

# **Korrosionsförhållanden i en urban jordlagerföljd**

## **- Fältförsök in situ med luftningsceller**

*Corrosion in an urban soil profile - Aeration cell experiment in situ in the soil*

Erik Levlin<sup>1)</sup> och Tor-Gunnar Vinka<sup>2)</sup>

1) Vattenvårdsteknik, Kgl. Tekniska Högskolan, 1100 44 STOCKHOLM

2) Korrosionsinstitutet

## Förord

---

I detta arbete studerades luftningscellskorrosion *in situ* i jord, som en del i ett större projekt som omfattade såväl korrosionsstudier som hydrogeologiska och geokemiska undersökningar i en urban jordlagerföljd. Projektet har startats på initiativ av Byggforskningsrådets programgrupp för försurning och korrosion, och utfördes i samarbete med Institutionen för Geologi vid Chalmers Tekniska Högskola.

Försurning orsakad av luftföroreningar kan på goda grunder misstänkas ge ökad korrosion på vattenledningsrör och andra konstruktioner i mark. Då korrosion orsakad av luftningsceller är ett vanligt korrosionsfenomen, medför försurningen en allvarlig korrosionsskaderisk, om den medför att detta korrosionsfenomen stimuleras.

Korrosionen hos en luftningscell i jord och dess beroende av försurning har i ett tidigare projekt studerats genom laborieförsök som resulterat i en doktorsavhandling (1) framlagd i januari 1993.

Stort tack framförs till Byggforskningsrådet som finansierat projektet, Göteborgs kommun som bistått med grävmaskin och till Malin Årebäck och hennes efterträdare Malin Norin vid Institutionen för Geologi vid CTH som utfört mycket av det praktiska arbetet på testplatsen.

Erik Levlin och Tor-Gunnar Vinka

# Innehållsförteckning

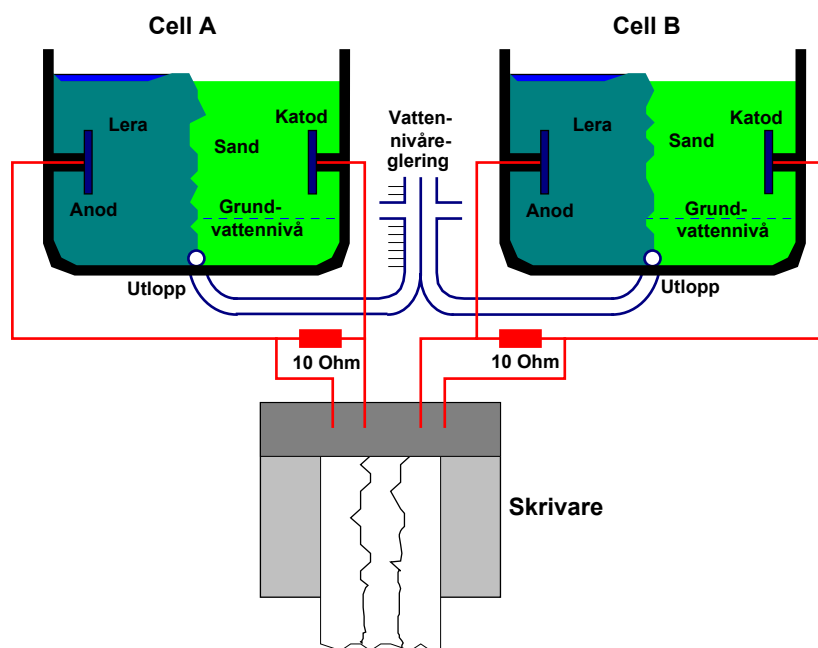
---

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. BAKGRUND</b> .....                       | <b>1</b>  |
| <b>2. UTFÖRANDE</b> .....                      | <b>2</b>  |
| 2.1 Försöksutformning.....                     | 2         |
| 2.2 Mätvärdesinsamling.....                    | 4         |
| 2.2.1 Strömmätning.....                        | 4         |
| 2.2.2 Potentialmätning.....                    | 5         |
| 2.2.3 Resistansmätning.....                    | 7         |
| 2.3 Provupptagning.....                        | 10        |
| 2.3.2 Grop 1: 1,085 år.....                    | 10        |
| 2.3.2 Grop 2: 2,685 år.....                    | 12        |
| <b>3. DISKUSSION</b> .....                     | <b>14</b> |
| 3.1 Utvärdering av mätdata.....                | 14        |
| 3.2 Formel för areaförhållandets inverkan..... | 15        |
| 3.3 Inverkan av korrosionsbeläggningar.....    | 17        |
| 3.4 Jämförelse med laboratorieförsöken.....    | 18        |
| <b>4. REFERENSER</b> .....                     | <b>19</b> |

# 1. Bakgrund

Korrosion orsakad av luftningsceller, till följd av syrekonzentrationskillnader i marken, är ett vanligt korrosionsfenomen hos vattenledningsrör i mark. Luftningsceller uppkommer där en metallisk konstruktion ligger i inhomogen jord med varierande syregenomsläpplighet. Den del av ett rör som ligger i jord med god syregenomsläpplighet, t.ex. luftad sand får en hög syrekonzentration och blir katod, och den del som ligger i jord med låg gasgenomsläpplighet, t.ex. vattenmättad lera, får en låg syrekonzentration, blir anod och korroderar.

Korrosionen hos en luftningscell i jord har tidigare studerats genom laborieförsök (1, 2). Därvid användes försöksceller där halva cellen fylldes med lera och den andra halvan med sand (se figur 1). Två segjärnprover fanns i cellen, en i leran och en i sanden, vilka förenades genom en yttre ledning där korrosionsströmmen mättes som potentialfallet över ett 10  $\Omega$  motstånd. Största inverkan av luftningscellen erhöles när vattennivån ställdes in så att katoden låg i luftad sand och anoden i vattenmättad lera. Avsikten med dessa försök var att studera inverkan av försurad nederbörd på korrosion i jord. Därför användes att parallella försöksceller, där den ena sprejades med försurat och den andra med icke försurat vatten.



Figur 1. Laborieförsök för studium av luftningscellskorrosion i jord (1, 2).

I detta projekt utförs försöket *in situ* nere i jorden. Försökscellen som användes vid laborieförsöken har omkonstruerats till celler avsedda för fältförsök, vilket ger ett referensobjekt till laborieförsöken. Det är svårt att hitta två försöksplatser som har olika grad av försurning, men som i övrigt är lika, varför försurningens inverkan ej kan studeras genom parallella fältförsök. Fältförsöken visar dock om den luftningscellskorrosion som studerades i laborieförsöken även sker i mark, och om de slutsatser som kan dras av laborieförsöken är relevanta utanför laboratoriet.

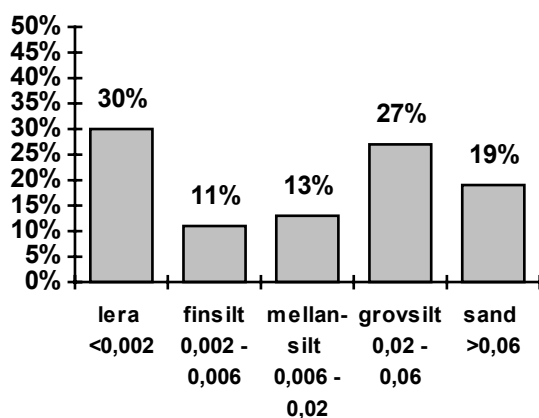
## 2. Utförande

### 2.1 Försöksutformning

Försöksplatsen ligger i Göteborg vid Chalmers Tekniska Högskola mellan Mossens idrottsplats och Sven Hultins gata, där försökscellerna är nedgrävda på 1,1 m djup. En försökscell består av två elektroder av stålplåt, förbundna med varandra genom kablar. En luftningscell erhålls genom att den ena elektroden är inbäddad i en klump lera medan den andra elektroden ligger i den omgivande jorden. Om jorden ej är vattenmättad kan syre diffundera genom jorden till elektroden i den omgivande jorden, som därmed blir katod och elektroden i leran blir anod. De frågeställningar som har studerats är:

1. Korrosionseffekten av luftningscellen genom mätning av korrosionsströmmen mellan plåtar i lera och i omgivande jord, samt korrosionspotential för plåtar kopplade som luftningsceller och okopplade plåtar i lera och fyllning.
2. Elektrodernas egenkorrosion genom mätning av massförlust för plåtarna och med plåtar i två gropar som togs upp efter 1,085 år och 2,685 år.
3. Inverkan av areaförhållandet mellan anod och katod genom att luftningsceller med olika stora plåtar används. Alla anoderna har måttet 100 x 100 mm. Hälften av katoderna är små och har måttet 100 x 100 mm, medan hälften är stora och har måttet 1000 x 100 mm. Hälften av försökscellerna har därmed areaförhållandet 1:1 och hälften har areaförhållandet 1:10.

Lerklumpen som luftningscellernas anoder är inbäddade i består av naturlig Göteborgslera och har måtten 90 x 90 cm och ett djup på ca 30 cm. Figur 2 visar leran uppdelad efter kornstorlek i fraktionerna lera, silt och sand. Siltandel är på 51%, varför leran kan klassificeras som siltig lera. Tabell 1 visar analyser av lerans pH-värde, vattenhalt, vattenkvot, glödningsförlust vid 900°C, sulfathalt och kloridhalt, gjorda på dubbla prover.



Figur 2. Leran uppdelad i fraktioner efter kornstorlek i mm.

Tabell 1. Analys av lera.

|                             | naturfuktat |      | lufttorrt |      |
|-----------------------------|-------------|------|-----------|------|
| pH(H <sub>2</sub> O)        | 8,12        | 8,08 | 7,95      | 7,97 |
| pH(KCl)                     | 7,77        | 7,90 | 7,68      | 7,47 |
| pH(CaCl <sub>2</sub> )      | 7,68        | 7,71 | 7,74      | 7,74 |
|                             | 30°C        |      | 105°C     |      |
| Vattenhalt, %               | 30,3        | 29,9 | 30,5      | 30,2 |
| Vattenkvot, %               | 43,4        | 42,7 | 44        | 43,2 |
| Glödningsförlust (900°C), % | 3,1         |      | 4         |      |
| Sulfathalt i mg/g torr lera | 0,18        |      | 0,19      |      |
| Kloridhalt i mg/g torr lera | 0,23        |      | 0,14      |      |

Gropen med försökscellerna är återfylld med uppgrävd jord, som katoderna ligger i. Katoderna ligger på 20 cm avstånd från lerklumpen och 50 cm avstånd från anoderna. Grundvattennivån ligger konstant mer än 2 meter under markytan (3), vilket gör att fyllningen runt katoderna som ligger på 1,1 m djup ej är vattenmättad. På detta djup består jorden av kärrtorv. Jorden kan till viss del blivit omblandad vid återfyllnaden. Analys av jorden är redovisas i tabell 2 (4, 5). Elektrodena som är av 2 mm kallvalsat stål, SS 13 16-32, har sammansättningen i massprocent; 0,063 Al, 0,044 C, 0,006 Cr, 0,022 Cu, 0,222 Mn, 0,003 Mo, 0,004 N, 0,015 Ni, 0,007 P, 0,007 S, 0,013 Si, 0,002 Ti och 0,008 V.

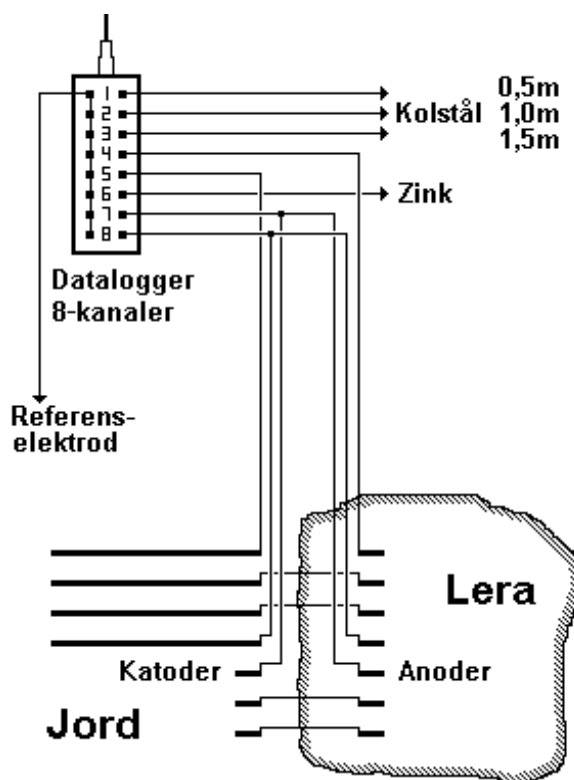
Tabell 2. Analys av fyllningsjord (Årebäck och Vinka 4, 5).

|   |     |
|---|-----|
| pH(H <sub>2</sub> O)                          | 7,5 |
| Vattenhalt, mass-% av fuktig jord             | 26  |
| Vattenkvot M%T*                               | 34  |
| Sulfathalt i mg/g torr jord                   | 60  |
| Kloridhalt i mg/g torr jord                   | 19  |
| Glödgningsförlust (950°C) M%T*                | 12  |
| Organisk halt M%T*,<br>från glödgningsförlust | 8,8 |
| Oorganisk kolhalt M%T*                        | 0,2 |
| Karbonathalt M%T*,<br>från oorganisk kolhalt  | 2,0 |
| Total kolhalt M%T*                            | 4,8 |
| Organisk halt M%T* från kolanalys             | 7,9 |

\* mass-% av torr jord

Totalt används 10 försöksceller i två gropar. I grop 1 som grävdes upp efter 1,085 år finns två försöksceller med areaförhållandet 1:1 och två med areaförhållandet 1:10. Figur 3 visar en skiss över försökscellerna i grop 2, som grävdes upp efter 2,685 år. Förutom de fyra försöksceller som är avsedda för att bestämma massförlust och som även finns i grop 1, finns ytterligare två försöksceller som är kopplade till en datalogger i ett mätskåp ovan jord. Den ena av dessa har areaförhållandet 1:1 och den andra areaförhållandet 1:10. Dataloggern har 8 kanaler för potentialmätning, varvid plåtarnas korrosionspotential mäts gentemot en nedgrävd referenselektrod. För att mäta korrosionspotentialen för plåtar som inte ingår i någon luftningscell finns en stor och en liten plåt i fyllning och en liten plåt i lera som enbart är kopplade till loggern.

I groparna finns även provplåtar och mätsonder för Korrosionsinstitutets delprojekt (4, 5) vilka är nedgrävda på tre nivåer 1,5 m, 1 m och 0,5 m. Dataloggern används även till att mäta potentialen för plåtar som ingår i Korrosionsinstitutets delprojekt. Tre kanaler är kopplade till stålplåtar på 0,5, 1 och 1,5 meters djup och en till en zinkplåt på 1 meters djup.



Figur 3. Skiss över försökscellerna i grop 2 med uppkopplingen till loggern

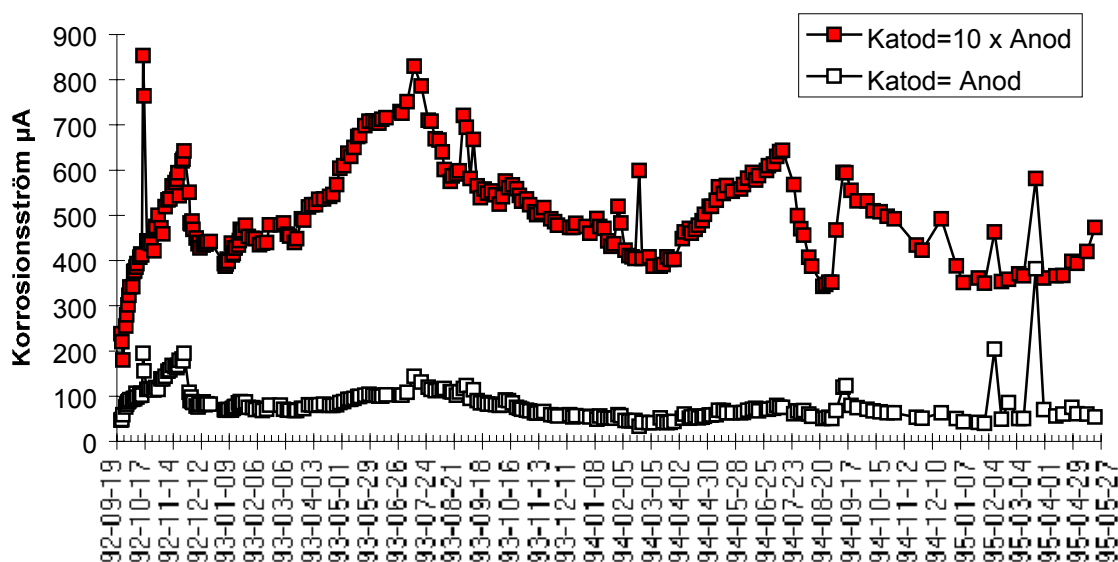
Projektet genomfördes enligt följande plan:

1. Konstruktion av försöksceller och val av försöksplats.
2. Utplacering av försökscellerna den 16 till 17 september 1992.
3. Insamling av mätdata genom *in situ* mätning av korrosionsström och potential. Resultaten har publicerats i Corrosion Science (6).
4. Upptagning av prover i två omgångar, dels 18/10 1993 (1,085 år) och dels 24/5 1995 (2,685 år). Vid försökets början och vid provupptagningen mättes plåtarnas jordtags-resistans,  $R_{jord}$ .
5. Mätning av massförlust och gropfrätningshastighet på upptagna plåtar.

## 2.2 Mätvärdesinsamling

### 2.2.1 Strömmätning

Korrosionsströmmen hos de båda försökscellerna har uppmätts manuellt. Figur 4 visar korrosionsströmmen fram till 21 maj 1995, vilket motsvarar en tidsperiod på 977 dagar eller 2,685 år. Tabell 3 visar statistik över 240 mätvärden upptagna under mätperioden. I luftningscellen med stor katod har strömmängden 42.161 As passerat mellan elektroderna och i cellen med liten katod 6.683 As. Om korrosionen av anoden antages ske som tvåvärt järn och densitet är  $7,86 \text{ g/mm}^3$ , motsvarar detta en korroderad volym på  $1552 \text{ mm}^3$  ( $77,6 \text{ }\mu\text{m}$ ) på anoden med stor katod respektive  $246 \text{ mm}^3$  ( $12,3 \text{ }\mu\text{m}$ ) på anoden med liten katod. Det blir omräknat till korrosionshastighet  $29,0 \text{ }\mu\text{m/år}$  respektive  $4,60 \text{ }\mu\text{m/år}$ .



Figur 4. Diagram över korrosionsström mot tid för luftningscellerna (6).

Tabell 3. Statistik över uppmätta värden för korrosionsströmmen i figur 4.

|                   | Katod = Anod        | Katod = 10 * Anod    |
|-------------------|---------------------|----------------------|
| Medelvärde        | 83,26 $\mu\text{A}$ | 500,45 $\mu\text{A}$ |
| Standardavvikelse | 36,90 $\mu\text{A}$ | 110,11 $\mu\text{A}$ |
| Maximivärde       | 382 $\mu\text{A}$   | 853 $\mu\text{A}$    |
| Övre kvartil      | 95 $\mu\text{A}$    | 566 $\mu\text{A}$    |
| Medianvärde       | 75 $\mu\text{A}$    | 483 $\mu\text{A}$    |
| Nedre kvartil     | 60 $\mu\text{A}$    | 428 $\mu\text{A}$    |
| Minimivärde       | 33 $\mu\text{A}$    | 180 $\mu\text{A}$    |

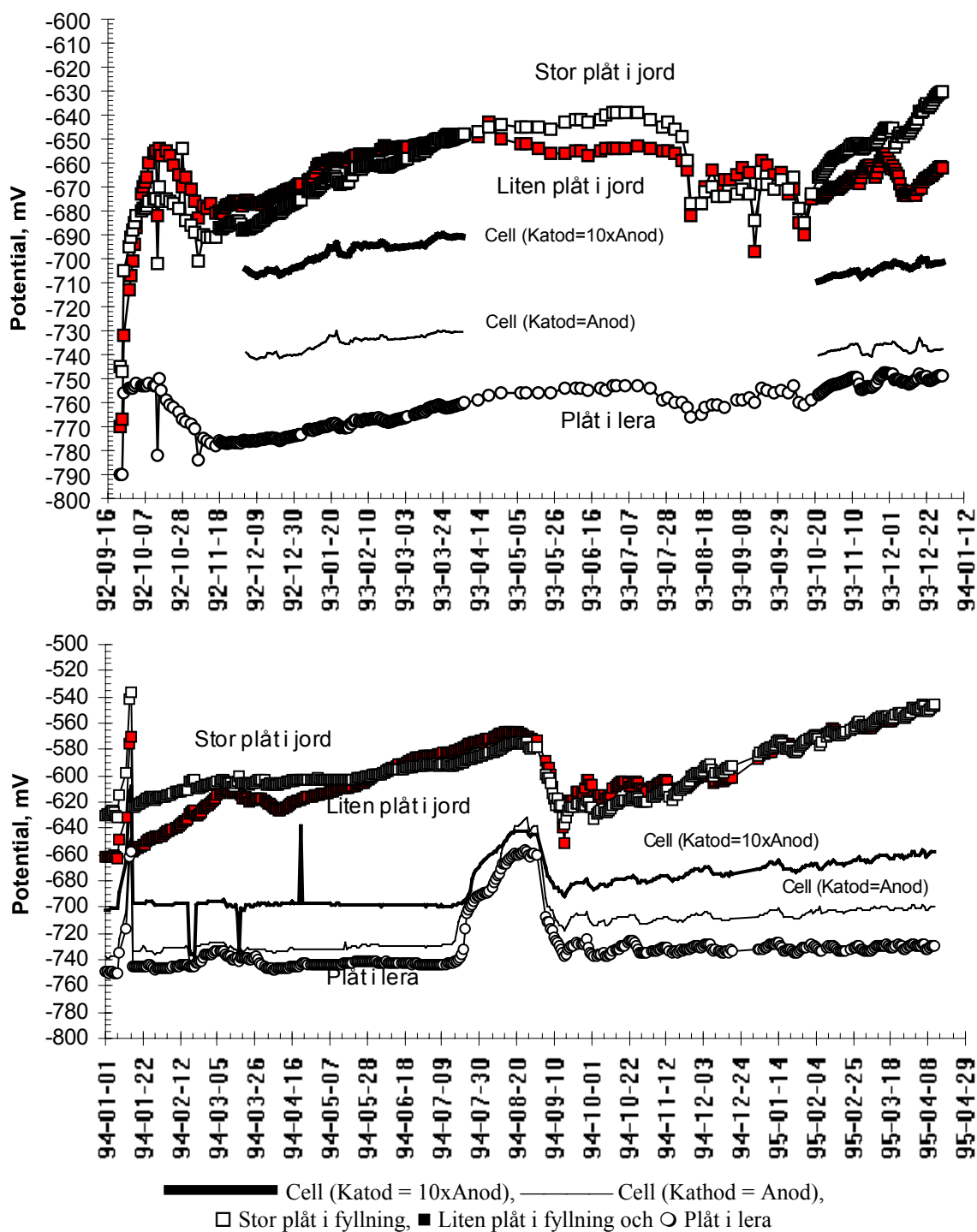
### 2.2.2 Potentialmätning

Figur 5 visar ett diagram med korrosionspotentialen mot tid för de båda luftningscellerna. I diagrammet finns även korrosionspotentialen för en stor plåt i fyllning, en liten plåt i fyllning, samt en plåt i lera, som är förbundna med dataloggern utan att vara kopplade till varandra.

Genom att jämföra korrosionspotentialen hos luftningscellerna, med potentialen hos okopplade elektroder som inte ingår i en luftningscell kan elektrodernas egenkorrosionen studeras och syrediffusionen till elektroderna bedömas. Korrosionspotentialen för luftningscellen med liten katod varierade från -30 till -742 mV och för cellen med stor katod från -690 till -710 mV. Korrosionspotentialen för plåten i lera varierade från -750 mV till -777 mV och för plåtarna i fyllning från -630 mV till -700 mV. Korrosionspotentialerna för en luftningscell är en blandpotential, som ligger mellan korrosionspotentialerna för plåten i lera och plåten i jord. Potentialskillnaden mellan plåtar i fyllning och lera är ca 100 mV. För luftningscellen med stor katod låg potentialen 35 mV högre än för den med liten katod. Att den ligger högre beror på att med en större katodarea blir katoden, som har en högre korrosionspotential, mer dominerande för bestämning av blandpotentialen.

Tabell 4 visar korrosions-, bryt- och blandpotential för mätcellerna 23/5 1995, när försöket avslutades. Korrosionspotential är potentialen för luftningscellernas katodplåtar i fyllning och anodplåtar lera när förbindelsen mellan plåtarna är bruten. Brytpotentialen är medelvärdet av fyra mätningar av plåtarnas potential strax efter det att förbindelsen mellan plåtarna har brutits. Den elektrokemiska polarisationen finns kvar men spänningsfallet orsakad av strömmen och resistansen försvinner momentant när strömmen bryts. Tabellen visar även potentialdifferensen mellan katod- och anodplåtarnas korrosions- och brytpotential, samt blandpotentialen uppmätt när plåtarna är förbundna med varandra.



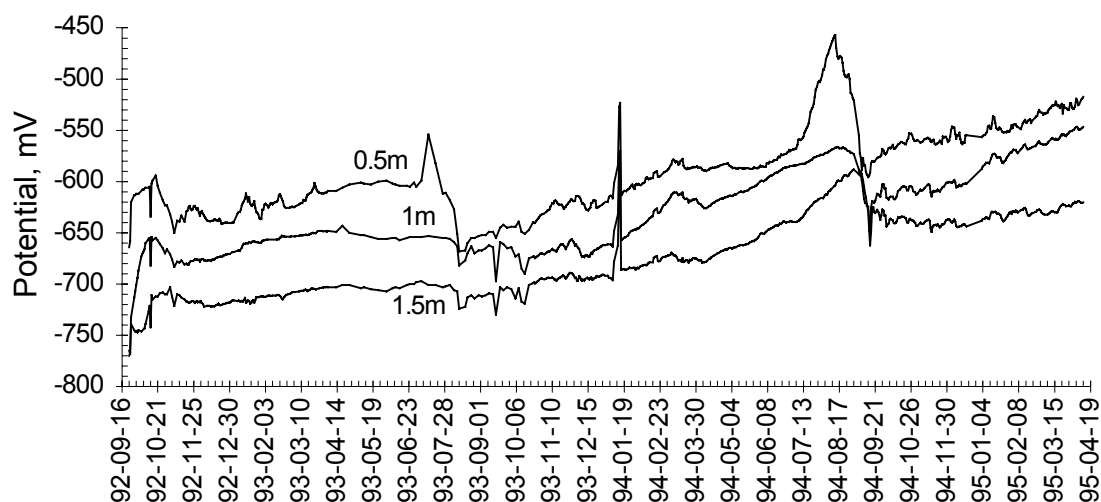


Figur 5. Diagram över korrosionspotentialen mot tid för luftningscellerna och referensplåtar i fyllning och lera (6).

Figur 6 visar ett diagram med potential mot tid för plåtar av kallvalsat stål nedgrävda på 0,5, 1 och 1,5 m djup. Diagrammet visar att korrosionspotentialen sjunker med ökande djup, vilket kan förklaras med att det blir längre väg för syrediffusionen från markytan. Korrosionspotentialen för okopplade plåtar ökar med tiden medan luftningscellernas korrosionspotential är konstant.

Tabell 4. Korrosions-, ryck- och blandpotential för mätcellerna 23/5 1995.

| Areaför. | Korrosionspotential |         | Potential differens | Brytpotential |            | Potential differens | Bland potential |
|----------|---------------------|---------|---------------------|---------------|------------|---------------------|-----------------|
|          | Katod               | Anod    |                     | Katod         | Anod       |                     |                 |
| 1:10     | -532 mV             | -717 mV | 185 mV              | -628,75 mV    | -689,5 mV  | 60,75 mV            | -652 mV         |
| 1:1      | -559 mV             | -723 mV | 164 mV              | -661,5 mV     | -697,75 mV | 36,25 mV            | -696 mV         |

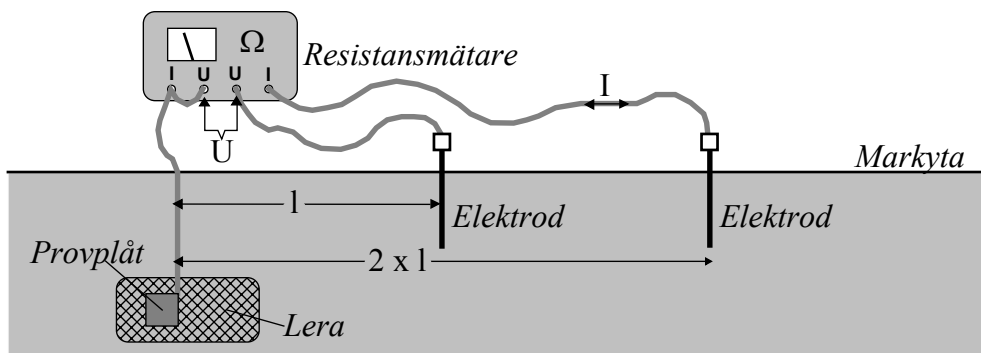


Figur 6. Diagram med potential mot tid för kolstålsplåtar på 0,5, 1 och 1,5 m djup (6).

Insamlingen av mätvärden sker förutom kontinuerligt med dataloggern, även manuellt. Med en datalogger för insamling av mätvärden kan arbetsinsatsen reduceras och fler mätvärden kan samlas in, varför de manuella mätningarna behöver ej utföras lika frekvent. Fram till november 1992 och under tiden 5 april till 21 oktober 1993 erhöles, p.g.a. problem med dataloggern, inga eller osäkra mätvärden. Det finns dock manuellt uppmätta kontrollvärden för kanal 1 till 6 under hela försökstiden. Mätserierna i figur 5 och figur 6 baseras på dygnsmedelvärden från dataloggern, förutom under dessa period då de manuellt uppmätta kontrollvärdena används.

### 2.2.3 Resistansmätning

Jordtagsresistans,  $R_{jord}$ , mättes vid tre tillfällen med jordresistansmätare och två hjälpelektroder (se figur 7). Jordresistansmätaren skickar en ström mellan uttagen (I) och mäter spänningen mellan uttagen (U), varefter resistansen beräknas med ohms lag. Tabell 5 visar  $R_{jord}$  och beräknad övergångsresistans,  $R_{överg}$ , för mätcellernas plåtarna. Elektrodena placerades på ett avstånd av 5 m och 10 m, 10 m och 20 m och vid det sista mättillfället även 15 m och 30 m från provplåtarna i gropen. Mätströmmen går mellan provplåten och den bortre elektroden och spänningen mäts mellan provplåten och den närmaste elektroden.



Figur 7. Mätning av jordtagsresistans,  $R_{jord}$ , med resistansmätare och två hjälpelektroder.

Tabell 5. Jordtags- och övergångsresistans,  $R_{jord}$  och  $R_{överg}$ , för mätcellernas plåtar.

| Datum                          | 1992-09-17 |      |       |      | 1993-10-19 |      |       |      |
|--------------------------------|------------|------|-------|------|------------|------|-------|------|
| Areaförhållande anod/katod     | 1:1        |      | 1:10  |      | 1:1        |      | 1:10  |      |
| Plåt                           | Katod      | Anod | Katod | Anod | Katod      | Anod | Katod | Anod |
| $R_{jord}$ , $\Omega$ 5 & 10m  | 406        | 66,2 | 81,7  | 65,6 | 240        | 49,6 | 45,7  | 52,3 |
| $R_{jord}$ , $\Omega$ 10 & 20m | 404        | 65,8 | 81,6  | 65,6 | 238        | 54,1 | 45,3  | 52,0 |
| $R_{överg}^*$ , $\Omega$       | 256        | 28   | 54,7  | 27,6 | 90         | 16   | 18,6  | 14   |
| Datum                          | 1995-05-23 |      |       |      |            |      |       |      |
| Areaförhållande anod/katod     | 1:1        |      | 1:10  |      |            |      |       |      |
| Plåt                           | Katod      | Anod | Katod | Anod |            |      |       |      |
| $R_{jord}$ , $\Omega$ 5 & 10m  | 478        | 134  | 93    | 135  |            |      |       |      |
| $R_{jord}$ , $\Omega$ 10 & 20m | 471        | 134  | 92    | 135  |            |      |       |      |
| $R_{jord}$ , $\Omega$ 15 & 30m | 474        | 134  | 92    | 135  |            |      |       |      |
| $R_{överg}^*$ , $\Omega$       | 327        | 96   | 65    | 97   |            |      |       |      |

\* Beräknad utifrån  $R_{jord}$  och resistiviteten,  $\rho$ ; 16,8  $\Omega\text{m}$  i lera och 65  $\Omega\text{m}$  i fyllning.

Vid mätning av  $R_{jord}$  skall hjälpelektroden placeras på så stort avstånd från provplåten att det uppmätta värdet blir oberoende av avståndet från provplåten. Att i stort sett samma  $R_{jord}$  erhöles vid alla avstånd visar att elektrodavståndet var tillräckligt stort. I det uppmätta värdet ingår även resistansen i ledningen till plåten liksom  $R_{överg}$  mellan plåt och jord samt utbredningsresistansen,  $R_{utbr}$ .  $R_{överg}$  beräknas genom att uppmätt  $R_{jord}$  minskas med  $R_{utbr}$ , som beräknas genom följande formel:

$$R_{utbr} = \frac{\rho}{n \cdot l \cdot (a+b)}$$

där  $\rho$  är resistiviteten hos omgivande jord,  $n$  är antalet exponerade sidor, i detta fall 2 och  $a$  och  $b$  är provplåtens bredd och längd.

För fyllning på 1,1 m djup är resistiviteten,  $\rho$ , mätt med soilbox 206  $\Omega\text{m}$  med naturfuktat jordprov och 65  $\Omega\text{m}$  vid vattenmätning (3). Därav beräknade  $R_{utbr}$  för katodplåtar i fyllning visas i tabell 6.  $R_{överg}$  för plåtar i fyllning i tabell 5 är beräknade utifrån  $\rho$ -värdet 65  $\Omega\text{m}$ . Om

$\rho$ -värdet 206  $\Omega\text{m}$  används för att beräkna  $R_{\text{överg}}$  för plåtar i fyllning erhålls negativa  $R_{\text{överg}}$  för 17/9 1992 och 19/10 1993 och 7  $\Omega$  för 23/5 1995.

Tabell 6. Utbredningsresistans,  $R_{\text{utbr}}$ , för små och stora plåtar i fyllning.

|                   | Resistivitet, $\rho$ | Små plåtar, $R_{\text{utbr}} = \rho/0,44$ | Stora plåtar, $R_{\text{utbr}} = \rho/2,42$ |
|-------------------|----------------------|---|---|
| Naturfuktad jord  | 206 $\Omega\text{m}$ | 468 $\Omega$                              | 85,1 $\Omega$                               |
| Vattenmättad jord | 65 $\Omega\text{m}$  | 148 $\Omega$                              | 26,9 $\Omega$                               |

$R_{\text{överg}}$  kan sjunka något med tiden beroende på att jorden runt plåtarna packas.  $R_{\text{utbr}}$  är beroende av markens resistivitet, vilken beror på fuktigheten och därmed varierar  $R_{\text{utbr}}$  med nederbörden. Att  $R_{\text{jord}}$  var lägst 19/10 1993 för att sedan öka är störst 23/5 1995, kan bero på att marken var torrare i maj än i oktober, varför  $\rho$  var högre 23/5 1995.  $R_{\text{överg}}$  för 23/5 1995 borde därför ha beräknats utifrån ett högre  $\rho$ . Om  $R_{\text{överg}}$  23/5 1995 antages vara densamma som  $R_{\text{överg}}$  19/10 1993 och skillnaden ligger i  $R_{\text{utbr}}$  kan  $\rho$  i fyllning för 23/5 1995 beräknas utifrån  $R_{\text{jord}}$  för små plåtar till 169  $\Omega\text{m}$  och för stora plåtar till 178  $\Omega\text{m}$ . Mätt med soilbox är  $\rho$  i leran 16,8  $\Omega\text{m}$ , vilket ger att  $R_{\text{utbr}}$  för anoderna är 38  $\Omega$ . Även för anoderna är  $R_{\text{utbr}}$  lägst 19/10 1993 och störst 23/5 1995. Antingen har även leran torkat eller så påverkar även  $\rho$  i fyllningen runt leran  $R_{\text{utbr}}$  för anoderna. Lerklumpen utgör en mindre del av den jordvolym som  $R_{\text{utbr}}$  skall beräknas för, varför ett sammanvägt värde för lera och fyllning borde ha använts för  $\rho$ . Eftersom strömtätheten är störst närmast provlpåten har  $\rho$  i leran störst betydelse för  $R_{\text{utbr}}$  förutom då  $\rho$  i fyllningen är alltför stor. Om  $R_{\text{överg}}$  23/5 1995 antages vara densamma som  $R_{\text{överg}}$  19/10 1993 och skillnaden ligger i  $R_{\text{utbr}}$  kan  $\rho$  för 23/5 1995 beräknas utifrån  $R_{\text{jord}}$  för små plåtar till 52  $\Omega\text{m}$  och för stora plåtar till 53  $\Omega\text{m}$ .

Tabell 7 visar cellresistans mellan plåt i fyllning och plåt i lera och ström 23/5 1995, samt spänning. Spänning beräknas med ohms lag från resistans och ström och skall vara lika med differensen för brytpotential i tabell 4. Skillnaden mellan tabellerna beror på att brytpotentialen är svår att bestämma med voltmätare.

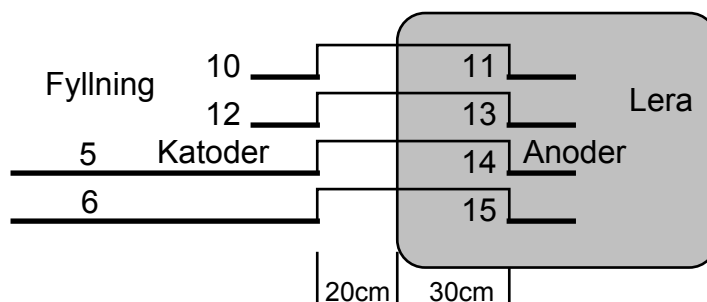
Tabell 7. Cellresistans, ström och spänning beräknad med ohms lag 23/5 1995.

| Areaför. | Resistans    | Ström             | Spänning |
|----------|--------------|-------------------|----------|
| 1:10     | 186 $\Omega$ | 415 $\mu\text{A}$ | 77,2 mV  |
| 1:1      | 508 $\Omega$ | 53 $\mu\text{A}$  | 26,9 mV  |

## 2.3 Provupptagning

### 2.3.2 Grop 1: 1,085 år

18 oktober 1993 togs provplåtarna i grop 1 upp, Exponeringstiden var 396 dygn eller 1,085 år. Vid denna tid hade 3 315 As passerat genom mätcellen med liten katod och 18 783 As cellen med stor katod. Figur 8 visar en skiss över placeringen av luftningscellernas provplåtar i gropen och hur de är kopplade till varandra. Plåt 5 och 6 är stora och de övriga är små plåtar.



Figur 8. Skiss över placering och koppling för plåtar i grop 1.

Plåtarnas korrosion utvärderades, genom mätning av massförlust, gropfrätningshastighet och gropfrättningsfaktor (se tabell 8). Massförlust mättes genom att korrosionsprodukterna först avlägsnades genom betning med Clarkes lösning (koncentrerad HCl med 20 g  $\text{Sb}_2\text{O}_3$ /l och 60 g  $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  /l). Därefter upprepas betningen ett antal gånger och plåtarna vägs efter varje gång. Viktminskningen vid betningstiden noll, bestämd genom extrapolation, är massförlusten orsakad av plåtarnas korrosion. Gropfrätningen bestämdes som djupet på den största frätgropen i  $\mu\text{m}$  mätt med mikroskop adderad med massförlusten omräknad till  $\mu\text{m}$ . Gropfrättningsfaktorn är gropfrätning dividerat med massförlust. I samband med provupptagningen mättes även  $R_{\text{jord}}$  för plåtarna (se tabell 9), varefter  $R_{\text{överg}}$  beräknades.

Tabell 8. Massförlust, gropfrätningshastighet och gropfrättningsfaktor för plåtar i grop 1.

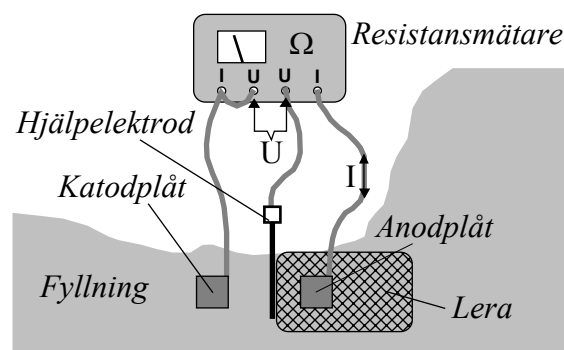
| Plåt nr                              | 10    | 11   | 12    | 13   | 5     | 14   | 6     | 15   |
|--------------------------------------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
|                                      | Katod | Anod | Katod | Anod | Katod | Anod | Katod | Anod |
| Massförlust, g                       | 0,93  | 1,99 | 1,84  | 3,26 | 14,89 | 9,52 | 13,39 | 9,79 |
| Massförlust, $\text{g}/\text{m}^2$   | 46,5  | 99,5 | 92,0  | 163  | 74,5  | 476  | 67,0  | 490  |
| Massförlust, $\mu\text{m}$           | 5,9   | 12,7 | 11,7  | 20,7 | 9,5   | 60,6 | 8,5   | 62,3 |
| Massförlust, $\mu\text{m}/\text{år}$ | 5,5   | 11,7 | 10,8  | 19,1 | 8,7   | 55,8 | 7,8   | 57,4 |
| Gropfrätning $\mu\text{m}$           | 196   | 107  | 226   | 127  | 531   | 239  | 496   | 232  |
| Gropfrätning $\mu\text{m}/\text{år}$ | 181   | 98,3 | 208   | 117  | 490   | 220  | 457   | 214  |
| Gropfrättningsfaktor                 | 33    | 8,4  | 19    | 6,1  | 56    | 3,9  | 58    | 3,7  |

Tabell 9. Jordtags- och övergångsresistans,  $R_{jord}$  och  $R_{överg}$ , för plåtar i grop 1.

| Plåt nr                     | 10    | 11   | 12    | 13   | 5     | 14   | 6     |      |
|-----------------------------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
|                             | Katod | Anod | Katod | Anod | Katod | Anod | Katod | Anod |
| $R_{jord}, \Omega$ 5 & 10m  | 319   | 75   | 326   | 80   | 107   | 83   | 106   | 89   |
| $R_{jord}, \Omega$ 10 & 20m | 324   | 75   | 330   | 80   | 107   | 83   | 106   | 89   |
| $R_{överg}^*, \Omega$       | 176   | 37   | 182   | 42   | 80    | 45   | 79    | 51   |

\* Beräknad utifrån  $R_{jord}$  och resistiviteten,  $\rho$ ; 16,8  $\Omega\text{m}$  i lera och 65  $\Omega\text{m}$  i fyllning.

För att mäta resistansen i lera respektive fyllningen användes jordresistansmätare och en hjälpelektrod som placerades i gränssytan mellan lera och sand (se figur 9). Tabell 10 visar cellresistans uppmätt mellan anodplåt i lera och katodplåt i fyllning, samt resistans i lera och i fyllning. För jämförelse mättes cellresistansen förutom med den fyrpoliga jordresistansmätaren även med en multimeter. Jordresistansmätaren skickar en ström mellan uttagen (I) och mäter spänningen mellan uttagen (U). Multimetern mäter spänning på samma uttag som ger ström.



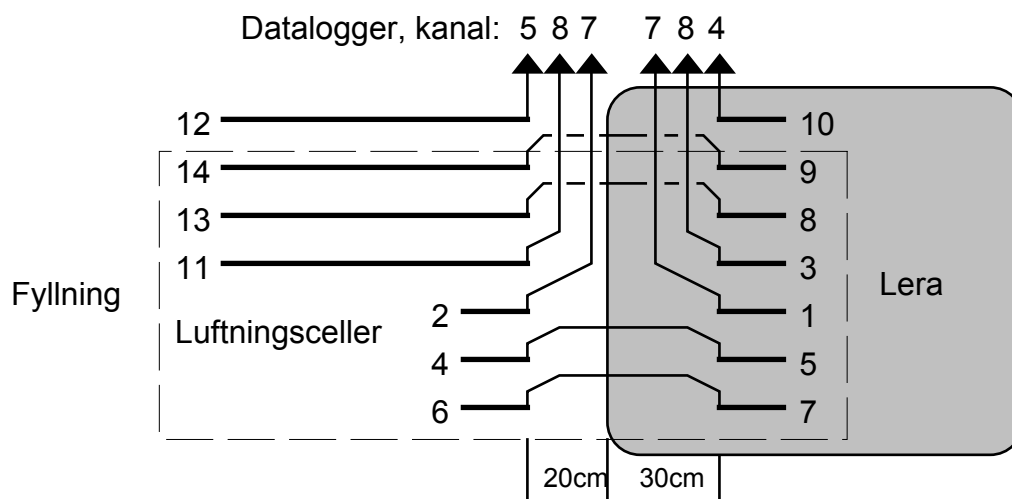
Figur 9. Mätning av resistans i fyllning och lera med resistansmätare och hjälpelektrod.

Tabell 10. Cellresistans mellan katod och anod och resistans i fyllning respektive lera mätt med jordresistansmätare, summan av resistans i fyllning och lera och cellresistans mätt med multimeter.

| Provplåt i katod anod |    | Uppmätt cellresistans | Resistans i fyllning | Resistans i lera | Summa fyll + lera | Mätt med multimeter |
|-----------------------|----|-----------------------|----------------------|------------------|-------------------|---------------------|
| 10                    | 11 | 344 $\Omega$          | 296 $\Omega$         | 79 $\Omega$      | 375 $\Omega$      | 474 $\Omega$        |
| 12                    | 13 | 375 $\Omega$          | 305 $\Omega$         | 80 $\Omega$      | 385 $\Omega$      | 575 $\Omega$        |
| 5                     | 14 | 171 $\Omega$          | 99 $\Omega$          | 71 $\Omega$      | 170 $\Omega$      | 285 $\Omega$        |
| 6                     | 15 | 173 $\Omega$          | 98 $\Omega$          | 75 $\Omega$      | 173 $\Omega$      | 286 $\Omega$        |

### 2.3.2 Grop 2: 2,685 år

24 maj 1995 togs proverna i grop 2 upp efter en exponeringstid på 980 dagar eller 2,685 år. Figur 10 visar en skiss över placeringen av luftningscellernas provplåtar i gropen och hur de är kopplade till varandra. Plåt 11 till 14 är stora plåtar och de övriga är små plåtar. 1 och 2 respektive 3 och 11 var kopplade till luftningsceller via dataloggern. 10 och 12 var kopplade till separata kanaler på loggern och därmed ej ihopkopplade till en luftningscell. Plåtarnas korrosion utvärderades, genom mätning av massförlust, gropfrätningshastighet och gropfrätningfaktor (se tabell 11). Vid denna tid hade 6 697 As passerat genom mätcellen med liten katod och 42 276 As cellen med stor katod, vilket omräknat till korrosion blir 12,3  $\mu\text{m}$  respektive 77,8  $\mu\text{m}$ . Massförlusten för anoderna i de luftningsceller som var kopplade till loggern är 62,4  $\mu\text{m}/\text{år}$  för plåt 3 som var kopplad till en stor katod och 35,5  $\mu\text{m}/\text{år}$  för plåt 1 som var kopplad till en liten katod. Om korrosionshastighet beräknas från korrosionsströmmen erhålls 29,0  $\mu\text{m}/\text{år}$  respektive 4,59  $\mu\text{m}/\text{år}$ . Att viktsförlustmätningen ger ett högre värde tyder på att det sker en egenkorrosion på anoderna som skall läggas till korrosionen orsakad av luftningscellen. Anodernas egenkorrosionen blir därmed 33,4  $\mu\text{m}/\text{år}$  för luftningscellen med stor katod och 30,9  $\mu\text{m}/\text{år}$  för luftningscellen med liten katod.



Figur 10. Skiss över placering och koppling för plåtar i grop 2.

Tabell 11. Uppmätta massförluster och maximalt frättdjup för plåtar i grop 2.

| Anodplåt i lera               | nr | 1*    | 5     | 7     | 3*    | 8     | 9     |
|-------------------------------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Massförlust, g                |    | 14,98 | 13,66 | 13,12 | 26,33 | 21,94 | 16,86 |
| Massförlust, g/m <sup>2</sup> |    | 749   | 683   | 656   | 1317  | 1097  | 843   |
| Massförlust, µm               |    | 95,3  | 86,9  | 83,5  | 167   | 140   | 107   |
| Massförlust, µm/år            |    | 35,5  | 32,4  | 31,1  | 62,4  | 52,0  | 39,9  |
| Gropfrätning µm               |    | 675   | 712   | 681   | 808   | 747   | 516   |
| Gropfrätning µm/år            |    | 252   | 265   | 254   | 301   | 278   | 192   |
| Gropfrättningsfaktor          |    | 7,09  | 8,19  | 8,17  | 4,83  | 5,35  | 4,81  |
| Katodplåt i fyllning          | nr | 2*    | 4     | 6     | 11*   | 13    | 14    |
| Massförlust, g                |    | 2,72  | 1,78  | 2,60  | 33,3  | 33,3  | 36,3  |
| Massförlust, g/m <sup>2</sup> |    | 136   | 89,0  | 130   | 166,5 | 166,5 | 181,5 |
| Massförlust, µm               |    | 17,3  | 11,3  | 16,6  | 21,2  | 21,2  | 23,1  |
| Massförlust, µm/år            |    | 6,46  | 4,21  | 6,17  | 7,90  | 7,90  | 8,61  |
| Gropfrätning µm               |    | 662   | 401   | 624   | 1173  | 1055  | 998   |
| Gropfrätning µm/år            |    | 247   | 149   | 232   | 437   | 393   | 372   |
| Gropfrättningsfaktor          |    | 38,2  | 35,5  | 37,6  | 55,3  | 49,8  | 43,2  |

\* Plåtar kopplade till luftningsceller via dataloggern.

Vid provupptagningen gjordes även mätningar av cellresistans och  $R_{jord}$ . Tabell 12 visar cellresistans mellan katod i fyllning och anod i lera och resistans i fyllning respektive lera för två luftningsceller, den ena med stor katod och den andra med liten. För att mäta resistansen i lera respektive fyllningen användes en hjälpelektrod som placerades i gränsytan mellan lera och sand.

Tabell 12. Cellresistans mellan plåt i fyllning och plåt i lera och resistans i fyllning respektive lera och summan av resistans i fyllning och lera.

| Areaför. | Katod<br>plåt nr | Anod<br>plåt nr | Uppmätt<br>cellresistans | Resistans i<br>fyllning | Resistans i<br>lera | Summa<br>fyll + lera |
|----------|------------------|-----------------|--------------------------|-------------------------|---------------------|----------------------|
| 1:10     | 14               | 9               | 191 Ω                    | 89 Ω                    | 101 Ω               | 190 Ω                |
| 1:1      | 2                | 1               | 768 Ω                    | 630 Ω                   | 131 Ω               | 761 Ω                |



### 3. Diskussion

#### 3.1 Utvärdering av mätdata

Tabell 13 visar medelkorrosionshastighet, som massförlust och som gropfrätningshastighet för provplåtar som ingått i luftningsceller, samt för okopplade plåtar av samma storlek som legat i lera respektive fyllning. I tabellen finns även kvoterna mellan korrosionen hos kopplade och okopplade plåtar samt kvoten mellan korrosionen för plåtar i lera respektive fyllning.

Tabell 13. Allmän medelkorrosionshastighet beräknad från massförlust och gropfrätningshastighet för kopplade och okopplade plåtar samt kvoterna mellan dem.

| Upptag 1: 1,085 år    |                  | Katod (plåt i fyllning) |           | Anod (plåt i lera) |           | Kvot anod/katod |           |
|-----------------------|------------------|-------------------------|-----------|--------------------|-----------|-----------------|-----------|
|                       |                  | Allmän                  | Gropfrät. | Allmän             | Gropfrät. | Allmän          | Gropfrät. |
| Liten katod           | Okopplade plåtar | 15,7 µm/år              | 573 µm/år | 15,1 µm/år         | 137 µm/år | 0,96            | 0,24      |
|                       | Kopplad cell     | 8,13 µm/år              | 194 µm/år | 15,4 µm/år         | 108 µm/år | 1,86            | 0,56      |
| Kvot kopplad/okopplad |                  | 0,53                    | 0,34      | 1                  | 0,79      |                 |           |
| Stor katod            | Okopplade plåtar | 17,5 µm/år              | 834 µm/år | 15,1 µm/år         | 137 µm/år | 0,88            | 0,16      |
|                       | Kopplad cell     | 8,29 µm/år              | 473 µm/år | 56,6 µm/år         | 217 µm/år | 6,9             | 0,46      |
| Kvot kopplad/okopplad |                  | 0,49                    | 0,57      | 3,8                | 1,58      |                 |           |

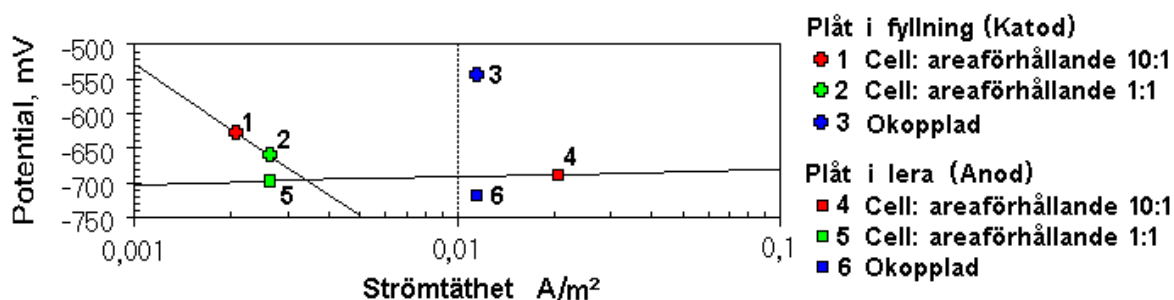
| Upptag 2: 2,685 år    |                  | Katod (plåt i fyllning) |           | Anod (plåt i lera) |            | Kvot anod/katod |           |
|-----------------------|------------------|-------------------------|-----------|--------------------|------------|-----------------|-----------|
|                       |                  | Allmän                  | Gropfrät. | Allmän             | Gropfrät.  | Allmän          | Gropfrät. |
| Liten katod           | Okopplade plåtar | 12,8 µm/år              | 517 µm/år | 13,5 µm/år         | 69,7 µm/år | 1,05            | 0,13      |
|                       | Kopplad cell     | 5,61 µm/år              | 209 µm/år | 33,0 µm/år         | 257 µm/år  | 5,88            | 1,23      |
| Kvot kopplad/okopplad |                  | 0,44                    | 0,40      | 2,44               | 3,69       |                 |           |
| Stor katod            | Okopplade plåtar | 14,7 µm/år              | 617 µm/år | 13,5 µm/år         | 69,7 µm/år | 0,92            | 0,11      |
|                       | Kopplad cell     | 8,14 µm/år              | 401 µm/år | 51,4 µm/år         | 257 µm/år  | 6,31            | 0,54      |
| Kvot kopplad/okopplad |                  | 0,55                    | 0,65      | 3,81               | 3,69       |                 |           |

| Kvot: upptag 2/1 |                  | Plåt i fyllning (katod) |           | Plåt i lera (anod) |           |
|------------------|------------------|-------------------------|-----------|--------------------|-----------|
|                  |                  | Allmän                  | Gropfrät. | Allmän             | Gropfrät. |
| Liten katod      | Okopplade plåtar | 0,82                    | 0,90      | 0,90               | 0,51      |
|                  | Kopplad cell     | 0,69                    | 1,08      | 2,2                | 2,38      |
| Stor katod       | Okopplade plåtar | 0,86                    | 0,74      | 0,90               | 0,51      |
|                  | Kopplad cell     | 0,98                    | 0,85      | 0,90               | 1,18      |

För okopplade plåtar är medelkorrosionen ungefär detsamma för plåtar i fyllning som för plåtar i lera, medan gropfrätningshastigheten är större i fyllning. För plåtar i lera som kopplats till en 10 gånger större katod är korrosionshastigheten 3,8 gånger mer än för okopplad plåt. För plåtar i lera som kopplats till en lika stor katod är korrosionshastigheten efter 1,085 år oförändrad medan den efter 2,685 år har ökat till 2,44 gånger mer än för okopplad plåt. Korrosionshastigheten för plåtar i fyllning halveras när de kopplas som katod. Korrosionen av anodplåtarna ökade med 19,5 µm/år med liten katod och 37,9 µm/år med en stor katod. Om man beräknar hur mycket ökad korrosion på anoden som motsvaras av minskningen på katoden erhålls 7,2 µm/år respektive 65,6 µm/år. Korrosionen av anoden ökar och korrosionen

av katoden minskar när plåtarna kopplas ihop, men korrosionen av anoden ökar inte i proportion till hur mycket som korrosionen av katoden minskar.

Figur 11 visar polarisation för anod- och katodplåtar baserat på mätning av brytpotentialer (tabell 4) och ström (tabell 7). Då den elektrokemiska polarisationen beror på strömtätheten har strömmen har räknats om till strömtäthet, som satts i relation till plåtens brytpotential. Egenkorrosionen som är massförlust på okopplade plåtar (13,5  $\mu\text{m}/\text{år}$ ), har räknats om till strömtäthet (11,7  $\text{mA}/\text{m}^2$ ) och satts i relation till korrosionspotentialen (tabell 4). Egenkorrosionen är för luftningscellen med liten katod större än korrosionen orsakad av luftningscellen.



Figur 11. Polarisation för anod- och katodplåtar baserat på brytpotential (tabell 4) och korrosionsström (tabell 7) samt för okopplade plåtar baserat på egenkorrosion (13,5  $\mu\text{m}/\text{år}$ ) och korrosionspotential (tabell 4).

### 3.2 Formel för areaförhållandets inverkan

Av figur 4 framgår att korrosionsströmmen är ca 6 gånger större i luftningscellen med areaförhållandet 1:10 än i luftningscellen med areaförhållande 1:1, trots att skillnaden i arean på plåt i fyllning är 10 gånger större. Syrediffusionen behöver inte vara proportionell mot arean, varför en viss del av skillnaden kan förklaras av att syrediffusionen till den större 10 gånger större katoden ej är 10 gånger större. Skillnaden i korrosionsström för de bägge luftningscellerna kan beräknas utifrån antagandet att katodreaktionen enbart sker på plåt i fyllning, vilken har tillgång till syre som diffunderat genom marken och att syrediffusionen till katoden är proportionell mot arean. Antagandet medför att den uppmätta korrosionsströmmen blir proportionell mot korrosionen av plåt i lera. Beroende på hur stor andel av anodreaktionen som sker på katoden, kommer strömdifferensen enligt tabell 14, att variera mellan två fall:

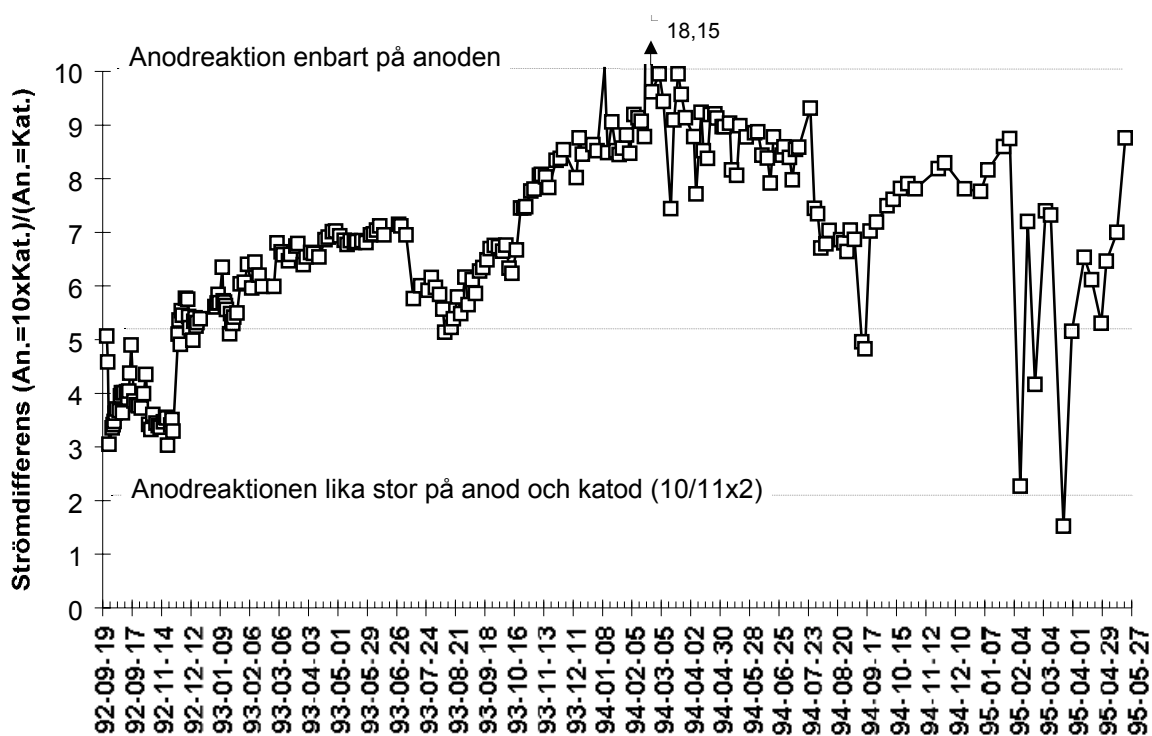
- I Anodreaktion är lika stor på plåt i fyllning och i lera varvid båda plåtarna korroderar lika mycket. En 10 gånger större korrosionsström från den 10 gånger större katoden fördelas både på anoden och katod vilket ger en anodarea som är 10+1, medan strömmen från den mindre katoden fördelas på en 2 gånger större anodarea. Då ytorna på plåt i lera är lika stora får man fram differansen på uppmätt korrosionsström till plåt i lera genom att dividera anodströmtätheterna. Strömdifferansen blir därmed 1,82.
- II Anodreaktion sker enbart på plåt i lera då katoden i fyllningen antages vara skyddad av ett skikt av korrosionsprodukter varför enbart plåt i lera korroderar. Därmed kommer en 10 gånger större katodarea att ge 10 gånger större uppmätt korrosionsström som genom den yttre förbindelsen ger en 10 gånger större korrosion på plåt i lera.

Tabell 14. Förutsättningar och formel för beräkning av strömdifferans mellan luftningscell med stor respektive liten katod (6).

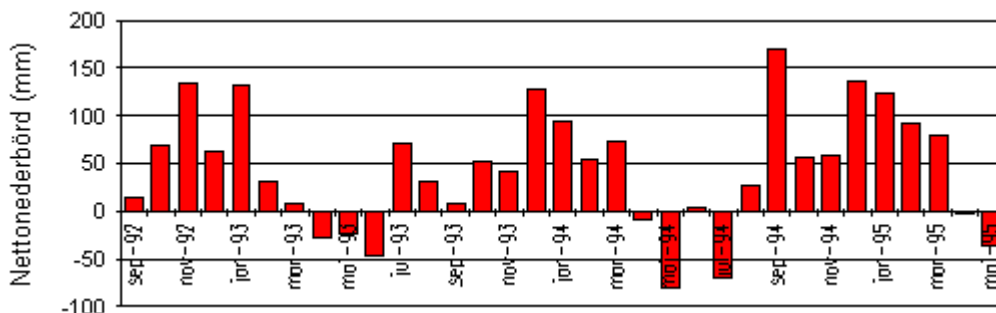
| Fall   | I  | II  |
|--|--|---|
| Förutsättningar:<br>Anodreaktion = korrosion<br>Katodreaktion<br>Egenkorrosion | Både på plåt i fyllning och i lera.<br>Enbart på plåt i fyllning.<br>Enbart på plåt i fyllning.  | Enbart på plåt i lera.<br>Enbart på plåt i fyllning.<br>Ingen egenkorrosion           |
| Formel för beräkning av strömdifferens.  | $\frac{\text{Katodytan för stor katod}}{\text{Anodytan som strömen fördelas på}} \times Y_{\text{tan på plåt i lera}}$ $\frac{\text{Katodytan för liten katod}}{\text{Anodytan som strömen fördelas på}} \times Y_{\text{tan på plåt i lera}}$ |   |
|  | $\frac{\frac{K_{\text{Stor}}}{K_{\text{Stor}} + A} \times A}{\frac{K_{\text{Liten}}}{K_{\text{Liten}} + A} \times A} = \frac{10}{1+1} = 1,82$  | $\frac{\frac{K_{\text{Stor}}}{A} \times A}{\frac{K_{\text{Liten}}}{A} \times A} = 10$ |
|  | Där: A = area för plåt i lera = 200cm <sup>2</sup><br>K <sub>Stor</sub> = area för stor katod = 2000cm <sup>2</sup> = 10A<br>K <sub>Liten</sub> = area för liten katod = 200cm <sup>2</sup> = A  |   |

Figur 12 visar hur skillnaden mellan korrosionsström för de båda luftningscellerna varierar med tiden. I början var strömdifferensen ca 3 gånger större varefter den successivt har ökat till 8. Att strömdifferensen ökar med tiden tyder på att utfällningen av korrosionsprodukter på katodytan minskar anodreaktionen på katoden så att andelen av anodreaktionen som sker på katoden minskar med tiden.

I juli 1994 observerades en ökad korrosionspotential för luftningscellerna och plåtarna i lera (se figur 5), samtidigt som skillnaden i korrosionsström (se figur 12) minskade från 9 till 7. Detta kan förklaras av figur 13 (3), som visar nettonederbörd beräknat från SMHIs nederbörds- och avdunstningsdata. Det mycket torra vädret maj och juli minskade vattenhalten i jorden, vilket fick lera att torka och skapar sprickor i lera som kan transportera syre till anoderna. Höstregnen i september fick lera att åter suga upp fukt, varvid potentialerna återgick till de värden de hade före torkan.



Figur 12. Diagram över strömdifferensen  $\frac{\text{Anod} = 10 \times \text{Katod}}{\text{Anod} = \text{Katod}}$  mot tid för luftningscellerna (6).



Figur 13. Nettonederbörd beräknat från SMHIs nederbörds- och avdunsningsdata (3).

### 3.3 Inverkan av korrosionsbeläggningar

Plåtar i fyllning är täckta av en korrosionsbeläggning i form av rostpannar (3). Utfällning av korrosionsprodukter medför att järnutlösningen hämmas då järnjonerna måste diffundera ut genom skiktet av utfällda korrosionsprodukter. Korrosionshastigheten i fyllningen begränsas därmed genom anodisk polarisation, d.v.s. diffusionen av utlöst järn genom rostsiktet. Syrereduktionen som styrs av diffusionen till metallytan förhindras i mindre utsträckning då syrereduktionen kan ske på det elektronledande magnetitskikt som bildas närmast metallytan (7). Den högre gropfrätningshastigheten för okopplade plåtar i fyllning visar dock att det korrosionshämmande skiktet bryts igenom på vissa ställen varvid korrosionen sker i form av gropfrätning. Den anodiska polariseringen och syrediffusionen till plåten gör att korrosionspotentialen ökar, vilket ökar risken för gropfrätning. För kopplade plåtar är korrosionspotentialen lägre, varvid den lokala korrosionen är mindre. Att korrosionen på de okopplade katodplåtarna till stor del sker genom gropfrätning som hämmas av kopplingen till

anodplåtarna, kan förklara varför korrosionen av anoderna inte ökar i proportion till hur mycket som korrosionen av katoderna minskar.

Korrosionshastigheten för plåtar i lera som ej är belagda med korrosionsprodukter begränsas av diffusionen av syre genom leran till plåtarna, varvid den lokala korrosionen är mindre. Att korrosionen för okopplade plåtar är lika stor i lera som i fyllning kan bero på att den korrosionshämmande effekten av syrediffusion i leran är lika som den korrosionshämmande effekten av diffusionen av utlöst järn genom rostskiktet på plåtar i fyllning.

### 3.4 Jämförelse med laboratorieförsöken

Att luftningscellskorrosion erhöles i såväl laboratorieförsöken (1, 2) som i fältförsöken visar att luftningscellskorrosion är ett reellt korrosionsproblem för konstruktioner i mark och att resultaten från laboratorieförsöken är relevanta för faktiska förhållanden. I laboratorieförsöken var korrosionen främst styrd av resistansen i sanden, som var större än i leran, och av hur nederbörd genom utlakning av salter påverkade resistansen. Tabell 7, 10 och 12 visar att då anoderna och katoderna var lika stora var även i fältförsöken resistansen i fyllningen mycket större än i leran. Vid användning av en tio gånger större katod uppmättes en något större resistans i fyllningen än i leran. Den högre resistansen i fyllningen har därvid uppvägs av att strömtätheten vid anoden är tio gånger större än vid katoden. Försurad nederbörd bedöms dock inte ha lika stor inverkan på korrosionen i fältförsöken som i laboratorieförsöken. Eventuell ökad utlakning av salter som en effekt av försurad nederbörd torde ha skett redan på högre nivåer i marken, och har därför en ringa effekt på 1 meters djup.

## 4. Referenser

---

1. Levlin, E.,  
Corrosion of water pipe systems due to acidification of soil and groundwater.  
Doktorsavhandling i Teknisk Elektrokemi och korrosionslära, 30+96 sidor, TRITA-TEK  
1992:01, ISBN 91-7170-094-3, KTH 1992
2. Levlin, E.,  
Corrosion of underground structures due to acidification: laboratory investigation. British  
Corrosion Journal, Årg. 26, Nr. 1, sid 36 - 66, 1991
3. Norin, M.,  
Groundwater and soil properties in an urban environment and their effects on the  
corrosion of soil buried constructions of carbon steel and zinc, Licentiatavhandling,  
Geologiska Institutionen, CTH, Publ. A 86, ISSN 1104-9839, Göteborg 1998.
4. Årebäck, M. och Vinka, T.-G.,  
Hydrogeologiska undersökningar och korrosionsmätningar i en urban lagerföljd.  
Geologiska Institutionen, CTH, Publ. B 391, ISSN 1100-5696, Göteborg 1994.
5. Vinka, T.-G. och Årebäck, M.,  
Korrosionsförhållanden hos kolstål och zink i en urban jordlagerföljd. KI Rapport 1996:9.
6. Levlin, E.,  
Aeration cell corrosion of carbon steel in soil: *In situ* monitoring cell current and potential.  
Corrosion Science Årg. 38, Nr. 12, sid 2083-2090, 1996.
7. Stratmann, M., Hoffman, K. och Müller, J.,  
Die bedeutung von rostsichten für den ablauf von korrosionsreaktionen bei niedrig  
legierte stählen. Werkstoffe und korrosion, Årg. 42, 1991, sid 467 - 472.