 mass-%, den volymbaserade vattenhalten 10 vol-% och vattenmättnadsgraden 27 vol-%).

Vid högre och lägre vattenhalt än 6 mass-% minskade både den jämna korrosionen och den lokala korrosionen. Av laboratorieförsöken att döma blir korrosionen successivt mer katodiskt reglerad från vattenmättnadsgraden 27 vol-% till vattenmättnad av jorden. Korrosionshastigheten blir vid katodisk reglering begränsad av transporthastigheten för syrgas genom jorden fram till metallytan.

Korrosionens beroende av vattenhalten kan sammanfattas enligt följande:

Hög vattenhalt	*	Låg jämn korrosion
	*	Låg lokal korrosionshastighet och nästan helt utan gropfrätning
Vattenhalt cirka 6 mass-%	*	Mycket hög jämn korrosion
	*	Mycket kraftig gropfrätning
Låg vattenhalt	*	Måttlig jämn korrosion
Vattenhalt < 6 mass-%	*	Påtaglig gropfrätning

## 7.2 Luftningsceller i jorden

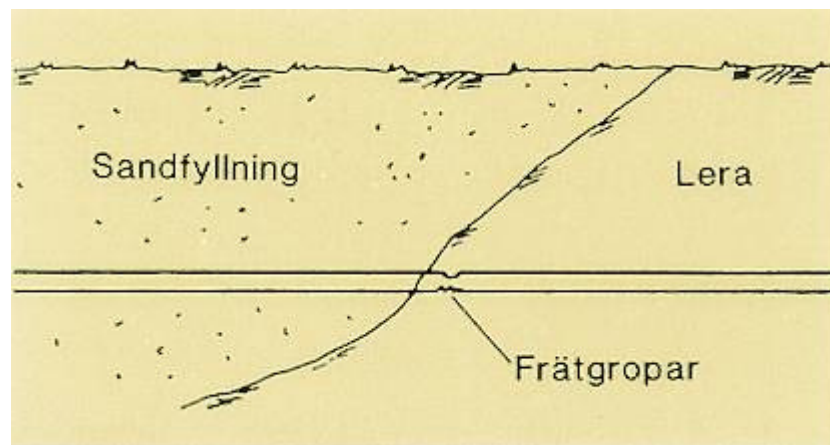
En luftningscell är en koncentrationscell inom den större gruppen galvaniska celler. Koncentrationscellen skapas av olika halt löst syrgas,  $O_2(aq)$ , på metallytan. Delar av metallytan med hög syrgashalt (god luftning) blir katod i luftningscellen och skyddas mot korrosion medan delar med låg syrgashalt (dålig luftning) blir anod i luftningscellen och angrips av korrosion.

Tomashov (1966) skiljer på två huvudtyper av luftningsceller; makro- och mikroluftningsceller. Mikroluftningsceller är som namnet antyder mycket små luftningsceller. För små föremål till exempel provplåtar kan det enligt Tomashov (1966) uppstå dels små makroluftningsceller orsakade av lokala heterogeniteter i jordmiljön och dels mikroluftningsceller.

Makroluftningsceller kan enligt Tomashov (1966) orsakas av:

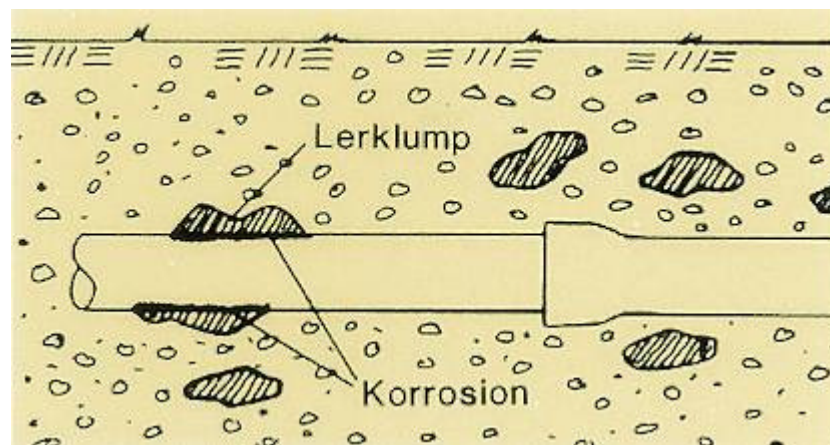
- Olika syretillförsel till olika delar av jorden. En sådan makroluftningscell kan uppstå på långsträckta konstruktioner, till exempel en rörledning med skador i skyddsbeläggningen, **Figur 7.1**.
- Lokala variationer i syretillförsel. Denna typ av makroluftningscell kan till exempel uppstå om en lerklump ligger an mot en vattenledning och röret i övrigt ligger i sandfyllning; **Figur 7.2**.
- Att konstruktionen befinner sig på olika djup. Denna typ av makroluftningscell uppstår i första hand på vertikala konstruktioner som stolpar och förankringsanordningar till stolpar, men kan också uppstå på långsträckta horisontella konstruktioner som rörledningar, **Figur 7.3**.

På en långsträckt rörledning, som korsar två eller fler jordarter, kan en luftningscell uppkomma. I luftningscellen är anoden lokaliserad till ett område med dålig luftning i lera och katoden är lokaliserad till området med sandfyllning där luftningen är bättre, **Figur 7.1**.



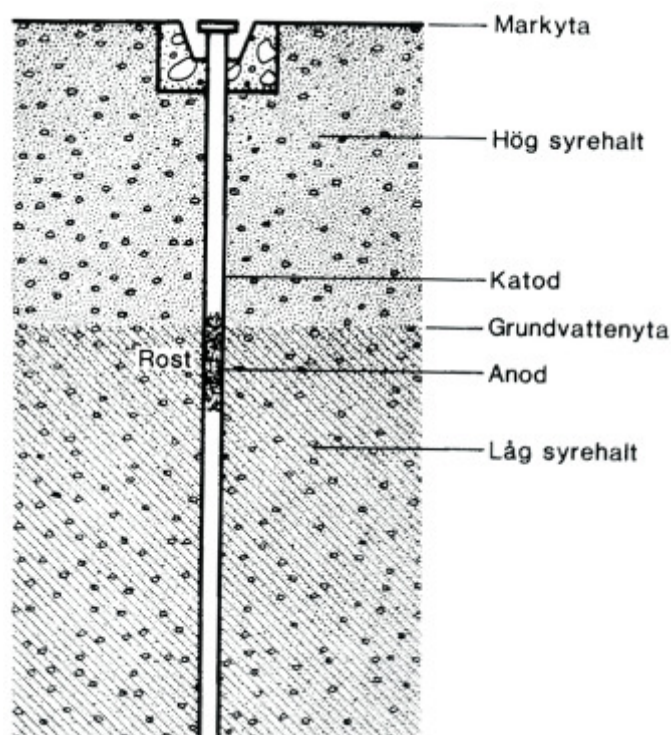
**Figur 7.1.** Korrosionsangrepp, orsakad av en makroluftningscell, på ställedning vid gränsen mellan lera och sandfyllning. Figur från Mattsson & Kucera (2009).

Luftningsceller kan också bildas då konstruktionen omges med blandad jord, som innehåller till exempel lerklumpar, **Figur 7.2**. Det bildas då anodiska områden med dålig luftning, som resulterar i frätgropar, under lerklumpar, som ligger an mot konstruktionen. Det katodiska området på konstruktionen är lokaliserat till området med sandfyllning.



**Figur 7.2.** Korrosionsangrepp, orsakad av en kort makroluftningscell, på gjutjärnsledning (gråjärn eller segjärn) under lerklumpar i sandfyllning. Figur från Mattsson & Kucera (2009).

Luftningsceller kan också uppkomma på en vertikal konstruktion i jord som sträcker sig genom grundvattenytan, **Figur 7.3**.



**Figur 7.3.** Korrosionsangrepp, orsakad av en makroluftningscell, på en stålpile i jord under grundvattenytan. Figur från Mattsson & Kucera (2009).

Makroluftningsceller påverkas av syretransporten genom jorden fram till katoden, areaförhållandet mellan anod och katod i korrosionscellen och jordens resistivitet, som påverkar resistansen i korrosionscellen, Sederholm m. fl. (1992). Tomashov (1966) uppger att jordens resistivitet har liten inverkan på korrosionen orsakad av mikroluftningsceller och av korta makroluftningsceller. Störst inverkan har resistiviteten på långa makroluftningsceller.

### 7.3 Samband mellan korrosionshastighet och jordparametrar

Det är svårt att finna samband mellan korrosionshastighet och jordparametrar eftersom korrosionen i jorden är så kraftigt katodiskt reglerad, det vill säga den katodiska delprocessen (syngasreduktion som katodreaktion) begränsar korrosionshastigheten. Korrosionshastigheten blir alltså begränsad av genomsläppligheten (transporthastigheten) för syrgas genom jorden fram till metallytan.

Den atmosfäriska korrosionen är ett exempel på svårigheterna att finna samband mellan korrosion och miljöparametrar. Under tider med hög svaveldioxidhalt ( $\text{SO}_2$ -halt) i atmosfären var det lätt att erhålla signifikanta samband mellan korrosionshastighet för de flesta bruksmetaller och  $\text{SO}_2$ -halten som enda förklarande parameter. Fram till 1985 – 90, då  $\text{SO}_2$ -halten började nå mycket låga nivåer i Sverige, erhöles linjära samband mellan korrosionshastighet och  $\text{SO}_2$ -halt med mycket hög förklaringsgrad (> 90 %) för den atmosfäriska korrosionen. I och med att  $\text{SO}_2$ -halten i atmosfären numera är så låg går det svårt att finna samband med acceptabel förklaringsgrad trots att betydligt fler parametrar har inkluderats i sambanden.

Det erhöles inga samband med acceptabel förklaringsgrad vid tidigare undersökningar på Korrosionsinstitutet mellan jämn korrosionshastighet för hela stålpilear, som varit exponerade fem år och jordparametrar enligt **Bilaga A**, med enkel och multipel linjär regression.

För korrosion på neddrivna stålpilear helt under markytan i jord erhöles inga samband mellan korrosionshastighet och jordens resistivitet eller pH-värde varken i svenska undersökningar vid SJ av San-

degren (1988) (se den statistiska utvärderingen av SJs undersökningar av Bengtsson m.fl. (2002)) och vid japanska undersökningar av Ohsaki (1982).

Resultaten från Göteborg visade att kloridhalten, varken i jorden eller i vattnet vid lakförsök motsvarande porvatten, inte verkar vara någon ensamt bestämmande parameter för korrosionen på stålplåtar. Den höga kloridhalten i både jordprov och eluat vid skaktest i Göteborg gav inte upphov till förhöjd korrosionshastighet, varken den jämna korrosionshastigheten för hela pålen eller den maximala jämna korrosionshastigheten för påldelar avvek från medelavfrätningen vid provningsplatserna Stockholm och Sollentuna eller från den maximala jämna korrosionen för påldelar vid Sollentuna. Den maximala jämna korrosionen för påldelar var dessutom betydligt lägre i Göteborg än i Stockholm.

## 7.4 Mikrobiell korrosion på kolstål

Korrelationerna mellan maximal korrosionshastighet för påldelar och halten löst organiskt kol (DOC) samt sulfathalt i eluat vid skaktest och mellan maximal korrosionshastighet för påldelar och den organiska halten indikerar att det finns förutsättningar för mikrobiell korrosion orsakad av sulfatreducerande bakterier.

Det är emellertid svårt att göra kompletterande undersökningar som påvisar faktisk mikrobiell korrosion och det är också svårt att i efterhand konstatera att en konstruktion varit utsatt för mikrobiell korrosion.

Mikrobiell korrosion har tidigare undersökts vid Korrosionsinstitutet på nedgrävda provplåtar av kolstål med arean 150 x 100 mm, Vinka (2001). Efter cirka tre års exponering undersöktes mikrobiell korrosion på den nedre provnivån (cirka 1,7 m under markytan) vid provningsplatserna Enköping, Sollentuna, Göteborg och Stockholm. En förnyad undersökning gjordes efter sju års exponering vid provningsplatserna med gyttjig lera: Göteborg och Stockholm. Undersökningarna gjordes på både den övre (cirka 0,7 m under markytan) och nedre provnivån.

Följande analyser utfördes för varje provplåt med omgivande jord efter cirka tre års exponeringstid:

- vattenhalt
- sulfathalt
- sulfidhalt
- totala antalet aeroba och fakultativt anaeroba bakterier
- antal sulfatreducerande bakterier
- aktiviteten (sulfatomvandlingshastigheten) hos sulfatreducerande bakterier.

Vid undersökningarna efter cirka tre års exponeringstid tillkom analys av:

- totala antalet anaeroba bakterier
- antal svaveloxiderande bakterier.

Analyserna gjordes på tre olika prov för varje provplåt:

- skrapprov från metallytan
- löst sittande jord helt nära metallytan
- jordprov, 5-10 cm från metallytan.

Av undersökningen framgick följande observationer och slutsatser:

- Den mikrobiologiska aktiviteten var högre på provplåtar och i omgivande jord på provnivåer med växlande grundvattenyta än i vattenmättad jord, som ständigt befinner sig under grundvattenytan.
- Antalet av och aktiviteten hos sulfatreducerande bakterier ändrades mellan olika provtagnings-tillfällen.
- Den massförlustbestämda korrosionshastigheten påverkades inte nämnvärt av antalet av eller aktiviteten hos sulfatreducerande bakterier.
- Ett högt antal sulfatreducerande bakterier verkade inte alltid ge upphov till ett kraftigt lokalt korrosionsangrepp.
- Något generellt samband mellan antal av eller aktivitet hos sulfatreducerande bakterier i jord och lokala korrosionsangrepp förefaller inte existera.
- Något mera påtagliga lokala korrosionsangrepp hade endast uppstått i jord med hög organisk halt, hög sulfathalt och stort antal sulfatreducerande bakterier vid provningsplatserna Göteborg och Stockholm.
- Magnetit utgjorde huvudbeståndsdel som korrosionsprodukt på kolstålsytan utan frätgropar.
- Förekomsten av siderit  $\text{FeCO}_3$  och pyrit  $\text{FeS}_2$  som korrosionsprodukter vid lokala korrosionsangrepp på metallytan vid provningsplatserna Göteborg och Stockholm tydde på mikrobiell korrosion.

Av undersökningen framgår att den massförlustbestämda korrosionen för provplåtar inte påverkas i någon större utsträckning av antalet av eller aktiviteten hos sulfatreducerande bakterier.

Korrelationerna mellan maximal korrosionshastighet för påddelar och halten löst organiskt kol (DOC) samt sulfathalt i eluat vid skaktest och mellan maximal korrosionshastighet för påddelar och den organiska halten betyder att det finns förutsättningar för mikrobiell korrosion orsakad av sulfatreducerande bakterier, men korrelationerna betyder inte att mikrobiell korrosion verkligen inträffar i praktiken.

Det innebär att det inte är troligt att sulfatreducerande bakterier orsakad den maximala jämna korrosionen på påddelar. Mikrobiell korrosion kan orsaka lokala korrosionsangrepp med frätgropar, men inte någon påtaglig massförlustbestämd jämn korrosion.

## 7.5 Analys av jordprover och eluat från skaktest

Av de utförda undersökningarna att döma har analys av eluat från skaktest större relevans än analys av jordprover vid korrelering mot uppmätta korrosionshastigheter.

Konduktiviteten i eluaten från skaktest uppvisade ett påtagligt samband med främst den maximala jämna korrosionshastigheten hos påddelar. Konduktiviteten kan anses vara ett mått på jonstyrkan i porvattnet. Den maximala jämna korrosionshastigheten ökade med ökande jonstyrka. Att den jämna korrosionen hos kolstål ökade med ökande jonstyrka i porvattnet har tidigare framkommit vid fältundersökningar av korrosionen hos provplåtar i sur sandig morän vid Korrosionsinstitutet, Vinka (1997).

Ett viktigt användningsområde för analyser av eluat från skaktest är vid bedömning av om jorden och porvattnet är kalkhaltigt, det vill säga om jorden eller porvattnet är karbonathaltigt.

Följande analyser av eluat är då användbara vid bedömning av jordens och porvattnets karbonatinnehåll och förutsättningar för bildandet av karbonathaltiga korrosionsprodukter och beläggningar på metallytan:

- pH-värde
- Vätekarbonathalt (alkalinitet)
- Kalciumhalt
- Magnesiumhalt.

Vid bedömning av korrosionshårdigheten hos förzinkat stål i jord har karbonathalten i jorden och porvattnet en stor betydelse, Vinka & Camitz (1996) och Vinka (2000b). Det finns indikationer på att korrosionshastigheten på förzinkat stål är lägre i skånska kalkhaltiga leror än i icke kalkhaltiga leror.

Det är emellertid mycket tveksamt om man skall lägga någon vikt vid mätningarna av redoxpotential i eluaten vid skakförsöken vid bedömning av korrosionshårdigheten hos stålplåtar. Redoxpotentialerna är mätta i luftade laklösningar och torde vara så kallade blandpotentialer, det vill säga en "blandning" av elektropotentialerna för minst två olika elektroreaktioner, se vidare **Bilaga B**. Mätvärdena avser konstanta värden (stabila värden) efter kort väntetid, om inte "stabila" värden erhållits inom fyra minuter redovisas värdet efter fyra minuter mätning.

De uppmätta redoxpotentialerna i eluaten är 600 – 700 mV mera positiva än uppmätta redoxpotentialer i fält i lerjord. Redoxpotentialer,  $E_h$ , på cirka – 200 mV relativt NHE uppmättes i leran i Sollentuna efter drygt en timmes mätning och efter cirka 16 timmars mätning i den gyttjiga leran på provningsplats Stockholm, se **Bilaga B**.

De uppmätta redoxpotentialerna i eluaten tar inte hänsyn till redoxpotentialens variation med tiden. Tolkningen av uppmätta redoxpotentialer i luftade laklösningar är på intet sätt enklare än för uppmätta redoxpotentialer i jord i fält. Back (2001) beskriver svårigheterna med att mäta redoxpotentialer och att tolka uppmätta värden.

## 8. Slutsatser

### 8.1 Inträffad korrosion

De nu utförda korrosionsundersökningarna, som utförts på stålplåtar neddrivna i naturligt lagrad jord, visar att korrosionen kan variera betydligt längs de 2,5 m långa pålarna. Korrosionen består dels av en jämn avfrätning över hela pålytan, dels lokal korrosion på vissa delar av pålarna samt gropfrätning på vissa punkter.

I denna undersökning har den jämna korrosionen undersökts för 0,25 m långa påldelar. Vid kraftig korrosion av en pådel finns en viss risk för "midjebildning" på pålarna. Korrosionshastigheten för påldelar har tidigare ej bestämts på krysspålarna, men har bedömts vara av betydelse vid till exempel bestämning av risken för knäckning av slanka stålplåtar i lös lera. På krysspålarna fanns emellertid ingen synlig midjebildning och det är endast på stålplåten från Stockholm som den maximala korrosionshastigheten för påldelar (18,8  $\mu\text{m}/\text{år}$ ) avviker i någon högre grad från medelavfrätningen för hela pålen (7,5  $\mu\text{m}/\text{år}$ ). I rapporten om långtidsexponerade stålrör redovisas också uppkomsten av midjebildning, Vinka & Bergdahl (2010).

De dimensionerande rostmåner, som anges i Pålkommisionens Rapport 98, Bengtsson m.fl. (2000), Tabell 7.52, för naturliga jordar vid "enkla förhållanden" är 2 – 4 mm/100 år. Detta motsvarar en korrosionshastighet på 20 – 40  $\mu\text{m}/\text{år}$ . Om den dimensionerande korrosionshastigheten förutsätts innehålla en partialkoefficient på 1,5 för att täcka osäkerheten i en korrosionsprognos skulle detta motsvara en korrosionshastighet på 13 – 27  $\mu\text{m}/\text{år}$  beroende av jordart och grundvattenförhållanden.

En jämförelse med de uppmätta värdena på medelavfrätningen, **Avsnitt 8.2**, för de undersökta krysspålarna visar att denna är lägre än de angivna värdena i Rapport 98 och i de flesta fall mycket lägre.

Om man jämför korrosionshastigheterna på de mest anfräta ställena av krysspålarna, det vill säga de mest angripna 0,25 m långa påldelarna, finner man att dessa också är lägre än de angivna värdena i Rapport 98 för gytjig lera på provningsplats Stockholm, Skå trots korrosionshastigheten 18,8  $\mu\text{m}/\text{år}$ . Detta borde innebära att man åtminstone för vissa säkert bestämda jordförhållanden borde kunna minska de dimensionerande rostmånerna. Detta förutsätter dock att man säkert kan klassa jordförhållandena efter mer nyanserade bedömningsregler än vad, som används idag som underlag för bestämningen av dimensionerande rostmån.

### 8.2 Korrosionens beroende av uppmätningssätt

Resultaten av massförlustmätningarna på hela pålar i lera visar på en medelkorrosionshastighet på mellan 2,1 och 8,0  $\mu\text{m}/\text{år}$  under cirka 27 år. Det högsta värdet uppmättes på Skå i Stockholm, medan det lägsta värdet uppmättes på pålarna från Ryda i Enköping. I sand och grusig sand på Kolbytteomon i Linköping var medelkorrosionshastigheten 3,5 – 3,6  $\mu\text{m}/\text{år}$  efter 20 års exponering.

Den jämna korrosionshastigheten mätt på 0,25 m långa påldelar visar på en största jämn korrosionshastighet på 3,1 till 18,8  $\mu\text{m}/\text{år}$ . Störst var den på 1,1 m djup under markytan på Skå och minst på 1,4 m djup i Enköping. Större jämn korrosionshastighet på provningsplatserna uppmättes på olika djup 0,6 – 2,4 m under markytan. Den största jämna korrosionshastigheten för påldelar låg under grundvattenytan troligen beroende på att pålytan där blev anodisk under inverkan av en luftningscell på stålplåten.

Den maximala lokala korrosionshastigheten uppmätt som frätgropsdjup (plus medelavfrätning) efter 9 år var mellan 33 och 252  $\mu\text{m}/\text{år}$ . Sammanfattningsvis kan konstateras att den maximala lokala korrosionshastigheten mätt som funktion av djupet under markytan var mellan 30 och 120  $\mu\text{m}/\text{år}$  och har uppmätts på 0,5 – 1,4 m djup under markytan. På större djup är den lokala korrosionshastigheten lägre, 10 – 40  $\mu\text{m}/\text{år}$  och något avtagande med djupet under markytan men ökar där samtidigt något med exponeringstiden. En jämförelse mellan den maximala lokala korrosionshastigheten och medelkorrosionshastigheten för hela pålen visar att den förra kan vara 10 – 60 ggr större än den senare. Frätgropar bedöms dock ej ha någon betydelse för pålarnas bärförmåga så länge de ej växer ut till en midjebildning.

### 8.3 Korrosionens beroende av exponeringstiden

Den massförlustbestämda medelkorrosionshastigheten för krysspålar i olika slag av lera och sand bedöms öka rätlinigt med tiden men storleken varierar från plats till plats. I lera i Sollentuna, Göteborg och Stockholm var korrosionshastigheten mellan 6,9 och 8,0  $\mu\text{m}/\text{år}$  medan den i lera i Enköping och sanden i Linköping var mellan 2,1 och 3,6  $\mu\text{m}/\text{år}$ . Man kan således inte på basis av dessa undersökningar säga att korrosionshastigheten avtar med exponeringstiden, som anges i vissa källor.

Det finns däremot en tendens att den maximala lokala korrosionshastigheten minskar med exponeringstiden.

### 8.4 Korrosionens beroende av jordens egenskaper

En av målsättningarna med denna rapport är att ta fram ett säkrare underlag än vad, som finns idag för dimensionering av stålplåtar i jord med hänsyn till korrosion. Detta förutsätter att man dels känner korrosionshastigheterna i jorden dels känner sambanden mellan dessa och olika egenskaper i jorden, som kan påverka korrosionshastigheten.

De nu utförda korrosionsundersökningarna i lera visar att en korrelation mellan uppmätta korrosionshastigheter och olika samband eller bedömningar av jordegenskaper kan erhållas, men spridningen i bedömningsresultaten är stor. Sålunda visar en bedömning av sannolikheten för korrosionsskador enligt DIN 50 929, del 3 (1985), där 12 olika jordegenskaper ingår i bedömningsunderlaget (**Avsnitt 5.7**) att man kan förvänta sig den största korrosionen på provningsplatserna: Stockholm, Sollentuna och Göteborg i nämnd ordning medan de minsta skulle erhållas i Enköping och Linköping, vilket också stämmer med de uppmätta medelfrättdjupen.

Resultaten av de särskilda laboratorieanalyserna (som genomförts för att simulera porvattenkemin på de olika provningsplatserna genom lakförsök och utvärdera orsakerna till korrosionen genom analys av eluatets kemiska sammansättning) visar också på påtagliga korrelationer mellan maximal korrosionshastighet och egenskaper som elektrisk konduktivitet, sulfathalt, pH-värde och halten löst organiskt kol (DOC). Denna typ av provtagning och analyser bedöms kunna utgöra en grund för att särskilja olika jordlagerföljder beträffande risken för större eller mindre korrosion tillsammans med uppgifter om jordart och grundvattenförhållanden från de normala geotekniska undersökningarna. Även de undersökningar, som utförts på förzinkade kraftledningsstolpar pekar på att motsvarande parametrar kan vara styrande för korrosionens storlek.

Den största korrosionshastigheten det vill säga en hastighet större än medelkorrosionshastigheten har uppmätts på olika djup mellan 0,6 och 2,5 m under markytan. De högsta värdena har uppmätts på 1,1 - 2,2 m djup vilket motsvarar 0,5 - 1,0 m under grundvattenytan där pålytan blev anodisk under inverkan av en luftningscell. Således har också djupet under markytan och djupet under grundvattenytan betydelse för korrosionens storlek.

### 8.5 Hur utföra korrosionsundersökningar

Försök att bedöma korrosionsriskerna på de olika provningsplatserna efter i litteraturen förekommande metoder baserade på resultat av geotekniska undersökningar visar på viss följsamhet mellan uppmätt korrosion och funktioner av sådana parametrar, som ovan nämnts. Ett problem är dock att de geologiska förhållandena varierar från land till land. Så till exempel har man i Tyskland inte någon stor omfattning av leror eller gyttjor, som avlagrats i saltvatten, som vi och t.ex. Norge har på Västkusten. Det finns därför skäl att utveckla olika bedömningsregler för olika geologiska områden där de parametrar, som redovisats ovan kan vara en del av underlaget.

Enligt Pålkommisionens Rapport 98 (Bengtsson m.fl., 2000) kan jordförhållandena för bedömning av korrosionsriskerna i jord indelas i tre kategorier: Enkla förhållanden, tveksamma förhållanden samt komplexa eller korrosiva förhållanden.



### **Enkla förhållanden kan omfatta:**

- Naturlig jord:
  - Sand, grus och sandiga/grusiga moräner.
  - Lera, silt och leriga/siltiga moräner.
  - Gyttjig lera/silt, gyttja, torv och dy (vattenkvot > 80 mass-%).
- Fyllningar av friktionsmaterial med känd sammansättning, under förutsättning att grundvattnet är sött och inte aggressivt.

### **Tveksamma fall kan omfatta:**

- Fyllning av organiskt material eller okänd sammansättning eller där underliggande organisk jord kan ha trängt upp i fyllningen.
- Jord där grundvattnet kan vara salt om t.ex. havsvatten har fri tillgång till en fyllning.
- Pålar i vatten eller i grov fyllning under vatten.
- Naturligt sulfidhaltiga jord.

### **Komplexa eller korrosiva förhållanden kan omfatta:**

- Avfallsdeponier (soptippar).
- Fyllningar som innehåller kol- eller koksrester.
- Fyllningar som innehåller aska eller slagg (eller något bearbetade ask- eller slaggprodukter) från förbränning av fasta bränslen.
- Fyllningar som innehåller slagg eller något bearbetade slaggprodukter från metallurgisk industri.
- Områden med kemisk processindustrimiljö eller områden med avfall från sådan industri.
- Områden där elektriska läckströmmar kan förekomma i jorden.
- Jordar, som genomsätts av havsvatten.
- Okontrollerad fyllning av naturlig jord.

Den största risken med sulfidhaltig jord torde vara risken för oxidation av sulfiden i jorden till sulfat vid luftning av jorden med ibland kraftig sänkning av pH-värdet hos jorden och porvattnet som följd.

Kol- och koksrester kan orsaka bimetallkorrosion (galvanisk korrosion) på kolstål, låglegerat stål och gjutjärn i jord. Med kol menas i detta sammanhang en brännbar, sedimentär bergart, som innehåller högst 30 mass-% icke brännbara beståndsdelar (aska).

Den geologiska inkolningsprocessen, som försiggår under vatten utan lufttillträde, omvandlar i ett första steg växtrester till torv. Sedan torven överlagrats med sediment omvandlas den långsamt till brunkol. Med fortsatt överlagring omvandlas så småningom brunkolet till stenkol. Brunkol och stenkol är organiska sedimentbergarter. Brunkol innehåller 65 – 84 mass-% kol och stenkol 84 – 91 mass-%. Antracit är en ursprungligen sedimentär bergart, som genom metamorfos (omvandling av en bergart då den utsätts för ändrat tryck och/eller ändrad temperatur) fått ökad kolhalt till 92 – 98 mass-%. Antracit bildas från stenkol, som utsätts för högt tryck och hög temperatur. Antracit kan vid ökad omvandlingsgrad bilda grafit.

Koks är en industriell produkt. När stenkol upphettas utan lufttillträde (torrdestillation) avgår flyktiga be-

ståndsdelar och en kolrikare koks återstår. Vid torrdestillation av stenkolk vid gasverk erhålls som huvudprodukt stadsgas, men också stenkolkstjära och koks.

Det är känt att antracit, grafit och koks kan orsaka bimetallkorrosion på kolstål i jord. Det är oklart om, och i så fall till vilken grad, brunkolk och stenkolk kan orsaka bimetallkorrosion på stål. Antracit, grafit och koks är mycket ädla material som har en mycket ädel (kraftigt förskjuten i positiv riktning) korrosionspotential.

Med aska från förbränningsanläggningar menas en fast, partikelformad, oorganisk restprodukt efter förbränning och med slagg menas en restprodukt vid förbränning, bestående av oförbränt material och aska i sintrat form. Ibland menas med slagg en blandning av bottenaska och slagg. Bottenaska är aska på eldstadsbotten bestående av grövre askfraktioner och ofta sintrat material (slagg). I bottenaskan återfinns den största andelen av stenar, sand och annat "skrot", som följer med bränslet. Ofta menas med bottenaska en blandning av bottenaska och slagg. Flygaska är ett samlingsnamn för all aska, som lämnar eldstaden och medföljer rökgaserna. Exempel på en något bearbetad bottenaska är slaggrus.

Egenskaperna hos aska och slagg beror på bränslet och förbrännings- och reningstekniken. Korrosiviteten hos aska och slagg är mycket dåligt undersökta. Vid laboratorieundersökningar vid Korrosionsinstitutet framkom att en del botten- och flygaskor kan vara mycket korrosiva mot kolstål, Camitz (198).

Med slagg från metallurgisk industri avses vanligen en glasartad produkt, som huvudsakligen består av oxider (ofta silikater). Slagg bildas som restprodukt vid järnframställning eller vid oxidation av metall vid smält- och värningsprocesser. Exempel på några bearbetade masugnsslagger är hyttsten och hyttsand. Järnsand är en bearbetad slagg från koppartillverkningen. Korrosionsegenskaperna hos metallurgiska slagger är mycket dåligt undersökta.

Fyllningsjord är ofta mer aggressiv och mer svårbedömd ur korrosionssynpunkt än naturlig jord. Den ökade aggressiviteten beror på ökad heterogenitet och föroreningsnivå i fyllningsjord. I heterogen jord finns en ökad risk att luftningsceller kan uppstå på stålkonstruktioner.

Läckström i form av likström är avsevärt farligare ur korrosionssynpunkt än växelström, se vidare Pålkommisionens Rapport 93 och 105, Camitz (1994) och Camitz m.fl. (2009).

Som framgår av ovanstående är det många förhållanden, som skall klarläggas för att korrosionsriskerna skall kunna bedömas för en aktuell bygplats där man planerar att utföra grundläggning med stålplåtar. Många av dessa kan man säkert klargöra utifrån den allmänna kunskapen om den tilltänkta platsen medan övriga kan behöva närmare utredas eller undersökas. Tyvärr finns idag ingen ytterligare sammanställning av hur korrosionsriskerna skall kunna bedömas utan man får sammanställa olika underlag och vid tveksamma eller komplexa och korrosiva förhållanden göra en samlad bedömning.

En korrosionsundersökning för bedömning av korrosionshastigheten på till exempel stålplåtar i naturlig lagrad jord kan bestå av olika delar: En geologisk, en geoteknisk, en geofysisk och en geokemisk del.

1. Den geologiska delen kan omfatta undersökning av de geologiska förhållandena på platsen: Jordlagerföljd, grundvattenförhållanden, speciella mineraler med sulfidinnehåll, nivå i förhållande till högsta kustlinjen. Denna del kan till exempel omfatta studier av geologiska och topografiska kartor samt i bebyggd miljö även ekonomiska kartor. Ett besök på platsen rekommenderas också.
2. Den geotekniska delen kan innehålla en närmare undersökning av jord- och grundvattenförhållandena på platsen: Upptagning av ostörda prover för geotekniska och geokemiska undersökningar, upptagning av störda/omrörda prover av fyllning eller grovjord, nedsättning av grundvattenrör eller porttryckmätare för mätning av grundvattenytans variationer och för upptagning av grundvattenprov. Den geotekniska delen av de upptagna proverna bör omfatta: benämning, skrymdensitet, vattenkvot, organisk halt, eventuellt kapillaritet och jordresistivitet.
3. Den geofysiska delen kan omfatta geofysiska mätningar på platsen: Mätning av jordens resistivitet med Wenner-metoden på olika djup ned till några m under grundvattenytan och mätning av korrosionspotentialen hos en i förväg nedsatt stålstång (14 dagar i förväg).

4. Den geokemiska delen av undersökningen kan omfatta följande undersökningar av upptagna jordprover och eluat från skaktester alternativt porvatten- eller grundvattenprov.

### **Analys av jordprover**

Analys avseende bedömning av allmänna korrosionsrisker:

- pH-värde
- Kloridhalt
- Jordresistivitet.

Analys avseende bedömning av förutsättningar för mikrobiell korrosion orsakade av sulfatreducerande bakterier:

- Organisk halt
- Sulfathalt.

### **Analys av eluat från skaktest alternativt porvatten- eller grundvattenprov**

Analys avseende bedömning av allmänna korrosionsrisker:

- pH-värde
- Kloridhalt
- Konduktivitet (konduktiviteten är ett mått på jonstyrkan i porvattnet).

Analys avseende bedömning av porvattnets karbonat innehåll och förutsättningar för bildandet av karbonathaltiga korrosionsprodukter och beläggningar på metallytan:

- pH-värde
- Vätekarbonathalt (alkalinitet)
- Kalciumhalt
- Magnesiumhalt.

Analys avseende bedömning av förutsättningar för mikrobiell korrosion orsakade av sulfatreducerande bakterier:

- Halten löst organiskt kol (DOC)
- Sulfathalt.

Analys av jordprov och eluat från skaktest alternativt porvatten- eller grundvattenprov ger ett bra komplement till korrosionsriskbedömningar från jordart och grundvattenytans position, enligt Pålkommisionens Rapport 93 och 98, Camitz (1994) och Bengtsson m. fl. (2000).

## 9. Referenser

- Back, P-E, (2001): Hur mäter man redoxpotentialen praktiskt och varför blir det inte rätt? Vatten, årgång 57, s 153 - 160.
- Bader, G, (1972): Katodiskt skydd av konstruktioner i jord. Bulletin nr 60. Korrosionsinstitutet, Stockholm.
- Bengtsson, Å & Berglars, B & Hultsjö, S & Romell, J, (2000): Dimensioneringsanvisningar för slagna stålplålar. Rapport 98. Pålkommisionen, Linköping. (Pålkommisionen, c/o Statens geotekniska institut, Linköping).
- Bengtsson, P-E & Bergdahl, U & Camitz, G & Vinka, T-G, (2002): Statens Järnvägars undersökning av korrosion på stålplålar i jord – Statistik bearbetning. Information 2002:1. Pålkommisionen, Linköping. Finns även på Pålkommisionens hemsida på internet: [www.palkommisionen.se](http://www.palkommisionen.se).
- Bergdahl, U, (1990): Sydkraft AB. Korrosionsundersökningar på kraftledningsstolpar i jord. Etapp IV. Sammanställning av erfarenheter från Nässjö – Mörap och Hornsö – Kalmar I. Dnr 2 – 314/81. Statens geotekniska institut, Linköping.
- Camitz, G, (1980): Korrosionsundersökningar i jord. Bestämning av jordars resistivitet. Bulletin nr 88. Korrosionsinstitutet, Stockholm.
- Camitz, G, (1983): Laboratorieundersökning av korrosiviteten hos kolaska. KHM teknisk rapport 69. Projekt Kol-hälsa-miljö, Statens Vattenfallsverk, Vällingby.
- Camitz, G, (1994): Korrosion och korrosionsskydd av stålplålar och stålspont i jord och vatten. Rapport 93. IVA Pålkommisionen, Linköping. (Pålkommisionen, c/o Statens geotekniska institut, Linköping).
- Camitz, G, & Bergdahl, U & Vinka, T-G, (2009): Stålplålar beständighet mot korrosion i jord. En sammanställning av kunskaper och erfarenheter. Rapport 105. Pålkommisionen, Linköping.
- CRC (2002). Handbook of Chemistry and Physics (D R Lide, ed.), CRC Press, 83 rd ed., Florida, USA
- Decker, J B & Rollins, K M & Ellsworth, J C (2008): Corrosion rate evaluation a prediction for piles based on long-term field performance. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 134, p. 341 - 351.
- DIN 50 929, Teil 3 (1985). Korrosion der Metalle. Korrosionswahrscheinlichkeit metallischer Werkstoffe bei äußerer Korrosionsbelastung. Rohrleitungen und Bauteile in Böden und Wässern (Corrosion of metals. Probability of corrosion of metallic materials under external corrosion conditions. Pipelines and structural component parts in soil and water.) Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- Gerwin, W & Baumhauer, R, (2000): Effect of soil parameters on the corrosion of archaeological metal finds. Geoderma, vol. 96, p. 63 - 80.
- Karlsson, R & Hansbo, S, (1992): Jordarternas indelning och benämning. Geotekniska laboratorieanvisningar, del 2. T21.1982, 3.e upplagan. Bygghörsningsrådet, Stockholm.
- Li, S Y & Kim, Y G & Jeon, K S & Kho, Y T & Kang, T (2001): Microbiologically influenced corrosion of carbon steel exposed to anaerobic soil. Corrosion, vol. 57, p. 815 - 828.
- Mattsson, E & Kucera, V, (2009): Elektrokemi och korrosionslära. Swerea KIMAB, Stockholm. 194 sidor.
- Ohsaki, Y, (1982): Corrosion of steel piles driven in soil deposits. Soils and Foundations, vol. 22, no 3, p. 57 - 76.

Pålkommisionen, (2010). Pålstatistik för Sverige 2009. Information 2010:1. Pålkommisionen, Linköping. Finns även på Pålkommisionens hemsida på internet: [www.palkommisionen.se](http://www.palkommisionen.se).

Sandegren, E, (1988): Korrosion på stål – vertikalt orienterat – i jord. Slutrapport. Meddelande nr 46. Statens järnvägars huvudkontor, Geoteknik och ingenjörsgologi, Stockholm.

Sederholm, B & Svensson, T & Vinka, T-G, (1992): Korrosion på metaller i jordar med olika surhetsgrad och vattenhalt. Rapport R7:1992. Bygghorskningsrådet, Stockholm.

Svensk Standard SS 027116 (1989). Geotekniska provningsmetoder – Vattenkvot och vattenmättnadsgrad. Utgåva 3. SIS, Stockholm.

Smedjebacken, (Okt. 1978): Broschyr: På säkra grunder... SW-stålpåle. Smedjebackens Valsverks AB, Smedjebacken.

Svensk standard SS 02 71 07 (1990). Geotekniska provningsmetoder – Organisk halt i jord – Kalorimetermätning. Utgåva 3. SIS, Stockholm.

Svensk standard SS-ISO 11465 (1995). Markundersökningar – Bestämning av torrsubstans och vattenkvot – Gravimetrisk metod. Utgåva 1. SIS, Stockholm.

Svensk standard SS-ISO 11271 (2003). Markundersökningar – Bestämning av "redoxpotential" – Fältmetod. Utgåva 1. SIS, Stockholm.

Svensk standard SS-EN 12457-1 (2003). Karaktärisering av avfall – Lakttest – Kontrolltest för utlakning från granulära material och slam – Del 1: Enstegs skaktest vid L/S 2 l/kg för material med hög fastfashalt och med partikelstorlek mindre än 4 mm (utan eller med nedkrossning). Utgåva 1. SIS, Stockholm.

Svensk standard SS-EN 1993-5:2007. Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner – Del 5: Pålar och spont. Utgåva 1, SIS, Stockholm.

Svensk standard SS-ISO 10390:2007. Markundersökningar – Bestämning av pH (ISO10390:2005, IDT). Utgåva 2. SIS, Stockholm.

Svensk standard SS-EN ISO 10304-1:2009. Vattenundersökningar – Bestämning av lösta anjoner med jonkromatografi – Del 1: Bestämning av bromid, klorid, fluorid, nitrat, nitrit, fosfat och sulfat (ISO 10304-1:2007). SIS, Stockholm.

Svensk standard SS-EN ISO 11885:2009. Vattenundersökningar – Bestämning av ett antal utvalda grundämnen genom atomemissionsspektrometri med induktivt kopplad plasma (ICP-AES) (ISO 11885:2007), Utgåva 2 (2009). SIS, Stockholm.

Tomashov, N D, (1966): Theory of corrosion and protection of metals. MacMillan, New York. Se särskilt kapitel XV Underground corrosion of metals.

Vinka, T-G, (1997): Korrosion på metaller i sur moränjord. Rapport till Bygghorskningsrådet. Korrosionsinstitutet, Stockholm.

Vinka, T-G, (2000a): Bedömningschema enligt tysk standard DIN 50929, Del 3. Opublicerat arbete vid Korrosionsinstitutet, Stockholm.

Vinka, T-G, (2000b): Bedömning av korrosionsrisk: Korrosion på förzinkat stål i jord. Bygg & teknik, årgång 92, nr 1, s 55 - 58.

Vinka, T-G, (2001): Microbial corrosion on carbon steel in Swedish soils. EUROCORR 2001. 30 September - 4 October 2001, Riva del Garda, Italien. Föredrag nr 248. Congress proceedings på CD-ROM utgiven av Associazione Italiana di Metallurgia, Milano, Italien 2001.

Vinka, T-G & Camitz, G, (1996): Corrosion of zinc coated steel in Swedish soils. Proc. 13th International Corrosion Congress, Melbourne 1996, Volume IV, Paper 439. Australasian Corrosion Association Inc, Clayton, Victoria.

Vinka, T-G & Bergdahl, U & Camitz, G, (2002): Korrosion på stålplåtar i jord. Bygg & teknik, årgång 94, nr 1, s 56 - 58, 61 - 62.

Vinka, T-G & Bergdahl, U, (2011): Korrosion på långtidsexponerade vertikala stålrör i jord. Rapport under publicering.

## Bilaga A:

### Analyser av jord och jordvatten från provningsplatserna

#### Tabeller

- Tabell A.1** Lokalisering av och jordart från provningsplatserna.
- Tabell A.2** Kornstorleksfördelning med olika jordfraktioner från naturligt lagrad jord från provningsplatserna med lerjord
- Tabell A.3** Kornstorleksfördelning med olika jordfraktioner för sanden i omättad zon (djup 0,7 m) och i vattenmättad zon (djup 0,7 m) från provningsplats Linköping.
- Tabell A.4** Karaktärisering av jorden från provningsplatserna. Provtagning från omgrävd jord på hösten 1986.
- Tabell A.5** Kaliumkarbonathalt, kolhalt, organisk halt och glödningsförlust i jorden från provningsplatserna. Provtagning från omgrävd jord på hösten 1986.
- Tabell A.6** Kalcium-, magnesium-, kalium- och fosforhalter i jorden från provningsplatserna. Provtagning från omgrävd jord på hösten 1986.
- Tabell A.7** Totalaciditet (syrakapacitet) vid pH = 4,8 [ $K_B(4,8)$ ] respektive pH = 7,0 [ $K_B(7,0)$ ] och totalalkalitet (baskapacitet) vid pH = 7,0 [ $K_S(7,0)$ ] respektive pH = 4,8 [ $K_S(4,8)$ ] samt kväveföreningar i jorden från provningsplatserna. Provtagning från omgrävd jord hösten 1981 för totalaciditet och totalalkalitet och hösten 1986 för kväveföreningar.
- Tabell A.8** Analys av jordvattnet i de uppgrävda provgroparna vid provningsplatserna.

## Kortfattad beskrivning av jordanalyserna

Jordresistiviteten mättes i naturfuktigt jord med soil box [1]. Den organiska halten bestämdes genom snabb våtförbränning av jorden med dikromatlösning och svavelsyra med efterföljande kolorimetermätning vid våglängden 620  $\mu\text{m}$  [2]. Metoden har senare standardiserats som svensk standard SS 02 71 07 [3]. Jordens pH-värde bestämdes som  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$  för naturfuktig jord efter extraktion med avjoniserat vatten med massförhållandet jord:vatten 1:2,5 [4, 5]. Kalciumkarbonathalten,  $\text{CaCO}_3$  - halten, bestämdes efter våtförbränning av jorden med saltsyra i ett slutet system, som evakuerats till vakuum (Moums apparat). Mängden bildad koldioxid mättes sedan indirekt med manometer [2].

Vid bestämning av jordens kloridhalt extraherades lufttorkad jord med avjoniserat vatten i en Soxhles-apparat och kloridhalten i vattnet bestämdes sedan med kloridtitrator. I kloridtitratorn utnyttjas fyra elektroder. Mellan två silverelektroder skickas en konstant likström. Strömpassagen medför att lösningen tillförs silverjoner, som förenar sig med kloridjoner till silverklorid,  $\text{AgCl}$ . Hastigheten med vilken silverjoner tillförs lösningen är konstant. När alla kloridjoner har förbrukats och fria silverjoner uppträder i lösningen stiger strömmen mellan de båda andra silverelektroderna och analysen avbryts.

Vid bestämning av jordens sulfathalt extraherades lufttorkad jord med avjoniserat vatten i en Soxhles-apparat och sulfathalten i vattnet bestämdes sedan med nefelometrisk metod. Grumligheten hos vattnet bestämdes efter tillsats av bariumklorid i en nefelometer. Sulfidhalten i jorden bestämdes som syralöslig sulfid efter våtoxidering och titrering. Som extraktionsmedel användes 6 M (mol/l) saltsyra med tillsats av tennklorid. Den bildade divätesulfiden (svavelväte),  $\text{H}_2\text{S}$ , förs över till ett absorptionskärl med kadmiumhaltig acetatbuffert. Därefter tillsattes en känd mängd jod till absorptionskärllet och vätskan titrerades med natriumtiosulfatlösning [2]. Sulfiden är bunden i jorden som olika järnsulfider såsom amorf  $\text{FeS}$  med varierande sammansättning, mackinawit,  $\text{Fe}_{1+x}\text{S}$  ( $x \approx 0,06$ ) och pyrit,  $\text{FeS}_2$ . Vid bestämning av syralöslig sulfid medtas i analysen amorf  $\text{FeS}$ , mackinawit och greigit,  $\text{Fe}_3\text{S}_4$ , men inte pyrit. Den totala svavelhalten i jorden bestämdes efter torrbränning i syrgas vid 900 °C i en Leco kol- och svavelanalysator.

Den totala kolhalten i jorden bestämdes efter torrbränning i syrgas vid 900 °C i en Leco kol- och svavelanalysator. Metoden har senare standardiserats som svensk standard SS-ISO 10 694 [6]. Halten oorganiskt kol har beräknats från kalciumkarbonathalten och den organiska kolhalten fås som skillnaden mellan den totala kolhalten och halten oorganiskt kol. Den organiska halten har beräknats från halten organiskt kol med antagandet att 58 mass-% av det organiska materialet utgörs av organiskt kol.

För sur jord (pH-värde < 7,0) bestämdes totalaciditeten (syrakapaciteten) vid pH = 4,8 respektive pH = 7,0. Till en jordsuspension bestående av 20 g fuktig jord och 40 ml avjoniserat vatten tillsattes successivt ökande mängder 0,1 M NaOH för att erhålla önskat pH-värde i jorden [7]. För alkalisk jord (pH-värde > 7,0) bestämdes totalalkaliteten (baskapaciteten) vid pH = 7,0 respektive pH = 4,8. Till en jordsuspension bestående av 20 g fuktig jord och 40 ml avjoniserat vatten tillsattes successivt ökande mängder 0,1 M HCl för att erhålla önskat pH-värde i jorden [7].

Analyserna av kalcium, magnesium, kalium respektive fosfor har utförts efter extraktion i dels 0,1 M ammoniumlaktat + 0,4 M ättiksyra (AL-extrakt), dels 2 M saltsyra (HCl-extrakt) [8]. Metoden har senare standardiserats som svensk standard SS 02 83 10 [9]. Med AL-extrakt erhålls den lösliga kvantiteten, som är växttillgänglig, och HCl-extraktet ger den svårlösliga kvantiteten, den så kallade förrådskvantiteten.



## Referenser

1. Camitz, G: Korrosionsundersökningar i jord. Bestämning av jordars resistivitet. Bulletin nr 88. Korrosionsinstitutet, Stockholm 1980.
2. Larsson, R & Nilson, G & Rogbeck, J: Bestämning av organisk halt, karbonathalt och sulfidhalt i jord. Rapport nr 27. Statens geotekniska institut, Linköping 1985.
3. Svensk standard **SS 02 71 07**. Utgåva 3, 1990. Geotekniska provningsmetoder – Organisk halt i jord – Kolorimetermätning. SIS, Stockholm 1990.
4. Laborationskompendium i marklära för agr. och hort. stud. (Eriksson, J, red.). Avdelningen för marklära, Institutionen för markvetenskap, Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala 1982.
5. Talme, O & Almén, K-E: Jordartsanalys. Laboratorieanvisningar. Del 1. Kvartärgeologiska institutionen, Stockholms universitet, Stockholm 1975.
6. Svensk standard **SS-ISO 10 694**. Utgåva 1, 1996. Markundersökningar – Bestämning av organiskt kol efter torrförbränning (elementaranalys). SIS, Stockholm 1996.
7. Steinrath, H: Untersuchungsmethoden zur Beurteilung der Aggressivität von Böden. DVGW Fassausschuß "Korrosion Rohrnetz". Deutscher Verein von Gas- und Wassfachmännern e.V. (DVGW), Frankfurt am Main 1966.
8. Kungl. Lantbruksstyrelsens kungörelse Nr 1, 1965. Kungl. Lantbruksstyrelsen, Solna 1965.
9. Svensk standard **SS 02 83 10**. Utgåva 1, 1993. Markundersökningar – Extraktion och bestämning av fosfor, kalium, kalcium, magnesium och natrium ur jord med ammoniumlaktat/ättiksyralösning (AL-metoden). SIS, Stockholm 1993.

**Tabell A.1** Lokalisering av och jordart från provningsplatserna.

Provningsplats	Lokalisering	Jordart	
		Övre provnivån 0,7 m	Nedre provnivån 1,7 m
Enköping	Ryda Kungsgård (14 km N Enköpings centrum), Enköpings kommun, Uppland	Styv lera <sup>1)</sup>	Mycket styv lera <sup>1)</sup>
Sollentuna	Rotsunda vid Norrviken (6 km N Sollentuna centrum, 18 km N Stockholms centrum), Sollentuna kommun, Uppland	Styv lera <sup>2)3)</sup>	Styv lera <sup>2)3)</sup>
Göteborg	Kannebäck på Näset vid Välen (9 km SV Göteborgs centrum), Göteborgs stad, Bohuslän	Styv gyttjig lera <sup>2)</sup>	Styv gyttjig lera <sup>2)</sup>
Stockholm	Skå på Färingsö (7 km NV Ekerö centrum, 20 km NV Stockholms centrum), Ekerö kommun, Uppland	Styv gyttjig lera <sup>2)</sup>	Gyttjig lera <sup>2)</sup>
Linköping <sup>7)</sup> , <i>sand</i>	Kolbytte-mon (10 km S Linköpings centrum), Linköpings kommun, Östergötland	Sand <sup>4)6)</sup>	–
Linköping <sup>7)</sup> , <i>vattenmättad grusig sand</i>	Kolbytte-mon (10 km S Linköpings centrum), Linköpings kommun, Östergötland	Grusig sand <sup>5)6)</sup>	–

1) Glacial lera.

2) Postglacial lera.

3) Jorden på provningsplats Sollentuna är på gränsen till styv gyttjig lera. Den organiska halten i jorden varierar omkring 2 mass-% av torr jord.

4) Ensgraderad (sorterad) finsandig mellansand.

5) Mellangraderad (ofullständig sorterad) grusig sand.

6) Isälvsavlagring.

7) Vid provningsplatsen i Linköping (sand respektive grusig sand) har stålplåtar slagits ned – över och under grundvattenytan – på närliggande platser på cirka 100 m avstånd från varandra. Exponeringen i sand, Linköping Övre, sker således i den omättade, dränerade zonen, medan exponeringen i grusig sand, Linköping Nedre, sker i botten av den nedlagda grustäkten i den vattenmättade zonen under grundvattenytan, som ligger cirka 0,2 m under schaktbotten.

**Tabell A.2** Kornstorleksfördelning med olika jordfraktioner från naturligt lagrad jord vid provningsplatserna med lerjord.

Jordfraktion	Halt							
	mass-%							
	Enköping		Sollentuna		Göteborg		Stockholm	
Övre nivå	Nedre nivå	Övre nivå	Nedre nivå	Övre nivå	Nedre nivå	Övre nivå	Nedre nivå	
Ler	59	61	56	56	41	44	44	32
Finsilt	14	16	21	23	15	18	14	15
Mellansilt	12	14	12	15	16	16	12	14
Grovsilt	9	9	9	6	15	13	10	14
Silt, totalt	35	39	42	44	46	47	36	43
Sand	6	0	2	0	13	9	20	25

**Tabell A.3** Kornstorleksfördelning med olika jordfraktioner för sanden i omättad zon (djup 0,7 m) och i vattenmättad zon (djup 0,7 m) från naturligt lagrad jord vid provningsplats Linköping.

Jordfraktion	Halt	
	mass-%	
	Omättad zon	Vattenmättad zon
Ler + silt	4	4
Finsand	39	15
Mellansand	51	26
Grovsand	6	25
Sand, totalt	96	66
Fingrus	0	16
Mellangrus	0	14
Grus, totalt	0	30

**Tabell A.4** Karaktärisering av jorden på provningsplatserna. Provtagning från omgrävd jord på hösten 1986.

Provningsplats	Djup m	Resistivitet naturfuktig jord $\Omega \cdot m$	Vatteninnehåll		Organisk halt mass-% av torr jord	pH-värde pH(H <sub>2</sub> O)	Kalcium- karbonat mass-% CaCO <sub>3</sub> av torr jord	Svavelföreningar mg S/kg torr jord			Klorid mg Cl/ kg torr jord
			Vattenhalt mass-% av fuktig jord	Vattenkvot mass-% av torr jord				Sulfid S <sup>2-</sup> -S	Sulfat SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> -S	Total S	
Enköping	0,7	32,9	31	46	1,6	6,6	0,18	7	21	190	20
	1,7	34,5	32	47	0,7	6,9	0,16	7	29	150	20
Sollentuna	0,7	37,7	41	69	2,9	4,3	0,32	8	202	2090	34
	1,7	11,6	48	92	2,2	6,3	0,32	288	526	10300	22
Göteborg	0,7	17,1	41	68	3,7	4,4	0,16	8	412	1480	170
	1,7	3,45	54	118	4,6	7,4	0,22	82	322	14600	2200
Stockholm	0,7	52,2	43	76	2,8	4,2	0,18	8	188	1840	30
	1,7	10,4	51	104	4,5	5,4	0,15	19	758	6390	140
Linköping, sand	0,7	2620	7	8	0,4	5,7	0,12	<5	6	90	20
Linköping, vattenmättad grusig sand	0,7	179	12	14	0,2	8,0	3,0	<5	8	140	20

**Tabell A.5**

Kaliumkarbonathalt, kolhalt, organisk halt och glödningsförlust i jorden från provningsplatserna. Provtagning från omgrävd jord på hösten 1986. Kalciumkarbonathalten, halten totalkol och glödningsförlust har analyserats. Oorganiskt kol har beräknats från  $\text{CaCO}_3$  halten och den organiska halten från halten organiskt kol.

Provningsplats	Djup m	Kalciumkarbonat mass-% $\text{CaCO}_3$ av torr jord	Kolhalt mass-% C av torr jord			Organisk halt mass-% av torr jord	Glödningsförlust mass-% av torr jord	
			Totalkol	Oorganiskt kol	Organiskt kol		450 °C	900 °C
Enköping	0,7	0,18	0,80	0,02	0,78	1,3	2,1	3,1
	1,7	0,16	0,56	0,02	0,54	0,9	2,0	2,9
Sollentuna	0,7	0,32	1,29	0,04	1,25	2,2	2,6	3,7
	1,7	0,32	1,21	0,04	1,17	2,0	1,7	3,0
Göteborg	0,7	0,16	1,86	0,02	1,84	3,2	3,0	3,8
	1,7	0,22	2,34	0,03	2,31	4,0	2,5	3,6
Stockholm	0,7	0,18	2,51	0,02	2,49	4,3	4,0	4,8
	1,7	0,15	2,35	0,02	2,33	4,0	4,2	5,2
Linköping, sand	0,7	0,12	0,26	0,01	0,25	0,4	0,8	1,1
Linköping, vatten- mättad grusig sand	0,7	3,0	0,63	0,36	0,27	0,5	0,4	4,9

**Tabell A.6** Kalcium-, magnesium-, kalium- och fosforhalter i jorden från provningsplatserna. Provtagning från omgrävd jord på hösten 1986. Analyser har utförts efter extraktion i dels 0,1 M ammoniumlaktat + 0,4 M ättiksyra (AL-extrakt), dels 2 M saltsyra (HCl-extrakt). Med AL-extrakt erhålls den lättlösliga kvantiteten som är växttillgänglig och HCl-extrakt ger den svårösliga kvantiteten, den så kallade förrådskvantiteten.

Provningsplats	Djup m	Kalcium mg Ca/kg torr jord		Magnesium mg Mg/kg torr jord		Kalium mg K/kg torr jord		Fosfor mg P/kg torr jord	
		Ca-AL	Ca-HCl	Mg-AL	Mg-HCl	K-AL	K-HCl	P-AL	P-HCl
Enköping	0,7	2580	4700	300	8400	130	3750	39	460
	1,7	3000	5300	370	9200	133	4600	40	480
Sollentuna	0,7	580	2300	190	8300	184	6500	16	480
	1,7	1920	4400	760	9900	446	6750	76	570
Göteborg	0,7	460	1900	330	4500	259	4200	22	480
	1,7	1700	3800	1350	7600	658	6500	147	590
Stockholm	0,7	680	3200	165	8200	147	5450	13	500
	1,7	1400	4400	700	9700	365	6250	56	640
Linköping, sand	0,7	160	900	50	1380	25	1300	29	410
Linköping, vattenmättad grusig sand	0,7	17000	17000	100	1590	33	1100	29	580

**Tabell A.7** Totalaciditet (syrapacitet) vid pH = 4,8 [ $K_B(4,8)$ ] respektive pH = 7,0 [ $K_B(7,0)$ ] och totalalkalitet (baskapacitet) vid pH = 7,0 [ $K_S(7,0)$ ] respektive pH = 4,8 [ $K_S(4,8)$ ] samt kväveföreningar i jorden från provningsplatserna. Provtagning från omgrävd jord hösten 1981 för totalaciditet och totalalkalitet och hösten 1986 för kväveföreningar.

Provningsplats	Djup m	Totalaciditet mmol/kg torr jord		Totalalkalitet mmol/kg torr jord		Kväveföreningar mg N/kg torr jord			
		$K_B(4,8)$	$K_B(7,0)$	$K_S(7,0)$	$K_S(4,8)$	Nitrit $\text{NO}_2^-$ -N	Nitrat $\text{NO}_3^-$ -N	Ammonium $\text{NH}_4^+$ -N	Total N
Enköping	0,7	0	0	0,3	21	0,13	0,09	3,6	1000
	1,7	0	0	1,4	22	0,12	58	2,7	700
Sollentuna	0,7	0,8	48	0	0	0,09	0,6	1,4	1600
	1,7	0	58	0	0	0,28	0,2	22	1600
Göteborg	0,7	0	35	–	0	0,08	0,5	1,4	2000
	1,7	24	89	0	0	0,19	0,09	85	2600
Stockholm	0,7	10	70	0	0	0,10	4,1	1,4	600
	1,7	0	71	0	0	0,20	0,4	43	3700
Linköping, sand	0,7	0	4,6	0	–	0,04	0,07	0,8	100
Linköping, vatten- mättad grusig sand	0,7	0	0	7,2	123	0,9	0,4	3,9	100

**Tabell A.8** Analys av jordvattnet i de uppgrävda provgroparna vid provningsplatserna. Jordvattnet består av markvatten från spricksystemet i de övre jordlagren och grundvatten. Provtagnings under hösten 1986.

Analys	Provningsplats			
	Enköping	Sollentuna	Stockholm	Linköping
COD <sub>Mn</sub> , mg/l	5,6	6,6	9,1	2,3
Konduktivitet (20 °C), mS/m	29,5	50,0	90,5	43,3
pH-värde	7,1	5,7	4,7	7,4
Alkalinitet, mg HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /l	189	6	0	212
Aggressiv kolsyra, mg CO <sub>2</sub> /l	19	54	53	0
Totalhårdhet, mg Ca/l	58	102	131	94
Totalhårdhet, °dH	8,1	14,3	18,3	13,2
Ca, mg/l	46	59	55	76
Fe, mg/l	3,5	3,5	3,6	8,7
Mn, mg/l	2,6	2,6	1,7	2,7
Cu, mg/l	< 0,02	0,08	< 0,02	< 0,02
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , mg/l	31	211	319	28
Cl <sup>-</sup> , mg/l	5	15	80	31
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , mg/l	2,5	1,0	4,4	0,3
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , mg/l	< 2	< 2	3	< 2
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , mg/l	0,02	< 0,01	0,01	< 0,01
Fosfat, mg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P/l	0,82	0,16	0,10	0,54
Totalfosfor, mg P/l	0,96	0,18	0,10	1,66



## Bilaga B:

### Mätning av redoxpotential i fält

#### Figurer

- Figur B.1** Mätning av redoxpotential i naturligt lagrad jord på provningsplats Stockholm, Skå.
- Figur B.2** Mätning av redoxpotential i naturligt lagrad jord på provningsplats Stockholm, Skå, mätsond och referenselektrod.
- Figur B.3** Redoxpotential på djupet 0,6 m under markytan i ostörd jord vid provningsplats Stockholm, Skå. Manuell mätning var 30:e sekund under tiden 15 sekunder – 30 minuter.
- Figur B.4** Redoxpotential på djupet 0,6 m under markytan i naturligt lagrad jord vid provningsplats Stockholm, Skå. Mätning med datalogger var 5:e minut Sollentuna, Rotsunda. Mätning med datalogger var 5:e minut under tiden 0 – 96 timmar.
- Figur B.5** Redoxpotential på djupet 0,6 m under markytan i naturligt lagrad jord vid provningsplats Stockholm, Skå. Mätning med datalogger var 5:e minut under tiden 12 – 18 timmar.
- Figur B.6** Redoxpotential på djupet 0,6 m under markytan i naturligt lagrad jord vid provningsplats Sollentuna, Rotsunda. Mätning med datalogger var 5:e minut under tiden 5 – 180 minuter.
- Figur B.7** Redoxpotential på djupet 0,6 m under markytan i naturligt lagrad jord på provningsplats Sollentuna, Rotsunda. Mätning med datalogger var 5:e minut under tiden 0 – 96 timmar.

# 1. Inledning

Redoxpotential mäts för att bestämma reduktions- och oxidationsförhållanden i vatten och i jord och är således ett mått på vattnets eller jordens oxidationsförmåga.

Redoxpotentialen är skenbart enkel att mäta i vatten eller i jord. En komplikation är att man ofta inte får ett stabilt värde, utan redoxpotentialen driver med tiden. Det är vanligt att potentialen blir mera negativ (förskjuts i negativ riktning) med tiden i naturliga vatten och i jord. Uppmätta redoxpotentialer är också svåra att tolka. Svårigheterna med att mäta redoxpotentialer och att tolka uppmätta värden beskrivs av Back (2001), Grenthe m. fl. (1992), Stumm & Morgan (1996) och Whitfield (1974). Artikeln av Back (2001) rekommenderas för vidare läsning om mätning av redoxpotential.

## 2. Allmänt om mätning av redoxpotential

Redoxpotentialen mäts som potentialskillnaden (spänningen) mellan en inert elektrod och en referenselektrod. Som inert elektrod används oftast en platinaelektrod, men det används också andra elektrodmaterial. Grenthe m. fl. (1992) använde till exempel i sina undersökningar följande elektrodmaterial:

- Platina
- Guld
- Kolglas (eng. glassy carbon)
- Grafit.

Som referenselektrod används i jord en mättad koppar/kopparsulfatelektrod ( $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ ) med mättad kopparsulfatlösning ( $\text{CuSO}_4$ ) som elektrolyt i elektroden och i vatten används mättad kalomelektrod (SCE) med mättad kaliumkloridlösning (KCl) som elektrolyt i elektroden eller silver/silverkloridelektrod ( $\text{Ag}/\text{AgCl}$ ) som referenselektrod. I silver/silverkloridelektroden används ofta mättad kaliumkloridlösning (mättad  $\text{Ag}/\text{AgCl}$ ) eller havsvatten som elektrolyt (silver/silverklorid/havsvattenelektrod).

Normalvätgaselektroden, NHE (kallas ibland också för standardväteelektroden, SHE) används inte vid praktiska mätningar, men mätvärden erhållna med andra typer av referenselektroder räknas om att gälla relativt normalvätgaselektroden. Redoxpotentialen angiven relativt normalvätgaselektroden (NHE) brukar betecknas  $E_h$ . Indexet  $h$  visar att mätvärdet gäller relativt NHE.

### 2.1 Inert elektrod

Det är viktigt att platinaelektroden verkligen är inert. Beläggningar på platinaytan kan ge missvisande resultat. Whitfield (1974) anger att i aerob miljö kan platinaoxiderna  $\text{PtO}$  och  $\text{PtO}_2$  bildas på platinaytan. En oxidbelagd platinaelektrod blir i första hand pH-känslig. I sulfidhaltig jord eller vatten kan platinasulfid  $\text{PtS}$  bildas på platinaytan, man brukar säga att elektroden förgiftas. Om  $\text{PtS}$  bildas på platinaytan sjunker (förskjutning i negativ led) redoxpotentialen relativt snabbt, Whitfield (1974). Förskjutningen i negativ led av uppmätta redoxpotentialer vid bildning av  $\text{PtS}$  på metallytan har också konstaterats av Hayes m. fl. (1958) och Baas Becking m. fl. (1960).

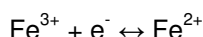
Vid undersökningar av Grenthe m. fl. (1992) i laboratoriemiljö uppsattes platina- och guldelektroder för sulfidlösningar med halten 20 – 50 mg/l  $\text{Na}_2\text{S}$ . Före och efter dopning av elektroderna i natriumsulfidlösningen mättes redoxpotentialen hos grundvatten. För platinaelektroden erhöles endast en liten minskning (som mest 10 mV) av redoxpotentialen, medan redoxpotentialen ökade med upp till 50 mV för guldelektroden. Platina är alltså mindre känsligt för sulfidangrepp än guld. Guldelektroder bör inte användas i sulfidhaltig miljö. Det förefaller som att risken för "förgiftning" av platinaelektroder är överdriven för vanliga jord- och vattenmiljöer.

### 3. Tolkning av uppmätta redoxpotentialer

För det idealiska fallet att endast ett redoxpar påverkar redoxpotentialen och kemisk jämvikt råder mellan det ämne som reduceras och det ämne som oxideras kan redoxpotentialen tolkas som en jämviktsreaktion.

Vid en redoxreaktion oxideras ett ämne samtidigt som ett annat ämne reduceras. Det ämne som oxideras [ox] avger elektroner  $e^-$ , medan ämnet som reduceras [red] upptar elektroner. Vid kemisk jämvikt gäller att för varje ämne som deltar i jämvikten är hastigheten lika stor för dess bildning som förbrukning.

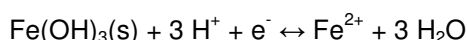
Vid jämvikt mellan till exempel  $Fe^{3+}$  joner och  $Fe^{2+}$  joner i ett vatten eller i ett porvatten i jord gäller:



Om halterna av  $Fe^{3+}$  joner och  $Fe^{2+}$  joner är kända kan jämviktspotentialen beräknas med Nernsts formel. Redoxpotentialen motsvaras då av jämviktspotentialen.

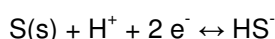
Olika ämnen i naturliga vatten och i jord befinner sig sällan i kemisk jämvikt. Lindberg & Runnels (1984) har jämfört 611 mätningar av redoxpotential i grundvatten med beräknade jämviktspotentialer enligt Nernsts formel. Slutsatsen från jämförelsen var att uppmätta redoxpotentialer avvek i de allra flesta fallen från beräknade jämviktspotentialer. Det framkom alltså att grundvatten sällan var i kemisk jämvikt.

I en del fall har man lyckats korrelera uppmätta redoxpotentialer till jämviktsreaktioner. Grenthe m. fl. (1992) har korrelerat uppmätta redoxpotentialer i grundvatten från djupa borrhål med Fe(II)/Fe(III)-systemet med  $Fe^{2+}$  i grundvattnet och Fe(III) som förekommer som järnhydroxid  $Fe(OH)_3$  på mineralytor enligt elektroreaktionen:



Det bör påpekas att vid mätning av redoxpotentialer i grundvatten i djupa borrhål dröjde det över 20 dygn innan stabila redoxpotentialer erhöles, Grenthe m. fl. (1992).

Berner (1963) och Whitfield (1969) fann att uppmätta redoxpotentialer i marina sediment kunde korreleras mot S(0)/S(-II)-systemet med svavel S med ortorombisk kristallstruktur i sedimentet och vätesulfidjon  $HS^-$  i porvattnet enligt elektroreaktionen:

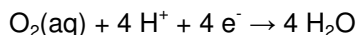


#### 3.1 Blandpotentialer

I vatten och i jord är redoxpotentialen sällan en jämviktspotential mellan ett reduktionsmedel [red] och ett oxidationsmedel [ox], utan flera olika redoxpar påverkar den uppmätta redoxpotentialen. Uppmätta redoxpotentialer är ofta så kallade blandpotentialer (eng. mixed potentials), det vill säga en "blandning" av elektropotentialerna för minst två olika elektroreaktioner. Det går inte att beräkna blandpotentialer med Nernsts formel.

Löst syrgas,  $O_2(aq)$ , i vattnet eller i porvattnet i jord har stor påverkan på uppmätta redoxpotentialer. Vid mätningar av Grenthe m. fl. (1992) påverkade också låga halter av löst syrgas i grundvattnet redoxpotentialen. Förekomsten av löst syrgas i grundvattnet gav upphov till initialt höga redoxpotentialer,  $E_h$  cirka + 300 mV relativt NHE, som långsamt minskade (förskjutning i negativ riktning) allteftersom den lösta syrgasen förbrukades och syrgashalten minskade i grundvattnet, Grenthe m. fl. (1992). Efter storleksordningen 10 dygn sjönk redoxpotentialen under kort tid cirka 400 mV. Det slutliga värdet på redoxpotentialen var cirka - 100 mV relativt NHE.

Förekomst av löst syrgas,  $O_2(aq)$ , i vattnet eller i porvattnet i jord resulterar i att uppmätta redoxpotentialer blir blandpotentialer. Den lösta syrgasen kommer att reduceras på platinaytan enligt reduktionsreaktionen:



Samtidigt kommer olika ämnen, främst organiska föreningar, att oxideras på platinaytan. Detta skapar en drivande uppmätt redoxpotential som successivt blir mera negativ.

I naturliga vatten är de viktigaste redoxreaktionerna oxidation av organiskt material med åtföljande reduktionsreaktioner i turordning (Sigg, 2000 och Stumm & Morgan, 1996):

- Löst syrgas,  $O_2(aq)$  till vatten
- Nitrat,  $NO_3^-$  till nitrit,  $NO_2^-$  och kvävgas,  $N_2$
- Mangan(III/IV) till mangan(II)
- Järn(III) till järn(II)
- Sulfat,  $SO_4^{2-}$  till sulfid,  $HS^-$
- Koldioxid,  $CO_2$  till metan,  $CH_4$ .

## 4. Tekniskt utförande

I detta projekt mättes redoxpotentialen i fält i naturligt lagrad jord på djupet 0,6 m under markytan på två provningsplatser, nämligen Stockholm (Skå) och Sollentuna, **Figur B.1**. Mätningarna påbörjades i Stockholm den 27 november 2008 och i Sollentuna den 11 december 2008.

Med redoxpotential menas potentialskillnaden (spänningen) mellan en inert elektrod (platinaelektrod) och en referenselektrod, **Figur B.2**. Som referenselektrod användes en mättad koppar/kopparsulfatelektrod ( $Cu/CuSO_4$ ) och mätvärdet har sedan omräknats relativt normalvätgaselektroden (NHE). Den mättade koppar/kopparsulfatelektroden har potentialen + 320 mV relativt NHE.

Ett hål förborrades i jorden ned till djupet 0,5 m och mätsonden trycktes sedan ned genom jorden så att platinaspetsen på mätsonden fanns på djupet 0,6 m under markytan. Mätsonden bestod av ett rör av rostfritt stål med platinaspetsen längst ned på sonden. Själva platinaspetsen var isolerad från röret på sonden och från platinaspetsen gick i röret en mätkabel som anslöts till en voltmeter. Hålet i jorden kring rör av rostfritt stål fylldes noggrant med jord och stampades igen.

Vid mätningarna på provningsplats Stockholm mättes redoxpotential manuellt var 30:e sekund under 30 minuter med en pH-meter som höghögig voltmeter. Därefter mättes potentialen var 5:e minut under drygt 95 timmar (i det närmaste fyra dygn) med datalogger (Datalogger Mitec AT40, Mitec Instrument AB, Säffle). Vid mätningarna på provningsplats Sollentuna mättes redoxpotentialen var 5:e minut under drygt 96 timmar (fyra dygn) med datalogger.

Före mätningarna ordnades gjordes mätsonden med platinaspetsen enligt en speciell procedur:

1. Rengöring av nedre delen av röret och platinaspetsen från jordrester med borstning med diskborste i avjoniserat vatten. Nedre delen av röret rengjordes också med polersvamp (Scotch-Brite).
2. Sköljning med avjoniserat vatten.
3. Försiktig poleringen av platinaspetsen med mycket fint slippapper.
4. Sköljning med avjoniserat vatten.
5. Kalibrering av platinaspetsen i redoxbuffertlösning.
6. Noggrann sköljning av nedre delen av röret och platinaspetsen med avjoniserat vatten.
7. Torkning av platinaspetsen med laborierpapper (Kleenex).

Vid kalibrering av platinaelektroden mättes potentialen mellan platinaspetsen och en mättad kalomel-elektrod (SCE) med känd potential i redoxbuffertlösningen. Temperaturen hos lösningen mättes också. Som redoxbuffertlösning användes Hamilton Redox Buffer 271 mV tillverkad av Hamilton Bonaduz AG, Bonaduz, Schweiz och levererad av Christian Berner AB, Mölnlycke.

Enligt svensk standard SS-ISO 11271 är försiktig mekanisk rengöring av platinaelektroden att föredra framför rengöring i starka oxiderande lösningar, till exempel salpetersyra. Galster (2000) förordar också försiktig mekanisk rengöring istället för rengöring i syralösningar.

## 5. Resultat

Vid redoxmätningar på provningsplats Stockholm var redoxpotentialen  $E_h + 580$  mV relativt NHE efter 15 sekunders mätning. Potentialen var som högst + 588 mV efter 2,5 minuters mätning och potentialen sjönk sakta till + 551 mV efter 30 minuter, **Figur B.3**.

Vid mätning med datalogger var potentialen + 550 mV efter 35 minuters mätning och som högst + 566 mV efter cirka 7 timmars mätning, **Figur B.4**. Efter 13 timmars mätning sjönk redoxpotentialen snabbt under cirka 2 timmars mätning: potentialen var + 507 mV efter 13 h, + 305 mV efter 13,5 h, + 83 mV efter 14 h, - 63 mV efter 14,5 h och - 137 mV efter 15 h, **Figur B.5**.

Potentialen var - 168 mV efter 16 timmars mätning och därefter sjönk redoxpotentialen sakta till - 195 mV efter cirka 33 h. Redoxpotentialen var sedan inom intervallet - 195 mV till - 187 mV efter 95 timmars mätning, **Figur B.4**. Det slutliga stabila värdet på redoxpotentialen var alltså - 190 mV relativt NHE.

Vid redoxmätningar på provningsplats Sollentuna sjönk redoxpotentialen snabbt under den första timmens mätning. Redoxpotentialen  $E_h$  var + 124 mV relativt NHE efter 5 minuters mätning, - 13 mV efter 15 minuter, - 98 mV efter 30 minuter, - 155 mV efter 45 minuter och - 177 mV efter 60 minuters mätning. Efter 2 h mätning var potentialen - 192 mV och som mest negativ, - 202 mV efter 4 h mätning, **Figur B.6**.

Redoxpotentialen var sedan inom ett tio mV intervall: - 200 mV till - 190 mV fram till efter 55 timmars mätning. Under tidsintervallet 55 – 74 timmars mätning låg redoxpotential mellan - 190 och - 185 mV. Redoxpotentialen sjönk sedan något och var - 181 mV efter 96 timmars mätning, **Figur B.7**. Det slutliga stabila värdet på redoxpotentialen var alltså - 180 mV relativt NHE.

## 6. Diskussion

### 6.1 Uppmätta redoxpotentialer

Vid mätningar på provningsplats Stockholm erhöles initialt en mycket positiv redoxpotential, + 590 mV till + 550 mV relativt NHE. Denna mycket positiva potential var tämligen konstant under 13 timmars mätning. Efter 13 timmars mätning sjönk redoxpotentialen snabbt under cirka 2 timmars mätning och var cirka - 140 mV efter 15 timmars mätning.

En mycket hög halt löst syrgas i porvattnet har troligen gett upphov till den mycket positiva redoxpotentialen. Den lösta syrgashalten i porvattnet har därefter långsamt förbrukats i elektrodprocesserna och efter cirka 15 timmar verkar all löst syrgas i närheten av redoxsonden ha förbrukats. Att den drastiska minskningen i redoxpotential efter 13 timmars mätning skulle bero på förbrukning av löst syrgas i porvattnet är betydligt troligare än "förgiftning" av platinaelektroden genom bildning av platinasulfid PtS på metallytan. Sulfidhalten i porvattnet i jorden torde med stor sannolikhet vara för låg för att PtS skall bildas på platinaytan.

Vid provningsplats Sollentuna var den initiala redoxpotentialen cirka + 125 mV relativt NHE och den sjönk snabbt under en timmes mätning till cirka - 175 mV.

Den initiala redoxpotentialen var betydligt, cirka 450 mV, mera negativ i Sollentuna än i Stockholm. Redoxpotentialen sjönk också avsevärt snabbare i Sollentuna än i Stockholm till ett relativt konstant värde: 16 timmar i Stockholm mot en timme i Sollentuna. Halten löst syrgas i porvattnet var antagligen betydligt lägre i Sollentuna än i Stockholm.

Efter cirka 18 timmars mätning erhöles ett relativt stabilt värde på redoxpotentialen i Stockholm, medan det i Sollentuna tog endast drygt en timme för att uppnå stabila mätvärden.

Av mätningarna av redoxpotential framgår att det råder reducerande betingelser i jorden både i Stockholm och i Sollentuna. Ett grundvatten med redoxpotentialen cirka - 200 mV relativt NHE, som i Stockholm och i Sollentuna, klassas med avseende på redoxförhållandet till Klass 3: låg redoxpotential/anaeroba vatten enligt Naturvårdsverket (1999).

Redoxpotentialen klassas i fyra klasser: Klass 1: hög redoxpotential, klass 2: måttligt hög redoxpotential, klass 3: låg redoxpotential och klass 4: mycket låg redoxpotential. Dessa fyra klasser avser grundvatten i jämvikt. Det finns också en femte klass också för blandvatten som inte befinner sig i kemisk jämvikt. I Bedömningsgrunder för miljö kvalitet Grundvatten (Naturvårdsverket, 1999) har man valt att uppskatta grundvattnets redoxpotential från förhållandet mellan järn-, mangan- och sulfathalt i vattnet. Direktmätning av grundvattnets redoxpotential anses för svår att utföra.

## 6.2 Variation hos redoxpotentialer i jord

Vid undersökningar av Fiedler (2000) framkom att redoxpotentialen i jorden påverkades av:

- Vattenhållsförhållandet i jord och grundvattenytans variation
- Djupet under markytan
- Årstiden
- Temperaturen i jorden.

Det framgick också av undersökningarna av Fiedler (2000), att skillnaden i redoxpotential kunde vara relativt stor för två närbelägna provningsställen på samma djup under markytan. Detta gäller åtminstone för ytligt placerade platinaelektroder (djup 5 – 10 cm under markytan). Största skillnaden i redoxpotential mellan två ytligt placerade platinaelektroder erhöles vid perioder med högt grundvattenstånd, perioder med snötäcke på markytan och vid snösmältning.

Faulkner m. fl. (1989) har mätt syrgashalter i markluften, redoxpotentialer och grundvattenytans läge i jord. I undersökningarna framkom att redoxpotentialen varierade med syrgashalten i markluften i jorden,  $O_2(g)$ , grundvattenytan läge och årstiden. Undersökningen visade alltså att jordens luftning och vattenhållsförhållandena i jorden har stor betydelse för värdet på redoxpotentialen. Den parameter som bäst speglar förhållandet mellan lufthalt och vattenhalt torde vara jordens vattenmättnadsgrad.

Det innebär att redoxpotential på ett provningsställe bör variera främst med luftningen av jorden, vattenhållsförhållandet i jorden, djupet under markytan och årstiden. I porvattnet påverkas redoxpotentialen främst av halten löst syrgas och järn- och manganförekomsten. Detta gör uppmätta redoxpotentialer än mer svårtolkade.

## 6.3 Mätning av redoxpotentialer

Med utgångspunkt från de genomförda mätningarna bör redoxpotentialen, vid mätningar i fält, följas under ett dygn för att uppnå tillnärmelsevis stabil redoxpotential i jord. Det är dock inte nödvändigt att följa redoxpotentialen med datalogger. Ett alternativt sätt kunde vara att trycka ned redoxsonden till avsett djup under markytan och sedan vänta ett dygn och därefter mäta redoxpotentialen mot en referenselektrod i markytan. Fältmätningar av redoxpotential är att föredra framför mätningar på laboratorium på intagna jord- eller grundvattenprover eller eluat från skaktest (lakförsök).

Som slutsats av undersökningarna kan det konstateras att redoxpotentialen torde vara allt för komplicerad att mäta och tolka för att användas vid rutinundersökningar av korrosionsrisker i jord.

## 7. Referenser

Baas Becking, L G M & Kaplan, I R & Moore, D, (1960): Limits of the natural environment in terms of pH and oxidation-reductions potentials. *The Journal of Geology*, vol. 68, p. 243 - 284.

Back, P-E, (2001): Hur mäter man redoxpotentialen praktiskt och varför blir det inte rätt? *Vatten*, årgång 57, s. 153 - 160.

Berner, R A, (1963): Electrode Studies of hydrogen sulphide in marine sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 27, p. 563 - 575.

Faulkner, S P & Patrick Jr., W H & Gambrell, R P, (1989): Field techniques for measuring wetland soil parameters. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 53, p. 883 - 890.

Fiedler, S, (2000): In situ long-term-measurement of redox potential in redoximorphic soils. I: *Redox: Fundamentals, Processes and Applications* (Schüring, J & Schulz, H D & Fischer, W R & Böttcher, J & Duijnsveld, W H M, eds.), p. 81 - 94. Springer-Verlag, Berlin.

Galster, H, (2000): Technique of measurement, electrode processes and electrode treatment. I: *Redox: Fundamentals, Processes and Applications* (Schüring, J & Schulz, H D & Fischer, W R & Böttcher, J & Duijnsveld, W H M, eds.), p. 13 - 23. Springer-Verlag, Berlin.

Grenthe, I & Stumm, W & Laaksuharju, M & Nilsson, A-C & Wikberg, P, (1992): Redox potentials and redox reactions in deep groundwater systems. *Chemical Geology*, vol. 98, p. 131 - 150.

Hayes, F R & Reid, B I & Cameron, M L, (1958): Lake Water and Sediment. II. Oxidation-Reduction relations at the mud-water interface. *Limnology and Oceanography*, vol. 3, p. 308 - 317.

Lindberg, R D & Runnells, D D, (1984): Ground water redox reactions: an analysis of equilibrium state applied to Eh measurements and geochemical modelling. *Science*, vol. 225, p. 925 - 927.

Naturvårdsverket, (1999). *Bedömningsgrunder för miljö kvalitet. Grundvatten. Rapport 4915.* Naturvårdsverket Förlag, Stockholm.

Sigg, L, (2000): Redox potential measurement in natural waters: Significance, concepts and problems. I: *Redox: Fundamentals, Processes and Applications* (Schüring, J & Schulz, H D & Fischer, W R & Böttcher, J & Duijnsveld, W H M, eds.), p. 1 - 12. Springer-Verlag, Berlin.

Stumm, W & Morgan, J J, (1996): *Aquatic Chemistry*. Third edition. Se speciellt s. 491 - 498. John Wiley, New York.

Svensk standard SS-ISO 11271 (2003). *Markundersökningar – Bestämning av "redoxpotential" – Fältmetod*. Utgåva 1. SIS, Stockholm.

Whitfield, M, (1969): Eh as an operational parameter in estuarine studies. *Limnology and Oceanography*, vol. 14, p. 547 - 558.

Whitfield, M, (1974): Thermodynamic limitations on the use of the platinum electrode in Eh measurements. *Limnology and Oceanography*, vol. 19, p. 857 - 865.

a)



b)



**Figur B.1** Mätning av redoxpotential i naturligt lagrad jord på provningsplats Stockholm, Skå. Med redoxpotential menas potentialskillnaden (spänningen) mellan en inert elektrod (vanligtvis en platinaelektrod) och en referenselektrod.

- a) Mätning av redoxpotential. Utrustning som krävs är en mätsond med platinaspets, en referenselektrod (i jord används en mättad koppar/kopparsulfatelektrod), en höghögsmig voltmeter samt mätsladdar. I förgrunden av bilden syns mätsonden med grön mätsladd.
- b) En pH-meter används som höghögsmig voltmeter vid mätning av redoxpotential. Redoxpotentialen mäts vid olika tidpunkter. I detta fall var redoxpotentialen + 268 mV relativt den mättade koppar/kopparsulfatelektroden 1,5 minut efter det sonden tryckts ned (+ 586 mV relativt normalvätgaselektroden NHE, mätvärdet kallas för  $E_r$ ).



a)



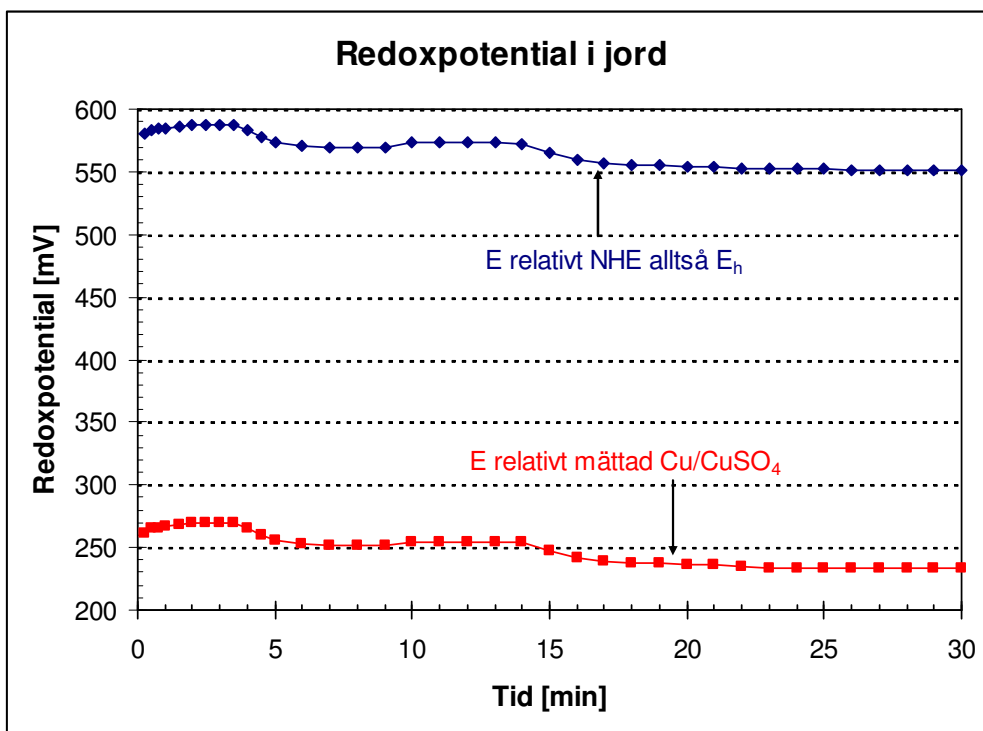
b)



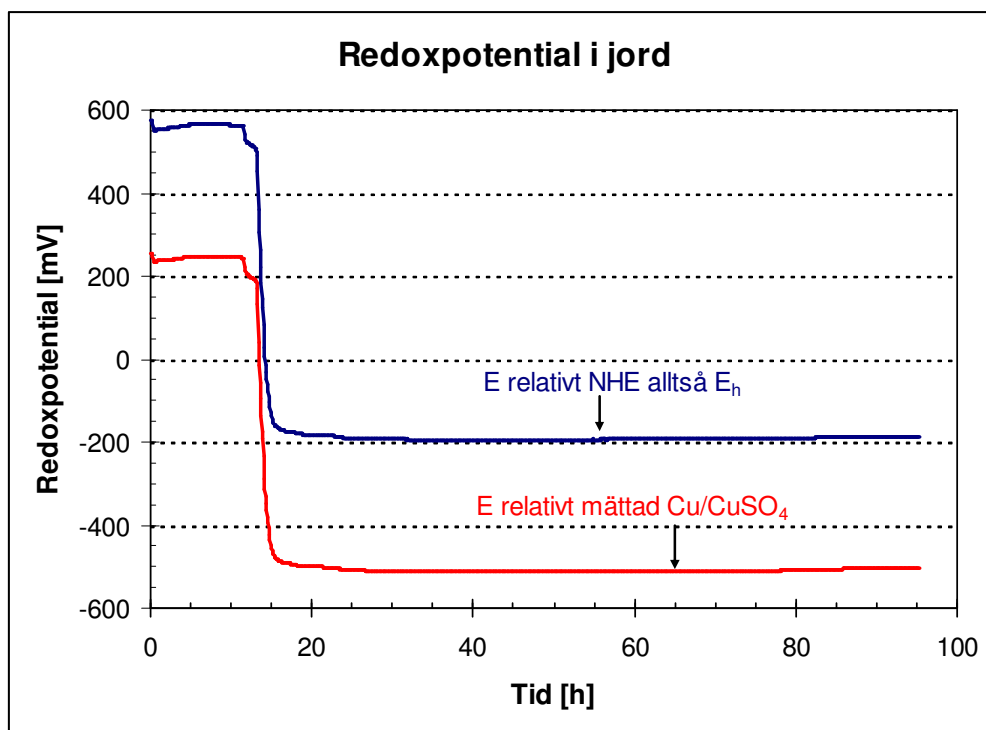
**Figur B.2** Mätning av redoxpotential i naturligt lagrad jord på provningsplats Stockholm, Skå. Mätsond och referenselektrod.

**a)** Mätsond med platinspets längst ned på sonden (platinspetsen var isolerad från röret på sonden). Ett hål förborrades i jorden ned till djupet 0,5 m och mätsonden trycktes sedan ned så att platinspetsen fanns på djupet 0,6 m under markytan.

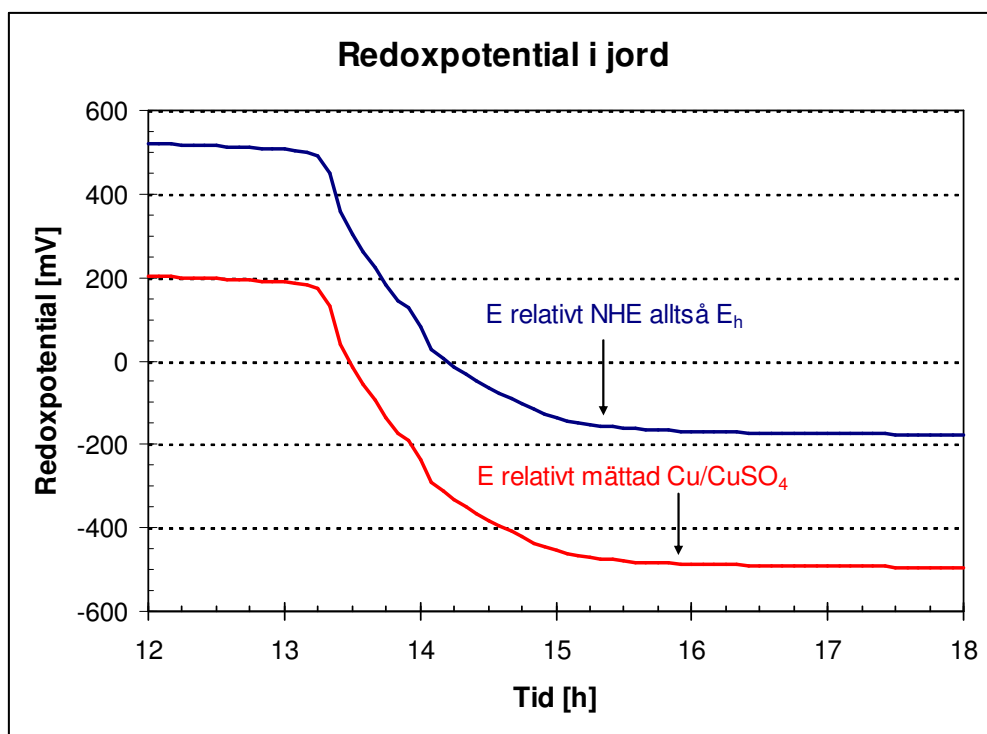
**b)** Referenselektrod, av typen mättad koppar/kopparsulfatelektrod, nedstucken i fuktig jord



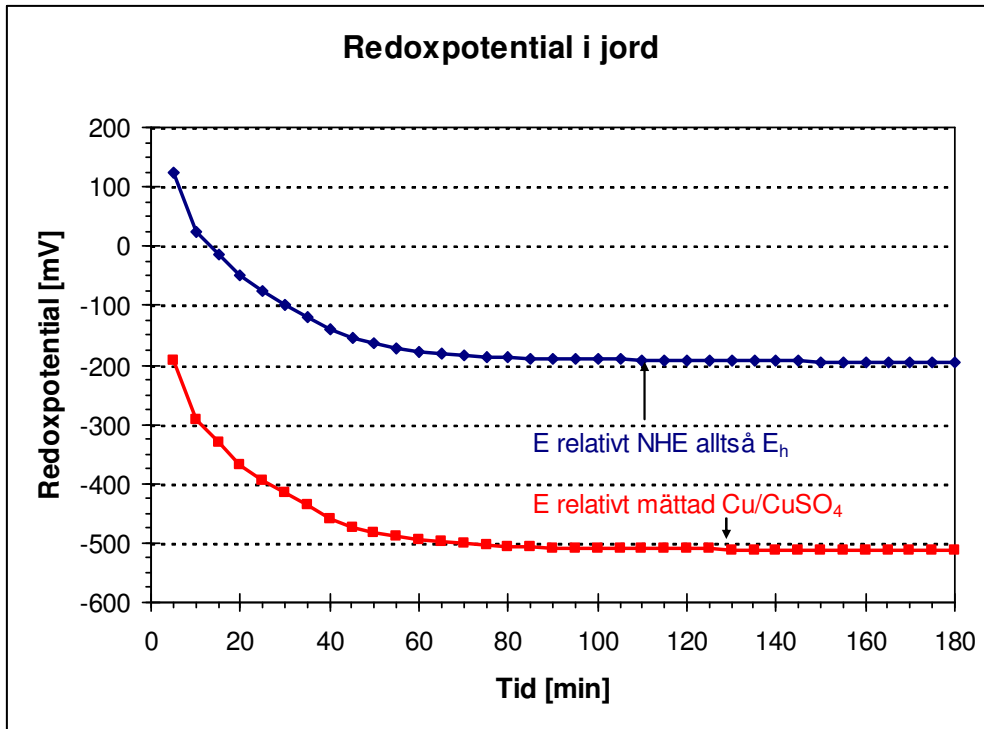
**Figur B.3** Redoxpotential på djupet 0,6 m under markytan i naturligt lagrad jord vid provningsplats Stockholm (Skå) som funktion av tiden. Manuell mätning var 30:e sekund.



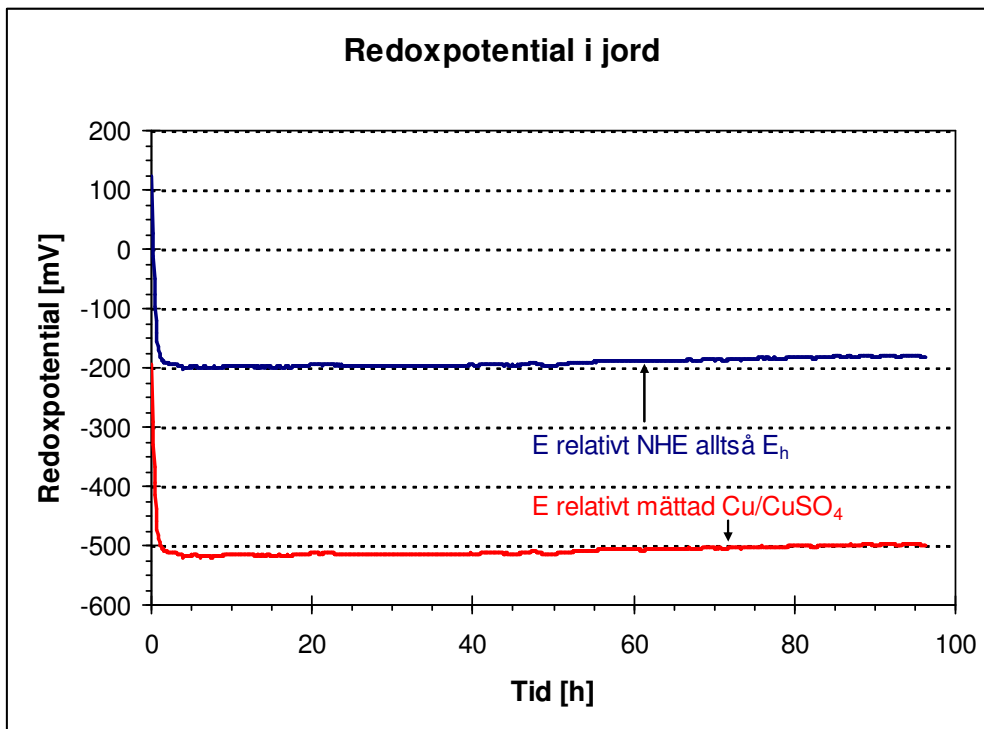
**Figur B.4** Redoxpotential på djupet 0,6 m under markytan i naturligt lagrad jord vid provningsplats Stockholm (Skå) som funktion av tiden. Mätning med datalogger var 5:e minut.



**Figur B.5** Redoxpotential på djupet 0,6 m under markytan i naturligt lagrad jord vid provningsplats Stockholm (Skå) som funktion av tiden. Tidsperiod: 12 – 18 timmar. Mätning med data-logger var 5:e minut.



**Figur B.6** Redoxpotential på djupet 0,6 m under markytan i naturligt lagrad jord vid provningsplats Sollentuna (Rotsunda) som funktion av tiden. Mätning med datalogger var 5:e minut.



**Figur B.7** Redoxpotential på djupet 0,6 m under markytan i naturligt lagrad jord vid provningsplats Sollentuna (Rotsunda) som funktion av tiden. Mätning med datalogger var 5:e minut.

## Bilaga C:

### Mätning av grundvattennivå vid provningsplatserna.

Vid provningsplatserna Enköping, Sollentuna och Stockholm mättes grundvattennivån, en gång per månad, under tiden januari 1989 – januari 1991. Grundvattennivån mättes dels i en provgrop med omgrävd och återfylld jord och dels i naturligt lagrad jord, som inte varit omgrävd.

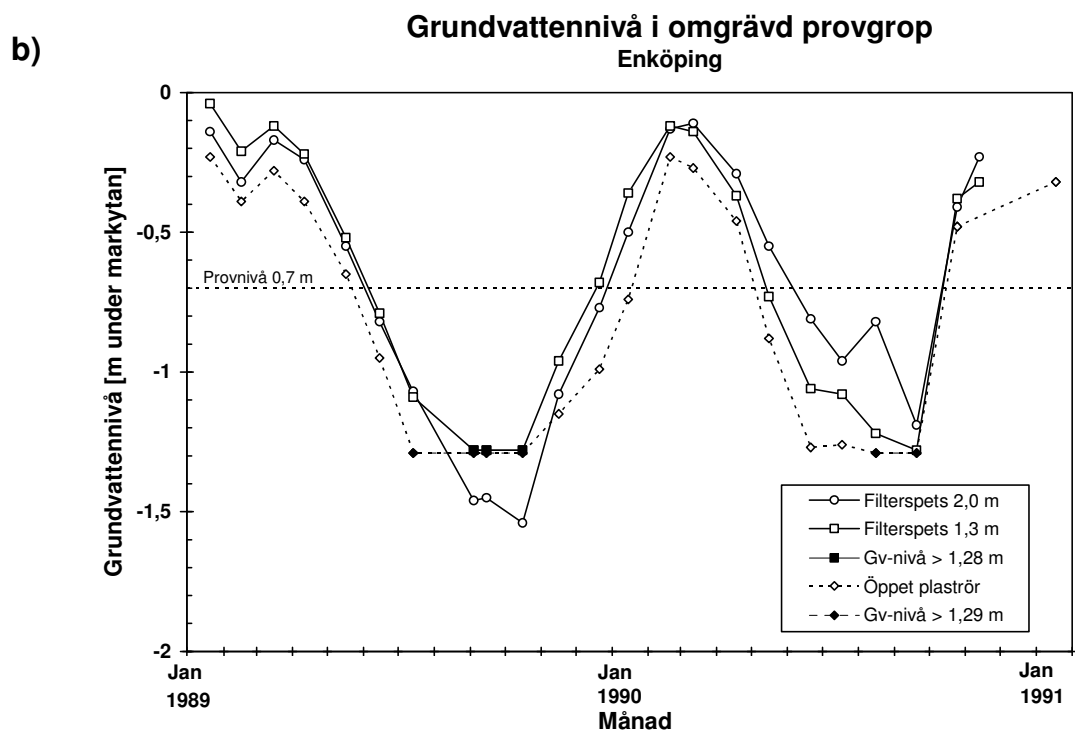
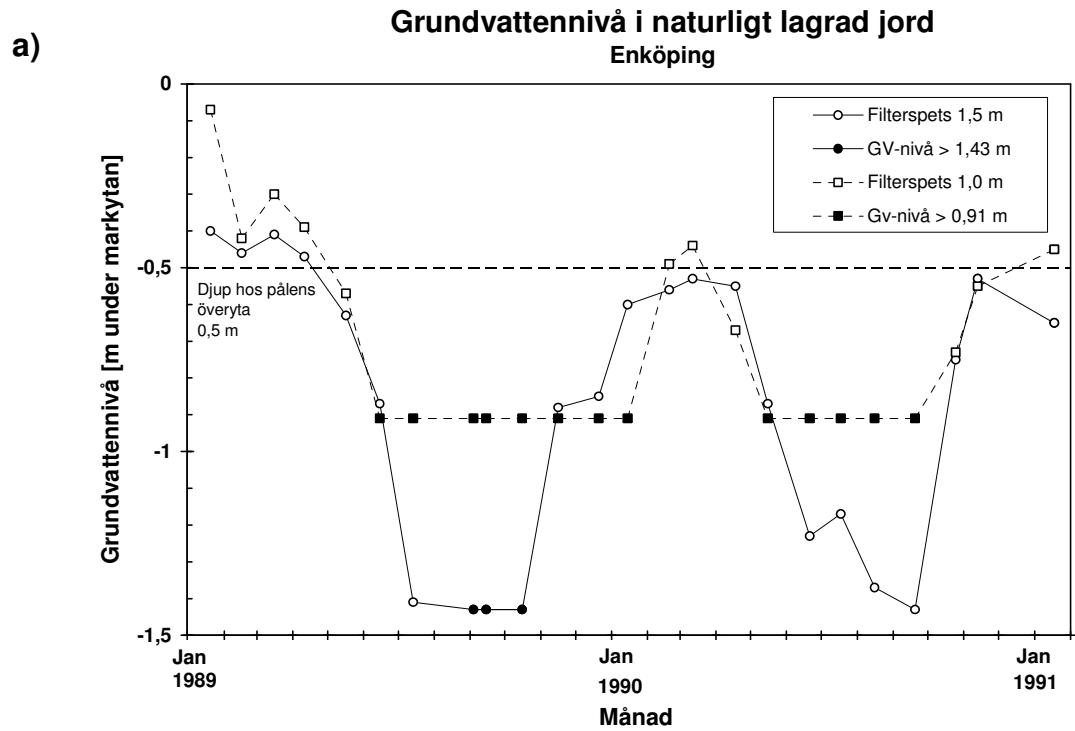
Grundvattennivåerna mättes i omgrävd jord med två rör med filterspetsar och ett öppet rör, som var perforerat i nederändan. Rören med filterspetsar var nedtryckta till olika djup. I Sollentuna fanns endast en filterspets och det öppna röret fungerade inte. I den naturligt lagrade jorden mättes grundvattennivåerna med två rör med filterspetsar, som var nedtryckta till olika djup.

Grundvattennivåerna vid provningsplatserna Enköping, Sollentuna och Stockholm visas i **Figur C.1, C.2** och **C.3**.

1989 var ett torrt år med låg årsnederbörd och årsnederbörden 1990 var hög. Detta medför att grundvattennivåmätningarna är relevanta och speglar förhållandena med lägsta och högsta grundvattennivåer. Variationerna i grundvattennivån mellan olika år med olika nederbörd torde ligga inom det uppmätta intervallen.

I **Figur C.4** visas okorrigerad årsnederbörd för åtta stationer inom SMHIs (Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut) nederbördsnät för perioden 1983 – 1999. De utvalda stationerna är de som ligger närmast provningsplatserna. Stationerna är:

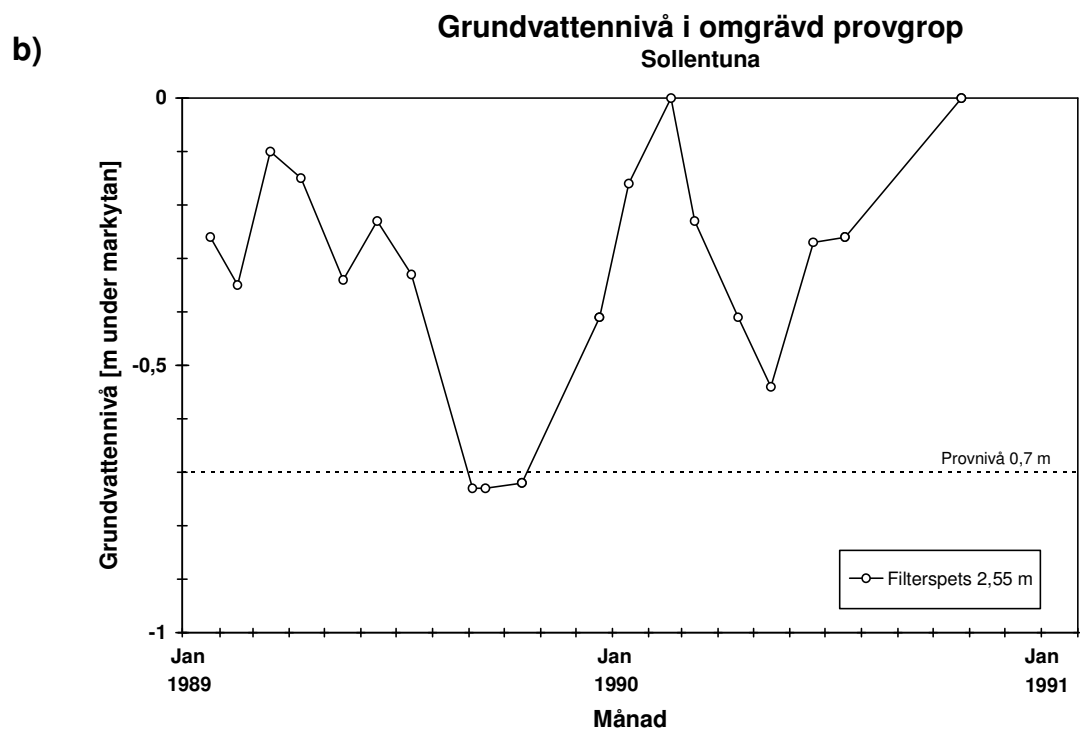
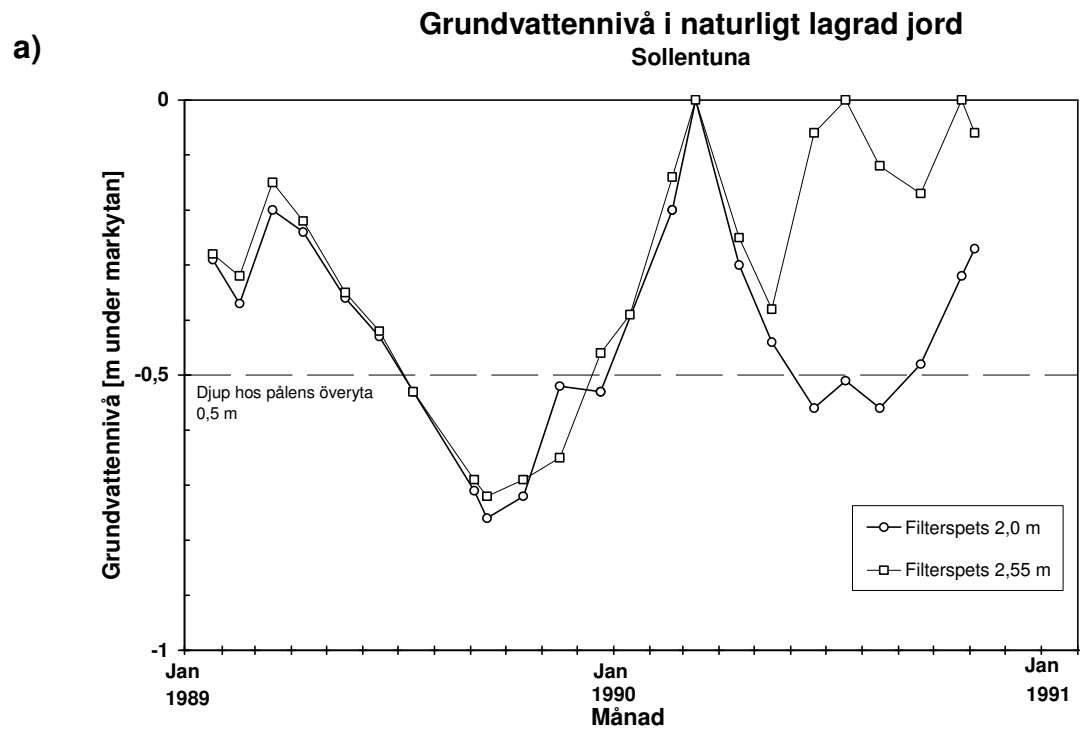
- Enköping
- Vallentuna
- Svartsjö på Färingsö
- Stockholm (Observatorielunden)
- Bromma flygplats
- Arlanda flygplats
- Uppsala flygplats
- Uppsala.



**Figur C.1** Grundvattennivå på provningsplats Enköping (Ryda), uppmätt en gång i månaden, under tiden januari 1989 – januari 1991.

a) Grundvattennivå i naturligt lagrad jord som inte varit uppgrävd.

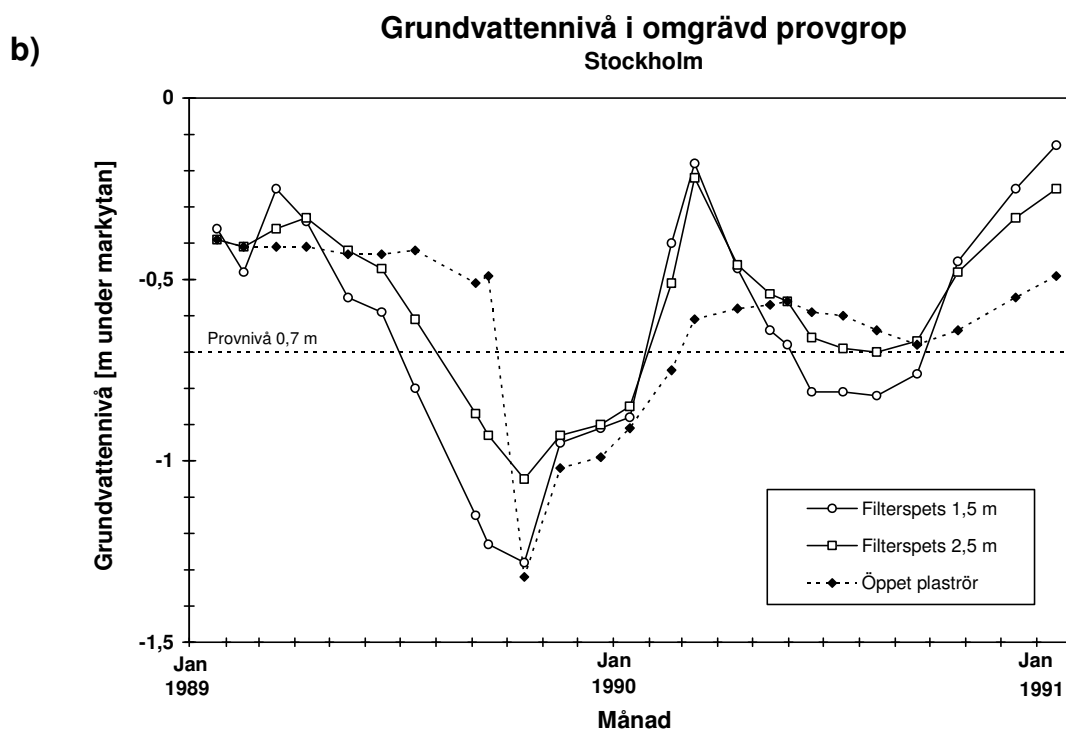
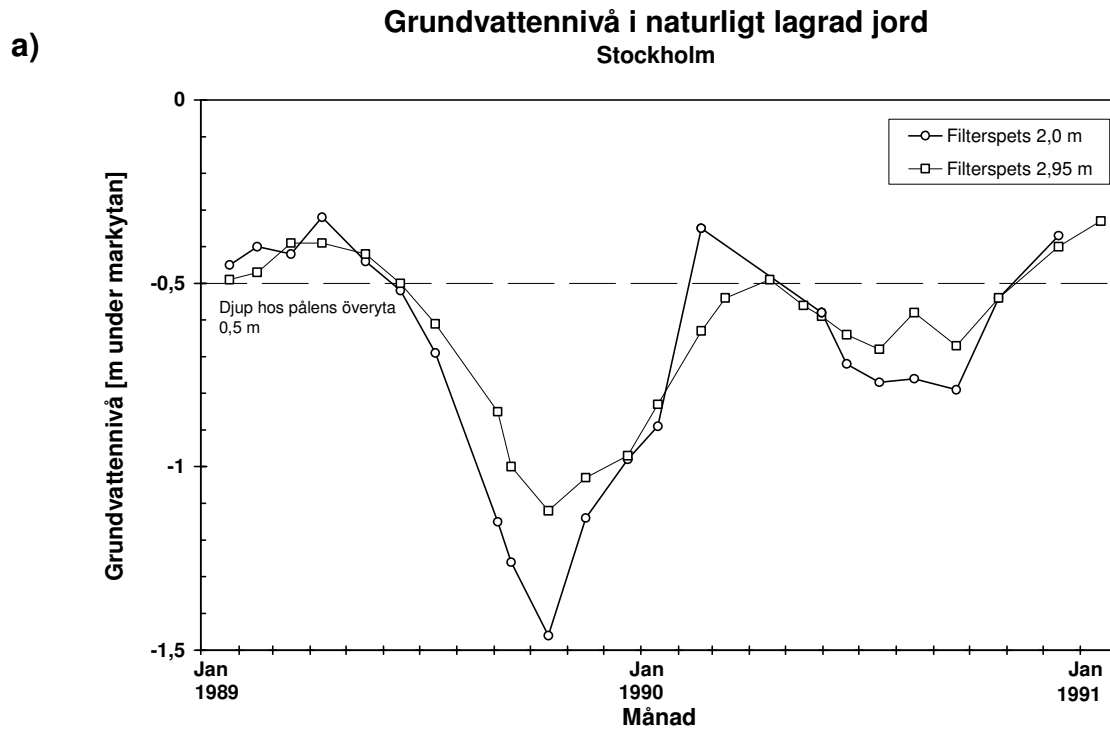
b) Grundvattennivå i omgrävd provgrop.



**Figur C.2** Grundvattennivå på provningsplats Sollentuna (Rotsunda) uppmätt, en gång i månaden, under tiden januari 1989 – januari 1991.

a) Grundvattennivå i naturligt lagrad jord som inte varit uppgrävd.

b) Grundvattennivå i omgrävd provgrop.

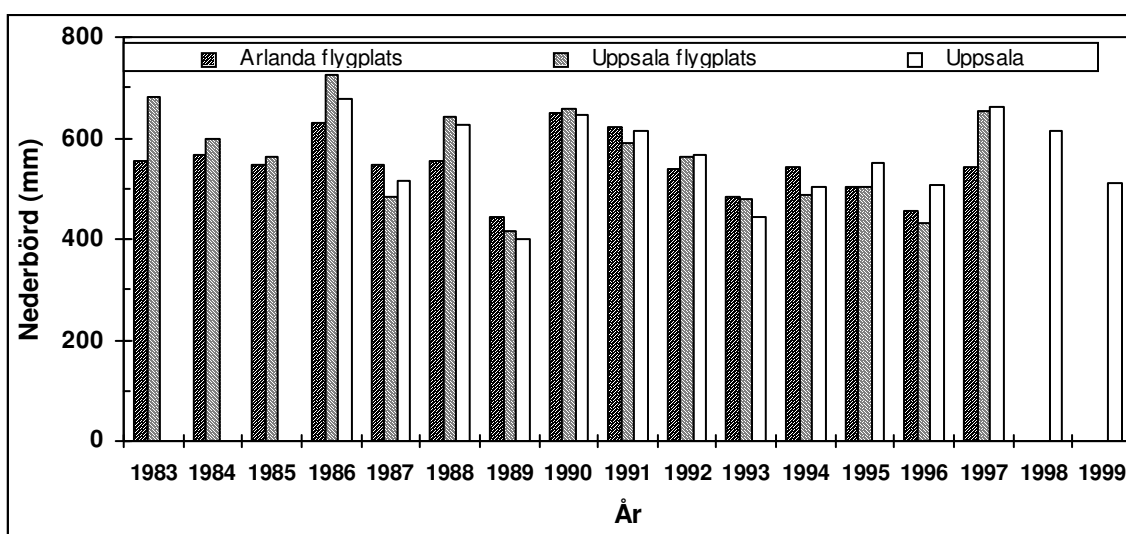
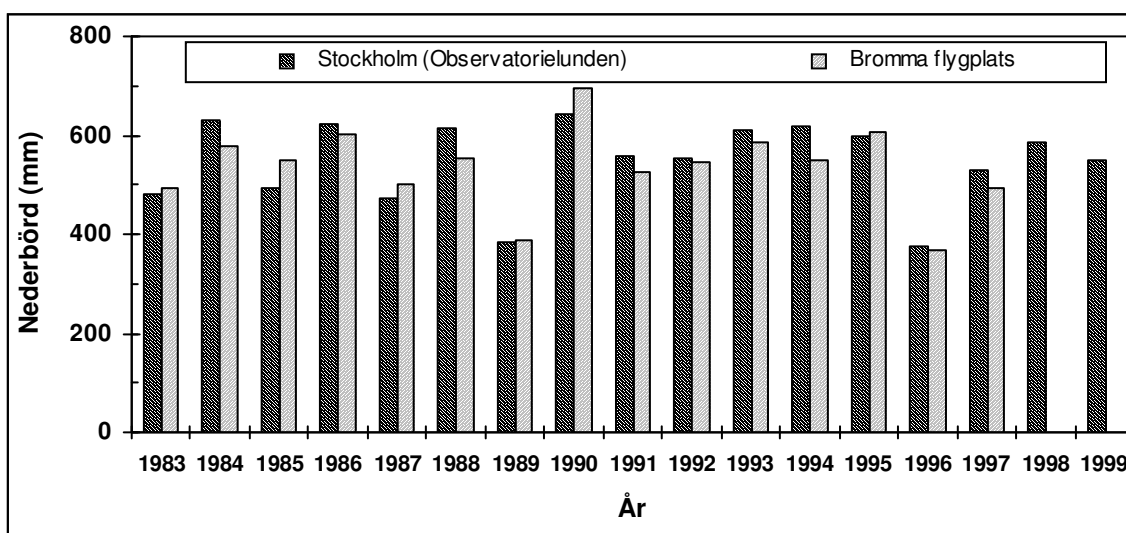
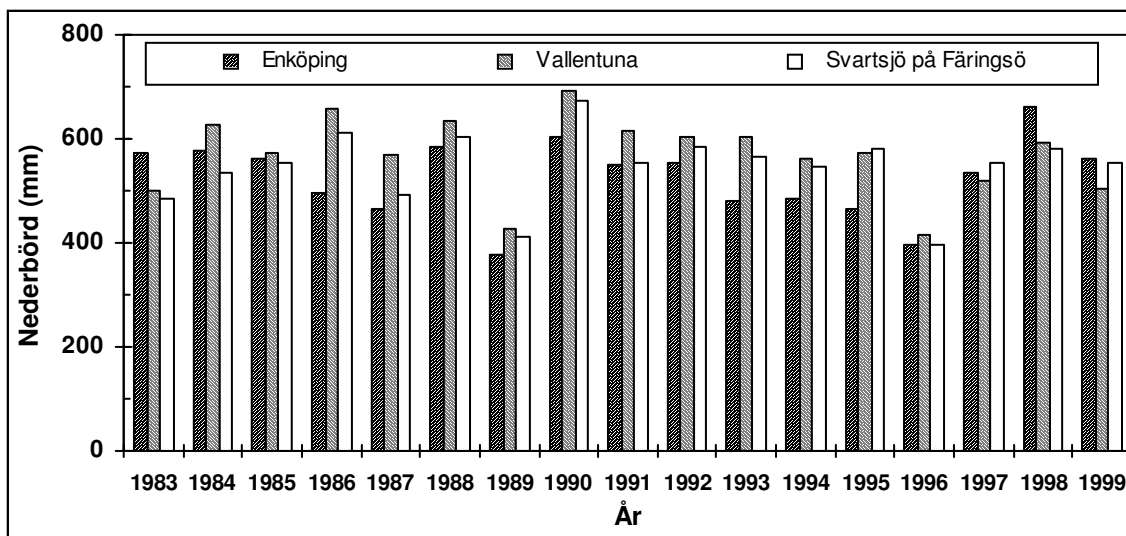


**Figur C.3** Grundvattennivå på provningsplats Stockholm (Skå) uppmätt, en gång i månaden, under tiden januari 1989 – januari 1991.

a) Grundvattennivå i naturligt lagrad jord som inte varit uppgrävd.

b) Grundvattennivå i omgrävd provgrop.





**Figur C.4** Okorrigerad årsnederbörd under perioden 1983 – 1999 för åtta nederbördsstationer inom SMHIs nät.

Vid provningsplatsen Sollentuna ligger grundvattenytan i naturligt lagrad jord på djupet 0,5 m eller ännu närmare markytan under en stor del av året. Vid provningsplatserna Enköping och Stockholm ligger grundvattenytan på djupet 0,5 m eller närmare markytan endast under en kortare tid av året.

Vid provningsplatserna Enköping, Sollentuna och Stockholm ligger grundvattenytan på djupet 0,7 m eller ännu närmare markytan under drygt halva året i omgrävd jord. Den övre provnivån för nedgrävda plattstänger och provplåtar ligger ungefär på 0,7 m under markytan. I Sollentuna ligger grundvattenytan över den övre provnivån (0,7 m) under nästan hela året.

Jorden på samtliga provningsplatser med jordarten lera eller gyttjig lera är på den nedre provnivån (cirka 1,7 m under markytan) alltid vattenmättad. På den övre provnivån är jorden på dessa provningsplatser också vattenmättad under en stor del av året på grund av att grundvattenytan står så nära markytan och genom vattentransport genom kapillär stigning. Detta innebär att skillnaden i vattenmättnadsgrad är tämligen liten under året mellan den övre och nedre provnivån.

Vid provningsplatsen Linköping finns grundvattenytan på cirka 9 m djup. Exponeringen i sand sker således i den omättade zonen medan exponeringen i grusig sand på botten av den nedlagda grustäkten sker i den vattenmättade zonen.

## **Bilaga D:**

### **Bedömningsschema enligt tysk standard DIN 50 929, Del 3**

#### **Korrosionswahrscheinlichkeit metallischer Werkstoffe bei äußerer Korrosionsbelastung**

Rohrleitungen und Bauteile in Böden und Wässern

Sannolikhet för korrosionsskador på metalliska material vid utvändig korrosionspåverkan

Rörledningar och lastbärande konstruktioner i jord och vatten

# Bedömningstabeller från DIN 50 929, Del 3

## Tabeller

- Tabell D.1** *Bedömningsschema för korrosionsundersökning av jord. Del A – undersökning av jordprov.*
- Tabell D.2** *Bedömningsschema för korrosionsundersökning av jord. Del B – undersökning av förhållandena på plats.*
- Tabell D.3** *Beräkning av summor av bedömningstal vid olika korrosionsorsaker för olegerat stål, låglegerat stål och gjutjärn respektive zinksiktet på varmförzinkat kolstål i jord.*
- Tabell D.4** *Jordklass, jordkorrosivitet och korrosionssannolikhet för olegerat stål, låglegerat stål och gjutjärn i jord.*
- Tabell D.5** *Bedömning av den anodiska och katodiska funktionen hos olegerat stål, låglegerat stål och gjutjärn vid korrosion orsakad av stora luftningsceller i jord.*
- Tabell D.6** *Korrosionssannolikhet för korrosionsangrepp till följd av bimetallkorrosion (galvanisk korrosion) på olegerat stål, låglegerat stål och gjutjärn i jord.*
- Tabell D.7** *Riktvärden vid uppskattning av väntad korrosionshastighet för olegerat stål, låglegerat stål och gjutjärn i jord.*
- Tabell D.8** *Bedömning av stabiliteten hos skyddande korrosionsprodukter på zinkytan på varmförzinkat kolstål i jord.*

**Tabell D.1** Bedömningsschema för korrosionsundersökning av jord. Del A – undersökning av jordprov.

Nr	Faktor	Enhet	Uppmätt värde	Bedömningstal
1	<b>Jordart</b>			<b>Z<sub>1</sub></b>
	a) Andel avslammingsbara beståndsdelar: ler- och siltfraktionerna med kornstorlek mindre än 0,06 mm	mass-%	≤10 >10 – 30 >30 – 50 >50 – 80 >80	+4 -2 0 -2 -4
	b) Torv-, gyttje-, myr- och marskjordar Halt organiskt kol	mass-%	>5	-12
	c) Starkt förorenad jord Förorenat av kolaska, koks, kolbitar, slagg, sopar, byggavfall eller avloppsvatten			-12
2	<b>Jordresistivitet</b>	Ωcm	>50000	<b>Z<sub>2</sub></b>
			>20000 – 50000	+4
			> 5000 – 20000	+2
			> 2000 – 5000	0
			1000 – 2000	-2
< 1000	-4 -6			
3	<b>Vattenkvot</b>	mass-% av torr jord	≤20	<b>Z<sub>3</sub></b>
			>20	0 -1
4	<b>pH-värde</b>		>9	<b>Z<sub>4</sub></b>
			<5,5 – 9	+2
			4 – 5,5	0
			<4	-1 -3
5	<b>Buffertkapacitet</b>			<b>Z<sub>5</sub></b>
	Syracapacitet till pH 4,3 (Alkalitet K <sub>S4,3</sub> ). Analyseras när jordens pH-värde är ≥ 7,0.	mmol/kg	< 200 200 – 1000 >1000	0 +1 +3
	Baskapacitet till pH 7,0 (Aciditet K <sub>B7,0</sub> ). Analyseras när jordens pH-värde är < 7,0.	mmol/kg	< 2,5 2,5 – 5 > 5 – 10 >10 – 20 >20 – 30 >30	0 -2 -4 -6 -8 -10
				<b>Z<sub>6</sub></b>
				0 -3 -6
7	<b>Neutralsalter</b> (vattenextrakt) Beräknas från jordens kloridhalt c(Cl <sup>-</sup> ) och sulfathalt c(SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) enligt: c(Cl <sup>-</sup> ) + 2c(SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mmol/kg	< 3	<b>Z<sub>7</sub></b>
			3 – 10	0
			> 10 – 30	-1
			> 30 – 100	-2 -3
			>100	-4
8	<b>Sulfat</b> (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) (saltsyraextrakt)	mmol/kg	< 2	<b>Z<sub>8</sub></b>
			2 – 5	0
			> 5 – 10	-1
			>10	-2 -3

**Tabell D.2** Bedömningschema för korrosionsundersökning av jord. Del B – undersökning av förhållandena på plats.

Nr	Faktor	Enhet	Uppmätt värde	Bedömningstal
9	<b>Objektets läge i förhållande till grundvattnet</b>	Grundvatten förekommer inte Grundvatten förekommer Växlande grundvattennivå		<b>Z<sub>9</sub></b>
				0
				-1 -2
10	<b>Jordhomogenitet i horisontalled</b>	ΔZ <sub>2</sub>   < 2 2 ≤  ΔZ <sub>2</sub>   ≤ 3  ΔZ <sub>2</sub>   > 3		<b>Z<sub>10</sub></b>
	Jordresistivetsprofil: utvärdering av förändring av Z <sub>2</sub> (enligt Nr 2) mellan närliggande jordområden: ΔZ <sub>2</sub> . (Här sätts alla positiva Z <sub>2</sub> -värden till +1)			0
				-2 -4
11	<b>Jordhomogenitet i vertikalalled</b>	Homogen kringfyllning med sand eller med omgivande, naturliga jordarter  Inhomogen kringfyllning med främmande beståndsdelar (trä, rötter och dylikt eller bestående av starkt olikartad jord)		<b>Z<sub>11</sub></b>
	a) Jorden i objektets omedelbara omgivning			0
				-6
	b) Skiktad jord med olika Z <sub>2</sub> -värden Utvärdering av  ΔZ <sub>2</sub>   enligt Nr 10			2 ≤  ΔZ <sub>2</sub>   ≤ 3  ΔZ <sub>2</sub>   > 3
12	<b>Korrosionspotential</b> (för bestämning av inverkan av främmande katod) Är inte potentialmätning möjlig att utföra (t ex bedömning av planerad konstruktion) sätts Z <sub>12</sub> till -10 om jorden innehåller koks eller kolbitar.	V relativt Cu/CuSO <sub>4</sub> - referens- elektrod	- 0,5 -- 0,4 > - 0,4 -- 0,3 > - 0,3	<b>Z<sub>12</sub></b>
				-3
				-8 -10

**Tabell D.3** Beräkning av summor av bedömningstal vid olika korrosionsorsaker för olegerat stål, låglegerat stål och gjutjärn respektive zinksiktet på varmförzinkat kolstål i jord.

Material	Korrosionsorsak	Summa av bedömningstal	Beräkning av summan
Kolstål och gjutjärn	Fri korrosion	$B_0$	$B_0 = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_7 + Z_8 + Z_9$
Kolstål och gjutjärn	Fri korrosion + luftningscell	$B_1$	$B_1 = B_0 + Z_{10} + Z_{11}$
Kolstål och gjutjärn	Luftningscell	$B_A$	$B_A = Z_1 + Z_2 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_7 + Z_8$
Kolstål och gjutjärn	Luftningscell	$B_K$	$B_K = Z_1 - Z_2 + Z_4 + Z_5 + Z_6$
Kolstål och gjutjärn	Bimetallkorrosion	$B_E$	$B_E = B_A + Z_{12}$
Zinksiktet på varmförzinkat kolstål	Fri korrosion	$B_D$	$B_D = Z_2 + Z_4 + Z_5 + Z_6$

**Tabell D.4** Jordklass, jordkorrosivitet och korrosionssannolikhet för olegerat stål, låglegerat stål och gjutjärn i jord. Jordkorrosivitet avser fri korrosion (= ej läckströmmar och ej främmande katod) utan inverkan av stora luftningsceller med stort avstånd mellan anodiska och katodiska partier.

$B_0$ - respektive $B_1$ -summa	Jordklass	Jordkorrosivitet (baserad på $B_0$ -summan)	Korrosionssannolikhet (baserad på $B_1$ -summan)	
			Lokal korrosion	Jämn korrosion
$\geq 0$	I a	praktiskt icke korrosiv	mycket liten	mycket liten
- 1 – - 4	I b	svagt korrosiv	liten	mycket liten
- 5 – - 10	II	korrosiv	måttlig	liten
< - 10	III	starkt korrosiv	stor	måttlig

**Tabell D.5** *Bedömning av den anodiska och katodiska funktionen hos olegerat stål, låglegerat stål och gjutjärn vid korrosion orsakad av stora luftningsceller i jord.*

<b>B<sub>A</sub>- summa för anoden</b>	<b>B<sub>K</sub>- summa för katoden</b>	<b>Funktion som anod respektive katod i luftningscell</b>
≥ 0	< - 4	ingen funktion
- 1 -- 4	- 4 -- 1	svag
- 5 -- 8	0 – 4	stark
< - 8	> 4	mycket stark

**Tabell D.6** *Korrosionssannolikhet för korrosionsangrepp till följd av bimetallkorrosion (galvanisk korrosion) på olegerat stål, låglegerat stål och gjutjärn i jord.*

<b>B<sub>E</sub>- summa</b>	<b>Korrosionssannolikhet</b>	
	Lokal korrosion	Jämn korrosion
≥ 0	liten	mycket liten
- 1 -- 4	måttlig	mycket liten
- 4 -- 8	stor	måttlig
< - 8	mycket stor	förhöjd



**Tabell D.7** Riktvärden vid uppskattning av väntad korrosionshastighet för olegerat stål, låglegerat stål och gjutjärn i jord. Tabellen är baserad på erfarenhetsvärden. Angiven korrosionshastighet avser medelvärden och den kan variera med en faktor 2.

Summa av bedömningstal	Väntad korrosionshastighet		Anmärkning
	Jämn korrosion	Lokal korrosion	
	Hastighet efter 100 års exponering mm/år	Maximal hastighet efter 30 års exponering mm/år	
B <sub>0</sub> - respektive B <sub>1</sub> -summa			
≥ 0	0,005	0,03	avtagande med tiden
- 1 -- 4	0,01	0,05	avtagande med tiden
- 5 -- 10	0,02	0,2	avtagande med tiden
< - 10	0,06	0,4	konstant med tiden
B <sub>E</sub> -summa			
≥ 0	0,01	0,05	lokal korrosion (gropfrätning) uppträder i första hand
- 1 -- 4	0,02	0,1	
- 4 -- 8	0,05	0,3	
< - 8	0,2	1	

**Tabell D.8** Bedömning av stabiliteten hos skyddande korrosionsprodukter på zinkytan på varmförzinkat kolstål i jord.

B <sub>D</sub> - summa	Stabilitet hos täcksiktet på zinkytan
≥ 0	mycket god
- 1 -- 4	god
- 5 -- 8	tillfredställande
< - 8	inte tillräcklig

# Bedömning av korrosiviteten hos jorden på provningsplatserna

## Tabeller

- Tabell D.9** *Bedömningstal för jorden vid provningsplatserna.*
- Tabell D.10** *Summor av olika bedömningstal för jorden vid provningsplatserna.*
- Tabell D.11** *Jordklass, jordkorrosivitet och korrosionssannolikhet för olegerat stål, låglegerat stål och gjutjärn vid provningsplatserna i jord.*
- Tabell D.12** *Bedömning av stabiliteten hos skyddande korrosionsprodukter på zinkytan på varmförzinkat kolstål och jordkorrosivitet mot olegerat stål, låglegerat stål och gjutjärn på provningsplatserna i jord.*
- Tabell D.13** *Bedömning av hur olegerat stål, låglegerat stål och gjutjärn fungerar som anod respektive katod i luftningscell i jorden vid provningsplatserna.*
- Tabell D.14** *Riktvärden för väntad korrosionshastighet för olegerat stål, låglegerat stål och gjutjärn vid provningsplatserna i jord.*

**Tabell D.9** Bedömningstal för jorden vid provningsplatserna.

Provningsplats	Bedömningstal										
	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Z <sub>4</sub>	Z <sub>5</sub>	Z <sub>6</sub>	Z <sub>7</sub>	Z <sub>8</sub>	Z <sub>9</sub>	Z <sub>10</sub>	Z <sub>11</sub>
<b>Enköping</b> övre nivå nedre nivå	- 4 - 4	- 2 - 2	- 1 - 1	0 0	0 0	- 3 - 3	0 0	0 0	- 2 - 1	0 0	0 0
<b>Sollentuna</b> övre nivå nedre nivå	- 4 - 4	- 2 - 4	- 1 - 1	- 1 0	- 10 - 10	- 3 - 6	- 2 - 3	- 2 - 3	- 2 - 1	0 0	0 0
<b>Göteborg</b> övre nivå nedre nivå	- 4 - 4	- 4 - 6	- 1 - 1	- 1 0	- 10 - 10	- 3 - 6	- 3 - 3	- 3 - 3	- 2 - 1	0 0	0 0
<b>Stockholm</b> övre nivå nedre nivå	- 2 - 2	0 - 4	- 1 - 1	- 1 - 1	- 10 - 10	- 3 - 6	- 2 - 3	- 2 - 3	- 2 - 1	0 0	0 0
<b>Linköping</b> sand vattenmättad grusig sand	+ 4 + 4	+ 4 0	0 0	0 0	- 2 0	0 0	0 0	0 0	0 - 1	0 0	0 0

**Tabell D.10** Summor av olika bedömningstal för jorden vid provningsplatserna.

Provningsplats	Summa av bedömningstal				
	B <sub>0</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>A</sub>	B <sub>K</sub>	B <sub>D</sub>
<b>Enköping</b> övre nivå nedre nivå	- 12 - 11	- 12 - 11	- 9 - 9	- 5 - 5	- 5 - 5
<b>Sollentuna</b> övre nivå nedre nivå	- 27 - 32	- 27 - 32	- 4 - 30	- 16 - 16	- 16 - 20
<b>Göteborg</b> övre nivå nedre nivå	- 31 - 34	- 31 - 34	- 28 - 32	- 14 - 14	- 18 - 22
<b>Stockholm</b> övre nivå nedre nivå	- 23 - 31	- 23 - 31	- 20 - 29	- 16 - 15	- 14 - 21
<b>Linköping</b> sand vattenmättad grusig sand	+ 6 + 3	+ 6 + 3	+ 6 + 4	- 2 + 4	+ 2 0

**Tabell D.11** Jordklass, jordkorrosivitet och korrosionssannolikhet för olegerat stål, låglegerat stål och gjutjärn vid provningsplatserna i jord.

Bedömningen av jordklass och jordkorrosivitet är baserad på B<sub>0</sub>-summan och korrosionssannolikheten på B<sub>1</sub>-summan. Jordkorrosivitet avser fri korrosion (= ej läckströmmar och ej främmande katod) utan inverkan av stora luftningsceller med stort avstånd mellan anodiska och katodiska partier. Korrosionssannolikheten för lokal och jämn korrosion avser inverkan av både fri korrosion och stora luftningsceller.

Provningsplats	Jordklass	Jordkorrosivitet	Korrosionssannolikhet	
			Lokal korrosion	Jämn korrosion
<b>Enköping</b> övre nivå nedre nivå	III III	starkt korrosiv starkt korrosiv	stor stor	måttlig måttlig
<b>Sollentuna</b> övre nivå nedre nivå	III III	starkt korrosiv starkt korrosiv	stor stor	måttlig måttlig
<b>Göteborg</b> övre nivå nedre nivå	III III	starkt korrosiv starkt korrosiv	stor stor	måttlig måttlig
<b>Stockholm</b> övre nivå nedre nivå	III III	starkt korrosiv starkt korrosiv	stor stor	måttlig måttlig
<b>Linköping</b> sand vattenmättad grusig sand	la la	praktiskt icke korrosiv praktiskt icke korrosiv	mycket liten mycket liten	mycket liten mycket liten

**Tabell D.12** *Bedömning av stabiliteten hos skyddande korrosionsprodukter på zinkytan på varm-förzinkat kolstål och jordkorrosivitet mot olegerat stål, låglegerat stål och gjutjärn på provningsplatserna i jord.*

Bedömning av stabiliteten hos täcksiktet på zinkytan är baserad på B<sub>D</sub>-summan och jordkorrosiviteten på B<sub>0</sub>-summan.

<b>Provningsplats</b>	<b>Stabilitet hos täcksiktet på zinkytan</b>	<b>Jordkorrosivitet</b>
<b>Enköping</b> övre nivå nedre nivå	tillfredställande tillfredställande	starkt korrosiv starkt korrosiv
<b>Sollentuna</b> övre nivå nedre nivå	inte tillräcklig inte tillräcklig	starkt korrosiv starkt korrosiv
<b>Göteborg</b> övre nivå nedre nivå	inte tillräcklig inte tillräcklig	starkt korrosiv starkt korrosiv
<b>Stockholm</b> övre nivå nedre nivå	inte tillräcklig inte tillräcklig	starkt korrosiv starkt korrosiv
<b>Linköping</b> sand vattenmättad grusig sand	mycket god mycket god	praktiskt icke korrosiv praktiskt icke korrosiv

**Tabell D.13** *Bedömning av hur olegerat stål, låglegerat stål och gjutjärn fungerar som anod respektive katod i luftningscell i jorden vid provningsplatserna.*

Den anodiska funktionen är baserad på  $B_A$ -summan och den katodiska funktionen på  $B_K$ -summan. Bedömningen avser funktionen i stora luftningsceller.

Provningsplats	Funktion som anod i luftningscell	Funktion som katod i luftningscell
<b>Enköping</b> övre nivå nedre nivå	mycket stark mycket stark	ingen funktion ingen funktion
<b>Sollentuna</b> övre nivå nedre nivå	mycket stark mycket stark	ingen funktion ingen funktion
<b>Göteborg</b> övre nivå nedre nivå	mycket stark mycket stark	ingen funktion ingen funktion
<b>Stockholm</b> övre nivå nedre nivå	mycket stark mycket stark	ingen funktion ingen funktion
<b>Linköping</b> sand vattenmättad grusig sand	ingen funktion ingen funktion	svag stark

**Tabell D.14** Riktvärden för väntad korrosionshastighet för olegerat stål, låglegerat stål och gjutjärn vid provningsplatserna i jord. Tabellen är baserad på B<sub>0</sub>-summan.

Provningsplats	Väntad korrosionshastighet		Anmärkning
	Jämn korrosion	Lokal korrosion	
	Hastighet efter 100 års exponering mm/år	Maximal hastighet efter 30 års exponering mm/år	
<b>Enköping</b> övre nivå nedre nivå	0,06 0,06	0,4 0,4	konstant med tiden konstant med tiden
<b>Sollentuna</b> övre nivå nedre nivå	0,06 0,06	0,4 0,4	konstant med tiden konstant med tiden
<b>Göteborg</b> övre nivå nedre nivå	0,06 0,06	0,4 0,4	konstant med tiden konstant med tiden
<b>Stockholm</b> övre nivå nedre nivå	0,06 0,06	0,4 0,4	konstant med tiden konstant med tiden
<b>Linköping</b> sand vattenmättad grusig sand	0,005 0,005	0,03 0,03	avtagande med tiden avtagande med tiden