



PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research



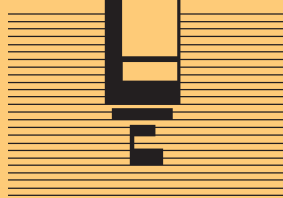
Stålpålaras beständighet mot korrosion i jord

En sammanställning av kunskaper
och erfarenheter

GÖRAN CAMITZ
ULF BERGDAHL
TOR-GUNNAR VINKA

Linköping 2009

rapport 105



PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

rapport 105

Stålpåalars beständighet mot korrosion i jord

En sammanställning
av kunskaper och erfarenheter

GÖRAN CAMITZ
ULF BERGDAHL
TOR-GUNNAR VINKA

Linköping 2009

Rapport	Pålkommisionen 581 93 Linköping
Beställning	Statens geotekniska institut Biblioteket Tel: 013–20 18 04 Fax: 013–20 19 14 e-post: info@swedgeo.se internet: www.palkommissionen.org
ISSN	0347-1047
ISRN	IVA/PAL/R--09/105--SE
Upplaga	200
Tryck	Tryckeri, Ort, månad 2009

Förord

I juni 1994 utkom Pålkommisionens Rapport 93, som utgör en sammanställning av de kunskaper om korrosion och korrosionsskydd på stålplåtar och stålsplattor i jord och vatten, som man hade fram till ca 1990. Sedan dess har Pålkommisionen utgivit Rapport 98 med dimensioneringsanvisningar för slagna slanka stålplåtar (2000). Denna baseras beträffande korrosion på de erfarenheter, som redovisas i den tidigare Rapport 93 med rekommenderade korrosionsvärden något på säkra sidan.

Sedan Rapport 93 utkom har en mängd nya erfarenheter av korrosion på stål i jord framkommit och dokumenterats på olika sätt. Samtidigt har också nya krav kommit från Vägverket när det gäller korrosion på stålplåtar och en Eurokod SS-EN 1993-5 presenterar förslag till rostmåner i olika jordar och vattenförhållanden.

För att ta tillvara den ökade kunskapen och samtidigt värdera korrosionen efter nya dimensioneringsregler har det bedömts lämpligt att göra en ny sammanställning av befintliga kunskaper och erfarenheter om korrosion på stålplåtar i jord. Denna skall ligga till grund för en ny utvärdering av ”karaktäristiska korrosionsvärden” vid olika jord- och grundvattenförhållanden och därmed ge ett underlag för val av ”dimensionerande rostmånsvärden” till påldimensioneringen. Sådana värden kan eventuellt också införas i en nationell bilaga till SS-EN 1993-5 om så skulle visa sig önskvärt.

Önskemålet om en förnyad kunskaps- och erfarenhetssammanställning har också blivit starkare eftersom användningen av stålplåtar ökar samtidigt som kraven på ett hållbart samhälle också ökar. Dessutom vill man förbilliga konstruktionerna vilket kan bli möjligt om man i vissa fall kan minska rostmånen på plåtarna. Här för erfordras dock att man säkert kan värdera korrosionens effekt på plåtarna och säkert avgöra vilket som är det farligaste fallet för en påles bärförmåga; en hög medelavfrätning eller en hög lokal avfrätning samt att man lär sig skilja mellan ”enkla förhållanden” och dem som är ”komplexa eller korrosiva” enligt Rapport 98.

Denna rapport har finansierats av Pålkommisionen och har utförts av Göran Camitz och Tor-Gunnar Vinka, Swerea KIMAB AB samt Ulf Bergdahl, Statens geotekniska institut, SGI.

Samråd har under arbetets gång skett med en projektgrupp bestående av Gunnar Holmberg, Skanska, Göteborg, Kjell Kjellberg, Ruukki Sverige AB, Borlänge, Bo Berglars, Piling Development samt Wilhelm Rankka, Pålkommisionen. Författarna vill härmed framföra ett varmt tack för de värdefulla synpunkter, som framkommit under detta arbete.

Stockholm och Linköping i maj 2009
Författarna

Innehållsförteckning

Förord	3
Summary	7
Sammanfattning	10
1 Inledning och syfte	13
2 Korrosion på stålplåtar i jord	14
2.1 Allmänt om stålets korrosion i jord och andra fuktiga miljöer	14
2.2 Uppkomst av korrosionsceller på stål i jord	14
2.3 Skillnaden mellan jämn och lokal korrosion	15
2.4 Mått på korrosionshastighet	15
2.5 Olika typer av korrosion på stålplåtar i jord	16
2.6 Inverkande faktorer	16
2.7 Skillnad mellan korrosion i naturligt lagrad jord, i omlagrad jord och i fyllnadsjord	18
2.8 Lokal korrosion i den luftade zonen över grundvattenytan	18
2.9 Korrosionens utveckling med tiden	18
2.10 Svenska jordars korrosivitet	18
2.11 Invändig korrosion i öppna stålplåtar	19
2.12 Korrosion på stål i beslag till plåtar av trä, betong och stål	19
2.13 Korrosionsegenskaper hos olika ståltyper i jord	20
2.13.1 Järn och stål – definitioner och förklaringar	20
2.13.2 Plåtar av kolstål	22
2.13.3 Plåtar av låglegerat stål	22
2.13.4 Plåtar av segjärn	22
2.13.5 Plåtar av rostfritt stål	22
2.14 Korrosion i naturligt vatten och i utomhusluft	24
3 Erfarenheter av korrosion i jord	25
3.1 Erfarenheter av balt stål i jord	25
3.1.1 Korrosion i jord enligt Pålkommisionens Rapport 93 – Erfarenheter från tidigare fältundersökningar av korrosion i jord	25
3.1.2 Korrosionsundersökningar på stålplåtar i grundvattenzonen	29
3.1.3 Korrosion på nedgrävda vertikala stålstänger	33
3.1.4 Korrosionsjämförelse mellan nedgrävda vertikala stålstänger och neddrivna stålplåtar	33
3.1.5 Korrosion på neddrivna stålstänger enligt Pålkommisionens Information 2002:1	35
3.1.6 Korrosion på stål i jord enligt VTT	36
3.1.7 Korrosion på vertikalt stål i grundvattenytan – Laboratorieundersökning	37
3.1.8 Korrosion på vertikalt nedslagna rör av kolstål och låglegerat stål	42
3.1.9 Korrosion på vertikalt nedslagna rör av rostfritt stål i jord	49
3.1.10 Korrosion på nedgrävda provplåtar av kolstål i jord	52
3.1.11 Korrosion enligt Norsk Peleveilledning (2005)	57
3.2 Erfarenheter av belagt stål i jord	57
3.2.1 Korrosion på förzinkat stål och zink i jord	57
3.2.2 Korrosion på varmförzinkade kraftledningsstolpar i jord	60
3.2.3 Korrosionsskyddande beläggningar	60

4	Åtgärder mot korrosion	62
4.1	Boverkets regler för korrosionsskydd	62
4.1.1	Dimensionering med hänsyn till korrosion - rostmån	62
4.1.2	Dimensionering med rostmån enligt Pålkommisionens Rapport 98	62
4.1.3	Dimensionering enligt Eurokod SS-EN 1993-5	63
4.1.4	Dimensionering enligt VTT:s förslag	66
4.1.5	Diskussion av dimensioneringsreglerna	67
4.1.6	Jämförelse mellan rostmåner på stålplåtar i jord och stålplåtar och stålspont i vatten enligt olika regler	69
4.1.7	Rostmån i kombination med annan skyddsåtgärd	72
4.2	Korrosionsskyddande beläggningar	72
4.3	Ingjutning i injekteringsbruk – stålärnepålar	73
4.4	Invändigt korrosionsskydd i öppna stålörspålar	74
4.5	Katodiskt korrosionsskydd	74
4.5.1	Skyddsprincipen	74
4.5.2	Skydd med offeranoder	74
4.5.3	Skydd med påtryckt ström	75
4.5.4	Skadliga biverkningar av katodiskt skydd	75
4.5.5	Katodiskt skydd i kombination med elektriskt isolerande skyddsbeläggning – Fullständigt korrosionsskydd	75
5	Kontroll	76
5.1	Kontroll av jordförhållanden	76
5.2	Kontroll av korrosion på nedslagna pålar	76
5.3	Kontroll av skyddsverkan vid katodiskt skydd	77
5.4	Kontroll av skadlig biverkan av katodiskt skydd	78
5.5	Kontroll av förekomst av läckström	78
6	Slutsatser	79
6.1	Allmänt	79
6.2	Korrosion på bart stål i jord	79
6.3	Korrosion på belagt stål i jord	81
6.4	Åtgärder mot korrosion	81
6.5	Kontroll av korrosion	82
7	Referenser	83

Summary

This report has been compiled to inform about new knowledge and experiences concerning corrosion on steel piles in soils revealed after the earlier report on corrosion by Camitz in the Swedish Pile Commission Report 93 (1994). This earlier report presented the experiences up to about 1990. Another purpose with this report is to establish a common base for a new estimation of corrosion rates to be used in design of steel piles in natural soils and to find out what conditions require designing for increased corrosion rates or other means to protect the piles. The implementation of the Eurocodes have also introduced requirements on "design corrosion rates" obtained by multiplying the "characteristic value" of the corrosion rate with a partial factor. It is important to find out if the corrosion rates in Swedish Standard SS-EN 1993-5:2007 can be used also for Swedish soils. The use of steel piles in Sweden has increased steadily during many years and is now about 30 – 40% of the total amount of driven piles in Sweden each year.

The report starts with a theoretical presentation of corrosion processes on steel piles in soils, what types of corrosion can occur, and how different factors in the soil can influence the corrosion. Also the possible change of corrosion rate with time is presented. Additional chapters describe the internal corrosion inside steel pipe piles and the corrosion characteristics of different types of steel.

The compilation of the corrosivity of Swedish soils indicates that this is primarily determined by the oxygen supply and the humidity in the soil. The corrosion rate can also be influenced by other factors as: the groundwater level, low resistivity in the soil due to high chloride content, low pH value, the amount of organic content in the soil and sulphides, possibly with so called sulphate-reducing bacteria, and the presence of certain minerals and coal, coke or graphite. Some experiences also indicate that the corrosion rate to some extent decreases with time during the first 3 – 5 years after the pile installation. Other information contradicts

this. The corrosion attack appears differently on the steel surface depending on the surrounding soil and the groundwater conditions. Normally one gets uniform corrosion of the steel surface but local attacks also occur. The test with steel panels at the Swerea-KIMAB laboratory in Stockholm indicated that the highest average corrosion rate occurred somewhat below the groundwater level due to the action of an oxygen-concentration cell. The highest local corrosion rate occurred in the soil above the groundwater table. Also the composition of the steel can affect the corrosion rate and its variation over the pile surface. Therefore also the quality of the steel should be considered when choosing steel piles. On steel piles from carbon steel, the most common type of steel for piles, the corrosion is generally evenly distributed over the pile surface. In certain types of soil locally limited corrosion damage, deeper than the average corrosion attack, can occur. On piles made of low-alloy steel there is a tendency that more local corrosion attacks occur in addition to the uniform corrosion, compared to piles of carbon steel. On piles of stainless steel no uniform corrosion occurs. Any corrosion that may take place appears as limited but often deep pits while the stainless steel surface around the attack is uncorroded.

According to Camitz (1994) the design corrosion rate in Swedish soils should be between 20 and 50 $\mu\text{m}/\text{year}$. The corrosion rates presented by Vinka et al (2002) for X-shaped steel piles after nine years in the soil were between 0,5 and 8 $\mu\text{m}/\text{year}$. The highest value was measured in a gyttja clay close to Stockholm. Assuming that the highest of these values represents the characteristic value, it can be transformed into the design value by multiplying with a partial factor of 1,5. This corresponds to a design corrosion rate of 12 $\mu\text{m}/\text{year}$ which is considerably less than the recommended values presented earlier.

A statistical analysis of the corrosion investigations made during many years by the Geotechnical department at the Swedish State Railways indicates according to Bengtsson et

al (2002) that the corrosion rate on all 836 exposed steel rods was between about 0 and 40 $\mu\text{m}/\text{year}$. The highest values were obtained in soils with a high organic content. The characteristic corrosion rate (95 % fractile) was between 10,7 and 12,1 $\mu\text{m}/\text{year}$ after 10 years of exposure. The design value of the corrosion rate thus can be estimated to 18 $\mu\text{m}/\text{year}$. This value is also lower than those recommended earlier. According to Törnqvist (2004), who has reanalysed the Swedish experiences together with Finnish experiences, the 95 % fractile for all soils, except for those with high organic content, has been shown to be lower than 10 $\mu\text{m}/\text{year}$ or 1,0 mm/100 year.

A comparison between the above-mentioned corrosion rates and those measured on flat steel bars, installed vertically in the ground by excavation and refilling, indicate a corrosion rate 2 – 4 times the corrosion rate on driven steel piles. The corrosion rate is not decreasing with time. This indicates that one probably has to treat steel piles in fills differently from those driven in natural soils.

Data from pipes exposed in Åkerhög close to Kungälv on the Swedish West Coast showed according to Bergdahl et al (1995) that high corrosion rates, up to 87 $\mu\text{m}/\text{year}$, had occurred locally on a pipe made of low-alloy steel in clay with a high chloride content and an average corrosion rate between 6 and 12 $\mu\text{m}/\text{year}$. On the other pipes (carbon steel) the corrosion rate was lower, 2 – 17 $\mu\text{m}/\text{year}$. On the other test sites the detailed measurements indicated that the highest corrosion rates were between 8 and 12 $\mu\text{m}/\text{year}$.

In Sweden today it is possible to use four different documents to design steel piles with respect to corrosion rates:

- Swedish Pile Commission, Report 93, Appendix 1, Camitz (1994).
- Swedish Pile Commission, Report 98, Chapter 7, Bengtsson et al (2000).
- Swedish Standard SS-EN 1993-5:2007.
- Swedish Technical Approval 0656/94 RR-piles, issued by SITAC to Ruukki Sverige AB, Sweden, (2007) and RR-pålar (RR piles). Anvisningar från Ruukki Sverige AB (Recommendation from Ruukki Sverige AB), (2007).

A comparison between those documents indicates that they have different classifications of soil and water conditions, and different design values on corrosion rates.

The comparison between design corrosion rates in soils show that those according to Swedish Pile Commission Report 98 can be between 1,2 and 3,3 times those given in Swedish Standard SS-EN 1993-5:2007. In water the design corrosion rate in Swedish Pile Commission Report 98 is up to 3,7 times the values given in Swedish Standard SS-EN 1993-5:2007. However, some values in the European standard seem to be too low compared to Swedish experiences. In addition the increased corrosion rate in excavated and refilled soils compared to that for driven piles in natural soils has not been considered. Also those values presented in the Ruukki recommendation RR-pålar (RR piles) are deemed too low.

The compiled experiences presented above indicate that it might be possible in some natural soil conditions to lower the design corrosion rate somewhat, compared to those given in Swedish Pile Commission Report 98 (2000). However, first it has to be determined in which soil conditions this can be done, and also how other soil conditions should be handled. In addition a closer study of the relation between the average and local corrosion rates should be carried out in order to verify that the local corrosion rate does not cause a worse stress situation than the average corrosion e. g. by causing failure by high compression stresses or local buckling. A corresponding evaluation also ought to be performed for corrosion in water. Unfortunately, Swedish experiences from this field is lacking. A complementary literature survey like that of Camitz (1994) is recommended.

The investigations on corrosion rates of zinc and hot-dip galvanized steel indicate that those in soils with low pH values often can be of the same order as for steel, but that zinc coating can provide some protection in calcareous soils.

The scratch resistance of organic coatings on steel piles has been investigated on two test sites using polythene and epoxy coatings. After driving down and pulling out the piles again it was noted that all piles had scratches in the coatings. The piles coated with polythene had a few deeper scratches but those covered by epoxy had such damage that they couldn't be considered as protected against corrosion.

Casting steel piles in concrete in a casing gives a good corrosion protection. In special soil conditions one can choose to cast in only one part of the pile, the part which is judged to be most affected. The concrete cover will decrease the oxygen supply to the pile and create a basic surrounding (high pH value) at the steel surface.

Cathodic protection is not frequently used for steel piles in Sweden in spite of the fact that it provides a good corrosion protection. However, it is used in some cases to protect sheet pile walls in water. There a low electric direct current is sent through the water to the sheet pile surface. In order to reduce the amount of electric current needed, the sheet piles ought to be given an organic coating before driving.

Monitoring of the corrosion, or the risk of it, can be done in different ways:

- by a corrosion investigation on the site in order to determine those characteristics of soil having influence on the corrosion rate.
- by driving tests of piles and pulling out them again in order to study the scratches in the coating on the piles .
- by driving piles outside the actual construction area for later pulling out and measurements of the corrosion rate.
- by checking the efficiency and the risks for damage with cathodic protection.

Unfortunately experiences from such studies are limited, and the methods should be developed and tested.

Sammanfattning

Denna rapport har tillkommit för att sprida information om de nya kunskaper och erfarenheter beträffande korrosion på stålplåtar i jord, som framkommit sedan den tidigare korrosionsrapporten Camitz (1994), som redovisade förhållandena fram till ca 1990. Ett annat syfte med denna rapport är att ge ett samlat underlag för en förnyad bedömning av vilka rostmän man bör räkna med vid dimensionering av pålar i naturliga jordar samt klargöra under vilka förhållanden man bör räkna med ökad rostmän eller skydda pålarna på annat sätt. Införandet av Eurokoderna har också medfört krav på "dimensionerande rostmän" som erhålls genom att ett "karaktéristiskt" värde på rostmännen multipliceras med en partialkoefficient. Det är viktigt att man kan bedöma huruvida de i SS-EN 1993-5 angivna värdena på korrosionshastighet vid olika jordförhållanden kan tillämpas också i svenska jordar. Användningen av stålplåtar har också ökat väsentligt i Sverige under en lång följd av år och utgör nu 30 – 40 % av den totala mängden pålmetrar, som slås här varje år.

Rapporten inleds med en teoretisk framställning av hur korrosionen uppträder på stålplåtar i jord, vilka olika typer av korrosion, som kan uppstå, samt hur olika faktorer i jorden kan påverka korrosionen. Vidare behandlas korrosionens utveckling med tiden. Tillkommande avsnitt handlar om invändig korrosion i stålror samt korrosionsegenskaper på olika ståltyper.

Sammanställningen av svenska jordars korrosivitet visar att denna främst bestäms av syrediffussionen och fuktförhållandena i jorden. Korrosionshastigheten kan också påverkas av andra faktorer som: grundvattenytans läge, lågt elektriskt ledningsmotstånd till följd av hög salthalt, lågt pH-värde, förekomst av organisk jord och sulfider eventuellt med s.k. sulfatreducerande bakterier samt förekomst av speciella mineraler och främmande material såsom kol, koks och grafit. Vissa uppgifter tyder också på att korrosionshastigheten i viss mån avtar med tiden under de första ca 3 – 5 åren efter installation av en påle. Andra uppgifter motsäger detta. Korrosionen uppträder olika på stålytan beroende av omgivande jord

och grundvattenförhållanden. Vanligast är att man får en jämn avfrätning på stålytan men även lokala gropar i stålet förekommer. Försöken med stålplåtar på KIMAB:s laboratorium visade att man får den största medelavfrätningen något under grundvattenytan till följd av den syrekonzentrationscell, som bildas där. Den största gropfrätningshastigheten erhöles dock i jorden över grundvattenytan. Man kan också konstatera att stålets sammansättning kan påverka såväl korrosionshastighet som korrosionens fördelning över pålytan varför också stålqualiteten bör beaktas vid val av pålar. På stålplåtar av kolstål, vilket är den vanligaste ståltypen i pålar, sker korrosionen förhållandevis jämnt över hela pålen. I vissa typer av jord kan det dock uppstå avgränsade lokala angrepp med större djup än den jämna korrosionen. På pålar av låglegerat stål tycks det, utöver den jämna korrosionen, finnas en tendens till fler och djupare lokala angrepp än vad som är fallet på pålar av kolstål. På pålar av rostfritt stål förkommer ingen jämn avfrätning. Eventuell korrosion uppkommer endast i form av starkt avgränsade men ofta djupa punktangrepp medan den rostfria stålytan runt om angreppet är "blank" och utan korrosion.

Enligt Camitz (1994) skulle de dimensionerande värdena på medelavfrätningen i svenska jordar vara mellan 20 och 50 $\mu\text{m}/\text{år}$. De av Vinka m.fl. (2002) redovisade korrosionshastigheterna på krysspålar efter nio års exponering var mellan 0,5 och 8 $\mu\text{m}/\text{år}$ med det högsta värdet uppmätt i gytig lera i Stockholm. Under antagande att det högsta av dessa värden utgör s.k. karaktéristiskt värde kan det omvandlas till dimensionerande värde genom multiplicering med partialkoefficienten 1,5. Detta skulle då motsvara en dimensionerande korrosionshastighet på 12 $\mu\text{m}/\text{år}$ dvs betydligt mindre än de tidigare rekommenderade värdena.

En vidare statistisk analys av de korrosionsundersökningar, som under en lång följd av år utförts av SJ:s geotekniska kontor visade enligt Bengtsson m.fl. (2002) att korrosionshastigheten på alla de 836 stångdelarna låg mellan ca 0 och 40 $\mu\text{m}/\text{år}$ med de högsta värdena i

jord med organiskt innehåll. Den karakteristiska korrosionshastigheten dvs. 95 %-fraktilen låg mellan 10,7 och 12,1 $\mu\text{m}/\text{år}$ efter tio års exponering. Den dimensionerande korrosionshastigheten kan därav beräknas till 18 $\mu\text{m}/\text{år}$, vilket också är lägre än de tidigare rekommenderade värdena. Enligt Törnqvist (2004), som har bearbetat de svenska erfarenheterna vidare tillsammans med finska erfarenheter kan 95%-fraktilen för alla jordar utom dem med organiskt innehåll visas vara lägre än 10 $\mu\text{m}/\text{år}$ eller 1,0 mm/100 år.

En jämförelse mellan ovan nämnda korrosionshastigheter och de som uppmätts på nedgrävda vertikala stålstänger visar att dessa på de senare är 2 – 4 ggr högre än för de nedslagna pålarna och man har heller inte observerat någon avtagande korrosionshastighet med tiden. Detta innebär att man sannolikt skulle behöva behandla pålar i fyllningsjord speciellt.

Erfarenheter från de s.k. Sandviksrören från Åkerhög vid Kungälv visade enligt Bergdahl et.al. (1995) att högre korrosionshastigheter på upp till 87 $\mu\text{m}/\text{år}$ kan uppkomma lokalt på ett rör av låglegerat stål i salthaltig jord när medelkorrosionshastigheten var 6 – 12 $\mu\text{m}/\text{år}$. På övriga rör (kolstål) var korrosionshastigheten något lägre 2 – 17 $\mu\text{m}/\text{år}$. På de andra platserna gav de detaljerade mätningarna värden på som mest 8 – 12 $\mu\text{m}/\text{år}$.

Sammantaget finns det i Sverige idag möjlighet att dimensionerna stålپالار med rostmån enligt fyra olika dokument:

- Pålkommisionen, Rapport 93, Appendix 1, Camitz (1994)
- Pålkommisionen, Rapport 98, Kap. 7, Bengtsson et al. (2000)
- SS-EN 1993-5
- Typgodkännandebevis 0656/94 RR-pålar, Ruukki Sverige AB (2007)

En jämförelse mellan dessa visar att de har olika klassificeringar av jord- och vattenförhållanden samt olika värden på dimensionerande rostmån. En jämförelse mellan dimensionerande rostmån i jord visar att de enligt Rapport 98 kan vara mellan 1,2 och 3,3 ggr de, som anges i SS-EN 1993-5. I vatten är dimensionerande rostmån i Rapport 98 upp till 3,7 ggr den som anges i SS-EN 1993-5. Vissa värden i den europeiska standarden bedöms efter svenska erfarenheter vara för låga. Samtidigt har ingen hänsyn tagits till att korrosionshastigheten i omgrävd jord kan vara betydligt större än för en påle, som drivits ned i

naturligt lagrad jord. Även de värden, som anges i Typgodkännandet för RR-pålar bedöms vara för låga.

Den samlade erfarenheten enligt ovan visar således att det kan finnas möjlighet att man för vissa naturliga förhållanden skulle kunna minska den dimensionerande korrosionshastigheten något i förhållande till vad som anges i Rapport 98 (2000). Här för erfordras att man kan precisera i vilka jordförhållanden det kan göras samt hur andra jordförhållanden skall hanteras och verifieras. Vidare bör en närmare studie av förhållandet mellan medelavfrätning och lokal korrosion göras så att man kan vara säker på att den lokala korrosionen inte orsakar ett svårare lastfall än medelkorrosionen dvs åstadkommer ett tryck- eller knäckbrott i pålen. En motsvarande värdering borde också göras för korrosion i vatten. Tyvärr saknas svenska erfarenheter härom. En komplettering av litteraturstudien enligt Camitz (1994) rekommenderas.

Undersökningar av korrosionshastigheterna på zink och förzinkat stål visar att dessa ofta kan bli av samma storlek som på bart stål i sura jordar men kan ge gott skydd i kalkhaltig jord.

Organiska beläggningars reptålighet har undersökts på två platser med polyeten och epoxi. Efter neddrivning och uppdragning konstaterades att samtliga pålar fått beläggningsskador. De polyetenbelagda pålarna hade fått ett fåtal djupare repskador medan de epoxibelagda fått sådana skador att de ej kunde anses vara korrosionsskyddade.

Ingjutning av stålپالار i cementbruk med foderör, såsom för stål kärnepålar ger ett gott korrosionsskydd. Vid speciella jordförhållanden kan man också välja att bara gjuta in den del av pålen, som bedöms bli mest påverkad. Detta minskar syrediffusionen till pålen och skapar en skyddande basisk miljö (hög pH-värde) vid stålytan.

Katodiskt skydd används i liten utsträckning för stålپالار i Sverige, trots att det ger ett gott korrosionsskydd, men används i vissa fall för att skydda sponter i vatten varvid man sänder en svag elektrisk likström genom vattnet till spont- eller pålytan. För att inte strömåtgången skall bli för stor bör pålarna före nedslagning förses med en organisk beläggning.

Kontroll av korrosion eller risken därför kan ske på olika sätt:

- genom en korrosivitetsundersökning på

platsen varvid man bestämmer de egenskaper i jorden, som kan ha betydelse för korrosionshastigheten.

- genom provpålning och uppdragning av pålarna för att studera repskador på en belagd yta på pålen.
- genom neddrivning av pålar utanför den egentliga konstruktionen för senare uppdragning och mätning av inträffad korrosion.
- genom kontroll av effektiviteten och skaderiskerna med katodiska skydd.

Tyvärr är erfarenheterna av sådana kontroller begränsade varför kontrollmetoderna bör utvecklas och provas.

1. Inledning och syfte

Stålpålar har använts för grundläggning i stor skala sedan tidigt 1900-tal. Den senaste statistiken från Pålkommisionen visar att det i Sverige under 2006 slogs 551.000 meter stålpålar, vilket utgjorde 31 % av det totala antalet meter slagna pålar. Statistiken visar på en ökning från 181.000 meter 1980 till som mest 589.000 meter 2004. Huvuddelen av stålpålarna (92 % 2006) utgörs av rörpålar med diametern ≤ 300 mm. Det finns bland annat på grund av den ökande mängden stålpålar goda skäl att göra en förnyad sammanställning av våra erfarenheter av korrosion eftersom frågan om pålarnas beständighet i jord och om korrosionens betydelse för stålpålars bärförmåga länge har diskuterats och är svår att följa upp.

Syftet med denna rapport är att orientera beställare, entreprenörer, konstruktörer och geotekniker om:

- hur korrosion på stålpålar i jord uppkommer
- hur stor korrosionen i jord kan bli
- hur man kan dimensionera med hänsyn till korrosion i jord
- hur man kan skydda stålpålar mot korrosion i jord.

Vidare skall rapporten ge ett underlag för att utveckla nya gränser för att dimensionera stålpålar med hänsyn till korrosion i jord samt klarlägga när kompletterande undersökningar måste göras i samband därmed.

För förklaring av korrosionstekniska begrepp hänvisas till Tekniska Nomenklaturcentralen, TNC 67: Korrosionsordlista och Pålkommisionens Rapport 93.

För mer detaljerad information om korrosion i vatten och fuktig utomhusluft hänvisas också till Pålkommisionens Rapport 93.

2. Korrosion på stålplåtar i jord

Det vanligaste användningsområdet för stålplåtar är för grundläggning av byggnader och anläggningar i jord. I detta avsnitt beskrivs korrosionens uppkomst på stålplåtar i jord och vilka faktorer, som påverkar korrosionens storlek. Stålplåtar används också i vatten t.ex. under pirar och kajer i hamnar och under broar. Därför orienteras kortfattat även om korrosion på stålplåtar i dessa miljöer. Tyngdpunkten i denna framställning har lagts på att förklara Jordkorrosion, dvs korrosion, som påverkas av jordens egenskaper och som är av störst betydelse för stålplåtar.

2.1 Allmänt om stålets korrosion i jord och andra fuktiga miljöer

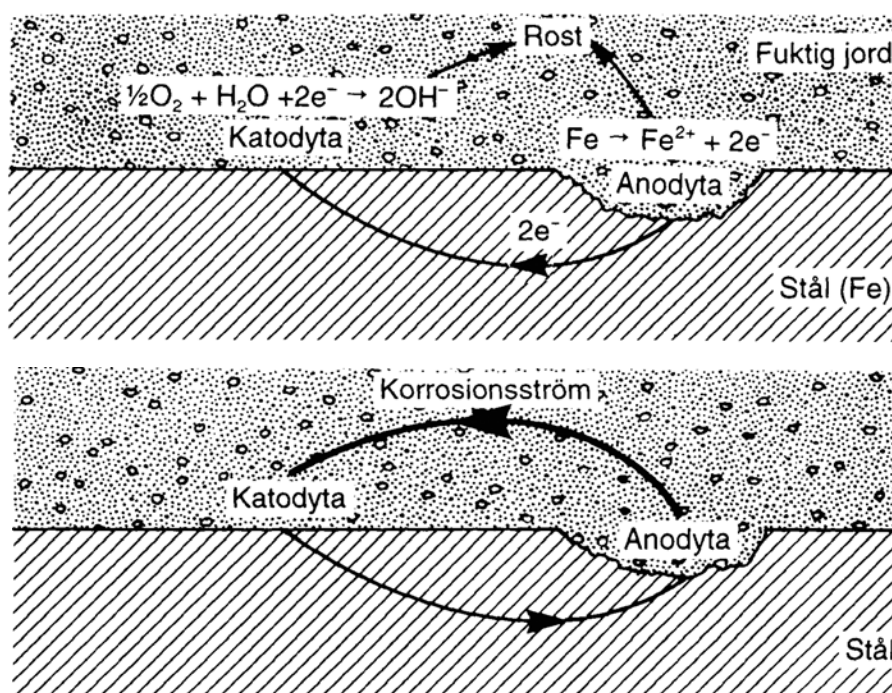
Korrosion på stålplåtar och andra metallkonstruktioner i jord, vatten och fuktig luft orsakas av elektrokemiska reaktioner mellan metallytan och omgivande jord, vatten eller luft. Stålet löses upp och det bildas korrosionsprodukter, rost.

Korrosionen i vatten sker under inverkan av förhållandevis få faktorer, främst syrehalt, lösta salter och temperatur. I jord är korrosio-

nen mer komplex och sker under inverkan av ett stort antal faktorer. I detta kapitel behandlas korrosion i jord. Korrosion i vatten och utomhusatmosfär behandlas kortfattat i Avsnitt 2.14.

2.2 Uppkomst av korrosionsceller på stål i jord

Korrosion på stål i jord är av elektrokemisk natur. Detta innebär att medan det sker kemiska reaktioner på stålytan flyter en elektrisk ström, korrosionsströmmen, mellan stålytan och jorden. Förloppet sker i korrosionsceller, som bildas på stålytan. Dessa består av en anodyta och en katodyta samt en elektrolyt, det vill säga den fuktiga jorden, se Figur 2.1. Beroende på förhållandena kan ett stort antal eller endast ett fåtal anod- och katodytor förekomma, ibland stora och ibland små. Vid kombinationen liten anodyta – stor katodyta kan korrosionshastigheten lokalt bli hög. Vid "allmän korrosion" förekommer ett stort antal små lika stora anod- och katodytor på stålytan. Vid "lokal korrosion" är antalet celler litet, med liten anod och stor katod. Vid extremfallet "gropfrätning" kan det vara en anod- och



Figur 2.1.
Korrosionscell på stål i jord. Övre bilden visar de elektrokemiska reaktionsförloppen. Nedre bilden visar korrosionsströmmens väg i samma korrosionscell

en katodyta, separerade från varandra. Under korrosionsförloppet sker samtidigt vid anod- och katodytorna två skilda elektrodreaktioner. Vid anodytan sker en oxidation av stålet, som upplöses, korrosionsangreppet. Vid katodytan sker en reduktion av ett oxidationsmedel. Vanligen är det syret i jordvattnet, som reduceras på katodytan. I jord eller vatten med pH-värde lägre än ca 4 kan även vätejoner reduceras så att katodreaktionen medför ökad korrosionshastighet.

Elektrodreaktionerna ger upphov till en elektrisk potentialskillnad mellan anod- och katodytan. Denna alstrar en elektrisk ström, korrosionsström, som flyter i jorden från anod till katod och tillbaka till anoden genom stålet, se Figur 2.1. Hur hög korrosionshastigheten blir beror på hur lätt korrosionsströmmen kan flyta. Är jordens elektriska ledningsförmåga hög, kan strömmen flyta lätt och korrosionshastigheten bli hög.

Om av någon anledning ett av förloppen i korrosionscellen hämmas, sker processen långsammare. Försvåras syretransporten till katoden kommer korrosionshastigheten att avta. Syrediffusionen har en nyckelroll vid korrosion på stål i jord. Detta betyder dock inte att korrosionen i tätare jord under grundvattenytan blir noll. Är jordens ledningsförmåga låg, dvs. jorden har hög resistivitet (torr jord) går korrosionen långsammare.

2.3 Skillnaden mellan jämn och lokal korrosion

Korrosionsangreppens djup och utbredning blir olika vid olika betingelser. Man skiljer mellan lokal korrosion och jämn korrosion (även kallad allmän korrosion). Vid lokal korrosion är angreppen koncentrerade till begränsade delar av stålytan. Ett exempel är gropfrätning, där angreppet har liten utbredning men stort djup. Utpräglad gropfrätning är dock ovanlig på kolstål. Vid allmän korrosion fås en jämn avfrätning över hela eller en större del av stålytan. Oftast är korrosionshastigheten högre

vid lokal korrosion, se Figur 2.2.

Olika konstruktioner är olika känsliga för formen av angrepp beroende på konstruktionens funktion. Så till exempel kan en genomfrätning i en oljecistern vara förödande. För bärande konstruktioner, till exempel spont eller pålar kan en utbredd jämn avfrätning betyda mer för konstruktionens bärförmåga än några enstaka djupa lokala angrepp.

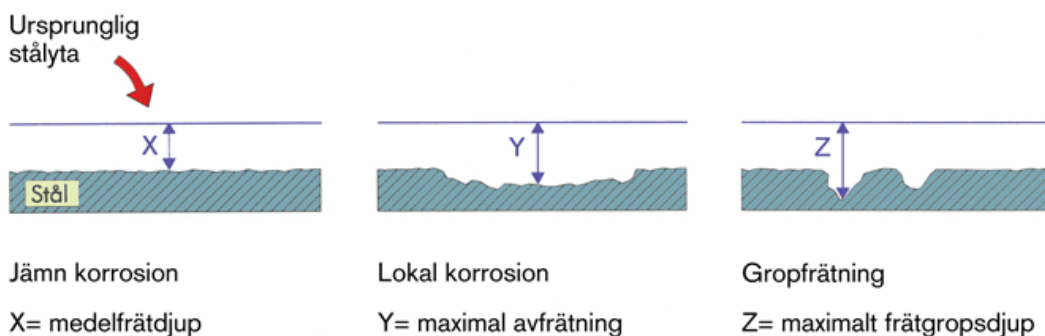
2.4 Mått på korrosionshastighet

Korrosionshastigheten på järn och stål brukar uttryckas antingen som viktsförlust per tidsenhet hos det korroderande föremålet eller som frättdjup per tidsenhet. Det senare är för pålar ett mer användbart uttryckssätt.

Vid korrosionsundersökningar vägs provföremål ofta före och efter exponering sedan korrosionsprodukterna avlägsnats. Korrosionshastigheten uttryckt i viktsminskning per exponerad area och exponeringstid brukar anges i enheten $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{år})$, som omräknas till **medelavfrätning** i $\mu\text{m}/\text{år}$ eller $\text{mm}/100 \text{ år}$ ($1 \mu\text{m} = 0,001 \text{ mm}$). Medelavfrätningen är alltså stålföremålets viktnskning omräknad till jämnt utbredd avfrätning av stålet per tidsenhet. På föremål, som inte kan vägas, kan avfrätningen bestämmas med mikrometer-skruv eller ultraljudsmätare. I vissa dokument t.ex. SS-EN 1993-5 anges korrosionshastigheten som tjockleksminskning i mm för en viss tid. Härmed avses dock den ensidiga korrosionen för viss tid.

Medelavfrätningen skall skiljas från **maximal avfrätning**, som avser lokal korrosion, dvs avfrätning på ett begränsat område där korrosionen är störst. Detta fastställs genom direkt mätning på det mest angripna stället, varav **maximal avfrätningshastighet** kan beräknas.

Gropfrätning avser lokal korrosion där det **maximala frätgropsdjupet** brukar mätas med mikroskop eller med nålmikrometer och **maximal gropfrätningshastighet** beräknas.



Figur 2.2
Olika typer av korrosionsangrepp på kolstål eller låglegerat stål.

Korrosionshastigheten kan också anges som karakteristiska, rekommenderade eller dimensionerande värden på avrostningen uttryckt i mm/100 år. Med karakteristiskt värde avses här 95 %-fraktilen av en serie uppmätta värden eller erfarenhetsvärden. Med rekommenderade värden avses värden, som bör användas vid dimensionering i brott- och bruksgränstillstånd för viss livslängd. Dimensionerande värden kan vara desamma som rekommenderade men kan också vara karakteristiska värden multiplicerade med en viss partialkoefficient men kan också vara ett krav från en beställare eller myndighet.

2.5 Olika typer av korrosion på stålplåtar i jord

Korrosion på järn och stål i jord kan ske under inverkan av tre olika faktorer varför man skiljer mellan följande typer av korrosion:

- Jordkorrosion
- Galvanisk korrosion
- Korrosion orsakad av elektrisk likström, s.k. läckströmskorrosion

Jordkorrosion sker under inverkan av jordens och grundvattnets kemiska och fysikaliska egenskaper. **Galvanisk korrosion** orsakas av elledande kontakt med en galvaniskt ädlare metall (metall med högre elektrokemisk potential än stål), t.ex. koppar. Även vissa icke-metaller är elektronledande och har en ädlare potential än stål, t.ex. grafit, stenkolk och koks. Därför kan även dessa material ge upphov till galvanisk korrosion på stål. **Läckströmskorrosion** orsakas av läckströmmar från elektrisk likströmsanläggning. Ström från växelströmsanläggningar anses inte kunna ge upphov till korrosion på stålplåtar i jord. I normala fall föreligger ingen risk för dessa två senare korrosionsformer på stålplåtar i jord. I vissa fall måste man dock ta hänsyn till dem. Det gäller t.ex. för galvanisk korrosion vid stålplåting i närheten av kopparjordning för högspänningsanläggningar, t.ex. ställverk i de fall plåtar kommer i avsiktlig eller oavsiktlig elektrisk ledande kontakt med kopparjordningen. Det gäller också vid plåting i fyllningsjord innehållande stenkolk och koks. Risken för läckströmskorrosion måste beaktas t.ex. vid plåting nära intill likströmsdrivna spårvägar.

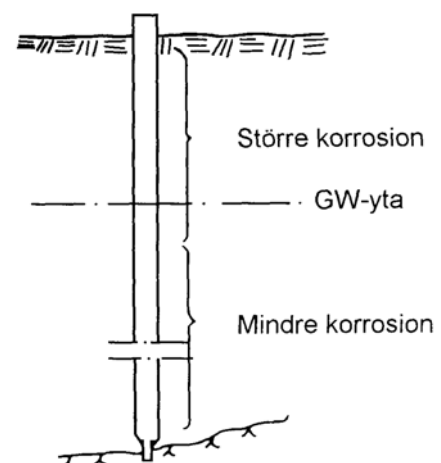
Eftersom Pålkommisionens rekommendationer rörande rostmålen storlek inte gäller vid galvanisk korrosion eller läckströmskorrosion bör man i varje enskilt fall kontrollera att det inte föreligger risk för dessa två korrosionsformer. För vidare orientering om åtgärder mot galvanisk korrosion och läckströmskorrosion på stålplåtar hänvisas till Camitz (1994).

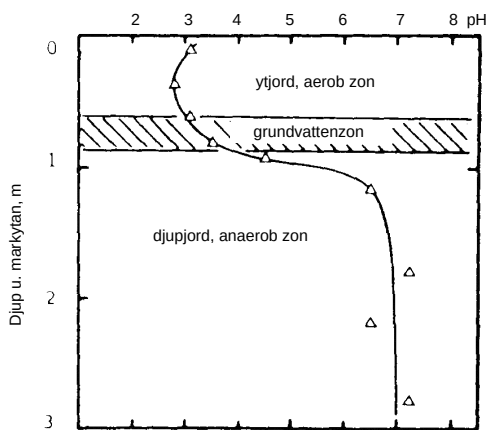
2.6 Inverkande faktorer

Som tidigare nämnts krävs närvaro av luftsyre och fuktig jord vid stålplåtan för att korrosion skall uppstå. Små vattenfyllda porer mellan jordpartiklarna försvårar syrets diffusion till stålplåtan och därmed blir korrosionen mindre. En förklaring till de låga korrosionshastigheterna, som konstaterats på stålplåtar i naturligt lagrad jord är att syrets diffusionshastighet i denna är lägre än i omlagrad jord. Vidare kan grundvattenytan utgöra en spärr för syrediffusionen, varför korrosionen ofta är mindre ett stycke under grundvattenytan än vid och över grundvattenytan. Detta förklarar varför man på västkusten har mätt upp låga korrosionshastigheter på stålplåtar i leror under grundvattenytan trots andra korrosionsfrämjande förhållanden, såsom hög kloridhalt och god elektrisk ledningsförmåga (låg resistivitet). Normalt är korrosionen störst på stålplåtar i området mellan markytan och ned till ett stycke under lägsta grundvattenyta. I området över grundvattenytan påträffas nämligen ett för korrosionen optimalt förhållande mellan luftsyre och vatten i jordens porsystem, se Figur 2.3. Att korrosionen kan bli betydande lokalt i den omättade zonen något över grundvattenytan har visats i laboratorieundersökningar på Korrosionsinstitutet. I jordarter som ger surt vatten, påträffas dessutom de lägsta pH-värdena över grundvattenytan, vilket också medför en ökad korrosion upptill på plåten. Under grundvattenytan är i allmänhet pH-värdet högre, det vill säga surhetsgraden är lägre, se Figur 2.4.

Genom att syrediffusionen till stålplåtan är förhållandevis god över grundvattenytan kan den lätt bli lokalt försämrade om till exempel jorden på vissa ställen är något hårdare packad eller om man återfyllt med blandade schaktmassor kring plåten. Utgörs schaktmassorna till exempel av lerklumpar inblandade i ett

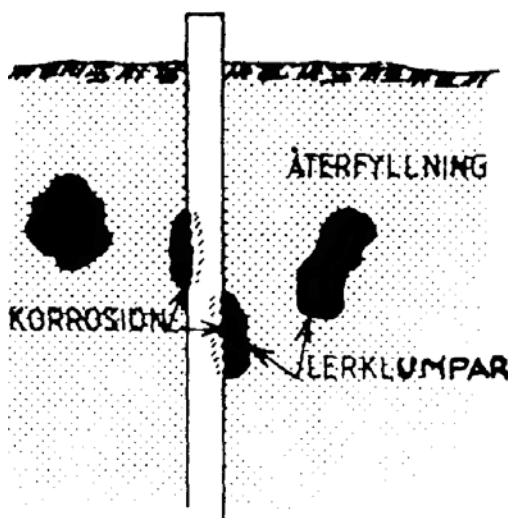
Figur 2.3. Korrosionen på en stålplåta är vanligen störst över grundvattenytan på grund av att det där råder ett för korrosionen optimalt förhållande mellan luftsyre och vatten i jordens porsystem.





För rörledningar, cisterner och andra stålkonstruktioner, som grävs ned relativt ytligt har jordens kemiska sammansättning, resistivitet och i viss mån även jordarten inverkan på korrosionen, både den jämna och lokala. Av de undersökningar om stålplåars korrosion, som refereras i Pålkommisionens Rapport 93, framgår det emellertid att det inte går att finna någon tydlig inverkan av dessa faktorer under grundvattenytan på stålplåar, som slås i jord. I en del av studierna kan man dock skönja en viss inverkan av jordens pH-värde och jordart på korrosionen i och över grundvattenytan

Figur 2.4
pH-profil i sulfidrik lera
Ersnäs, Norrbotten. I
den luftade zonen över
grundvattenytan är jor-
den sur (lågt pH-värde)
på grund av att sulfi-
derna oxiderat till sulfat.
Något under grund-
vattenytan stiger pH-
värdet och jorden blir
nära kemiskt neutral.

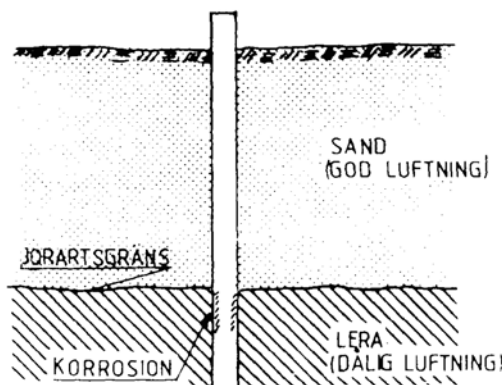


Ibland uppstår gropfrätning i mekaniska skador i skyddsbeläggningen på jordförlagda rörledningar som en följd av kraftig lokal tillväxt av en speciell typ av bakterier på den blottlagda stål- eller gjutjärnsytan. Detta kallas mikrobiell korrosion. Denna korrosionsform förekommer bara i anaerob (syrefri) jord, som är rik på organiskt material och sulfat. Mikrobiell korrosion påträffas därför särskilt på rör lagda i jord som utgör gammal havsbotten. Bakterierna tillhör släktet sulfatreducerande bakterier (latin: *desulfovibrio desulfuricans*) och deras livsprocess innebär att sulfat reduceras till sulfid vilket ökar aggressiviteten lokalt på järn- eller stållytan. Av allt att döma leder mikrobiell korrosion endast till lokala angrepp, främst på konstruktioner med skadad skyddsbeläggning och alltså inte till ökad allmän korrosion på nakna stålkonstruktioner.

Figur 2.5
Lokal korrosion på stål-
plå i den luftade zonen
över grundvattenytan
orsakad av inhomogena
schaktmassor, som åter-
fyllts runt pålen. Där
lerklumpar ligger an mot
pålytan har luftningscel-
ler uppkommit med en
anodyta under lerklum-
pen där lokal korrosion
uppkommer.

grövre material exempelvis sand, kan lerkulor komma att ligga an mot stållytan medan resten av ytan täcks av sand. Syretillförseln blir därigenom sämre under lerkulorna. Därvid uppstår en så kallad luftningscell vilket innebär att stållytan i den välluftade sanden blir katod medan ytan under lerkulorna blir anod och ett lokalt korrosionsangrepp utstår, se Figur 2.5.

Luftningsceller kan också uppkomma vid skiktad jord. Står stålplåen till exempel i lera överlagrad av en mera permeabel jord som sand kommer syretillförseln till stållytan att vara förhållandevis god i sanden medan den försvåras i lera. Stållytan i sanden blir katodisk medan ytan i lera närmast under jordartsgränsen blir anodisk och korroderar, se Figur 2.6. Detta förhållande kan uppkomma särskilt över grundvattenytan medan skiktningar under grundvattenytan inte behöver innebära någon ökning av korrosionen i de fall syrekonsentrationen där är låg. Till följd av regnvatteninfiltration kan dock i vissa fall mer genomsläppliga skikt även under grundvattenytan ha en syrehalt av betydelse jämfört med den i till exempel ett lerskikt.



Figur 2.6
Korrosion på stålplå
orsakad av att pålen står
i skiktad jord. En luft-
ningscell har uppkommit
på pålen på grund av
jordlagrens olika ge-
nomsläpplighet för luft-
syre. Ett lokalt angrepp
uppträder vid skiktgrän-
sen.

2.7 Skillnad mellan korrosion i naturligt lagrad jord, i omlagrad jord och i fyllnadsjord

Ostörd jord är naturligt lagrad med ett i huvudsak orört kornskelett och med jordkornen jämförelsevis väl packade vilket försvårar syrediffusionen och vattenomsättningen i porerna mellan jordpartiklarna. Om jorden omlagras, det vill säga grävs upp och återfylls på samma plats, förstörs mer eller mindre den naturliga lagringen och jorden blir mera heterogen med delvis större porer och kanaler, vilket ökar syrediffusionen och vattenomsättningen. Genom omlagringen ökar även förutsättningarna för uppkomst av luftningsceller. Detta förklarar varför korrosionen i allmänhet är större i omlagrad än i ostörd jord.

I en svensk fältundersökning jämfördes korrosionen på stålplåtar, som stått neddrivna i ostörd jord med korrosionen på plåtar, som stått nedgrävda lika lång tid i samma jord. Man fann att medelavfrätningen var två till fyra gånger större i omlagrad jord, Avsnitt 3.1.4. På lång sikt, efter flera decennier, återgår dock en omlagrad jord till ett tillstånd som, ur korrosionssynpunkt liknar det ostörda tillståndet.

Fyllnadsjord, som hämtas från annat håll, har korrosionsegenskaper, som vanligen skiljer sig från de i den ursprungliga jorden på platsen, som utfylls. I fyllnadsjord, som utgörs av naturlig jord (sand, silt, lera etc.) är den naturliga lagringen och packningen av jordpartiklarna helt eller delvis upphävd. I så kallad kontrollerad fyllning, det vill säga fyllning, som packats maskinellt till en viss packningsgrad, är dock syrediffusion och vattenomsättning vanligen sämre än i okontrollerad fyllning.

Fyllnadsjord kan även bestå av icke naturlig ”jord”, som flygaska, annan aska, byggavfall etc., med helt andra kemiska och fysikaliska egenskaper än fyllnadsjord av naturligt ursprung. Fyllning med icke naturlig jord kan därför vara starkt korrosiv. Inför pålning i sådan fyllnadsjord rekommenderas att man gör en särskild utredning av korrosionsriskerna.

2.8 Lokal korrosion i den luftade zonen över grundvattenytan

I den luftade zonen mellan markytan och ned till grundvattenytan kan lokala angrepp uppstå med betydligt större djup än på omkringliggande stålytor, som utsätts för mera jämn korrosion. Orsaken är att det föreligger ett optimalt förhållande mellan syrekonzentration och markvatten i den icke vattenmättade zonen. Att de lokala angreppen kan bli betydande i

denna zon har visats både i fält- och laboratorieundersökningar vid Korrosionsinstitutet. Fältundersökningarna visade emellertid att den maximala minskningen av pålens tvärsnittsytan, trots djupa lokala angrepp, blir förhållandevis liten – endast en eller ett par procents minskning av ursprunglig tvärsnittsytan på tio års sikt. Detta är positivt eftersom det är den resterande tvärsnittsytan, som har betydelse för pålens bärförmåga.

2.9 Korrosionens utveckling med tiden

Då och då framförs åsikten att korrosionshastigheten skulle avta med tiden på stålplåtar i jord, även på så lång sikt som 50 – 100 år. Svenska undersökningar, där man har tagit in och undersökt stålplåtar, som har stått olika länge på samma ställe, har emellertid visat att korrosionen i de flesta fall är i stort sett densamma på lång sikt. Att det skulle vara någon skillnad i genomsnittlig medelavfrätning av praktisk betydelse under t ex. 50 års användningstid jämfört med 100 år finns det alltså idag inte fog för att anta. Däremot kan korrosionshastigheten avta under de första 3 – 5 åren, efter det att pålen drivits ned i jorden, men därefter finns det knappast någon sådan effekt. Man bör alltså förutsätta att den genomsnittliga korrosionen i de flesta fall är i stort sett lika stor per år på lång sikt.

2.10 Svenska jordars korrosivitet

Något förenklat kan man säga att Sveriges yta till 75 % täcks av morän medan 10 % av ytan utgörs av i huvudsak kalt berg. Resterande ca 15 % täcks av isälvsavlagringar, finkorniga sediment och torvmarker. Det är i huvudsak dessa senare jordlager, som på grund av ofta låg bärförmåga ger upphov till pålning för byggnader och anläggningar. Även lermoräner kan i vissa fall ha för låg bärförmåga. Beroende på ursprungsmaterialet och förhållandena under sedimentationen eller torvmarkernas utbredning och tiden därefter får dessa jordar olika egenskaper, som har betydelse för korrosionen, dels fysikaliskt dels kemiskt. De svenska jordförhållandena påverkar riskerna för korrosion på stålplåtar dels positivt dels negativt. Det finns mycket fasta jordar och områden med litet djup till berg, som begränsar behovet av plåtar. Grundvattenytan ligger ofta på litet djup under markytan, vilket gör att en stor del av plåterna ofta står i grundvatten vilket kan reducera korrosionen. Å andra sidan har svenska jordar speciellt leror ofta hög vattenkvot, hög sulfidhalt och liten karbonathalt, vilket kan leda till högre korrosionshastighet.

De egenskaper i jord, som bedöms främst inverka på korrosionshastigheten på stål i jord, är syrediffusionen och fuktförhållandena. Dessa förhållanden kan i sin tur påverkas av jordens permeabilitet, vattenkvot och närheten till grundvattenytan eller vattenförande skikt i jorden. Även ett varierande grundvattenstånd kan påverka beroende på att det ökar syreomsättning. Korrosionshastigheten kan också påverkas av en låg resistivitet i jorden (korrosionsströmmen flyter lättare) till följd av t.ex. hög salthalt i sedimenten såsom på Västkusten, där jorden avsatts i saltvatten. Ett lågt pH-värde ($\leq 4,5$) och hög organisk halt, som bl.a. påträffas i torv, gyttja och sulfidjordar, kan också öka korrosionshastigheten. Ett högt pH-värde såsom i kalkhaltig jord minskar å andra sidan korrosionshastigheten.

Korrosionshastigheten kan också påverkas av vissa speciella mineraler i jorden såsom t.ex. koks, kolaska och grafit. Förekomst av s.k. sulfatreducerande bakterier i sulfidjord kan också öka hastigheten genom s.k. bakteriell korrosion. Denna effekt bedöms dock vara liten för obelagda stålplåtar i jord. Vidare kan det förhållandet att jorden varit uppgrävd och återfylld runt en påle eller blandats med restprodukter av något slag t.ex. aska eller slagg öka korrosionshastigheten.

Om man har en högpermeabel jord t.ex. grus eller stenfyllning i direkt anslutning till öppet vatten där vattnet kan flyta mer eller mindre fritt ut och in i jordvolymen med plåtar kan korrosionshastigheten öka betydligt på grund av stor tillgång på syresatt vatten och bör antas bli densamma som vid korrosion i öppet vatten. Förekomsten av sten och block i jorden kan också vara negativ så till vida att de kan slita av delar av beläggningsen på belagda plåtar.

2.11 Invändig korrosion i öppna stålörspålar

Stålörspålar och segjärnspålar är inte helt täta. Grundvatten tränger så småningom in vid skarvhylsor och bergskor och pålen fylls efter hand helt eller delvis med grundvatten. Den invändiga, oskyddade stål-ytan kommer då att rosta. Tre zoner kan urskiljas där korrosionen blir olika stor. Dels rostar ytorna över vattenytan genom atmosfärisk korrosion, dels rostar ytorna under vattnet. Dessutom rostar stålet i själva vattenytan genom så kallad vattenlinjekorrosion, se Avsnitt 3.1.7. Man bör också notera att vattenståndet i pålen kan komma att variera beroende på att vattenståndet i omgivande jord varierar. Vattenlinjekorrosion med-

för djupare och mera koncentrerat angrepp än korrosionen på de övriga ytorna på pålens insida. Av denna anledning måste man ta hänsyn till den invändiga korrosionen i rörplåtar, antingen genom tillämpning av en invändig rostmån eller genom att insidan korrosions-skyddas med t.ex. betongfyllning.

2.12 Korrosion på stål i beslag till plåtar av trä, betong och stål

Som framgår nedan finns omfattande erfarenheter av korrosion på stål i jord. Emellertid saknas erfarenheter av korrosion på beslag till olika typer av plåtar. Nedan sammanfattas den kunskap, som framkommit i en utredning av Camitz och Bergdahl (2007). Följande slutsatser dras beträffande vilka förhållanden, som kan påverka korrosionen för de olika beslagen:

- mest utslagsgivande är jordens fuktighet och möjligheten för syre att tränga ned till och eventuellt in i det aktuella beslaget i jorden
- även jordens elektriska ledningsförmåga har betydelse för korrosionshastigheten men bedöms vara underordnad syre-mobiliteten
- den allmänna (jämna) korrosionen bedöms vara den förhärskande på aktuella ytor av beslagen
- galvanisk korrosion bedöms ej aktuell för plåteslag så länge endast olika stålsorter av typen olegerat och låglegerat stål blandas med varandra

En analys av vilka spalter, som kan uppstå, på och i de olika plåteslagen visar att dessa kan variera från 5 à 10 mm vid träplåtar till 1 à 2 mm vid betong- och stålplåtar samt vid bergskor. I betongplåtskarvens inre delar är spalterna endast 0,3 – 1,4 mm och utrymmet är dessutom tillslutet av en låsbricka och den grövre delen av låspinnen. Analysen har baserats på toleranser från tillverkningsritningar och ett tillägg, som bedömts uppstå till följd av slagning.

Avgörande för korrosionens storlek på olika delar av beslagen är spalternas storlek och eventuell omsättning av jord och syresatt vatten i dessa. Teoretiska beräkningar visar att korrosionen i ovan nämnda spalter och hålrum totalt blir mycket liten, endast 0,002 – 0,014 μm om man antar att ingen omsättning av materialet i spalterna sker. Om man i stället extrapolerar erfarenhetsvärden från korrosionen i fritt vatten och jord erhålls korrosionshastigheter mellan 0,5 och 8,0 $\mu\text{m}/\text{år}$ i skarvglappen för plåarna och 0,05 – 1,05 $\mu\text{m}/\text{år}$ för de inre hål-

rummen i betongpålskarvarna. De högre av dessa värden har ansatts som karakteristiska värden på korrosionshastigheten. Dimensionerande värden på korrosionshastigheten har erhållits genom multiplicering med partialkoefficienten 1,5.

Med ledning av bedömda korrosionshastigheter och Pålkommisionens dimensioneringsanvisningar har korrosionen för olika delar av pålbeslagen ansatts dimensionerande värden i mm/100 år, som kan användas vid dimensionering av beslagen. Följande värden föreslås:

- för rörskarv till trä-trä och trä-betongpålar utvändigt: 1 mm/100 år
- för betongpålskarvens inre slutna delar: 0,2 mm/100 år (alla ytor)
- för betongpålskarvens övre och undre bottenplattor: 1,0 mm/100 år
- för bergskarv i spalt mellan hylsa och bergdubb: 1 mm/100 år (alla ytor)
- för hylsskarv till stålpile i invändig spalt: 1 mm/100 år (alla ytor)
- för stålytor med direkt anliggning mot jordgaller: dimensioneringsanvisning enligt Pålkommisionens Rapport 98, Bengtsson m.fl. (2000)

Ett alternativ till att dimensionera skarvbeslagen med en rostmån kan vara att skydda dem eller delar därav genom infettning förutsatt att fett skyddas från avnötning under påslagningen.

2.13 Korrosionsegenskaper hos olika ståltyper i jord

2.13.1 Järn och stål – definitioner och förklaringar

I Tabell 2.1 anges definitioner och en del förklaringar angående järn och stål.

Gränsdragning mellan olegerat och legerat stål, baserad på chargeanalys, sker med hjälp av gränsvärden, Tabell 2.2, för olika legeringsämnen, som anges i svensk standard SS-EN 10020, 2000.

Stål med låg legeringsnivå, mikrolegerade stål och låglegerade stål, har i allmänhet inte bättre korrosionshårdighet än ordinärt kolstål. Ett undantag är rosttröga stål, som har bättre korrosionshårdighet än kolstål i vissa atmosfärs-miljöer. Rosttrögt stål, som ibland kallas för Cor-Ten stål, är ett låglegerat stål med små legeringstillägg av krom, koppar, kisel och fosfor samt ofta också nickel. Rosttrögt stål fungerar bäst för konstruktioner utomhus där de omväxlade utsätts för fukt och torka. De

bör inte användas på konstruktioner, som ständigt är fuktiga eller i närheten av hav.

Rosttrögt stål får inte förväxlas med rostfritt stål. I **jord och vatten** har rosttrögt stål inte bättre korrosionshårdighet än vanligt kolstål.

Rostfritt stål kan indelas i grupper på olika sätt. Efter metallografisk struktur kan en indelning ske i:

- Ferritiska rostfria stål
- Martensitiska rostfria stål
- Austenitiska rostfria stål
- Duplexa rostfria stål
 - Austenit-ferritiska rostfria stål (det vanligaste duplexa rostfria stålet)
 - Martensit-austenitiska rostfria stål
 - Ferrit-martensitiska rostfria stål.

Efter legeringsämnen kan en indelning göras enligt:

- Kromstål (Cr-stål)
- Krom-nickelstål (Cr-Ni-stål)
- Krom-nickel-molybdenstål (Cr-Ni-Mo-stål).

I svensk standard SS-EN 10020, 2000 görs en indelning efter viktigaste egenskap i:

- Korrosionshårdiga rostfria stål
- Värmebeständiga rostfria stål (kallas ibland för eldhårdiga rostfria stål)
- Kryphållfasta rostfria stål (kallas också för varmhållfasta rostfria stål).

Rostfritt stål har generellt god korrosionshårdighet, men korrosionsegenskaperna beror av legeringssammansättningen. Därför varierar korrosionshårdigheten inte bara mellan olika grupper av rostfria stål utan också mellan olika stålsorter inom en bestämd grupp. Det finns alltså ett stort antal rostfria stål med olika korrosionsegenskaper, mekaniska egenskaper och olika svetsbarhet.

Antalet standardiserade rostfria stål har ökat mycket markant med europastandardiseringen. Det fanns 38 standardiserade rostfria stål i Sverige före europastandardiseringen. Numera är 160 rostfria stål standardiserade i svensk standard SS-EN 10088-1:2005.

Tabell 2.1.
Definitioner av järn
och olika stål.

Material	Definition
Järn	Järn kan förekomma i tre betydelser: 1. Grundämne med beteckning Fe, 2. Tekniskt rent järn, till exempel elektrolytjärn, 3. Legering med grundämnet järn som basmetall och med hög kolhalt, vanligen 2 – 4 mass-%, till exempel gjutjärn.
Stål	Legering med järn som basmetall och som innehåller, förutom max 2 mass-% kol (C), också ett eller flera andra legeringsämnen. (Några kromstål innehåller mer än 2 mass-% kol, men 2 mass-% är den vanliga gränsen mellan stål och gjutjärn.)
Olegerat stål eller kolstål	Stål som inte innehåller något legeringsämne med halt lika med eller högre än gränsvärdet enligt Tabell 2.2 .
Legerat stål	Stål som innehåller åtminstone ett legeringsämne med halt lika med eller högre än gränsvärdet enligt Tabell 2.2 .
Mikrolegerade stål	Stål som genom små tillsatser av vissa legeringsämnen, till exempel aluminium, vanadin och niob, och viss värmebehandling erhållit en finkornig struktur och en förhöjd sträckgräns. Begreppet mikrolegerat stål används inte inom europastandardiseringen
Låglegerat stål	Stål med sammanlagd legeringshalt, kol borträknat, under cirka 5 mass-%. Begreppet låglegerat stål används inte inom europastandardiseringen.
Höglegerat stål	Stål med sammanlagd legeringshalt, kol borträknat, över cirka 5 mass-%. Begreppet höglegerat stål används inte inom europastandardiseringen. Rostfritt stål är det vanligaste höglegerade stålet. Andra exempel är nickellegerade tryckkärlsstål för låga temperaturer och snabbstål, som är ett höglegerat verktygsstål med god slitstyrka och hållfasthet vid höga temperaturer.
Rosttrögt stål	Låglegerat stål med små legeringstillsatser av krom, koppar, kisel och fosfor och ofta nickel. Rosttröga stål har bättre korrosionshårdighet än kolstål i vissa atmosfärsmiljöer och fungerar bäst för konstruktioner utomhus, som omväxlade utsätts för fuktning och torkning. I jord och vatten har rosttrögt stål inte bättre korrosionshårdighet än vanligt kolstål.
Rostfritt stål	Stål innehållande minst 10,5 mass-% krom (Cr) och max 1,2 mass-% kol (C).
Syrafast stål, Syrafast rostfritt stål	Molybdenlegerat rostfritt stål. Molybdenhalten i det rostfria stålet bör överstiga 2 mass-% för att det skall räknas som ett syrafast stål. Namnet kommer från stålets relativt goda korrosionshårdighet i vissa syralösningar, till exempel koksyra använd vid tillverkning av pappersmassa enligt sulfitprocessen. Begreppet syrafast stål används inte inom europastandardiseringen.
Gjutjärn	Järn i gjutet tillstånd och med kolhalt över 2 mass-%, vanligen mellan 2 – 4 mass-%.
Gråjärn	Grafitiskt gjutjärn där grafiten förekommer som grafitfjäll. I grafitiska gjutjärn uppträder största delen av kolet som grafit. Kolet som grafit föreligger i ren form som fritt utskild grafit i grundmassan och är inte bundet till järnet i en kemisk förening.
Segjärn	Grafitiskt gjutjärn där grafiten förekommer som kulor (sfärer, noder). Segjärn har betydligt bättre hållfasthetsegenskaper och seghet än gråjärn. Korrosionshårdigheten i jord och vatten är ungefär likvärdiga för gråjärn, segjärn och kolstål.

Tabell 2.2.
Gränsdragning mellan
olegerat och legerat stål
enligt svensk standard
SS-EN 10020, 2000.

Legeringsämne	Gränsvärde mass-%
Aluminium, Al	0,30
Bor, B	0,0008
Vismut, Bi	0,10
Kobolt, Co	0,30
Krom, Cr	0,30
Koppar, Cu	0,40
Lantanider, La (vardera)	0,10
Mangan, Mn	1,65
Molybden, Mo	0,08
Niob, Nb	0,06
Nickel, Ni	0,30
Bly, Pb	0,40
Selen, Se	0,10
Kisel, Si	0,60
Tellur, Te	0,10
Titan, Ti	0,05
Vanadin, V	0,10
Wolfram, W	0,30
Zirkonium, Zr	0,05
Andra enstaka ämnen (utom kol, fosfor, svavel, kväve) (vardera)	0,10

2.13.2 Pålar av kolstål

Stålpålar tillverkas normalt i kolstål, det vill säga olegerat stål. Denna ståltyps korrosionsegenskaper har undersökts mest genom tiderna både vad gäller användningen i pålar och i rör och cisterner. Det, som ovan sagts om stålets korrosionsegenskaper i jord grundar sig främst på svenska och utländska undersökningar av korrosionsegenskaperna hos pålar av olegerat stål.

2.13.3 Pålar av låglegerat stål

Undersökningar har visat att måttliga variationer av sammansättningen hos vanliga kolstål (olegerade stål) och låglegerade konstruktionsstål inte betyder något för korrosionshårdigheten i form av medelavfrätning i jord. I jord och vatten har så kallade rosttröga stål, det vill säga kolstål med inlegerade låga halter av krom, fosfor och koppar, inte bättre korrosionshårdighet än normala kolstål. Eftersom dessa stål fordrar god tillgång på luftsyre för sin "rosttröghet", kan de ha sämre korrosionshårdighet än vanliga kolstål och låglegerade stål i syrefattiga miljöer, såsom vattenrik och tät jord. En vanlig kommersiell beteckning för rosttrött stål är Cor-Ten-stål.

2.13.4 Pålar av segjärn

Segjärn är en typ av gjutjärn, som har betydligt högre mekanisk hållfasthet än övriga typer av gjutjärn och materialet kan därför användas i lastbärande pålar. Segjärn har en avsiktligt

hög kolhalt, 3 – 4 vikts- %. En del av kolet förekommer som kulformad fri grafit i järnet, vilket ger denna typ av gjutjärn dess höga duktilitet. När pålar av segjärn började användas på 1980-talet uppkom frågan om segjärnets korrosion i jord. Korrosionsinstitutet genomförde av den anledningen en omfattande litteraturundersökning i ämnet. Man kom fram till följande:

- Jämförande amerikanska undersökningar av korrosionsbenägenheten hos oskyddade kolstålsrör och segjärnsrör har genomförts i omgrävd och återfylld jord. Resultaten visar att korrosionshastigheten är av samma storleksordning på segjärnsrör och stålrör, som grävts ned liggande i jorden.
- På sannolika skäl kan det antas att också oskyddade segjärnspålar och stålpålar, som drivs ned i ostörd jord uppträder på likartat sätt ur korrosionssynpunkt.
- Praktiska erfarenheter från många decenniers distribution av vatten och gas i jordförlagda ledningsnät tyder på en något bättre korrosionshårdighet vad avser gropfrätning hos segjärn än hos stål i jord. Möjligen skulle det grafitskikt, blandat med rost, som bildas på segjärnsytan vid korrosionen ha en svagt korrosionshämmande effekt.

I en annan litteraturundersökning jämfördes korrosionsbenägenheten hos olika typer av gjutjärn (segjärn, gråjärn och aducerjärn) och kolstål i sötvatten och havsvatten. En av slutsatserna av litteraturgranskningen var

- Det är en vanlig uppfattning att olegerade, grafithaltiga gjutjärn har bättre korrosionshårdighet i vatten än kolstål. Vad gäller medelavfrätningen har det inte framkommit mätvärden, som klart belägger denna uppfattning. Tendensen till gropfrätning förefaller dock vara mindre i gjutjärn än i kolstål.

En samlad bedömning är att korrosionsbenägenheten, avseende medelavfrätning, hos oskyddade segjärnspålar i jord och vatten kan jämföras med den hos oskyddade pålar av kolstål. Vad som i denna skrift sägs om korrosion på stålpålar gäller sålunda även för segjärnspålar. Segjärn tycks dock ha en svagt bättre hårdighet mot lokala korrosionsangrepp.

2.13.5 Pålar av rostfritt stål

I Pålkommisionens Rapport 93 (Camitz, 1994) trodde inte författaren att pålar av rostfritt stål skulle kunna komma till användning trots de rostfria stålens helt överlägsna beständighetsegenskaper i jord jämfört med kolstål.

Antagandet grundades på den höga kostnaden för rostfritt stål och att det därför inte skulle vara ekonomiskt möjligt att använda pålar av rostfritt stål. Vid utgivningen av Rapport 93 förekom inte heller pålar av rostfritt stål.

På senaste tid har dock rostfria pålar introducerats på marknaden i några länder däribland Sverige. Pålarna, som marknadsförs för närvarande, utgörs av begagnade stålrör från offshoreindustrin. De har använts som foderrör i borrhål genom havsbotten för uppföring av olja och naturgas. Hålen är borrhållade ned till ansevärd djup, flera kilometer. När borrhålet har övergivits har de rostfria foderörren dragits upp och överförts till annan användning, bland annat som lastbärande stålpålar.

Eftersom det numera förekommer pålar av rostfritt stål kommenteras de rostfria stålens korrosionsegenskaper i detta avsnitt.

Rostfria ståls metallurgiska uppbyggnad

Rostfritt stål är stål, som har tillförts ett eller flera legeringsämnen i vissa proportioner, så att stålytan, när den senare kommer i kontakt med fuktig luft, överdras av ett mycket tunt och tätt, några nanometer tjockt, oxidskikt. Oxidskiktet skyddar effektivt stålet från att rosta och skiktet bildas och "självläker" spontant och omedelbart i fuktig miljö om det skadas mekaniskt. Det utgörs i huvudsak av kromoxid och därför är huvudlegeringsämnet i rostfria stål krom (Cr). För att oxidskiktet ska få önskade egenskaper fordras att kromhalten är lägst ca. 10 %. Är kromhalten lägre är stålet inte längre rostfritt.

Andra legeringsämnen, som ofta används i rostfria stål, är nickel (Ni) och molybden (Mo). Nickel förbättrar framför allt stålets svetsbarhet och korrosionshårdighet. Molybden har redan vid låga halter mycket stark påverkan på stålytans passiverande och skyddande oxidskikt och därmed på stålets hårdighet mot både gropfrätning och spaltkorrosion. I vissa stålsorter förekommer även titan (Ti), koppar (Cu) och kväve (N). Halten kol (C) är alltid mycket låg i rostfria stål, numera vanligen 0,05 % eller lägre. Halten av legeringsämnen, och de inbördes proportionerna dem emellan, bestämmer en rad egenskaper hos det rostfria stålet och därmed dess användbarhet för olika tillämpningar och miljöer. Det gäller framför allt hållfasthet, duktilitet, svetsbarhet, värmetålighet och särskilt korrosionshårdigheten. Det finns alltså inte ett rostfritt stål, utan ett stort antal sådana stål, som alla har olika

materialegenskaper. För närvarande finns det över hundra rostfria stålsorter, som är standardiserade och lämpade för olika användningsområden och miljöer.

Förekomst av korrosion på rostfritt stål – angreppens utseende och praktiska betydelse

Även om namnet rostfritt stål antyder att stålet inte rostar kan rostfritt stål angripas under vissa förhållanden. De rostfria stålsorternas korrosionsegenskaper är väl kartlagda. Uppkommer angrepp på en rostfri konstruktion är orsaken vanligen att man valt fel stålsort för det aktuella användningsområdet. Angreppet hade alltså kunnat undvikas om valet av stålsort hade skett på ett sakkunnigt sätt. Här ska dock framhållas att korrosionsangrepp på rostfria stål är mycket ovanliga med tanke på den breda förekomsten av rostfritt stål i samhället.

I normala utomhusmiljöer är den vanligaste orsaken till angrepp på rostfritt stål hög kloridhalt i omgivande jord, vatten etc. Kloridjoner kan nämligen lokalt punktera stålytans skyddande skikt av kromoxid varvid det underliggande oskyddade stålet blir frilagt. I normalfallet återbildas kromskiktet spontant och korrosionen avstannar. Är däremot förhållandena i elektrolyten (vattnet, jorden etc.) ogynnsamma kan det uppstå en korrosionscell, som är verksam och korrosionen fortgår. Den korrosionscell, som uppstår, påminner om galvanisk (bimetallisk) korrosion på kolstål i kontakt med en ädlare metall såsom t. ex. koppar. I fallet med rostfritt stål blir det punktvis frilagda stålet anodiskt medan de oangripna stålytorna runtomkring blir katodiska och underhåller korrosionsprocessen på stålet i det punktvis skadade kromoxidskiktet. När väl korrosionen startat på rostfritt stål i jord går det lokala angreppet på djupet vanligen med högre hastighet än lokala angrepp på vanligt stål.

Av detta framgår att angrepp på rostfritt stål i normalfallet sker på en liten yta men att angreppsdjupet kan bli betydande. Detta gäller i jord, vatten och fuktig utomhusluft, som det är fråga om i denna skrift. Någon allmän (jämn) korrosion, som är den vanliga korrosionsformen på stålpålar av kolstål, förekommer inte på rostfritt stål i jord. Av denna anledning tillämpas inte rostmån på rostfria stål i jord eller vatten. Det rätta sättet att ta hänsyn till korrosionen på rostfria stål är i stället att sakkunnigt välja stålsort med hänsyn till användningsmiljön.

Eftersom angreppet kan gå på djupet relativt snabbt är man särskilt noga med val av lämplig rostfri stålsort till rör och plåt i jordförlagda rörledningar och cisterner. Detta eftersom ett enda frätangrepp, som går genom rör- eller cisternväggen medför att konstruktionen inte längre fyller sin funktion, nämligen att innehålla ett medium (vatten, bensin, gas etc.).

Huruvida sådana angrepp med stort djup men med liten area kan ha betydelse för bärförmågan hos pälår av rostfritt stål kan diskuteras. Det troliga är att enstaka djupa punktangrepp med förhållandevis liten yta, t.ex. mindre än någon cm², knappast kan påverka pälårens bärförmåga.

Korrosionstyper på rostfritt stål i jord

De korrosionstyper, som kan uppträda på rostfria stål i jord är:

- gropfrätning (punktfrätning)
- spaltkorrosion
- spänningskorrosionssprickning

Gropfrätning uppstår spontant var som helst på stålytan vid förhöjd kloridhalt i korrosionsmediet. Angreppsytan är vanligen förhållandevis liten, normalt mindre än en cm².

Spaltkorrosion sker i trånga spalter med en vattenfilm, till exempel under påkrympta eller i löst gängade förband. Spalter kan även uppstå under olikartat packad jord mot den rostfria stålytan. Denna form av spaltkorrosion har likartad mekanism som den i luftningsceller. Angreppsytan vid spaltkorrosion är ofta större än vid gropfrätning. Gropfrätning och spaltkorrosion orsakas av klorider, och i vissa fall av sulfider bland annat i jord och bottensediment. Både gropfrätning och spaltkorrosion kan av olika orsaker uppstå i eller invid olämpligt utförda montagesvetsar. Dessa båda korrosionstyper motverkas främst genom hög halt av legeringsämnen krom och molybden samt viss halt nickel i stålet. Tillsats av kväve förbättrar hårdigheten mot gropfrätning och spaltkorrosion.

Spänningskorrosionssprickning förekommer endast vid avsevärt förhöjd temperatur, högre än 50 – 60 °C. Rostfria stålplåtar slagna i jord kan således inte utsättas för spänningskorrosionssprickning. I jord, som ju i sig har låg temperatur, kan spänningskorrosionssprickning däremot uppkomma på en rostfri rörledning i vilken den transporterade vätskan, t.ex. ett processvatten, har hög temperatur och där rören är utsatta för mekaniska spänningar över en viss kritisk gräns. Vid spänningskorrosion

föreligger inget synbart angrepp på stålytan annat än hårfina sprickor. Dessa utgör anvisning för sprickutveckling, dvs. fortsatt tillväxt av sprickan på djupet. Utsätts stålet för mekanisk belastning över en viss gräns spricker stålet.

Kunskapsläget beträffande rostfria ståls beständighet i jord

Det har genom åren genomförts åtskilliga systematiska stora undersökningar av rostfria ståls beständighet i jord, däribland några i Sverige. Därutöver avslutade Swerea KIMAB AB nyligen en mycket omfattande fältundersökning där ca. 800 långa rör och band av åtta olika rostfria stålsorter varit nedgrävda fyra till fem år på sju olika provplatser i Sverige och södra Frankrike, Sjögren m.fl. (2008). Dessa undersökningar har i första hand varit inriktade på att kartlägga de olika stålsens lämplighet som material i rör för jordförlagda rörledningar. Så vitt bekant har endast en undersökning genomförts med rostfria rörpålar, som drivits ned vertikalt i jord. Denna refereras i Avsnitt 3.1.9 i denna rapport.

2.14 Korrosion i naturligt vatten och i utomhusluft

På pälår och spont i stillastående söt- eller havsvatten avtar korrosionen, på grund av avtagande syrehalt, med djupet under vattenytan. I strömmande vatten kan korrosionen dock bli betydande även på större djup. Kalkfällande sötvatten hämmar korrosionen. I kalkfattiga regioner är pH-värde, alkalinitet och kalciumhalt låga i sjöar och vattendrag, vilket ökar korrosionen. Havsvatten är, på grund av sin höga salthalt, mera korrosivt än sötvatten. I hamnar och vikar kan havsvattnet vara utspädd med sötvatten från utströmmande vattendrag och grundvatten. Förekomst av alger eller dylikt på stål i havsvatten kan öka korrosionshastigheten. Storleken på dimensionerande korrosion i olika typer av vatten redovisas i Appendix 1 i Pålkommisionens Rapport 93, Camitz (1994).

Avgörande för korrosionen i utomhusatmosfär är hur långa perioder stålytan är täckt av vatten, den s.k. våttiden, och förekomst av korrosionsstimulerande ämnen i fuktfilmen. Känner man våttiden och i vilken miljö stålytan exponeras kan korrosionshastigheten beräknas. Se internationell standard ISO 9223 och 9224.

3. Erfarenheter av korrosion i jord

3.1 Erfarenheter av bärstål i jord

3.1.1 Korrosion i jord enligt Pålkommisionens Rapport 93 – Erfarenheter från tidigare fältundersökningar av korrosion i jord

I början av 1990-talet genomfördes i Pålkommisionens regi en sammanställning av erfarenheter från fältundersökningar av korrosion och korrosionsskydd av stål i jord och naturliga vatten. Resultaten är sammanställda i Pålkommisionens Rapport 93 (Camitz, 1994). I rapporten sammanfattas samtliga svenska och utländska fältundersökningar av korrosion på stålplåtar i jord, vatten och bottensediment, vilka var kända i början av 1990-talet då utredningen genomfördes. De undersökningar, som gällde stålplåtar i jord, var:

A. Svensk långtidsundersökning av korrosion på stålplåtar i jord (Avsnitt 5.1.1 i Pålkommisionens Rapport 93)

B. Svensk undersökning av korrosionen på stålplåtar i grundvattenzonen (Avsnitt 5.1.2 i Pålkommisionens Rapport 93)

C. Svensk undersökning av korrosion på stål i uppgrävd och återfylld jord (Avsnitt 5.1.3 i Pålkommisionens Rapport 93)

D. Svensk undersökning av lokal korrosion på vertikala stålstänger i grundvattenzonen (Avsnitt 5.1.4 i Pålkommisionens Rapport 93)

E. Amerikanska undersökningar av korrosionen på stålplåtar i jord (Avsnitt 5.1.5 i Pålkommisionens Rapport 93)

F. Norska undersökningar av korrosionen på stålplåtar i jord med hög kloridhalt (Avsnitt 5.1.6 i Pålkommisionens Rapport 93)

G. Japanska undersökningar av korrosionen på stålplåtar i jord (Avsnitt 5.1.7 i Pålkommisionens Rapport 93)

H. Undersökning av korrosionen på stålplåtar i jord med ständig tjäle (Avsnitt 5.1.8 i Pålkommisionens Rapport 93)

Resultaten från några av dessa undersökningar refereras kortfattat i det följande. De resultat, som inte refereras här, behandlas längre fram i denna rapport.

A. Svensk långtidsundersökning av korrosion på stålplåtar i jord (Avsnitt 5.1.1 i Pålkommisionens Rapport 93)

Under perioden 1950 till ca 1980 genomförde Statens Järnvägars geotekniska kontor en undersökning, som innebar långtidsexponering av ett stort antal långa stålstänger, som hade drivits ned på 19 olika platser i Sverige. En statistisk utvärdering av den stora mängden undersökningsresultat refereras i Avsnitt 3.1.5, Statens Järnvägars undersökningar av korrosion på stålplåtar – Statistisk bearbetning av korrosionshastigheter i denna rapport.

B. Svensk undersökning av korrosionen på stålplåtar i grundvattenzonen (Avsnitt 5.1.2 i Pålkommisionens Rapport 93)

Korrosionsinstitutet (nu Swerea KIMAB AB) och Geotekniska institutet exponerar sedan år 1981 massiva stålplåtar i grundvattenzonen på fem olika provningsplatser med olika jordlagerföljd. Hittills har plåtar tagits upp för utvärdering av korrosionen efter cirka 10 års exponering i jorden. Resultaten från dessa utvärderingar refereras i Avsnitt 3.1.2, Korrosionsundersökning på massiva stålplåtar i grundvattenzonen i denna rapport.

Swerea KIMAB AB och Statens geotekniska institut drar för närvarande upp och utvärderar ytterligare provplåtar från provningsplatserna. Dessa plåtar har nu stått drygt 28 år i jorden. Därmed kommer man att förfoga över ett unikt undersökningsmaterial, eftersom det inte har genomförts någon liknande undersökning av korrosion på stålplåtar i jord under så lång tid vare sig i Sverige eller utomlands.

C. Svensk undersökning av korrosion på stål i uppgrävd och återfylld jord (Avsnitt 5.1.3 i Pålkommisionens Rapport 93)

År 1979 påbörjade dåvarande Korrosionsinstitutet en provserie med långtidsexponering i jord av plattstänger av kolstål. Stängerna är tänkta att motsvara tunga stålkonstruktioner, bl.a. lastbärande stål balkar, som grävs ned eller som på annat sätt installeras i omgrävd jord. Exponeringen sker på sju provplatser med olika jordförhållanden. Stängerna grävdes ned i provgropar dels stående vertikalt dels liggande på två olika djup. På varje plats anordnades fem likadana provgropar för att möjliggöra intagning av prover efter olika långa exponeringstider. Hittills har plattstångsprover tagits in och utvärderats efter två olika långa exponeringsperioder. Resultaten från utvärdering av de vertikalt nedgrävda stängerna refereras i Avsnitt 3.1.3 och 3.1.4, "Korrosionsjämförelse mellan nedgrävda vertikala stålstänger och neddrivna stålplåtar" i denna rapport.

Swerea KIMAB AB och Statens geotekniska institut tar för närvarande in och utvärderar ytterligare stålstänger från samtliga provningsplatser samtidigt som man tar in kvarvarande stålplåtar.

År 1983 utökades undersökningsprogrammet med exponering av plåtar av olika metaller däribland kolstål. Provpåtarna grävdes ned i provgropar intill groparna med plattstänger. Även i denna provserie sker exponering av prover på två olika djup i lika provgropar intill varandra. Under 1990-talet utökades denna serie med exponering av provplåtar i moränjord på två platser samt i fyllningsjord på en plats. Provpåtar har tagits in och utvärderats i några olika omgångar, dvs. efter olika långa exponeringsperioder. Resultaten från dessa utvärderingar refereras i Avsnitt 3.1.10 "Korrosion på nedgrävda provplåtar av kolstål i jord" i denna rapport.

D. Svensk undersökning av lokal korrosion på vertikala stålstänger i grundvattenzonen (Avsnitt 5.1.4 i Pålkommisionens Rapport 93)

Under 1950- och 1960-talen, då flera överföringskraftledningar från Norrland till Syd- och Mellansverige byggdes ut, sattes Vattenfall ned provstänger av obehandlat och varmförzinkat stål i jorden på ett större antal stolpplatser i kraftledningsgatorna. Avsikten var att undersöka korrosionshastigheten i olika jordar och grundvattenförhållanden. Undersökningen refereras här i korthet.

Proverna utgörs av vinkelstänger med längden 1,5 eller 2,5 meter. De grävdes ned vertikalt så att ett par decimeter stack upp över markytan. På varje provplats sattes flera stänger av varje sort ned, vilket medgivit utvärdering av korrosionen efter olika långa exponeringstider. Troselius (1991) vid Vattenfall sammanställde resultat från undersökningen av provstänger av obehandlat stål, som hade stått 10 till 20 år i jorden på olika provplatser. Resultatet medgav en utvärdering av samband mellan maximalt lokalt korrosionsangrepp och jordart respektive grundvattennivå, se Tabell 3.1. Vid denna tidpunkt fanns inte tillräckligt underlag för en sådan sambandsanalys för lerjordar, varför lera saknas i tabellen.

Slutsatserna från undersökningen visar att grundvattenytan har stor betydelse för det största korrosionsangreppets djup och läge:

- På en provstång, som står i grundvattnet, uppstår det en utpräglad "korrosionszon" på stången kring grundvattenytan
- Ligger grundvattenytan konstant nära markytan (inom någon decimeter från markytan) uppstår ett skarpt avgränsat parti med förhöjd avfrätning på stången
- Varierar grundvattennivån med årstiderna blir den maximala avfrätningen mindre genom att angreppet sprids ut över en större del av stången

Tabell 3.1
Samband mellan maximal avfrätning på vertikala stålstänger och jordart respektive grundvattenytans (GW) läge i Vattenfalls undersökningar.

Grundvattenytans dominerande läge	Maximal avfrätning, µm/år	
	Morän	Torv
GW-ytan i markbandet	15	40
Varierande GW-yta på stången	10	30
GW-ytan ständigt under stången	5	- -

Jordlagerföljd	Antal provplatser	Maximal avfrätning ¹⁾ µm/år	Medelavfrätning ²⁾ µm/år
Lerjordar	12	13-82	6-8
Torvjordar	4	29-40	4-8
Moränjordar	11	5-19	2-8

1) Korrosionshastighet på stångens mest angripna parti uppmätt med mikrometerskruv.

2) Genomsnittlig korrosionshastighet mätt genom massförlustbestämning.

Tabell 3.2.
Maximal avfrätning
och medelavfrätning
på provstänger av
obehandlat kolstål,
vertikalt nedgrävda i
jord i Vattenfalls un-
dersökningar.

- Den maximala avfrätningen blir lägst där grundvattenytan konstant, under hela året, ligger under stängen

En senare sammanställning av Vattenfalls samtliga undersökningsresultat erhållna fram till slutet av 1980-talet redovisas i Tabell 3.2. Av sammanställningen framgår att den maximala avfrätningen varierar inom vida gränser för de tre jordlagerföljderna, och att den kan vara många gånger större än medelavfrätningen. Det bör påpekas att den största maximala avfrätningen påträffades i "markbandet" (inom någon decimeter från markytan) på platser där grundvattnet står i markytan. Störst maximal avfrätning uppstod i lerjord medan medelavfrätningen är så liten att det inte går att finna samband mellan denna och jordlagerföljden.

E. Amerikanska undersökningar av korrosionen på stålplåtar i jord (Avsnitt 5.1.5 i Pålkommisionens Rapport 93)

Romanoff (1957) vid U S National Bureau of Standards, undersökte 44 tunga stålplåtar (H-profiler) och stålspont, som hade stått nedslagna mellan 8 och 50 år i olika jordar. De flesta undersökningsobjekten utgjordes av spontplankor, som hade stått i hamnar i insjöar och floder samt i slussar. Romanoff kunde inte utvärdera korrosionshastigheten genom viktsförlustbestämning, eftersom objektens ursprungsvikt inte var kända. I stället gjorde han framför allt ingående okulära besiktningar av stålplåtans utseende. Därutöver mätte han djupet i lokala korrosionsangrepp. Mätresultaten redovisas som största djupet i lokala korrosionsangrepp på olika ställen utmed objektet. Resultaten redovisas framför allt som okulära iakttagelser. Några av slutsatserna var i citat:

- Inga märkbara korrosionsangrepp förekom på stålplåtar eller stålspont under grundvattenytan i ostörd jord, oavsett jordens egenskaper

- Över grundvattenytan och i fyllningsjord innehållande slagg varierade korrosionshastigheten men den var inte hög
- Ostörda jordar har så låg syre(oxygen)halt på några få fots djup under markytan eller under grundvattenytan att inga märkbara korrosionsangrepp uppstår på stålplåtar
- Det fanns ingen korrelation mellan korrosionens storlek på plåtarna och någon av de jordegenskaper, som har korrelerats med korrosionen på nedgrävda rörledningar. Möjligen fanns det ett svagt samband mellan jordens pH-värde och plåtarnas korrosion vid grundvattenytan.

F. Norska undersökningar av korrosionen på stålplåtar i jord med hög kloridhalt (Avsnitt 5.1.6 i Pålkommisionens Rapport 93)

Tungesvik, Moum och Fischer vid Norges Geotekniska Institut undersökte sju stålplåtar, som stått nedslagna i jord mellan 10 och 70 år i grundläggningar under olika slags byggnadsverk. De rapporterade:

- Den största medelavfrätningen var mellan 20 och 40 µm/år i lera, som fortfarande håller en salthalt på upp till 30 g/liter i porvattnet (Lera med havsvatten som porvatten och med jordresistiviteten ca. 1 Ω · m, författarens anmärkning.)
- I lerjordar där den ursprungliga salthalten har avtagit på grund av urlakning och där jordresistiviteten ligger mellan 20 och 100 Ω · m var korrosionshastigheten inte högre än 2 – 10 µm/år
- Resultaten är endast tillämpliga på förhållandena i vattenmättade sediment under torrskorpan. I torrskorpan i salthaltig lera kan korrosionshastigheten vara högre

G. Japanska undersökningar av korrosionen på stålplåtar i jord (Avsnitt 5.1.7 i Pålkommisionens Rapport 93)

Ohsaki (1982), professor vid Universitetet i Tokyo, har genomfört en omfattande korrosionsundersökning på 130 stålplåtar, som slagits till 15 m djup i naturligt lagrad jord på 10 provplatser med olika jordförhållanden.

Stålplåtarna bestod av 15 m långa vinkelstänger (10x100x100 mm) med kvarsittande vals-hud. De drevs ned i ostörd jord. På en prov-plats göts överändan av några plåtar in i armerad betong så att plåtarna kom i kontakt med armeringsstålen. Syftet var att undersöka om kontakten med armeringen (som har en ädel korrosionspotential) skulle kunna orsaka förhöjd korrosion (genom galvanisk påverkan) på plåtarna utanför betongingjutningen. Plåtarna drogs upp i tre olika omgångar, efter 2, 5 och 10 års exponering. Rosten avlägsnades genom maskinell stålborstning och dimensionsminskningen, orsakad av korrosionen, mättes med mikrometerskruv i ett stort antal punkter på varje stång. Korrosionshastigheten är redovisad dels som "största lokala medelavfrätning" på varje påle dels som "medelvärde av största medelavfrätning" på samtliga plåtar på varje provningsplats.

När professor Ohsaki hade resultat efter 10 års exponering rapporterade han bl.a.

- De uppdragna plåtarna var i utmärkt skick
Påverkan av korrosionen var minimal och oberoende av jordens karaktär.
- Den största medelavfrätningen (korrosions-hastigheten på det mest korroderade partiet) på en enstaka påle efter 10 år var 13 µm/år. Medelavfrätningen i genomsnitt för samtliga plåtar i hela undersökningen var 6 µm/år.
- Medelavfrätningen avtog markant med ökad exponeringstid.
- Korrosionen var något förhöjd i den luftade zonen från markytan ned till ca tre meters djup. Därunder var korrosionen oberoende av djupet.
- Ingen förhöjd korrosion kunde observeras vare sig vid jordartsgränser eller i skikt med strömmande grundvatten.
- Ingjutning av övre delen av stålplåtarna i armerad betong skyddade den ingjutna pål-delen effektivt. Ingen skadlig galvanisk

korrosionseffekt kunde observeras på det nakna stålet närmast under betongingjutningen.

- Det är svårt att urskilja någon speciell jord-parameter, som påverkade korrosionen på ett avgörande sätt. Möjligen kan ett visst samband skönjas mellan korrosionen och jordens pH-värde.
- Stålets kemiska sammansättning (kolstål, kopparhaltigt kolstål eller "rosttrögt" stål) hade ingen urskiljbar påverkan på korrosionshastigheten.

Undersökningsresultaten är sammanfattade i Tabell 3.3.

H. Undersökning av korrosionen på stålplåtar i jord med ständig tjäle (Avsnitt 5.1.8 i Pålkommisionens Rapport 93)

Romanoff (1957), vid National Bureau of Investigations (NBS) i USA, undersökte korrosionen på 9 stålplåtar, som stått nedslagna mellan 6 och 11 år i tre olika permafrostjordar i Alaska

Jorden hade en övre aktiv zon där den årligen omväxlande frös och tinade ned till ungefär 1,5 m under markytan. Under denna zon låg permafrost, dvs. jorden var ständigt frusen. Romanoff rapporterar i citat:

- Undersökningarna visade att stålplåtarna var opåverkade av korrosion i permafrosten. Plåtarnas ursprungliga valshud var intakt på hela den del av pålen, som stått i permafrosten.
- Det fanns inga tecken på någon påtaglig avfrätning varken vid markytan eller vid gränsen mellan den aktiva zonen och permafrosten.
- Med undantag av några få djupare frätgropar (djup upp till 0,7 mm) på två plåtar var frätgropsdjupet aldrig större än 0,5 mm på den delen av plåtarna, som stått i den aktiva zonen.

Resultaten från denna undersökning av korrosionen i permafrost överensstämmer med de resultat som NBS publicerat från tidigare korrosionsundersökningar på stålplåtar i andra delar av USA (se tidigare i detta rapportavsnitt).

Provplats	Jordlagerföljd	Antal undersökta pålar, som stått 10 år i jord	Största medelavfrätning, efter 10 år, µm/år	Totalt antal undersökt a pålar	Medelvärde av samtliga pålars medelavfrätning, µm/år
1. Tokyo	Lera (alluvial)	3	5	9	2
2. Okayama	Silt, sand, lera (återvunnen havsbotten)	2	11	12	6
3. Hiroshima	Sand, sandig silt	4	10	10	6
4. Kanagawa	Silt (eolisk)	3	10	9	6
5. Hyogo	Sand, silt (Återvunnen havsbotten)	3	8	15	4
6. Tokyo	Silt, sand, grus, silt (varierande GW-yta, 7-10 m, strömmande grundvatten)	3	13	9	5
7. Tokyo	Lera, sand, lera, sand (30 m från likströmsdriven järnväg)	3	11	12	7
8. Akita	Silt (återvunnen havsbotten i bräckvatten)	3	7	9	5
9. Saitama	Sand, siltig lera	2	5	11	3
10. Okayama	Platsen belägen 500 m från plats nr 2, samma jordart	4	13	30	6

Not: De korrosionsvärden, som anges i denna Tabell 3.3 är de korrekta. I motsvarande Tabell 8 i Pålkommisionens Rapport 93 har tyvärr felaktiga värden angivits.

Tabell 3.3
Sammanställning av resultaten från den japanska undersökningen av stålplåtar i jord. Plåtarna drogs upp efter 2, 5 och 10 års exponering.

3.1.2 Korrosionsundersökningar på stålplåtar i grundvattenzonen

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 "midjebildning" på plåtarna och därmed en lokal försvagning av bärförmågan vid grundvattenytan. För att klarlägga frågan genomför Korrosionsinstitutet (numera Swerea KIMAB AB), i samarbete med Statens geotekniska institut, en fältundersökning där tunga stålplåtar långtidsexponeras i jord genom grundvattenytan på fem provningsplatser.

Stålplåtarna, som ingår i undersökningen, utgörs av så kallade X-plåtar av varmvalsat kolstål med beteckningen X100 och dimensionen 100 x 14 mm, dvs. med bredden 100 mm och flänstjockleken 14 mm. Plåtarnas längd var 2,5 m, med undantag för exponeringen i vattenmättad grusig sand i Linköping där plåtens längd var 1,5 m. Plåtarna avslutades upptill med en skarvplatta.

Jordförhållandena och den huvudsakliga kemiska och fysikaliska jordkaraktärstiken på provningsplatserna anges i Tabell 3.4.

De 2,5 m långa plåtarna slogs eller trycktes ned i den ostörda jorden. På varje plats drevs fem plåtar ned, vilket medger upptagning och utvärdering efter fem olika långa exponeringar, se Figur 3.1. På de fyra provningsplatserna med olika typer av lera står grundvattenytan vid plåtarnas övre del. På platsen med sand (Linköping) står en serie plåtar helt över grundvattenytan och en annan serie i grusig sand helt under grundvattenytan. Hittills har plåtar tagits in och undersökts efter fem och nio års exponering. Nyligen gjordes ytterligare en bearbetning av resultaten från intagningen av plåtar efter nio års exponering. Bland annat utvärderades mätningar av den tvärsektionsminskningen, som plåtarna fått till följd av korrosionen. I det följande jämförs dessa nya resultat med resultaten efter 5 års exponering.

Korrosionshastigheten mätt som jämn korrosion och största lokala korrosion (i den djupa frätgropen) efter fem och nio år i jorden visas i Figur 3.2, se vidare Vinka m. fl. (2002). Den största tvärsektionsminskningen för varje plåte samt var på plåten denna förekom, visas i Tabell 3.5.

Tabell 3.4.

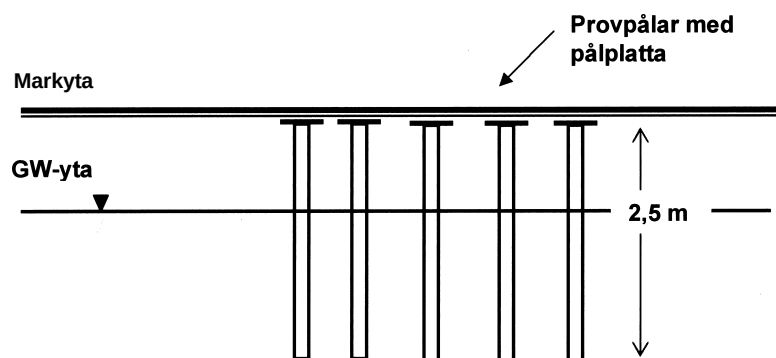
Jordens karaktär på provningsplatserna i Korrosionsinstitutets och Statens geotekniska instituts undersökning av korrosion på stålplåtar genom grundvattenytan. Olika hetererna i värdena beror på att jordanalyser har gjorts på prover tagna på olika djup.

Provningsplats	Jordart	Vattenkvot mass-% av torr jord	Resistivitet ohm·m	pH-värde pH(H ₂ O)	Kloridhalt mg Cl ⁻ /kg torr jord	Organisk halt mass-% av torr jord
Enköping	Glacial lera	31-32	32,9-34,5	6,6-6,9	20	0,7-1,6
Sollentuna	Postglacial lera	41-48	11,7-37,7	4,3-6,3	22-34	2,2-2,9
Göteborg	Gyttig lera	41-54	3,5-17,1	4,4-7,4	170-2200	3,7-4,6
Stockholm	Gyttig lera	43-51	10,5-52,2	4,2-5,4	30-140 *)	2,8-4,5
Linköping – övre	Sand	7	2620	5,7	20	0,5
Linköping – nedre	Vattenmättad grusig sand	13	179	8,0	20	0,2

*) Den delvis höga kloridhalten på provningsplats Stockholm kan förklaras dels med att leran har avsatts i bräckt vatten (bräckvattensediment) dels med många års ogräsbekämpning med s.k. "Klorex".

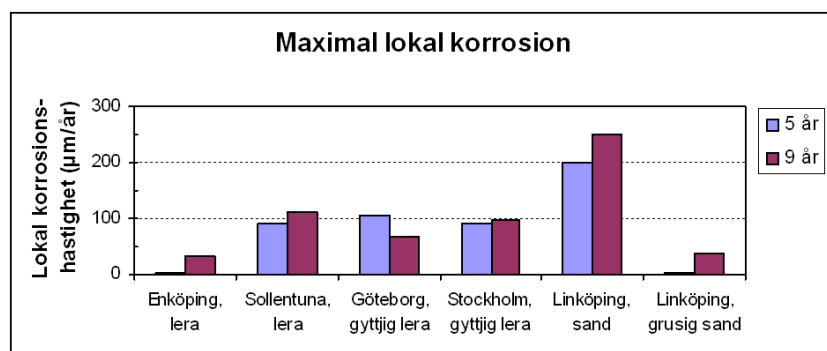
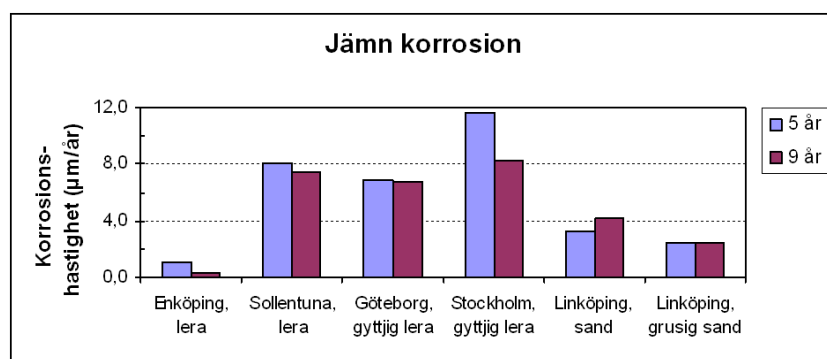
Figur 3.1.

På varje provningsplats slogs fem X-pålar intill varandra för senare uppdragning och undersökning efter olika långa exponeringsperioder.



Figur 3.2.

Korrosionshastighet, jämn korrosion (medelavfrätning) och maximal lokal korrosionshastighet (nederst) på nedslagna X-pålar av kolstål efter fem och nio års exponering i Korrosionsinstitutets och Statens geotekniska instituts undersökning med pålar genom grundvattenytan.



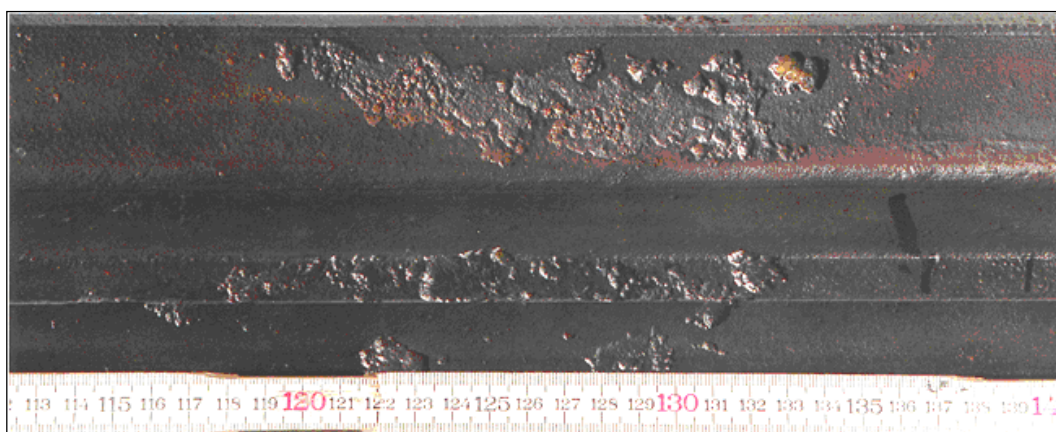
Av Figur 3.2 framgår att den jämna korrosionshastigheten (medelavfrätningen) varierade mellan 1 och 8 $\mu\text{m}/\text{år}$ efter 9 års exponering med den högsta korrosionshastigheten i Stockholm i gytjig lera. En jämförelse mellan korrosionshastigheterna efter 5 respektive 9 års exponering tyder på en minskande korrosionshastighet med tiden vid provningsplatserna Enköping och Stockholm, men på provningsplats Enköping var korrosionen så liten att skillnaden, åtminstone till en del, kan utgöras av mätfel vid vägningen av de tunga pålarna. Vid övriga provningsplatser var korrosionshastigheten praktiskt taget oförändrad med tiden.

Den högsta lokala korrosionshastigheten (250 $\mu\text{m}/\text{år}$) uppmättes på pålen från Linköping i sand över grundvattenytan. Motsvarande jämn korrosionshastighet var 4 $\mu\text{m}/\text{år}$. Pålen hade flera djupa frätgropar längs hela sin längd, Figur 3.3. Det var endast på denna påle, som det fläckvis förekom egentlig gropfrätning tillsammans med mera utbredd lokal korrosion. Övriga stålpålar hade ett jämnt korrosionsangrepp jämte lokala angrepp. Figur 3.4

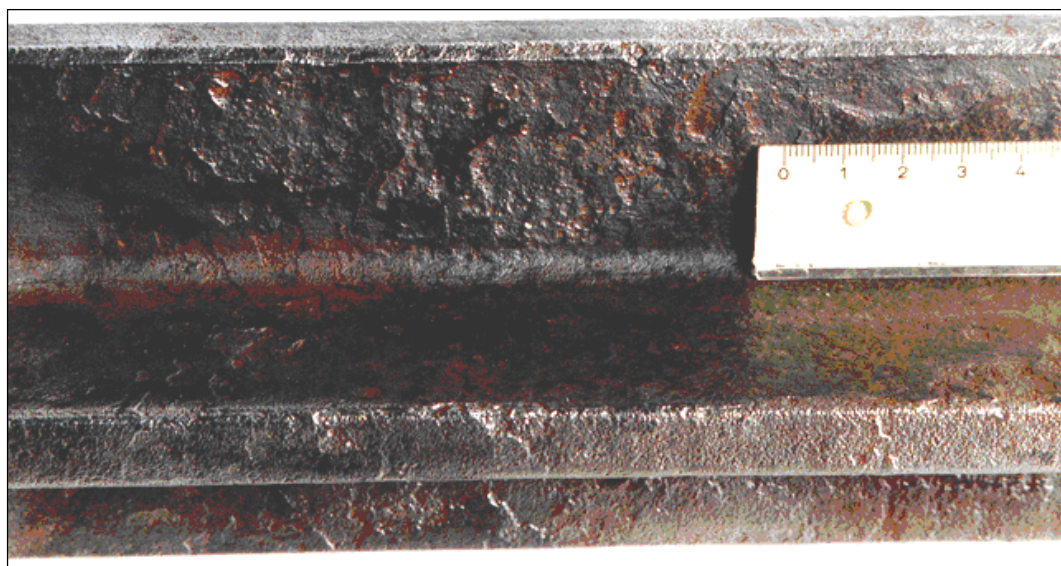
visar pålen från Stockholm med den högsta jämna korrosionshastigheten.

De största lokala korrosionsangreppen uppkom alltså i sanden i den omräknade zonen över grundvattenytan. Det är tydligt att uppkomsten av lokala korrosionsangrepp med djupa frätgropar gynnas av god luftning av jorden. Ett exempel är jämförelsen mellan korrosionsangreppen på pålar från provningsplatsen Linköping; den ena pålen exponerad i sand i icke vattenmättad jord över grundvattenytan och den andra pålen exponerad i vattenmättad grusig sand under grundvattenytan. Det var endast på pålen placerad över grundvattenytan, som det fanns kraftiga lokala korrosionsangrepp. På pålen i vattenmättad grusig sand fanns inga djupa frätgropar och den maximala lokala korrosionshastigheten var 40 $\mu\text{m}/\text{år}$ efter 9 års exponering, Figur 3.5. Pålens jämna korrosionshastighet var 3 $\mu\text{m}/\text{år}$.

Tvärsnittsminskningen var, trots betydande lokal korrosion, liten på samtliga pålar. Ingen utpräglad midjebildning hade uppkommit.

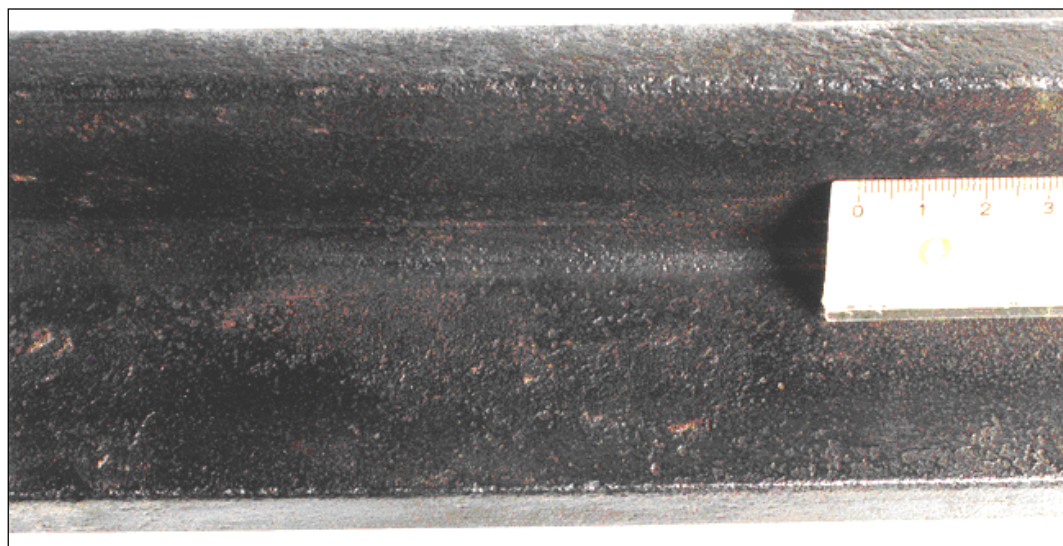


Figur 3.3.
Påle exponerad 9 år i sand över grundvattenytan på provningsplats Linköping. Lokala korrosionsangrepp med många förhållandevis djupa frätgropar i position 1,15 – 1,4 m under skarvplattan på pålens överände. Den djupaste frätgropen är 2,3 mm.



Figur 3.4.
Påle exponerad 9 år i gytjig lera på provningsplats Stockholm. Angreppens position: 0,3 – 0,6 m under skarvplattan på pålens överände. Jämnt rostan grepp med en del lokala, djupare angrepp i form av frätgropar. Största frättdjup: 0,8 mm.

Figur 3.5.
Påle exponerad 9 år i vattenmättad grusig sand under grundvattenytan på provningsplats Linköping. Angreppens position: 0,1 – 0,25 m under skarvplattan på pålens överände. Jämn avrostning med små och grunda frätgropar. Maximalt frätdjup: 0,3 mm.



Tabell 3.5.
Tvärsnittsminskning i det mest korroderade tvärsnittet på X-pålar av kolstål efter 9 års exponering i jord i Korrosionsinstitutets och Statens geotekniska instituts korrosionsundersökning med tunga X-pålar genom grundvattenytan.

Provningsplats	Jordförhållanden	Mest angripna tvärsnitt	
		Avstånd från pålens överyta m	Tvärsnittsminskning %
Enköping	Glacial lera	0,4	0,7
Sollentuna	Postglacial lera	0,4	1,7
Göteborg	Gyttig lera	0,1	0,6
Stockholm	Gyttig lera	0,4	2,6
Linköping – övre	Sand över grundvattenytan	0,5	1,1
Linköping – nedre	Grusig sand under grundvattenytan	0,4	0,3

Störst tvärsnittsminskning, 2,6 %, uppmättes på pålen i den gyttjiga leran på provningsplats Stockholm.

Slutsatser:

- Både hastigheterna för den jämna korrosionen och den lokala korrosionen (gropfrätningen) är i stort sett lika under de två olika långa exponeringarna. Detta innebär att vare sig hastigheterna för medelavfrätningen eller den lokala korrosionen minskar med tiden i sådan utsträckning att det har någon praktisk betydelse.
- Den lokala korrosionen var störst i den permeabla och högresistiva sanden över grundvattennivån på provplats Linköping. Där är korrosionshastigheten i de djupaste lokala angreppen 0,25 mm per år. Detta

stödjer det teoretiska resonemanget i Pålkommisionens Rapport 93 om att lokal korrosion på obelagt stål gynnas i permeabel, välluftad jord, medan denna typ av korrosion inte blir lika kraftig i tät och dåligt luftad jord, såsom ler- och siltjordar med hög vattenkvot.

- Tvärsnittsminskningen var, trots betydande lokal korrosion, liten på samtliga pålar. Ingen utpräglad midjebildning hade uppkommit. Störst tvärsnittsminskning, 2,6 %, uppmättes på pålen i den gyttjiga leran på provningsplats Stockholm.
- Korrosionen kan kompenseras med rostmån, lämpligt vald för aktuell jordlagerföljd.

3.1.3 Korrosion på nedgrävda vertikala stålstänger

I fältundersökningen, som utförs av Korrosionsinstitutet (numera KIMAB AB), ingår förutom stålplåtar också stålstänger, som exponeras nedgrävda i provgropar, det vill säga i jord, som grävts upp och därefter återfyllts över proverna, Camitz & Vinka (1988; 1989) och Camitz (1994).

Stålstängerna med blåstrad ståltyta och längden 2 m och dimensionen 100 x 15 mm exponeras i provgropar på samma provningsplatser som stålplåtarna. I varje provgrop exponeras stålstänger vertikalt nedgrävda på djupet cirka 0,5 m (avståndet från stålstängernas övre kant till markytan). Förutom vertikala stålstänger exponeras också stålstänger liggande på två olika djup, 0,7 respektive 1,7 m under markytan.

I Figur 3.6 visas uppmätta korrosionshastigheter avseende jämn korrosion och maximal lokal korrosion för nedgrävda vertikala stålstänger efter ungefär fyra och elva års exponeringstid vid olika provningsplatser.

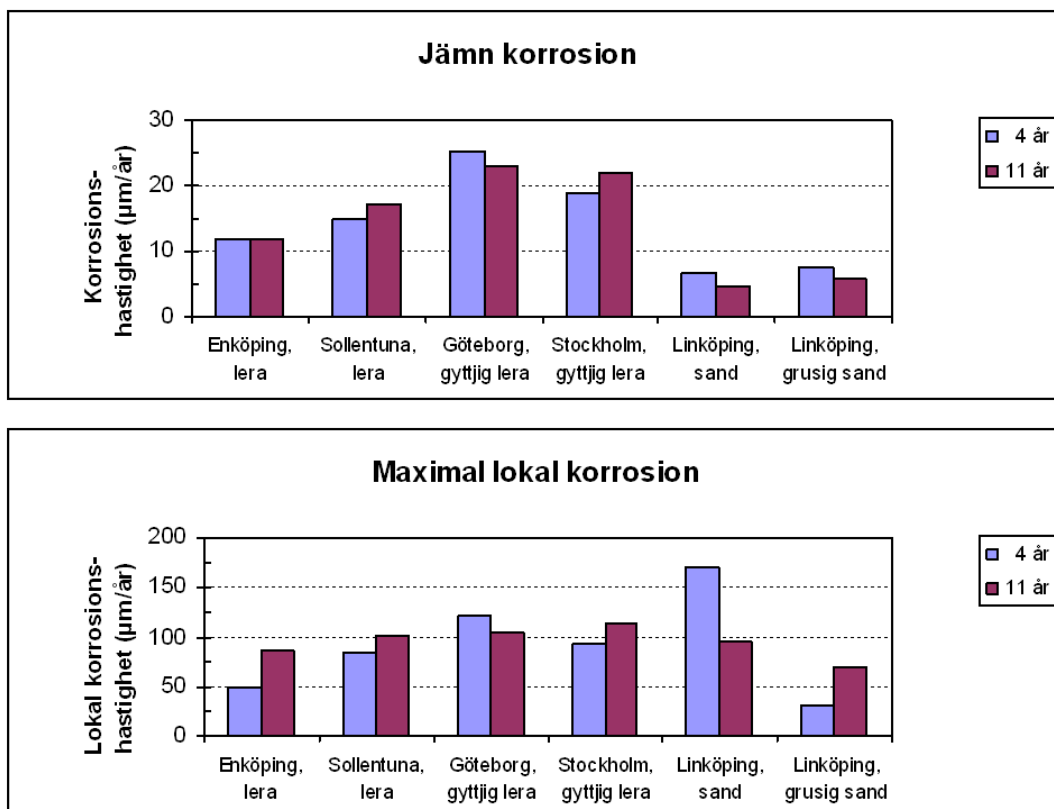
Den högsta jämna korrosionen uppmättes i gyttjig lera och den lägsta i sand. Den jämna korrosionshastigheten var praktiskt taget densamma efter fyra som efter elva års exponering. Någon minskning av korrosionshastighe-

ten har alltså inte skett efter den längre exponeringstiden.

Den maximala lokala korrosionen var störst och minst vid provningsplats Linköping: störst i sand över grundvattenytan och minst i vattenmättad grusig sand under grundvattenytan. På provningsplatserna med gyttjig lera respektive lera var den lokala korrosionshastigheten tämligen lika. Den lokala korrosionshastigheten minskade med längre exponeringstid i sand över grundvattenytan i Linköping, medan den lokala korrosionshastigheten ökade med längre exponeringstid i Linköping under grundvattenytan i grusig sand och i Enköping med lera.

3.1.4 Korrosionsjämförelse mellan nedgrävda vertikala stålstänger och neddrivna stålplåtar

I detta avsnitt görs en jämförelse mellan korrosionshastigheten på nedgrävda vertikala stålstänger och neddrivna stålplåtar. I Tabell 3.6 och Figur 3.7 visas uppmätta korrosionshastigheter avseende jämn korrosion och maximal lokal korrosion för neddrivna stålplåtar (X-plåtar) och för nedgrävda vertikala stålstänger efter ungefär lika lång exponeringstid vid olika provningsplatser.



Figur 3.6. Korrosionshastighet för jämn korrosion och maximal lokal korrosion på nedgrävda vertikala stålstänger av kolstål efter olika exponeringstider vid olika provningsplatser. Vid provningsplats Linköping med jordarten sand avser korrosionshastigheten liggande nedgrävda stålstänger på djupet 0,7 m under markytan.

Tabell 3.6

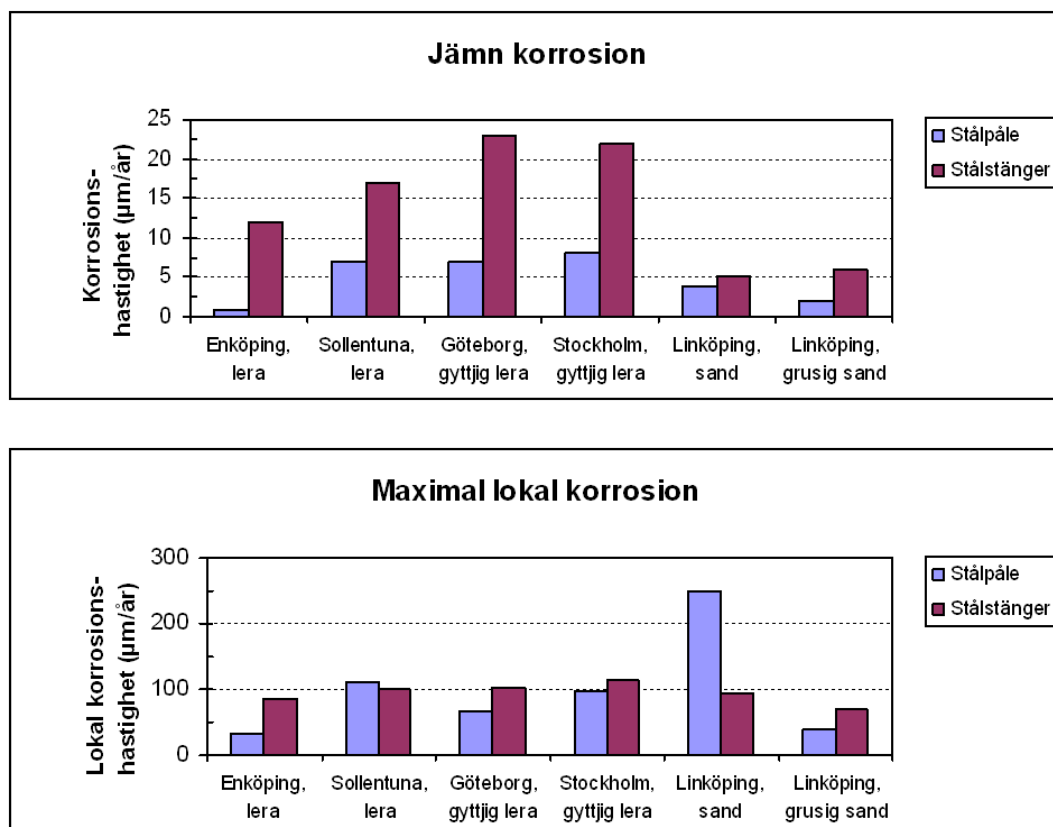
Jämförelse mellan jämn korrosionshastighet på neddrivna stålplåtar och nedgrävda stående stålstänger efter ungefär lika lång exponeringstid vid olika provningsplatser. Korrosionshastigheten för stålstänger avser medelvärdet för dubbelprov.

Provningsplats	Jordförhållanden	Neddrivna stålplåtar		Nedgrävda stående stålstänger	
		Exp. tid år	Korrosionshastighet $\mu\text{m}/\text{år}$	Exp. tid år	Korrosionshastighet $\mu\text{m}/\text{år}$
Enköping	Glacial lera	5,0	3	4,0	12
		9,1	1	11,0	12
Sollentuna	Postglacial lera	4,8	8	5,1	15
		8,9	7	10,9	17
Göteborg	Gyttig lera	5,1	7	3,8	25
		9,3	7	10,8	23
Stockholm	Gyttig lera	5,0	12	4,8	19
		10,2	8	11,0	22
Linköping	Sand	5,1	3	4,0	7 ¹
		9,3	4	11,0	5 ¹
Linköping	Vattenmättad grusig sand	5,3	2	4,0	7
		9,3	2	11,0	6

1) Vid provningsplats Linköping med jordarten sand avser korrosionshastigheten liggande nedgrävda stålstänger på djupet 0,7 m under markytan.

Figur 3.7.

Jämförelse mellan korrosionshastighet för jämn korrosion och maximal lokal korrosion på nedslagna stålplåtar (X-plåtar) och nedgrävda vertikala stålstänger av kolstål efter exponeringstiden ungefär nio år för stålplåtar och elva år för stålstänger vid olika provningsplatser. Vid provningsplats Linköping med jordarten sand avser korrosionshastigheten liggande nedgrävda stålstänger på djupet 0,7 m under markytan.



Av Tabell 3.6 och Figur 3.7 framgår att den jämna korrosionen är betydligt högre (2 – 4 gånger högre) på nedgrävda vertikala stålstänger än på neddrivna stålplåtar. Den maximala lokala korrosionshastigheten var betydligt högre på stålplåten än på nedgrävda stålstänger vid provningsplats Linköping över grundvattenytan. För övrigt var i allmänhet den maximala lokala korrosionen något större på nedgrävda stålstänger än på neddrivna stålplåtar.

3.1.5 Korrosion på neddrivna stålstänger enligt Pålkommisionens Information 2002:1

Geotekniska kontoret vid Statens Järnvägar genomförde under perioden ca 1950 till ca 1980 mycket omfattande undersökningar av korrosionen på vertikala stålstänger på 19 olika provplatser i Sverige. Utvärderingen av korrosionen gjordes i samarbete med Korrosionsinstitutet. Stängerna utgjordes av sammanskruvade en meter långa sondstänger av kolstål med upp till 40 meter total längd. Varje delstång vägdes noggrant innan de skruvades samman till en hel provstång. Efter uppdragning vid avsedd exponeringstid och rengöring från jord och rost vägdes varje delstång på nytt. Härigenom kunde man bestämma viktsförlusten och räkna fram medelavfrätningen för varje meter från markytan och nedåt. Genom att ta in provstänger efter olika exponeringstider kunde korrosionens utveckling med tiden bestämmas. Totalt har 836 delstänger undersökts. Resultaten av alla undersökningar redovisas av Sandegren (1988).

Av naturliga skäl kom provplatserna att väljas utmed järnvägar där geotekniska undersökningar pågick och där man kunde tänka sig att stålplåtar skulle komma till användning dvs främst lerjordar där grundvattenytan ligger

nära markytan. Därför finns bara enstaka provstänger från jord över grundvattenytan. Denna undersökning är unik på många sätt, dels genom de långa exponeringstiderna och försöksuppläggningsen med uppföljning av korrosionen såväl med djupet som med exponeringstiden samt de kompletterande undersökningarna av jordförhållandena.

Inom Pålkommisionen där man bl.a. arbetar med att ta fram regler för dimensionering av plåtar med hänsyn till deras beständighet föreslogs att man skulle genomföra en fördjupad genomgång av SJ:s undersökningar. Detta gjordes genom att överföra alla resultaten till en databas och med hjälp av denna göra en statistisk analys av resultaten, Bengtsson m.fl. (2002). På detta sätt har man kunnat studera:

- Korrosionens storlek som funktion av jordlagerföljd (sandig jord, lerig jord, och jord med organiskt innehåll i jämförelse med "alla jordar").
- Korrosionens storlek som funktion av provets läge i förhållande till grundvattenytan.
- Korrosionens storlek i förhållande till jordens egenskaper (vattenkvot, resistivitet och pH-värde).
- Korrosionens storlek som funktion av provets exponeringstid.

De sålunda utvärderade statistiska parametrarna för proverna uppdelade på typjordar och "alla jordar" samt olika exponeringstider har sammanställts i Tabell 3.7.

Sammanställningen visar att det är en stor spridning i värdena på uppmätt korrosionshastighet från 0 till 40 $\mu\text{m}/\text{år}$ men spridningen är mindre om man studerar 95 %-fraktilen (den karakteristiska korrosionshastigheten) blir 10 till 21 $\mu\text{m}/\text{år}$. I övrigt kan följande slutsatser dras:

Provningsplats -Typjordar	Urval av delstänger	Antal observa- tioner	Statistiska parametrar för korrosionshastighet, $\mu\text{m}/\text{år}$							
			Minsta värde	Nedre kvartil	Median- värde	Övre kvartil	95 % fraktil	Största värde	Medel- värde	Standard- avvikelse
Sandiga jordar	Alla	146	≈ 0	1,3	2,3	4,4	10,3	33,2	3,8	4,9
	Exp tid ≥ 10 år	95	≈ 0	1,3	2,1	3,5	11,3	33,2	3,6	5,5
Leriga jordar	Alla	377	≈ 0	1,6	3,3	6,2	12,1	22,9	4,5	4,0
	Exp tid ≥ 10 år	234	≈ 0	1,8	3,5	5,7	10,7	18,6	4,3	3,5
Jordar med or- ganiskt material	Alla	219	≈ 0	3,2	4,7	7,2	21,3	40,0	7,0	7,3
	Exp tid ≥ 10 år	153	0,2	3,2	4,4	6,0	12,1	15,8	5,1	3,1
Samtliga jordar	Alla	765	≈ 0	1,8	3,6	6,2	15,0	40,0	5,1	5,5
	Exp tid ≥ 10 år	492	≈ 0	1,8	3,6	5,7	11,3	33,2	4,5	3,9

Tabell 3.7
Statistiska parametrar för korrosion i olika typjordar; Bengtsson m.fl. (2002).

- Jord med organiskt innehåll ger åtminstone på kort sikt högre korrosionshastighet än sandiga och leriga jordar.
- Det finns ingen påtaglig skillnad i korrosionshastighet över, vid eller under grundvattenytan.
- Det finns inga klara samband mellan korrosionshastigheten och jordegenskaper som vattenkvot, resistivitet och pH-värde.
- Resultaten visar att korrosionshastigheten i vissa jordar kan avta något med tiden.

Man skall dock betänka att den stora spridningen i undersökningsresultat kan överskugga tendenser till samband, som kan finnas på en eller flera platser.

Under förutsättning att man väl kontrollerat grundförhållandena och dessa utgörs av naturlig jord kan Tabell 3.7 användas för att bedöma korrosionshastigheten i de angivna typjordarna. Härvid kan 95 %-fraktilsvärdet ansättas som karakteristisk medelkorrosionshastighet i $\mu\text{m}/\text{år}$. För att täcka in osäkerheten i korrosionshastigheten bör det karakteristiska värdet ökas med ca 50 % för att erhålla en dimensionerande korrosionshastighet.

3.1.6 Korrosion på stål i jord enligt VTT

Vid den finländska forskningsorganisationen VTT i Esbo, Finland har man i en databas samlat cirka 1600 observationer av korrosionshastigheter på olika stålföremål i jord. En

stor del av materialet kommer från stålpålar i ostörd jord dels från Statens Järnvägar, Sandegren (1988) och dels från japanska undersökningar, Ohsaki (1982). En annan stor del av materialet kommer från stag i omrörd jord till kraftledningsstolpar från Imatran Voima Oy i Finland. Provpålar och plattstänger nedgrävda i omrörd jord från Korrosionsinstitutets fältexponeringar (Camitz & Vinka, 1989) är också inkluderade i databasen.

Från de insamlade variablerna i databasen har Törnqvist (2004) sökt göra en bedömning av deras betydelse för korrosionen på stål i jord, Tabell 3.8.

Törnqvist har också sökt dra slutsatser om olika enskilda faktorerers inverkan på korrosionen:

- En höjning av stålets kolhalt ökar korrosionen.
- Korrosionen i fyllningsjord och omrörd störd jord är i genomsnitt dubbelt så stor som korrosionen på stål som slagits ned i naturlig jord.
- Över grundvattenytan är korrosionen till en början högre än under grundvattenytan, men korrosionen minskar med tiden och blir då mindre än under grundvattenytan.
- Jordens kornstorlek och jordens sammansättning verkar inte ha någon tydlig inverkan på den jämna korrosionen hos stålet.
- Förekomst av organiskt material i jorden ökar korrosionen något.

Tabell 3.8
Betydelsen av olika parametrar för korrosionen på stål i jord enligt Törnqvist (2004)

Parameter	Signifikans för korrosionen
Stålets orientering i jorden	++
Jordens tillstånd vid stålet	++
Närvaro i jorden av organiska beståndsdelar	0
Jordens skiktning	0
Jordart/kornstorlek	++
Förekomst av särskilda material i jorden	0
Stålföremålets läge i förhållande till grundvattennivån	++
Typ av stål	++
Typ av stålföremål (stång, provplåt, etc.)	0
Exponeringstid	++
Jordens vattenkvot	+
Jordens surhetsgrad	+ (++ om pH-värdet < 4,5)
Jordens resistivitet	+

Teckenförklaring:

++ Parametern påverkar korrosionen märkbart

+ Parametern påverkar korrosionen något

0 Parametern har ingen påverkan på korrosionen.

- Korrosionen förefaller vara mer betydande då vattenkvoten är 40 – 60 % än vid torrare eller fuktigare förhållanden.
- Jordens resistivitet har ingen betydande effekt på korrosionen.
- I sura jordar (pH-värde < 5) kan korrosionen vara omfattande.

Törnqvist har från materialet i databasen anpassat ett exponentiellt samband mellan karakteristisk avfrätning och tid:

$$s_{m, 95} = 0,0332 \cdot t^{0,6452}$$

där:

$s_{m, 95}$ = karakteristisk rostmån, mm

t = tid, år

Den karakteristiska korrosionen avtar exponentiellt med tiden. För tiden 100 år blir den karakteristiska korrosionen enligt ovanstående formel 0,65 mm. Den karakteristiska rostmånen blir alltså 0,65 mm för 100 år.

Törnqvist kommer fram till att:

- Korrosionshastigheten på stål i jord avtar exponentiellt med tiden.
- Den jämna korrosionen på stål i naturlig jord är mindre än 1 mm på 100 år.

Det finns endast cirka 20 observationer i databasen där korrosionen överskrider 0,65 mm för 100 år. Dessa observationer kan hänföras till två kategorier:

- Stålföremål i gytig lera eller silt med organiska beståndsdelar. Dessa jordar kan i regel tolkas som sulfidjordar.
- Stålföremål där havsvatten kommer i direkt eller indirekt kontakt med stålytan.

3.1.7 Korrosion på vertikalt stål i grundvattenytan – Laboratorieundersökning

Korrosionen i och kring grundvattenytan är av stort intresse när det gäller vertikala konstruktioner, som går genom denna. Kolstål används nämligen i stor omfattning i lastupptagande, vertikala konstruktioner i jord. Det gäller framför allt stålplåtar och stålspont under brofundament och byggnader samt fundament och förankringsstag till stålstolpar i högspänningskraftledning. Plåtar och spont installeras genom neddrivning och hamnar därför vanligen i ostörd jord medan stolpfundament och stag grävs ned och hamnar i omgrävd och uppluckrad jord. Flertalet av dessa konstruktioner går ner genom grundvattenytan.

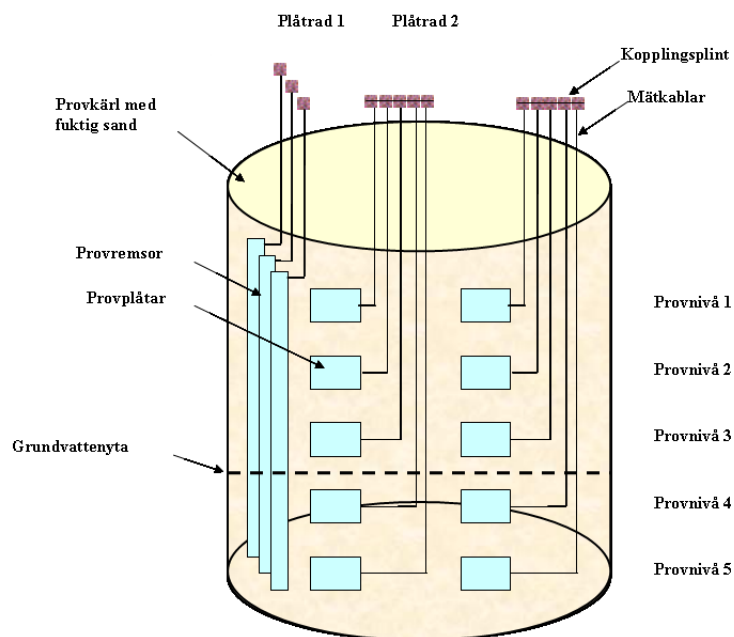
Dåvarande Korrosionsinstitutet (numera Swe-rea KIMAB) inledde 1983 tillsammans med Statens geotekniska institut en långtidsexponering i fält av stålplåtar, som syftar till undersökning av korrosionens storlek nära grundvattenytan. Plåtarna slogs ned vertikalt i marken på sex olika platser med olika jordar så att de kom att gå genom grundvattenytan. Det är emellertid inte möjligt att i den undersökningen studera korrosionsförhållandena vid grundvattenytan i detalj. Av den anledningen genomförde Korrosionsinstitutet en laboratorieundersökning, som var inriktad på att få ökad förståelse för korrosionsförloppet i och kring grundvattenytan i jord. Undersökningen är också beskriven i en utländsk publikation (Carmitz, Vinka 2007).

Små kolstålplåtar placerades på fem olika djup över varandra i en stor plastcylinder fylld med finsand. De fem provplåtarna anslöts till varandra via mätledning och en kopplingsplint. Två sådana vertikala rader med plåtar placerades intill varandra. Genom sammankopplingen gavs korrosionsprocessen på en provplåt möjlighet att på ett anodiskt eller katodiskt sätt kunna påverka korrosionsprocessen på en annan provplåt i plåtraden. Därutöver sattes tre långa plåtremсор ned vertikalt genom sanden bredvid plåtraden. Meningen med plåtarna var att studera korrosionen på varje djup i förhållande till grundvattenytan samt att mäta deras elektrokemiska påverkan på övriga plåtprover i raden. Meningen med plåtremсорna var att få en sammanhängande bild av korrosionen kring grundvattenytan, samt att jämföra denna korrosion med korrosionen på varje enskild provplåt.

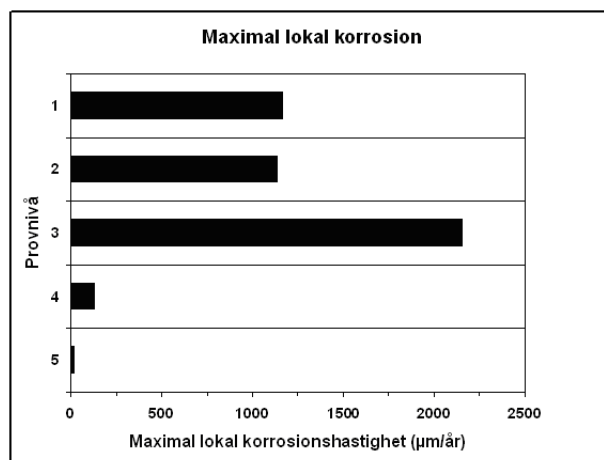
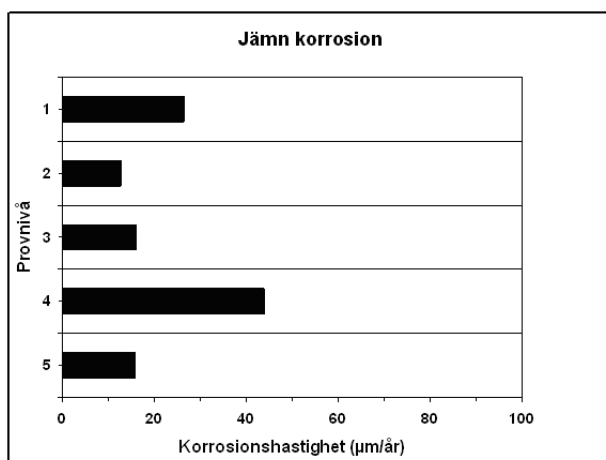
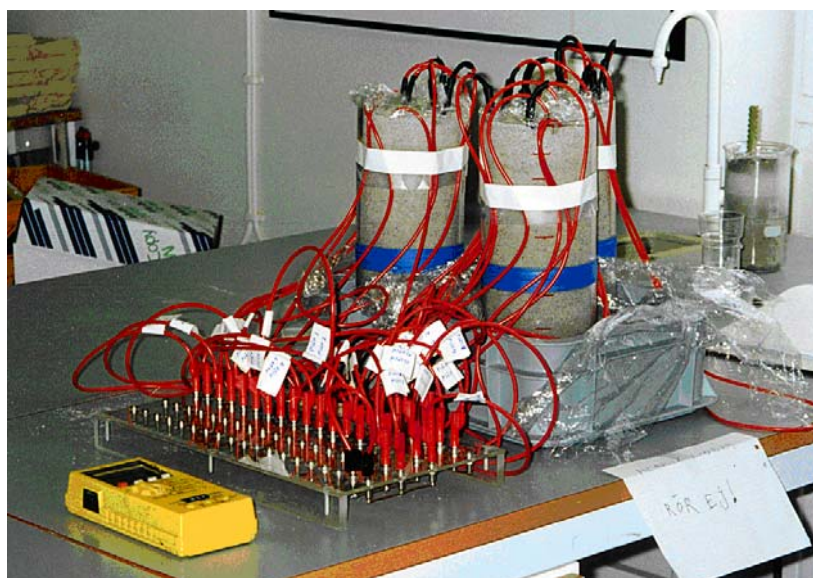
Plastcylindern försågs undertill med ett finmaskigt plastnät med syftet att hålla sanden på plats i cylindern. Därefter placerades cylindern i ett yttre kärl innehållande Stockholms dricksvatten med salttillsats. Vattnets kloridjonhalt kom därmed att bli 130 mg klorid per liter. Vattnet kom därigenom att efterlikna ett grundvatten med måttligt förhöjt saltinnehåll, motsvarande det som kan förekomma t.ex. i en kustnära jord.

Med det yttre kärlet erhöles ett kommuniserande kärl, som gjorde det möjligt att ställa in och bibehålla "grundvattenytan" på en viss nivå i sanden inne i plastcylindern. Grundvattenytan ställdes in så att de översta tre plåtarna i varje plåtrad kom över grundvattenytan och de två nedre plåtarna under denna yta, se Figur 3.8.

Figur 3.8.
Provplåtarnas placering i provcylindern.
"Grundvattenytan" ligger mellan provnivå tre, räknat uppifrån, och provnivå fyra.



Figur 3.9
Provkärl med provplåtar och sand.



Figur 3.10.
Medelavfrätning och maximal gropfrätningshastighet på provplåtarna på de fem provnivåerna.
Medelavfrätningen är angiven som medelvärde för de två plåtarna på samma provnivå.

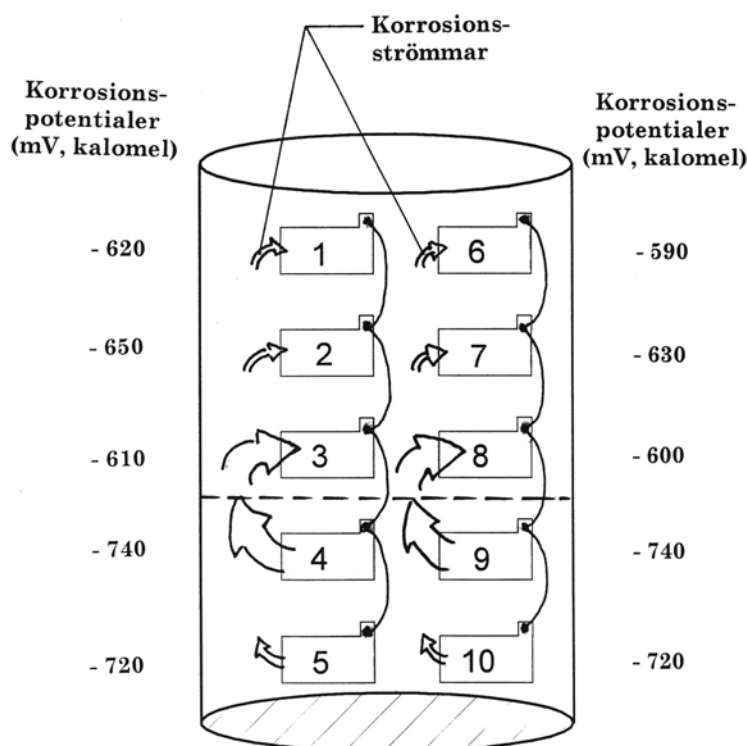
Fyra gånger och med jämna mellanrum mättes provplåtarnas och provremsoarnas korrosionspotential och korrosionsströmmen, som flöt mellan de sammankopplade plåtarna. Potentialmätning gjordes på varje plåt efter cirka en halv sekunds temporär brytning av sammankopplingen. På så sätt var det möjligt att få fram den "äkt" korrosionspotentialen under pågående korrosion på varje enskild plåt. Denna potential antas vara ungefär densamma, som råder på motsvarande yta av en vertikal konstruktion vid grundvattenytan i verkligheten vid ungefär samma betingelser, det vill säga i välluftad jord. Mätning av korrosionsströmmarna mellan plåtarna gjordes så att både strömriktning och strömstyrka kunde registreras.

Försöket pågick under 6 veckor. I samband med att försöket avslutades bestämdes vattenkvot och vattenmättnadsgrad på varje plåtnivå genom jordprovtagning. Denna analys verifierade att "grundvattenytan" låg mellan den tredje och den fjärde provplåten, räknat uppifrån.

Provplåtar och plåtremсор rengjordes från jord och rost genom betning i syrabad. Deras medelavfrätning bestämdes genom viktsförlustmätning. Viktsförlusten per tidsenhet räknades sedan om till en medelavfrätning uttryckt i

$\mu\text{m}/\text{år}$. Det maximala djupet i frätgropar på varje provplåt mättes i mikroskop, varefter det räknades om till maximal gropfrätningshastighet uttryckt i $\mu\text{m}/\text{år}$. Stapeldiagrammen i Figur 3.10 visar medelavfrätningshastighet och maximal gropfrätningshastighet för provplåtarna på varje provnivå. Dessa korrosionshastigheter är betydligt högre än vad som normalt mäts upp på provpålar av kolstål, som stått ett större antal år i jord i fält. Det illustrerar det faktum att korrosionshastigheten är avsevärt högre i början än senare under en exponeringsperiod. Att försöket genomfördes i rumstemperatur har förmodligen också stimulerat korrosionen. Även om korrosionen var större i försöket än under praktiska förhållanden på en nedslagen påle eller ett nedgrävt stolpfundament/förankringsstag så ger en analys av korrosionshastigheternas inbördes storlek värdefull information om korrosionen i och kring grundvattenytan.

I Figur 3.11 visas korrosionsströmmarnas riktning mellan provplåtarna under försöket. I figuren är också korrosionspotentialen hos varje enskild provplåt angiven. Strömstyrkan visas symboliskt med strömpilarnas tjocklek. Den faktiska strömstyrkan och även strömriktningen vid de fyra mättillfällena visas i Figur 3.12.



Figur 3.11.
Provplåtarnas korrosionspotential på de fem provnivåerna samt korrosionsströmmarnas riktning mellan plåtarna i samma plåtråd. Strömstyrkan visas symboliskt med strömpilarnas tjocklek.

Figur 3.12.
Korrosionsströmmarnas styrka och riktning och provplåtarnas elektropotential vid vardera av de fyra mättillfällena. Anodisk ström = Plåten avger korrosionsström. Katodisk ström = plåten tar emot korrosionsström.

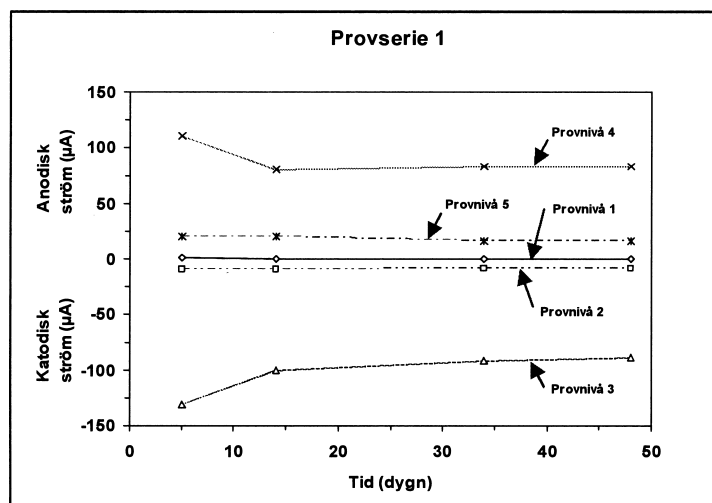


Bild A



Bild B (x25)



Bild C (x 25)

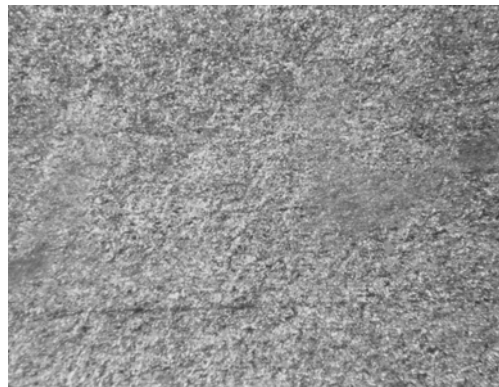


Bild D (x 25)

Figur 3.13.

Korrosionsangreppens utseende före och efter rengöring från jord och rost. Bild A: En rad provplåtar och de tre provremsorna före rengöring. Övre provplåten från övre provnivån etc. Bild B: Korrosionens utseende på plåtar från provnivåerna 4 och 5, dvs. under grundvattennivån efter rengöring. Bild C: Korrosionens utseende på provplåtar på provnivåerna 2 och 3, dvs. något över grundvattenytan. Bild D: Korrosionens utseende på provplåtar på provnivå 1, dvs. närmast "markytan" efter rengöring. Bilderna B, C och D förstoring x 25.

Plåtar och remsor fotograferades både före och efter rengöring, se Figur 3.13. Bild A i figuren visar plåtarna och plåtremsorna före rengöring från jord och rost. Bild B visar att korrosionsangreppet under grundvattennivån är av typen jämn korrosion. Bild C visar att det, utöver den jämna korrosionen, förekommer frätgropar på provnivåerna något över grundvattenytan trots att plåtarna på dessa nivåer har erhållit ett visst katodiskt korrosionsskydd av korrosionsströmmarna, som flyter från plåtarna under grundvattenytan. Strömmarna har tydligen varit för svaga för att hämma gropfrätningen. Strömmarna har emellertid varit så starka att de genom sin katodiska skyddsverkan har hämmat den jämna korrosionen på dessa plåtar. Jämför provnivå 3 och 4 i Figur 3.8. Bild C visar den förhållandevis stora jämna korrosionen och gropfrätningen på provplåtar på den översta provnivån. Strömflödena, som redovisas i Figur 3.11 och 3.12, visar att plåtarna på den översta provnivån inte har påverkats av luftningscellen kring grundvattenytan. Den förhållandevis höga medelavfrätningen på dessa plåtar har alltså uppkommit genom egenkorrosion.

Analysen av undersökningsresultaten gav i sammanfattning följande viktiga information:

- Korrosionen vid grundvattenytan på en vertikal stålkonstruktion skiljer sig från korrosionen på övriga delar av konstruktionen.
- Orsaken till denna skillnad är att det bildas en syrekonzentrationscell (luftningscell) i denna zon som en följd av olikheter i syrediffusionen något över och under grundvattenytan.
- Luftningscellen föreligger koncentrerad kring grundvattenytan, på så sätt att stål-ytan omedelbart över grundvattenytan (dvs. på provnivå 3, där jorden är omättad på grundvatten och därmed jämförelsevis väl-luftad) blir starkt katodisk, medan stål-ytan omedelbart under grundvattenytan (dvs. på provnivå 4, där jorden är vattenmättad och sämre luftad) blir starkt anodisk.
- Korrosionscellens drivkraft är den stora potentialskillnaden, cirka 130 respektive 170 mV, mellan den anodiska plåten på provnivå 3 och den katodiska provplåten på provnivå 4 i de båda provplåtsraderna. Efter den första ström- och potentialmätningen (efter 15 dagar) hade luftningscellen samma styrka ända tills försöket avbröts.
- Luftningscellen medförde att den största *medelavfrätningen* uppstod på den anodiska plåten medan den var betydligt lägre på den katodiska plåten. Den lägre medelavfrätningen på den katodiska plåten är en följd av att den har erhållit ett visst katodiskt korrosionsskydd av korrosionsströmmen, som avges från den anodiska plåten. Detta kan uttryckas som att plåten på provnivå 4 "korroderar till förmån för" ("offrar sig för") plåten på provnivå 3.
- Under grundvattenytan förekom det knappast någon gropfrätning medan *gropfrätningen* var betydande på provnivåerna över grundvattenytan. Även om medelavfrätningen på plåten på provnivå 3 har hämmats av katodisk skyddsverkan av korrosionsströmmen från plåten på provnivå 4, har strömmarna tydligen inte varit tillräckligt starka för att hämma gropfrätningen på plåten på denna provnivå.
- Troligen är gropfrätningen på nivåerna över grundvattenytan orsakad av mikroluftningsceller, som framkallats genom heterogen anliggning av jordpartiklar mot stål-ytan. Gropfrätningen är alltså oberoende av den stora luftningscellen kring grundvattennivån men stimulerad av den goda luftningen lokalt på plåtarna över grundvattenytan.
- Frånvaron av gropfrätning under grundvattenet beror troligen på att en heterogen anliggning av jordpartiklar på plåtarna i denna zon, som i brist på syre, inte ger upphov till samma skillnader i syrekonzentrations på mikronivå, som heterogeniteter över grundvattnet.
- Denna observation liknar de observationer, som gjorts på provpålar i sand över grundvattenytan på KIMAB:s och SGI:s provplats Linköping/Kolbyttomon. På pålar under grundvattenytan på denna provplats förekommer knappast någon gropfrätning, endast jämn korrosion. Se vidare Avsnitt 3.1.2. Observationerna stödjer hypotesen om större förutsättningar för djup gropfrätning på stål över grundvattenytan, som förs fram i teorikapitlet (Kapitel 3) i Pålkommisionen Rapport 93, Camitz (1994).

Avslutningsvis ska det påpekas att korrosionsförhållandet i försöket var statistiskt, det vill säga det förkom inte några variationer i grundvattenytans nivå och det förekom inte heller någon nederbörd, som trängde ned genom

sanden. Resultaten visar därför bara korrosionsförhållandet vid en viss, stagnant grundvattennivå. I naturen, däremot, varierar grundvattenytan med årstider och nederbörd. Det medför att korrosionsangreppen, som uppstår som en följd av luftningscellen kring grundvattenytan, blir utspridda över en viss del av den vertikala konstruktionen med tiden

3.1.8 Korrosion på vertikalt neddrivna rör av kolstål och låglegerat stål

Under 1967 drev Sandvik AB ned ett större antal rör av olika stålqualiteter i ostörd jord på tre platser i Mellansverige. Rören bestod av olegerat kolstål, låglegerat konstruktionsstål samt fyra olika rostfria stålqualiteter. Se även Avsnitt 3.1.9. Syftet var att låta stålrören stå ostörda i jorden under lång tid för att därefter undersöka dem med avseende på uppkommen korrosion. Efter en tid hade undersökningen förlorat i betydelse för Sandvik AB varför man överlät undersökningen till Korrosionsinstitutet. Efter 25 års exponering i jorden togs rören upp av Korrosionsinstitutet 1992 för undersökning.

Rören exponerades på tre platser: Åkerhög vid Kungälv, Närefors vid Lidköping samt Nyhem vid Sandviken. På provningsplatsen vid Åkerhög/Kungälv utgörs jorden av en marin lera med hög kloridhalt och skalrester efter marina skaldjur. Vid Närefors/Lidköping består jorden av siltig lera och vid Nyhem/Sandviken av gyttig silt. Jordförhållandena på de tre provningsplatserna sammanfattas i Tabell 3.9 samt som funktion av djupet i Figur 3.14 och 3.15. Som framgår av figurerna varierar parametrarna en hel del med djupet under markytan.

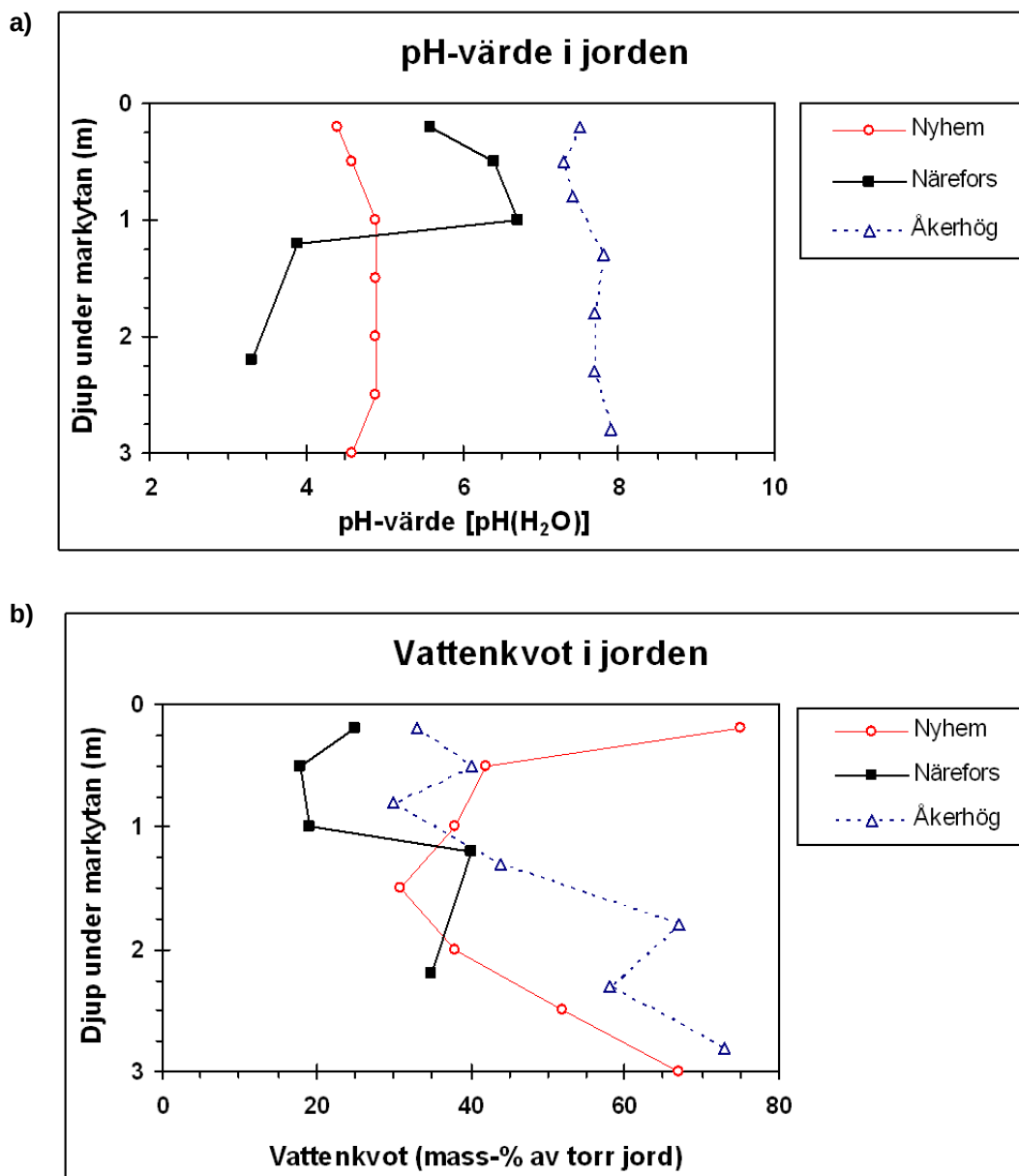
Rören var ca 3,5 m långa och hade drivits ned nära 3,0 m i jorden dvs ca 0,6 m av rören stack upp över markytan utom röret vid Närefors, som ej kunde drivas ned längre än till ca 1,6 m djup. Rören var ej pluggade i ändarna och innehöll därför delvis vatten och jord vid upp-tagningen varför deras insida också delvis korroderat. Rören hade en nominell yttre diameter på 32 mm och en inre diameter på 16 respektive 9 mm. Den senare var av det ej standardiserade låglegerade stålet. Stålets sammansättning (chargeanalys) visas i Tabell 3.10. Kolstålröret och det ena låglegerade stålröret bestod av standardiserade stålsorter. Det andra låglegerade stålet, med beteckningen 1,3Cr/3Ni/0,2Mo, var inte standardiserat.

Efter att rören dragits upp utvärderades korrosionen vid Statens geotekniska institut, Bergdahl och Eriksson (1995). Efter rengöring genom ut- och invändig stålborstning gjordes en traditionell massförlustbestämning genom noggrann vägning av rören och jämförelse med ursprungsvikten. Eftersom man redan tidigt såg att det fanns en lokal korrosion på rören från Åkerhög/Kungälv på vissa nivåer under markytan ville man ha en mer noggrann uppmätning av korrosionen längs rören såväl ut- som invändigt. Detta utfördes med en så kallad vattenvolymeter där röret sattes ned i ett graderat plexiglasrör, vilket decimeter för decimeter fylldes med vatten varvid tillförd vattenvolym noggrant mättes. Genom att mäta vattenvolymsskillnaden mellan tomt mät-rör och med instuckt rör kunde stålvolymen för varje decimeter av det instuckna röret bestämmas och korrosionen beräknas. En principskiss över mätutrustningen visas i Figur 3.16 medan ett exempel på olikheterna i korrosionshastighet längs rören sådan de uppmätts i vattenvolymetern visas i Figur 3.17. Samtliga uppmätta korrosionshastigheter redovisas i Tabell 3.11.

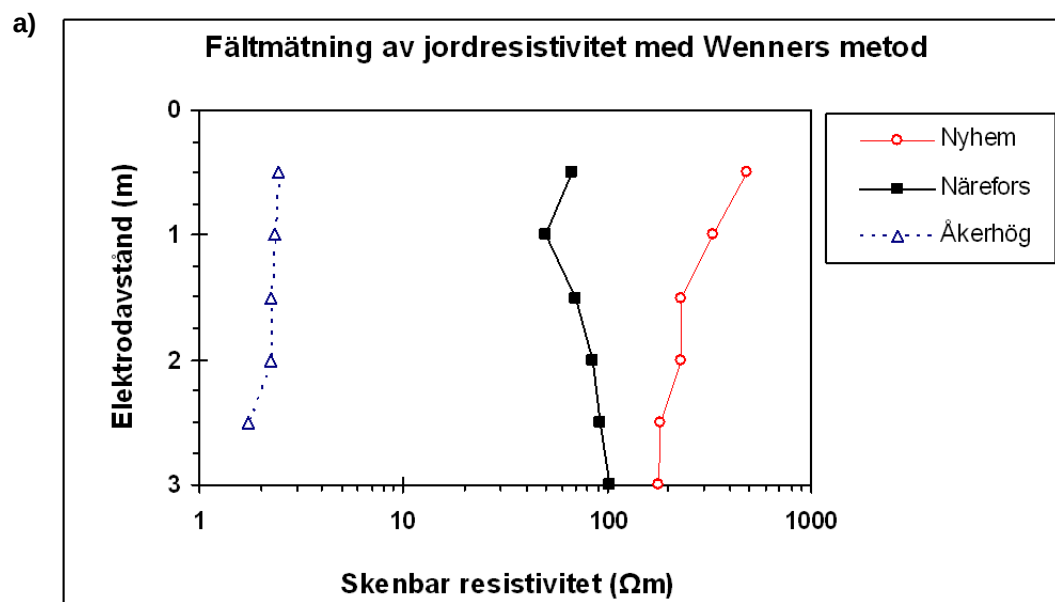
Tabell 3.9

Jordart och jordens kemiska sammansättning och fysikaliska egenskaper på provplatserna med vertikalt nedslagna rör av rostfritt stål, kolstål och låglegerat stål. Olikheterna i värden beror på att jordprov från olika djup analyserats.

Provningsplats	Jordart	Vattenkvot %	Resistivitet, ohm·m	pH-värde (H ₂ O)	Kloridhalt mg Cl/kg torr jord	Organisk halt %
Åkerhög/Kungälv	Marin lera med hög kloridhalt	33 – 73	2,32 – 2,53	7,3 – 7,9	ca.1 800 – 4 600	2,4
Närefors/ Lidköping	Siltig lera	18 – 40	23,2 – 39,3	3,3 – 6,7	ca. 40	3,3
Nyhem/Sandviken	Gyttig silt	31 – 75	28,1 – 51,2	4,4 – 4,9	ca. 40 – 50	13,9

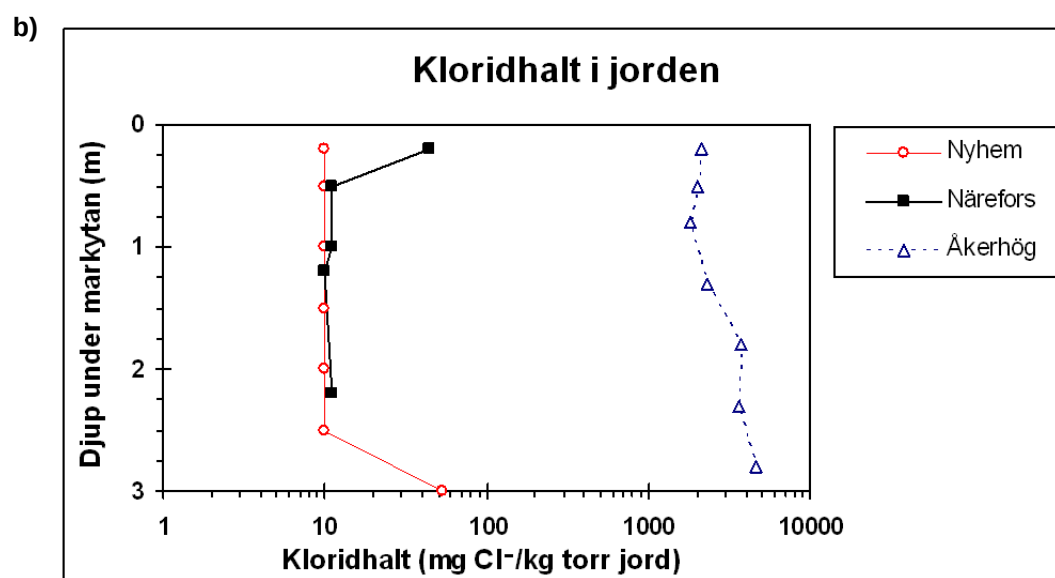


Figur 3.14.
pH-värde och vattenkvot på olika djup i jorden vid provningsplatserna Nyhem, Närefors och Åkerhög.
a) pH-värde
b) Vattenkvot.



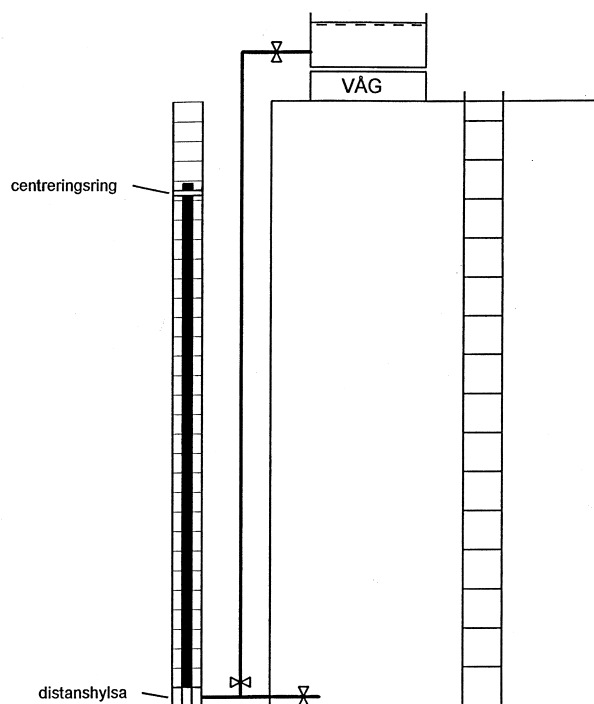
Figur 3.15
Resistivitet och kloridhalt på olika djup i jorden vid provningsplatserna Nyhem, Närefors och Åkerhög.

a) Fältmätning av jordresistivitet med Wennerg's 4-elektrodmotod. Elektroavståndet motsvarar i princip djupet under markytan.
b) Kloridhalt.

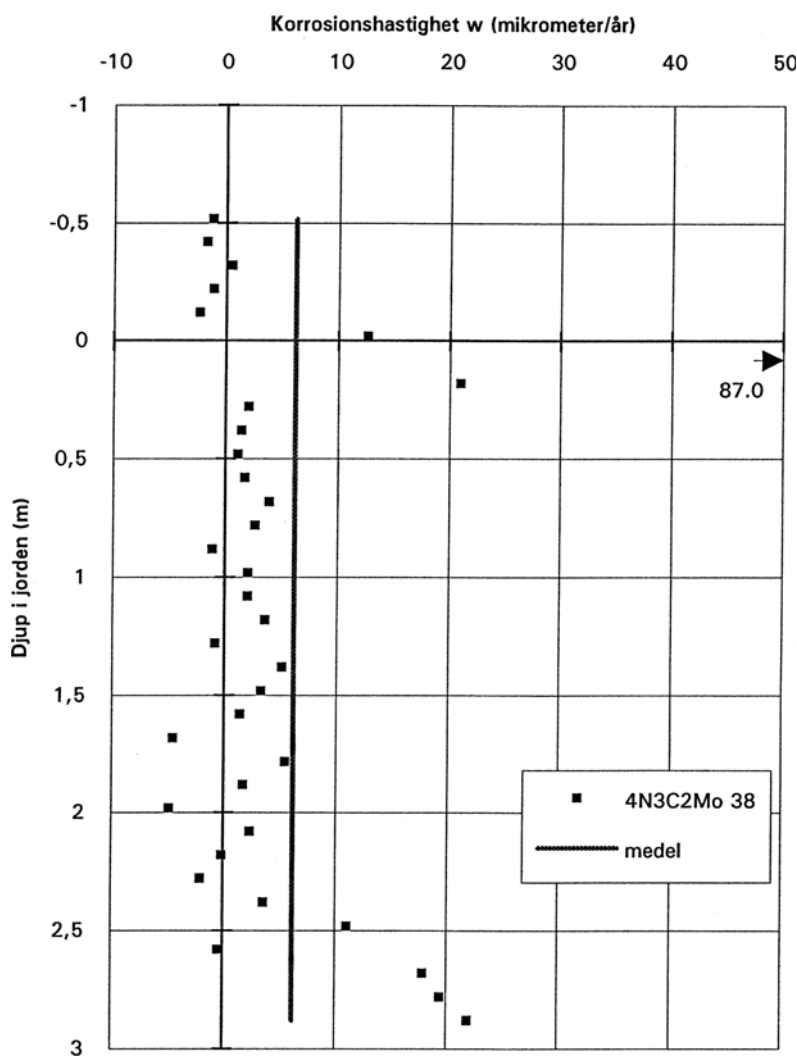


Tabell 3.10
Sammansättning (chargeanalys) hos de undersökta rören av kolstål och låglegerat stål, som använts i korrosionsundersökningen.

Rör nr.	Ståltyp	Svensk standard	Stålets kemiska sammansättning, vikts-%								
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
38	Låglegerat stål	Ej standardiserat	0,27	0,29	0,63	0,020	0,010	1,33	2,99	0,25	-
21	Låglegerat stål	SS 2225	0,24	0,28	0,55	0,015	0,010	1,09	0,05	0,22	-
66	Kolstål	SS 2120	0,47	0,27	1,50	0,020	0,009	0,06	0,04	-	-



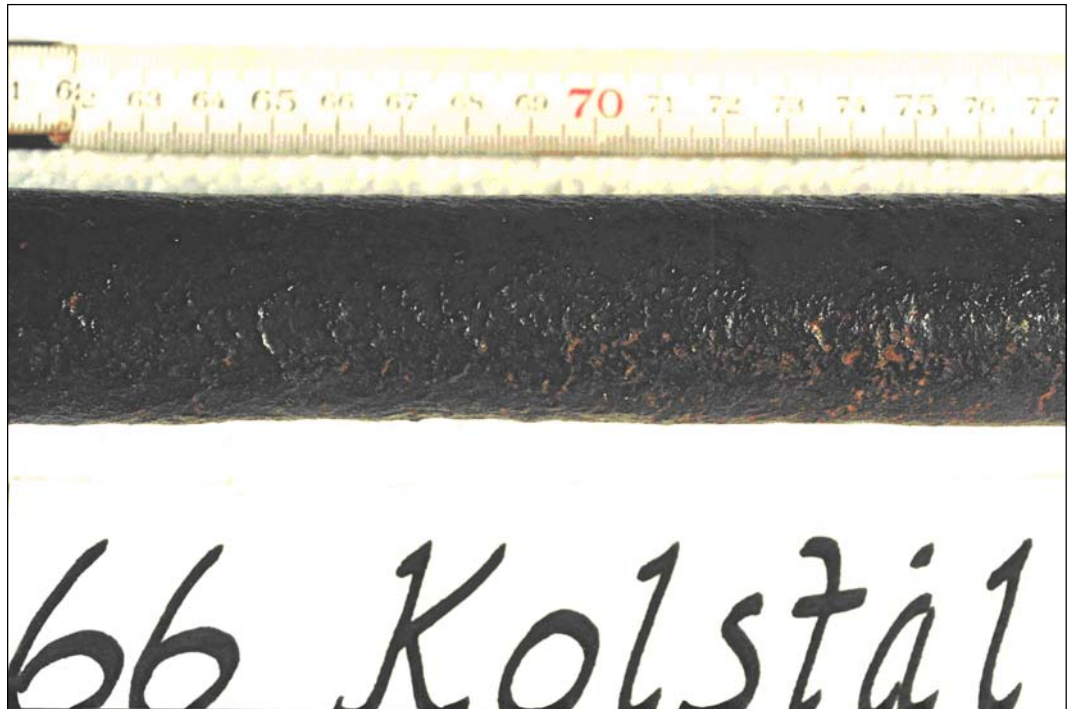
Figur 3.16
Principskiss för vatten-
volymeterutrustningen



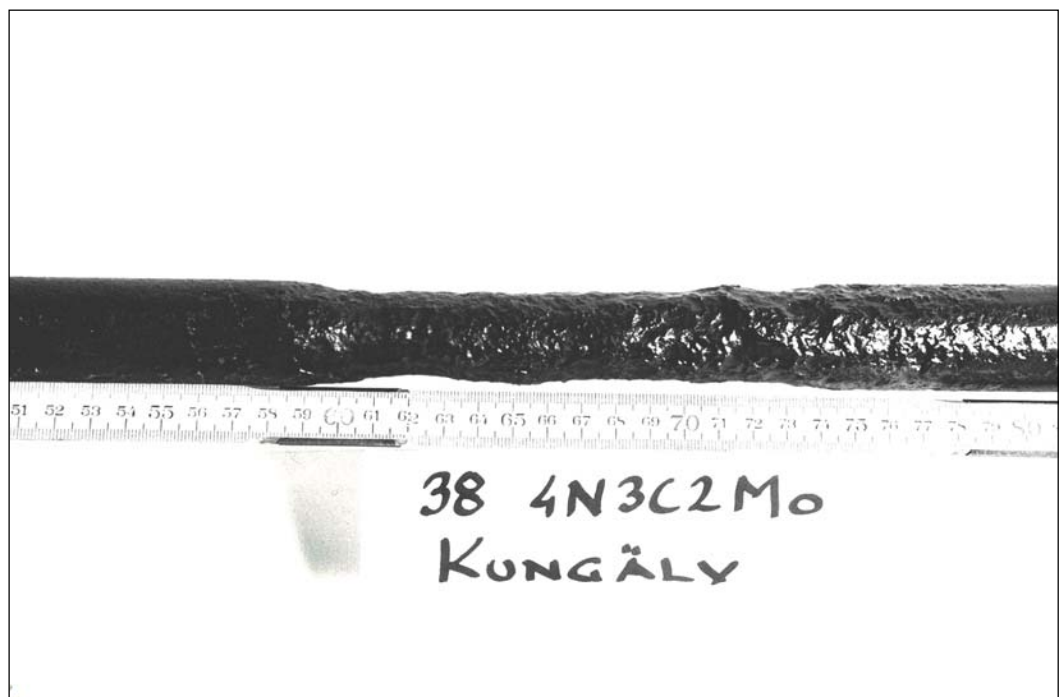
Efter att rören rengjorts från jord och rost fotograferades de, Figur 3.18 – 3.22. De mer detaljerade korrosionsmätningarna i vattenvolymetern visade att korrosionen för det icke standardiserade röret var störst 0,1– 0,2 m under markytan samt vid spetsen längst ned, Figur 3.19. För det andra låglegerade stålet

förekom den största korrosionen på olika djup under markytan: 0,55, 0,90, 1,02 och 2,80 m under markytan, Figur 3.20 och 3.21. För röret av kolstål var korrosionshastigheterna mer jämnt fördelade över rörets längd med en antydning till midja något under markytan Figur 3.18.

Figur 3.18.
Åkerhög. Stång av kolstål.



Figur 3.19.
Låglegerat stål (ej standardiserat) från Åkerhög i Kungälv.





Figur 3.20.
Låglegerat stål från
Åkerhög vid Kungälv
typ SIS 2225.



Figur 3.21.
Låglegerat stål från
Åkerhög vid Kungälv
typ SIS 2225. Belysta
detaljer.

Figur 3.22.
Rör av kolstål från Näre-
fors vid Lidköping.



Figur 3.23.
Rör av kolstål från Ny-
hem vid Sandviken.



Stålkvalitet	Provningsplats	Medelavfrätning för hela röret (Not 1) µm/år	"Lokal" korrosion medelavfrätning på varje 0,1 m rör (Not 2) µm/år	Anmärkning
Låglegerat stål 1,3Cr/3Ni/0,2Mo	Åkerhög/Kungälv Rör 38	6	~ 0 – 87	Tydlig midjebildning strax under markytan och kraftigt lokalt angrepp längst ned på röret
	Närefors/Lidköping	–	–	–
	Nyhem/Sandviken	–	–	–
Låglegerat stål SS 2225	Åkerhög/Kungälv Rör 21	12	2 – 41	Måttliga lokala angrepp i form av gropar på flera ställen, bland annat längst ned på röret
	Närefors/Lidköping	–	–	–
	Nyhem/Sandviken	–	–	–
Kolstål SS 2120	Åkerhög/Kungälv Rör 66	9	1 – 18	Inga lokala angrepp
	Närefors/Lidköping Rör 71	5	1 – 12	Inga lokala angrepp
	Nyhem/Sandviken Rör 76	4	1 – 9	Inga lokala angrepp

Not 1: Utvärderad genom massförlustmätning – avser både utvändigt och invändigt korrosion

Not 2: Utvärderad i vattenvolymeter – avser både utvändigt och invändigt korrosion

Tabell 3.11.
Korrosionshastigheter och korrosionens utbredning på vertikala rör av kolstål och låglegerat stål efter 25 år i jord på de tre provningsplatserna i Korrosionsinstitutets och Sandviks fältundersökning

Några viktiga observationer i undersökningen var:

- Medelavfrätningen varierar mellan 4 och 12 µm/år.
- Den lokala korrosionen på kolstålen är 2,0 – 2,4 gånger högre än medelavfrätningen, vilket bör beaktas när man bestämmer den dimensionerande korrosionshastigheten.
- De låglegerade stålrören är mer angripna av lokal korrosion än kolstålsrören
- Lokala angrepp förekommer på flera ställen och även längst ned, på 3 m djup, på de låglegerade stålrören

3.1.9 Korrosion på vertikalt neddrivna rör av rostfritt stål i jord

Som redan nämnts i Avsnitt 3.1.8 drev Sandvik AB ned ett större antal rör av olika stålkvaliteter vertikalt i ostörd jord på tre platser i Mellansverige. Rören utgjordes av olegerat kolstål, låglegerat konstruktionsstål samt fyra olika rostfria stålkvaliteter. Sandvik AB ville tillsammans med Vattenfall undersöka om dessa rostfria stål kunde vara ett alternativ, ur beständighetsmässig och ekonomisk synpunkt, till de varmförzinkade stålstångerna i förankringsstag i jord till stora kraftledningsstolpar. Meningen var att låta stålrören stå orörda i jorden under lång tid för att därefter undersöka dem med avseende på uppkommen korrosion. Efter en tid hade undersökningen förlorat i betydelse för Sandvik AB och man överlät undersökningen till Korrosionsinstitutet. Efter 25 års exponering i jorden togs rören upp år

1992 av Korrosionsinstitutet för undersökning. Undersökningsmaterialet är unikt med tanke på den långa exponeringstiden i jord.

I detta avsnitt återges i sammandrag resultat från undersökningen med de **rostfria rören**. Undersökningen redovisas i detalj i Korrosionsinstitutets internrapport "Korrosion på vertikala konstruktioner av kolstål, låglegerat stål och rostfritt stål i jord". Se även Camitz och Vinka (2004). Resultat från undersökningen av rören av kolstål och låglegerat stål sammanfattas i Avsnitt 3.1.8 i denna rapport.

De fyra rostfria stålqualiteternas sammansättning (chargeanalys) och metallografiska mikrostruktur visas i Tabell 3.12. I provningen ingick alltså ett "enkelt" s.k. kromstål (SS 2321), ett austenitiskt 18Cr/9Ni-stål (SS 2333), ett austenitiskt stål, som liknar det förra men som är mera höglegerat samt med tillsats av molybden (SS 2343), och slutligen ett sk "duplexstål" med likartade korrosionsegenskaper som det molybdenlegerade austenitiska stålet (SS 2376).

Undersökningen genomfördes som nämnts på tre provningsplatser: Åkerhög/Kungälv, Närefors/Lidköping och Nyhem/Sandviken. Jordart och jordens egenskaper på provningsplatserna beskrivs i Avsnitt 3.1.8. För jordanalyser, se Tabell 3.9 samt Figur 3.14 och 3.15. Tyvärr placerades inte alla fyra stålqualiteterna ut på

alla de tre provningsplatserna. Hur stålqualiteterna fördelades på provningsplatserna framgår av Tabell 3.13. För varje stålqualitet exponerades tre rör intill varandra på varje provningsplats där stålet förekom. Totalt exponerades alltså 21 rostfria rör. Rörens yttre diameter var 32 mm och deras längd 3,5 m, med undantag av rören av stålqualiteten SS 2321, som var 2,7 m långa. Godstjockleken var väl tilltagen, $t = 8$ mm, för att eventuell gropfrätning inte skulle gå ända genom rörväggen. Rören slogs ned i den ostörda jorden till drygt 3 m djup. Cirka 0,5 m av rören stack upp över markytan.

Rören drogs upp, som redan nämnts, efter 25 år i jorden. Omedelbart innan uppdragningen mättes varje enskilt rörs fria korrosionspotential med en referenselektrod av typen mättad koppar/kopparsulfatelektrod (Cu/CuSO_4). Mätresultaten visas i Tabell 3.14. Syftet med potentialmätningarna var bland annat att kontrollera om det går att avgöra om det pågår korrosion på en jordförlagd rostfri stålkonstruktion. Korrosionen utvärderades genom okulärbesiktning och genom mätning av djupet i lokala frätgropar i metallmikroskop enligt den så kallade fokuseringsmetoden. Djupet i lite djupare angrepp mättes också med en så kallad nålmikrometer med onoggrannheten $\pm 0,05$ mm (± 50 μm). Undersökningsresultaten redovisas i sammandrag i Tabell 3.15 medan foton på proverna visas i Figur 3. 24.

Tabell 3.12.
Stålqualiteterna, och deras sammansättning, som ingick i Korrosionsinstitutets och Sandvik AB:s undersökning av vertikala rostfria rör i jord.

Stålqualitet	Typ av rostfritt stål	Stålets kemiska sammansättning								
		mass-%								
Svensk standard	Metallografisk mikrostruktur	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
SS 2321	Martensitisk	0,20	0,32	0,61	0,009	0,011	16,1	2,13	–	0,034
SS 2333	Austenitisk	0,045	0,42	0,50	0,012	0,011	18,6	9,5	0,14	0,030
SS 2343	Austenitisk	0,046	0,62	1,71	0,017	0,006	17,4	13,3	2,46	0,044
SS 2376	Ferrit-austenitisk ("duplex")	0,030	1,88	1,65	0,010	0,007	18,6	4,6	2,52	0,045

Tabell 3.13.
Fördelningen av stålqualiteter på provningsplatserna i Korrosionsinstitutets och Sandvik AB:s undersökning av korrosion på vertikala rostfria stålrör i jord.

Provningsplats	Stålqualiteter som exponerades i jord på provningsplatserna			
	SS 2321	SS 2333	SS 2343	SS 2376
Åkerhög/Kungälv	ja	ja	ja	ja
Närefors/Lidköping	ja	–	–	–
Nyhem/Sandviken	ja	–	–	ja

Stålkvalitet	Åkerhög/Kungälv		Närefors/Lidköping		Nyhem/Sandviken	
	Rörprov nr	Korrosionspotential mV (Cu/CuSO ₄)	Rörprov nr	Korrosionspotential mV (Cu/CuSO ₄)	Rörprov nr	Korrosionspotential mV (Cu/CuSO ₄)
ASTM 431 EN 1.4057 SS 2321	1: 2: 3: Mv: s:	- 438 - 442 - 466 - 449 15	1: 2: 3: Mv: s:	+ 219 + 178 + 240 + 212 32	1: 2: 3: Mv: s:	+ 409 + 398 + 414 + 407 8
ASTM 304 EN 1.4301 SS 2333	1: 2: 3: Mv: s:	- 353 - 484 - 161 - 333 162		-		-
ASTM 316 EN 1.4436 SS 2343	1: 2: 3: Mv: s:	- 104 - 99 - 55 - 86 27		-		-
ASTM S31500 EN 1.4424 SS 2376	1: 2: 3: Mv: s:	- 42 - 24 - 159 - 75 73		-	1: 2: 3: Mv: s:	+ 335 + 371 + 362 + 356 19

Tabell 3.14.
De rostfria rörprover-
nas fria korrosionspo-
tential uppmätt omedel-
bart innan uppdragning
av rören efter 25 års
exponering i jord.
Mv = medelvärde av tre
potentialvärden.
s = standardavvikelse.

Stål- kvalitet	Förekomst av korrosionsangrepp och största fräthastighet µm/år		
	Åkerhög/Kungälv (marin lera med hög kloridhalt)	Närefors/Lidköping (siltig lera)	Nyhem/Sandviken (gyttig silt)
SS 2321	Många punktangrepp från markytan ända ned till rör- slutet på alla tre rören. Dju- past och mest utbredda frätgrop (ca 4 cm ²) på nedre röränden på ett rör. <u>Max. djup:</u> 6 mm	Många punktangrepp samt frätgropar med något större utbredning (ca 1 cm ²) på flera ställen på alla tre rö- ren. <u>Max. djup:</u> 3,9 mm	Många punktangrepp samt frätgropar med något större utbredning (ca 1 cm ²) på flera ställen på två av rören. Ett rör helt utan angrepp. <u>Max. djup:</u> 0,5 mm
SS 2333	Åtskilliga punktangrepp fördelade på hela rörläng- derna. <u>Max. djup:</u> 1,6 mm	Ingen provning	Ingen provning
SS 2343	Flera små punktangrepp nedtill på två av rören. Ett rör helt utan angrepp. <u>Max. djup:</u> 0,2 mm	Ingen provning	Ingen provning
SS 2376	Några enstaka små punkt- angrepp på nedre tredje- delen på två av rören. Ett rör helt utan angrepp. <u>Max. djup:</u> ej mätbart	Ingen provning	Ett par små punktangrepp på två av rören. Ett rör helt utan angrepp. <u>Max. djup:</u> ej mätbart

Tabell 3.15.
Korrosionshastigheter
och korrosionens upp-
trädande i Korrosions-
institutets och Sandvik
AB:s undersökning av
korrosion på vertikala
rostfria stålrör i jord.

Figur 3.24.
Största angripna ställe
på mest angripna rör-
prov från vardera av de
fyra rostfria stålqualite-
terna. Samtliga rör har
stått på provnings-
platsen med den högsta
jordkorrosiviteten,
Åkerhög/Kungälv, marin
lera.



Sammanfattande slutsatser:

- Korrosionsangreppen uppträder i form av punktangrepp med olika djup och i olika mängd på de olika rostfria stålsorterna. Den rostfria stålytan runt angreppen är "blank" och oangripen.
- Punktangreppens utbredning över stålytan är endast en eller ett par mm² oavsett angreppsdjupet. Runt om angreppen är stålytan helt fri från angrepp. Ett undantag är det 6 mm djupa och långsmala angreppet längst ned på ett av de tre rören av stålqualitet SS 2321 på provningsplats Åkerhög/Kungälv (marin, salthaltig lera). Där har angreppet större area, ca. 4 cm².
- Punktangreppens mängd och djup är beroende av den rostfria stålsorten.
- Bäst motståndskraft mot korrosionsangrepp hade de två stålsorterna med molybden som legeringsämne (SS 2343 och SS 2376). Det är känt från andra, liknande provningar av rostfritt stål i jord att legeringsämnet molybden, även i låg halt, har en mycket stor betydelse för rostfria ståls korrosionshårdighet i jord utöver halten krom. Sämst motståndskraft hade det "enkla" krom-stålet med förhållandevis låg legeringsgrad (SS 2321). Stålsorten SS 2333 intar en mellanställning vad avser hårdighet mot punktangrepp i jord.
- Den mest korrosiva provningsplatsen är Åkerhög/Kungälv med marin lera. Avgörande för den höga korrosiviteten är alltså lerans höga kloridhalt. Detta faktum att det framför allt är kloridförekomst, som nedsätter rostfria ståls korrosionshårdighet i jord är känt från andra fältundersökningar. De övriga två provningsplatserna visar i stort sett samma korrosivitet mot rostfritt stål.
- Troligen är det heterogeniteter i leran tillsammans med kloridförekomsten, som har framkallat angreppen. Kloridjonerna har punkterat stålytans skyddande kromoxidskikt lokalt på olika ställen. Genom heterogeniteten har hastigheten på syrediffusionen varit olika hög till olika partier på stålytorna, vilket förmodligen har varit avgörande för var angreppen har uppkommit. Helt avgörande för angreppens djup och antal har emellertid varit kloridhalten. En bedömning är att det faktum att cirka 0,5 meter av rören stack upp ovanför markytan har stimulerat korrosionen ytterligare. Vid regn och vid snösmältning har det på denna välluftade rördel kunnat försiggå en kraftig katodisk korrosionsreaktion, som sålunda har kunnat förstärka korrosionen på rörpartier nere i jorden.
- De mest negativa korrosionspotentialerna mättes på rören vid Åkerhög/Kungälv. Det antyder att jorden på lite större djup är anaerob(syrefri). Därigenom kan det ha utvecklats en typ av aktiv/passivcell där stålet närmast markytan är katodiskt och stålet längre ner på röret är anodiskt och korroderar fläckvis.
- Det går inte att med hjälp av mätning av korrosionspotentialen med säkerhet avgöra om det pågår korrosion på en jordförlagd rostfri stålkonstruktion.

3.1.10 Korrosion på nedgrävda provplåtar av kolstål i jord

Vid Korrosionsinstitutet (numera KIMAB) har det bedrivits tre program med exponering av provplåtar i jord:

Program I	Exponering i olika jordarter
Program II	Exponering i sandig morän
Program III	Exponering i fyllningsjord

1983 påbörjade Korrosionsinstitutet en långtidsundersökning med syfte att kartlägga korrosionen på olika metaller, bland annat kolstål, nedgrävda i typiska svenska jordar samt att undersöka inverkan av olika jordparametrar på korrosionen. Nedan redovisas resultat från upp till sju års exponering av kolstål i olika jordar och upp till fem års exponering av kolstål i sandig morän och upp till tre års exponering av kolstål i fyllningsjord. Resultaten från undersökningarna har tidigare rapporterats, Camitz och Vinka (1988; 1989), Norin och Vinka (2003a; 2003b) Vinka (1997; 2001; 2003) och Vinka och Årebäck (1996).

Exponering i olika jordar

Sju provningsplatser i jord upprättades på olika ställen i landet. Jorden på varje plats består av en relativt likartad jord representativ för svensk geologi. Jordarna utgörs av lera (glacial respektive postglacial lera), svart sulfidrik siltig lera så kallad svartmocka, gytjtig lera (två typer, varav en marin gytjtig lera i Göteborg med hög kloridhalt), torv i en mosse och sand. Jorden är naturligt lagrad och har aldrig tidigare varit omgrävd.

Vid provningsplatsen i Linköping (sand) måste man av praktiska skäl gräva ner proverna, som skulle ligga över grundvattenytan på en plats cirka 100 m från platsen där man grävde ner proverna under grundvattenytan. Vid den senare provningsplatsen står grundvattnet vid markytan. Detta resulterade i att både provnivån över och den under grundvattenytan kom att ligga cirka 0,7 m under markytan. På den övre provnivån är det cirka 10 m ned till grundvattenytan. pH-värde och karbonathalt skiljer något mellan de två platserna men i övrigt är jorden likartad.

En sammanställning av jordens karaktär för provplatserna Enköping, Sollentuna, Göteborg, Stockholm och Linköping återfinns i Tabell 3.4 medan jordens egenskaper för provplatserna Munkarp, Stråssan, Chalmers, Laxå och Kramfors anges i Tabell 3.16.

I varje provgröp finns en övre och en nedre provnivå på cirka 0,7 respektive 1,7 m djup under markytan. Grundvattenytan varierar mellan de två nivåerna med årstiderna. Vid nedgrävningen av prover vid provningsplats Kramfors ligger de båda provnivåerna relativt djupt, 1,2 m respektive 2,2 m under markytan. Detta resulterade i att grundvattenytan i Kramfors långa perioder ligger vid eller något över den övre provnivån.

Provplåtarna placerades stående i rad i omrörd jord med en rad över och en rad under grundvattenytan. I undersökningen exponerades provplåtar med dimensionen 150 x 100 mm av varmvalsat kolstål med tre plåtar i varje rad. De varmvalsade kolstålsplåtarna exponerades med glödskalet på metallytan. Samma provmaterial användes också vid exponeringarna i morän och fyllningsjord. Utöver dessa prover finns provplåtar exponerade över och under grundvattenyta i fyllningsjord av sand, se Camitz och Vinka 1988 och 1989.

Exponering i sandig morän

Fältexponeringar av metallerna kolstål, zink, koppar och bly påbörjades hösten 1987 vid provningsplatser i Skåne och Dalarna. I Munkarp (35 km NV Lund, Höörs kommun, Skåne län) exponerades provplåtar i likartade jordar men marken var bevuxen med olika trädslag – björk, bok och gran. Dessa trädslag ger upphov till viss skillnad i jordens försurning. Vid provningsplatsen i Stråssan (40 km NV Falun, Falu kommun, Dalarnas län) exponerades provplåtar i sandig morän.

I både Munkarp och Stråssan utgörs jorden av morän med stort sandinnehåll (sandmorän eller i björkbeståndet i Munkarp sandig morän) och i Stråssan utgörs trädbeståndet av gran. Jordmånen på båda provningsplatserna är järnpodsol, Haplic Podzol enligt FAO:s system. Jordarna på försökslokalerna i Munkarp är försurade. Huvudorsaken till försurningen i Munkarp är atmosfäriskt nedfall av sura ämnen.

Provningsplatsen i Stråssan ligger i en sluttning. Fram till 1956 bestod skogen av gammal skog, dominerad av gran. Denna skog kalhögs 1956 – 57. På sommaren 1957 hyggesbrändes området och på våren 1958 planterades gran.

Provningsplats	Jordart	Vattenkvot %	Resistivitet, ohm·m	pH-värde (H ₂ O)	Kloridhalt mg Cl ⁻ /kg torr jord	Organisk halt %
Munkarp Lund	Siltig, sandig morän	15-22	427-1099	4,4-4,7	22-30	1,6-2,2
Stråssan Falun	Siltig, sandig morän	20-31	299-3313	4,8-5,4	20-22	0,8-1,7
Chalmers Göteborg	Lerig, grusig Sand/kärrtorv	21-132	47-160	4,7-8,1	23-119	3,4-38
Laxå	Vitmossetorv	1200-559	72-131	4,2-4,3	180-220	61-75
Kramfors	Siltig lera	42-48	14-26	6,0-6,5	50-60	0,9-1,9

Tabell 3.16
Jordart och jordens kemiska sammansättning och fysikaliska egenskaper på provplatserna Munkarp, Stråssan, Chalmers, Laxå och Kramfors.

Provplåtarna exponerades instuckna stående i en ostörd jordprofil. För exponeringen grävdes en provgrop i vars fyra sidor provplåtar trycktes in i ostörd jord. Provgropen fylldes sedan igen. Detta förfaringssätt medgav fyra olika intag. Provplåtarna exponerades i den icke vattenmättade zonen över grundvattenytan.

Vid provningsplatsen exponerades trippelprover av varje material för varje intag. Provplåtarnas dimension var 100 x 75 mm. Provplåtarna av varmvalsat kolstål exponerades 0,4 m under markytan räknat från plåtens övre kant. De varmvalsade kolstålsplåtarna exponerades med glödskalet på metallytan.

Exponering i fyllningsjord

Undersökningarna i fyllningsjord i Göteborg utfördes i samarbete med Geologiska institutionen, Chalmers tekniska högskola. Fältförsöket har utförts i ett försöksområde i direkt anslutning till Chalmers tekniska högskolas södra del. Försöksområdet iordningställdes i september 1992. Försöket avslutades i sin helhet i maj 1995. Området är gräsbevuxet och ligger i anslutning till Sven Hultins gata.

De ytliga jordlagren inom försöksområdet består av ett 1 – 1,5 m tjockt skikt fyllningsmaterial, som överlagrar den naturligt avsatta jorden bestående av kärrtorv med visst lerinnehåll. Fyllningen karaktäriseras av en moränliknande kornstorleksfördelning. Jordarterna på de olika djupen benämns: lerig sand (0,25 m), lerig grusig sand (0,5 och 0,75 m), kärrtorv (1,1 och 1,3 m) och kärrtorv med lerinslag (1,5 m). Förutom naturlig jord fanns byggnadsavfall: tegelbitar, träbitar och järnskrot i fyllnadsjorden. Dessutom återfanns skalrester i jorden. Skalförande skikt i leran är

tämligen vanligt i Göteborgstrakten och representerar en arktisk-boreal fauna. Provplåtarna exponerades i den icke vattenmättade zonen över grundvattenytan. Grundvattenytan ligger som högst ca 2 m under markytan.

Två lika stora provgropar grävdes i samband med att försöket startades. När provgroparna återfylldes lades stor vikt vid att försöka åter skapa den förutvarande jordlagerföljden. I varje provgrop placerades provplåtar stående på tre olika djup: 0,5, 1,1 och 1,5 m under markytan.

I undersökningen exponerades provplåtar av kallvalsat kolstål och varmvalsat kolstål i två provgropar. De varmvalsade kolstålsplåtarna exponerades med glödskalet på metallytan. På varje provnivå har fyra provplåtar av både varm- och kallvalsat kolstål grävts ned stående i omrörd jord. Provplåtar av kallvalsat kolstål har också tryckts in stående i gropväggen i ostörd jord. Provplåtarnas storlek var 100 x 100 mm.

Resultat – Provningsplatser med olika jordarter

Korrosionshastigheterna efter cirka 7 års exponering i olika jordar visas i Tabell 3.17. Den längsta exponeringstiden i Kramfors är cirka 5 år och inte 7 år. Korrosionshastigheten är angiven som jämn korrosion omräknad från uppmätt massförlust.

De två högsta korrosionshastigheterna uppmättes på den övre nivån i naturlig jord på provningsplatserna Göteborg och Enköping. Lägst korrosionshastighet uppmättes i sand i omättad zon över grundvattenytan i Linköping.

Tabell 3.17
Korrosionshastigheter för jämn korrosion på varmvalsat kolstål efter cirka 7 års exponering. Provplåtar har grävts ned i omrörd jord. Korrosionshastigheterna anges som medelvärde (med standardavvikelse) för trippelprov.

Provningsplats	Jordart	Exp. tid år	Korrosionshastighet µm/år	
			övre nivån	nedre nivån
Enköping	Glacial lera	7,0	22 (2,0)	11 (2,3)
Sollentuna	Postglacial lera	7,1	–	11 (0,5)
Kramfors	Siltig lera	4,9	12 (1,5)	6,1 (3,0)
Göteborg	Gyttig lera	7,0	29 (6,0)	18 (1,6)
Stockholm	Gyttig lera	8,2	17 (0,4)	9,9 (1,4)
Laxå	Torv	7,3	15 (0,2)	14 (0,1)
Linköping	Sand	7,0	6,4 (0,6)	–
Linköping	Vattenmättad grusig sand	7,0	11 (0,6)	–

Kolstål uppvisade högre korrosionshastighet på den övre provnivån i originaljord än på den nedre nivån. Här avviker sandjorden i Linköping, som uppvisar något högre korrosionshastighet i vattenmättad grusig sand under grundvattenytan än i sanden över grundvattenytan.

De mest korrosiva jordarna var gyttjig lera och lera, på provningsplatserna Göteborg och Enköping. Om korrosionen också betraktas på de andra provningsplatserna med gyttjig lera och lera finner man att korrosiviteten är något högre i gyttjig lera än i lera. Den minst korrosiva jorden var sanden i Linköping.

Resultat – Provningsplatser i sandig morän och fyllningsjord

Korrosionshastigheterna efter 5,0 års exponering i sandig morän vid provningsplatserna i Munkarp och Stråssan och efter 2,7 års exponering i fyllningsjord vid Chalmers tekniska högskola visas i Tabell 3.18. Korrosionshastigheten är angiven som jämn korrosion omräknad från uppmätt massförlust.

Korrosionshastigheterna för jämn korrosion i sandig morän var högre i Munkarp än i Stråssan. Den jämna korrosionshastigheten var högst i Munkarp där skogsbeståndet utgjordes av gran. I Munkarp var vattenkvoten i jorden och pH-värdet i markvattnet ungefär lika på de tre provningsplatserna. Provningsplatsen med gran skiljde sig gentemot de två övriga prov-

ningsplatserna med lövskog genom att jonstyrkan i markvattnet var högre på denna provningsplats.

Korrosionshastigheten var högst i granbeståndet i Munkarp och överensstämmer ungefär med uppmätta korrosionshastigheter i lera vid övriga provningsplatser. Korrosionshastigheten i lövskogsbestånden i Munkarp överensstämmer med uppmätt korrosionshastighet i välluftad sand.

Den jämna korrosionshastigheten var högre i fyllningsjorden än i den sandiga moränen. Korrosionshastigheten i fyllningsjorden överensstämmer ungefär med uppmätta korrosionshastigheter i lera vid övriga provningsplatser.

Den jämna korrosionen i fyllningsjorden ökade något, om än marginellt, med djupet. Det kallvalsade intryckta kolstålet uppvisade generellt störst skillnad mellan den övre och nedre nivån. Den kraftigaste jämna korrosionen erhöles på en av de kallvalsade nedgrävda plåtarna på djupet 1,5 m, därav den stora standardavvikelsen (20 µm/år). Denna plåts korrosionshastighet var 41 µm/år, vilket kan jämföras med medelvärdet för de övriga två på 15 µm/år. Den jämna korrosionshastigheten för de nedgrävda kolstålsplåtarna har generellt sett minskat efter den längre exponeringstiden, medan den har ökat något för de intryckta kallvalsade kolstålsplåtarna.

Provningsplats	Jordart	Exponeringstid år	Exponeringssätt	Typ av kolstål	Trädbestånd	Djup m	Korrosionshastighet µm/år
Munkarp	Sandig morän	5,0	Intryckt i ostörd jord	Varmvalsat	Björk	0,4	9,4 (2,2)
					Bok	0,4	9,2 (0,6)
					Gran	0,4	12 (1,1)
Stråssan	Sandig morän	5,0	Intryckt	Varmvalsat	Gran	0,4	6,8 (1,1)
Chalmers tekniska högskola, Göteborg	Fyllningsjord	2,7	Nedgrävt i omrörd jord	Varmvalsat	–	0,5	13 (1,1)
						1,1	15 (2,2)
						1,5	15 (1,4)
		2,7	Nedgrävt i omrörd jord	Kallvalsat	–	0,5	12 (1,5)
						1,1	13 (1,0)
						1,5	20 (1,4)
		2,7	Intryckt i ostörd jord	Kallvalsat	–	0,5	13 (1,6)
						1,1	21 (4,6)
						1,5	21 (3,6)

Tabell 3.18
Korrosionshastigheter för jämn korrosion på kolstål efter exponeringstiden 5,0 år på provningsplatserna Munkarp och Stråssan med jorden sandig morän och efter 2,7 år i fyllningsjord vid Chalmers tekniska högskola. Korrosionshastigheterna anges som medelvärde (med standardavvikelse) för sex provplåtar i sandig morän och för fyra provplåtar i fyllningsjord.

Sammanfattning

I Figur 3.25 sammanfattas den jämna korrosionshastigheten för provplåtar av varmvalsat kolstål vid olika provningsplatser. Exponeringstider framgår av Tabell 3.17 och 3.18. Korrosionshastigheterna anges som medelvärden i diagrammet. För provningsplats Munkarp anges ett medelvärde för samtliga provplåtar oavsett trädslag efter exponeringstiden 5,0 år.

En jämförelse visar på att den jämna korrosionshastigheten i allmänhet var lägre i fyllningsjorden på de övre nivåerna (0,5 och 1,1 m) än i övriga jordarter. Lägre korrosionshastigheter uppmättes emellertid i Kramfors, i sand i Linköping samt i sandig morän i Stråsan och i lövskogsbestånden i Munkarp. På den nedre nivån var den jämna korrosionshastigheten ungefär lika för de olika jordarna.

Efter lång exponeringstid (cirka 7 år) var den jämna korrosionshastigheten på den övre provnivån högst i Göteborg och Enköping och på den nedre nivån var den högst i Göteborg och Laxå. Den högre korrosionshastigheten vid provningsplatserna Göteborg och Stockholm kan till viss del sättas i samband med förhöjda halter av klorid i jorden.

Initialt, efter ett år, var den jämna korrosionshastigheten ungefär lika för de olika provningsplatserna. Ju längre tid provplåtarna exponeras, ju större blir skillnaderna i jämn korrosionshastighet. Av detta framgår att det är viktigt att korrosionsundersökningen pågår under en längre tid, absolut mer än ett år, för att det skall vara möjligt att klargöra de lokala korrosionsförhållandena.

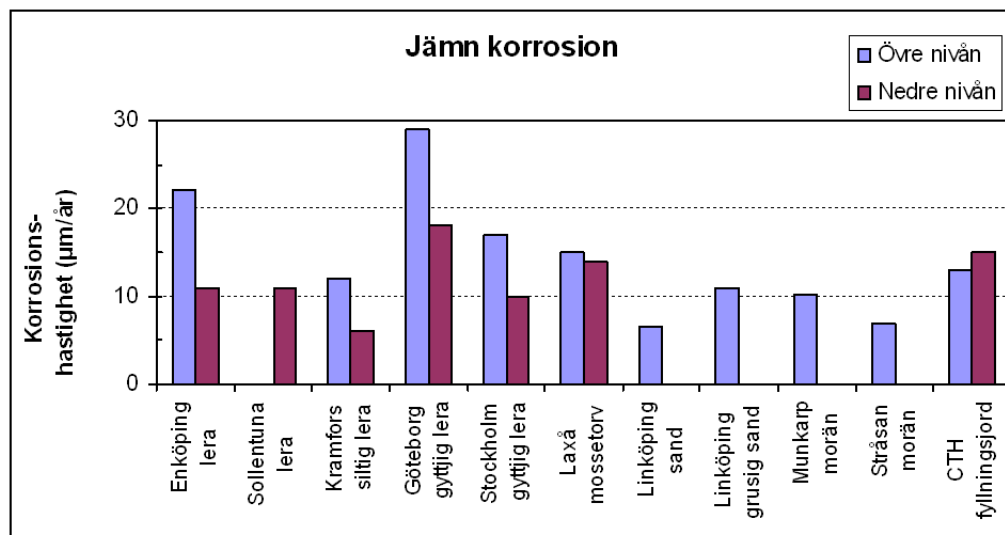
Såväl den jämna som den lokala korrosionshastigheten var lägst i sanden i omättad zon och i den vattenmättade grusiga sanden i Linköping. I denna var också markvattnets alkalinitet förhöjd. Den låga korrosionshastigheten i grusig sand torde bero på att jorden är vattenmättad vilket bidrar till en reducerad syretillgång. Dessutom kan den förhöjda alkaliniteten ha bidragit till att det utbildats ett skyddande skikt av karbonathaltiga korrosionsprodukter och andra beläggningar, som haft en reducerande inverkan på korrosionshastigheten, Figur 3.25.

Från de tre olika undersökningarna kan följande generella indelning göras mellan korrosionshastighet och typen av jord. Den jämna korrosionshastigheten ökade med typen av jord i följande ordning:

sand $\approx$ sandig morän < fyllningsjord < torv $\approx$ lera < gyttjig lera

Det måste dock poängteras att korrosionens storlek i fyllningsjord är svårbedömd eftersom sammansättningen hos fyllningsjord kan variera inom vida gränser.

Figur 3.25.
Korrosionshastigheter för jämn korrosion på provplåtar av varmvalsat kolstål vid olika provningsplatser.



3.1.11 Korrosion enligt Norsk Peleveledning (2005)

Enligt den norska "Peleveledningen" (2005) skall korrosionsproblem principiellt tillvaratas med korrosionsskydd eller ett ökat påltvärnsnitt. Återstående osäkerhet beaktas vid val av reduktionsfaktorn f_a . För praktisk dimensionering kan man utgå från de dimensionerande korrosionshastigheterna i Tabell 3.19, som baseras på norska, svenska och engelska erfarenheter samt SS-EN 1993-5, vilket för de flesta fall ger en viss extra säkerhet i bedömningen av korrosionshastigheterna.

Osäkerheten är större om ett eller flera av följande förhållanden råder:

- Skiktad jord
- Dåligt packad fyllning närmast grundvattenytan
- Organiskt material i jorden
- Speciellt aggressivt grundvatten, förorenat
- Läckströmmar

Pålar i havsmiljö kräver särskild värdering av korrosionen.

3.2 Erfarenheter av belagt stål i jord

3.2.1 Korrosion på förzinkat stål och zink i jord

Vid Korrosionsinstitutet (numera Swerea KIMAB) har det bedrivits tre program med exponering av provplåtar i jord:

- Program I Exponering i olika jordar
Program II Exponering i sandig morän
Program III Exponering i fyllningsjord

1983 påbörjade Korrosionsinstitutet en långtidsundersökning med syfte att kartlägga korrosionen på olika metaller, bland annat förzinkat stål och zink, nedgrävda i typiska svenska jordar samt att undersöka inverkan av olika jordegenskaper på korrosionen. Nedan redovisas resultat från upp till sju års exponering av varmförzinkat stål i olika jordar, från upp till fem års exponering av zink i sandig morän och från upp till tre års exponering av zink i fyllningsjord. Resultaten från undersökningarna har tidigare rapporterats av Norin &

Vinka (2003a) Vinka (1997; 2000; 2003), Vinka & Camitz (1996) och Vinka & Årebäck (1996).

Beträffande de olika exponeringsprogrammen, se Avsnitt 3.1.10.

Exponering i olika jordar

De varmförzinkade stålplåtarna exponerades på samma provningsplatser och i samma provpropar som kolstålsplåtarna i den fältundersökning, som beskrivs i Avsnitt 3.1.10, "Exponering i olika jordarter".

Provplåtarna placerades således i en rad i omrörd jord med en rad över och en rad under grundvattenytan. I varje rad fanns tre prover. I undersökningen exponerades provplåtar med dimensionen 150 x 100 mm av varmförzinkat stål.

Vid varmförzinkningen doppades varmvalsat kolstål i zinksmälta vid cirka 460 °C. Medianvärdet och medelvärdet hos zinkbeläggningens tjocklek var 165 µm, detta motsvarar beläggningens massa 1190 g/m² per enkel sida. Zinkbeläggningen bestod helt av järn-zinklegering (grått zinksikt). En typisk beläggning med total tjocklek 180 µm var uppbyggd av två skikt: ett delta-(δ)-skikt med tjockleken 8 – 12 µm med järnhalten cirka 12 mass-% längst in mot stålet och ett yttre tjockt zeta-(ζ)-skikt med järnhalten cirka 6 mass-%.

Exponering i sandig morän

Fältexponeringar av zink påbörjades hösten 1987 vid provningsplatser i Skåne (Munkarp/Lund) och i Dalarna (Stråsan/Falun).

Provplåtarna exponerades på provningsplatserna instuckna stående i en ostörd jordprofil. För exponeringen grävdes en provgrop i vars fyra sidor provplåtarna trycktes in stående i ostörd jord. Provgropen fylldes sedan igen. Detta förfaringssätt medgav fyra olika intag. Vid provningsplatsen exponerades i syfte att minimera slumpvisa resultat trippelprover för varje intag på så sätt att tre likadana plåtar placerades intill varandra. Provplåtarnas dimension var 100 x 75 mm. Plåtarna placerades

Miljö	Korrosionshastighet i µm/år
Naturligt lagrad jord under grundvattenytan	15
Naturligt lagrad jord över grundvattenytan	20
Gyttja och torv	40
Fyllning med normal eller ingen packning	40
Tidvattenzon och skvalpzon i vatten	300
Under tidvattenzon i vatten	100

Tabell 3.19
Dimensionerande ensidiga korrosionshastigheter enligt Norsk Peleveledning (2005).

i den icke vattenmättade zonen över grundvattenytan, 0,4 m under markytan räknat från plåtarnas övre kant

Exponering i fyllningsjord

Undersökningarna i fyllningsjord i Göteborg utfördes i samarbete med Geologiska institutionen, Chalmers tekniska högskola (CTH). Fältförsöket utfördes i ett försöksområde i direkt anslutning till Chalmers tekniska högskolas södra del. Området är gräsbevuxet och ligger i vid Sven Hultins gata.

I undersökningen exponerades provplåtarna i två provgropar. I varje provgrop placerades provplåtar stående på tre provnivåer: 0,5, 1,1 och 1,5 m under markytan. På varje provnivå grävdes fyra provplåtar ned stående i omrörd jord. Provplåtarnas storlek var 100 x 100 mm. Plåtarna placerades i den icke vattenmättade zonen över grundvattenytan. Grundvattenytan låg som högst ca 2 m från markytan.

Resultat – Provningsplatser med olika jordarter

Korrosionshastigheterna för zinkskiktet på förzinkat stål i olika jordarter visas i Tabell 3.20. Korrosionshastigheterna avser hastigheten för jämn korrosion. Värdena ges som medelvärde med standardavvikelse för trippelprov.

Korrosionshastigheten var i allmänhet något högre på den övre provnivån än på den nedre nivån. Uppdelat efter jordart ökade korrosiviteten i följande ordning:

sand < lera < gyttjig lera < torv

Resultat – Provningsplatser i sandig morän och fyllningsjord

Korrosionshastigheterna för zink i sandig morän och i fyllningsjord visas i Tabell 3.21. Korrosionshastigheterna avser jämn korrosion och anges som medelvärden med standardavvikelse för sex provplåtar i sandig morän och för fyra provplåtar i fyllningsjord.

Tabell 3.20

Korrosionshastigheter för zinkskiktet på varm-förzinkat stål i olika jordarter efter cirka 7 års exponering. Korrosionshastigheterna anges som medelvärde (med standardavvikelse) för trippelprov.

Provningsplats	Jordart	Exp. tid år	Korrosionshastighet µm/år	
			övre nivå	nedre nivå
Enköping	Glacial lera	7,0	12 (1,9)	9,3 (0,9)
Sollentuna	Postglacial lera	7,1	13 (0,7)	6,7 (1,2)
Kramfors	Siltig lera	4,9	14 (3,3)	11 (5,6)
Göteborg	Gyttig lera	7,0	18 (0,8)	17 (1,9)
Stockholm	Gyttig lera	8,2	11 (0,6)	10 (1,4)
Laxå	Torv	7,3	24 (6,0)	20 (2,1)
Linköping	Sand	7,0	1,4 (0,2)	–
Linköping	Vattenmättad grusig sand	7,0	4,4 (0,7)	–

Tabell 3.21.

Korrosionshastigheter för jämn korrosion på zink efter exponeringstiden 5,0 år på provningsplatserna Munkarp och Stråsan med sandig morän och efter 2,7 år i fyllningsjord vid Chalmers tekniska högskola. Korrosionshastigheterna anges som medelvärde (med standardavvikelse) för sex provplåtar i sandig morän och för fyra provplåtar i fyllningsjord.

Provningsplats	Jordart	Trädbestånd	Exp. tid år	Djup m	Korrosionshastighet µm/år
Munkarp	Sandig morän	Björk	5,0	0,4	1,4 (0,2)
		Bok	5,0	0,4	1,4 (0,5)
		Gran	5,0	0,4	2,1 (0,5)
Stråsan	Sandig morän	Gran	5,0	0,4	1,1 (0,4)
Chalmers tekniska högskola, Göteborg	Fyllningsjord	–	2,7	0,5	9,3 (1,7)
			2,7	1,1	7,5 (0,8)
			2,7	1,5	14 (4,1)

Sammanfattning

I Figur 3.26 sammanfattas den jämna korrosionshastigheten för zinksiktet på provplåtar av varmförzinkat stål och för zink vid olika provningsplatser. Exponeringstider framgår av Tabell 3.20 och 3.21. Korrosionshastigheterna anges som medelvärden i diagrammet. För provningsplats Munkarp anges ett medelvärde för samtliga provplåtar efter exponeringstiden 5,0 år oavsett vegetation på markytan.

Det framgår att korrosionshastigheten i sandig morän, den vanligaste svenska typen av jord, är ungefär lika som i sand. Korrosionshastigheten i fyllningsjord liknar den i lera, men korrosionsrisken är svårbedömd eftersom sammansättningen hos fyllningsjord kan variera inom vida gränser. Korrosivitetsordningen med ökande korrosionshastighet blir alltså:

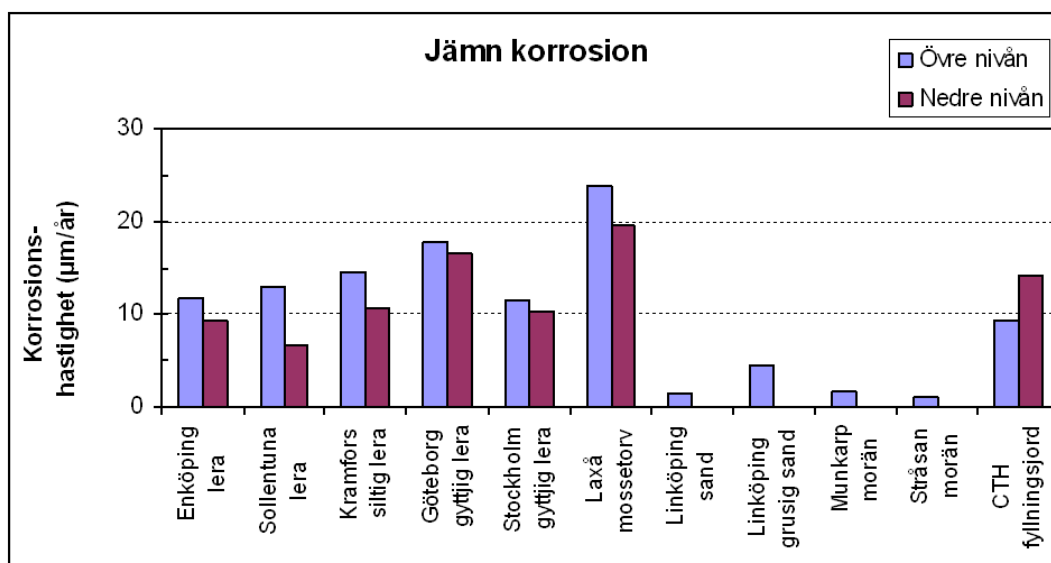
sand $\approx$ sandig morän < lera < gyttjig lera < torv

Denna serie för korrosivitet mot förzinkat stål är tillämplig för jordar med låg karbonathalt. För jordar med kalciumkarbonatförekomst (CaCO_3 -förekomst), kalkhaltiga jordar, torde korrosionshastigheten bli något lägre än i jämförbara jordar med ingen eller ringa CaCO_3 -halt. Korrosionen i kalkhaltiga jordar i Sverige är dåligt undersökta, men det finns indikationer på att korrosionshastigheten hos zinksiktet på förzinkat stål är lägre i skånska kalkhaltiga leror än i icke kalkhaltiga leror. (Jfr. Avsnitt 3.2.2)

Svenska jordar har i allmänhet låg karbonathalt. Den låga karbonathalten i jorden beror på att berggrunden till mycket stor del (ca 75 %) består av urberg, det vill säga prekambrisk kristallin berggrund äldre än 570 miljoner år. Det är endast i områden med sedimentär berggrund (kalksten, sandsten och lersten) som jorden innehåller CaCO_3 i någon större utsträckning. Större sådana områden finns i Skåne, på Öland och Gotland och området kring Storsjön i Jämtland och Siljan i Dalarna.

Ur praktisk synpunkt kan de erhållna resultaten summeras enligt följande:

För svenska jordar med låg kalciumkarbonathalt (CaCO_3 -halt) kan korrosionsrisken för zinksiktet på förzinkat stål bedömas med ledning av typen av jord. Uppdelat efter typ av jord ökar korrosiviteten i följande ordning: sand $\approx$ sandig morän < lera < gyttjig lera < torv. Korrosionsriskbedömningen på grundval av typ av jord visade sig vara bättre än bedömningar med utgångspunkt från jordens resistivitet och pH-värde.



Figur 3.26. Korrosionshastigheter för jämn korrosion på zinksiktet hos varmförzinkat stål och på zink vid olika provningsplatser.

3.2.2 Korrosion på varmförzinkade kraftledningsstolpar i jord

På uppdrag av dåvarande Sydkraft AB utförde Statens geotekniska institut (SGI) under åttiotalet två utredningar om korrosionen på kraftledningsstolpar av förzinkat stål i jord i syfte att finna ett sätt att bedöma riskerna för allvarlig korrosion på dessa, som vid den aktuella tidpunkten hade stått ca 40 år i jord, Bergdahl et al. (1990) De aktuella stolparna består av fackverksben av L-järn 90x90x9 mm respektive 70x70x7 mm, som grundlagts på en rustbädd av slipers ca 2 m under markytan och kringfyllets med uppgrävda jordmassor. Stolparna var varmförzinkade och skiktjockleken visade sig vid mätning över markytan vara mellan 50 och 300 µm.

Under utredningen utfördes ett antal olika undersökningar samt framgrävdes ett 30-tal stolpar varvid korrosionen på stolparna mättes. Härvid utgick man från att stolparnas dimensioner ursprungligen var desamma, som de man kunde uppmäta över markytan.

Uppmätningen av korrosionen visade på areaförluster mellan 0,17 och 7,5 % av medeltvärnsnittsarean på stolparna över markytan utom i ett fall då den var 13,5 %. Dessa areaförluster motsvarar en enkelsidig korrosionshastighet på 0,95 till 11,0 µm/år utom för den värst korroderade stolpen där den blev 17,5 µm/år. Zinksiktet var på vissa stolpar fläckvis bortfrätt medan det på andra var nära intakt. Den maximala korrosionen uppmättes på mellan 0,5 och 1,4 m djup under markytan.

En jämförelse mellan de största korrosionsvärdena (≥ 5 % areaförlust) och benämningarna på upptagna jordprover visar att de största värdena erhållits i torv, lera och sand. En jämförelse med vattenkvoten visar att korrosionshastigheten ökar om denna ökar. pH-värdet bedöms inte ensamt ha någon större betydelse vid mätvärden över ca pH 5,0. Vid lägre värden än 5,0 ökar korrosionen betydligt, vilket kan sammanhånga med att zinkens korrosionsbenägenhet ökar markant vid $\text{pH} \leq 5,0$.

Svåra korrosionsangrepp kan också fås vid låga resistivitetsvärden (100 – 400 Ωm) samt vid grundvattennivåer mellan 0,3 och 1,2 m under markytan.

Eftersom ingen enskild parameter direkt återspeglar korrosionshastigheten har funktioner av parametrarna satts samman till en funktion vars värde återspeglar korrosionshastigheten enligt följande:

$$\text{Korrosionen} = \left[\frac{\log w(7,0 - 2,5h_w) \cdot \Delta U}{\text{pH} \cdot \log \rho} \right]$$

Där:

w = vattenkvot

h_w = grundvattenytans minsta djup under markytan

ΔU = potentialskillnad mellan stolpe och förzinkat grundvattenrör

ρ = resistiviteten i den omgrävda jorden 0,5 m från stolpen

pH = lägsta uppmätta pH-värde på platsen.

3.2.3 Korrosionsskyddande beläggningar

Stålpålar skyddas ibland genom beläggning av något slag; organiska beläggningar såsom polyeten eller epoxi eller oorganisk beläggning som zink. Kunskapen om skyddseffektiviteten hos belagda stålpålar har dock varit bristfällig. Man har således saknat kunskaper om dels beläggningarnas motståndskraft mot mekanisk nötning vid neddrivning dels beläggningarnas beständighet och korrosionsskyddande förmåga på lång sikt.

I en rapport av Bergdahl & Tränk (2005) redovisas resultatet av en provning av reptåligheten hos korrosionsskydd på stålpålar och hur eventuella skador kan upptäckas med in situ-mätning. Provning av beläggningarnas beständighet och korrosionsskyddande förmåga utfördes av Swerea KIMAB.

Som provpålar har valts rörpålar (RR 115). Dessa var epoxi-målade (4 st), varmförzinkade (4 st) och obehandlade (2 st) som referenspålar. Dessutom användes stål-plastpålar med beläggning av polyeten. Alla provpålar hade längden 12 m. Före neddrivning mättes beläggningarnas tjocklek och tätheten dvs friheten från porer undersöktes.

Provpålarne drevs ned på två provplatser: Universitetsområdet och Kolbyttemon båda i Linköping. På Universitetsområdet bestod jorden av 2,4 m packad bergkross, 8 m lera och 1 m friktionsjord på berg. På Kolbyttemon bestod jorden av sand och silt med hög till medelhög relativ fasthet. Djupet till berg var större än 12 m.

Rörpålarne drevs ned med fallhejare på 3 ton och 0,25 m fallhöjd medan stålplastpålarne drevs ned med vibrationshejare. Efter sju veckor i jorden drogs pålarne upp med vibrationshejare och kapades i hanterbara längder om 2,0 – 2,5 m för närmare undersökning.

Efter uppdragning har beläggningarna noga undersökts genom fotodokumentation, tjockleksmätning, porsökning och okulär granskning (skadeklassning). Undersökningen visade att epoxibeläggningen erhållit mest skador till följd av nedslagning och uppdragning (mycket skadade till relativt mycket skadade). De varmförzinkade pålarna bedömdes vara relativt mycket skadade till oskadade medan de polyetenbelagda pålarna bedömdes som relativt skadade till relativt oskadade. Beläggningarna blev mest skadade på Universitetsområdet trots det samlade större neddrivningsmotståndet på Kolbytte-mon, sannolikt beroende på bergkrossfyllningen. Skadorna var störst närmast pålspetsarna och vid skarvhylsorna sannolikt beroende på att jordtrycket mot mantelytan där blir störst vid neddrivningen.

Sammanfattningsvis kan konstateras att samtliga pålar fått beläggningsskador vid de utförda försöken och att skadorna är av sådan omfattning att de kan leda till korrosion på underliggande stål. De epoxibelagda pålarna har fått störst skador och bedöms ej uppfylla Boverkets konstruktionsregler utan bör skyddas genom extra rostmån eller med katodiskt skydd vid jordförhållanden liknande de som nu provats. De polyetenbelagda pålarna har fått få djupare skador (frilagt stål) medan de förzinkade inte fått några nyare djupa skador.

4. Åtgärder mot korrosion

4.1 Boverkets regler för korrosionsskydd

Enligt Boverket (2003) 2:13 skall "Byggnadsdelar och material ingående i bärande konstruktioner vara beständiga eller kunna skyddas och underhållas så att kraven i brottgräns- och bruksgränstillstånd uppfylls under byggnadens livslängd". Enligt 8:56 skall stålkonstruktioner i korrosiv miljö ges erforderligt rostskydd. Detta kan utgöras av lämplig beläggning, katodiskt skydd eller rostmån.

4.1.1 Dimensionering med hänsyn till korrosion – rostmån

Alla stålplåtar skall dimensioneras för en livslängd av minst 100 år om inte konstruktionen uppenbart skall ha en annan kortare livslängd. Dimensionering med hänsyn till korrosion (rostmånsdimensionering) av stålplåtar skall utgå från att påltvårsnittet först reduceras av korrosionen och att övriga lastfall kommer därefter. Eftersom korrosionen på stålplåtar i mark är beroende av jord- och grundvattenförhållandena skall rostmånen alltid bestämmas utifrån jord- och grundvattenförhållanden på platsen t. ex. utifrån de värden, som anges i Pålkommisionens Rapport 98. I denna anges "dimensionerande rostmån" för olika jord- och vattenförhållanden. Dimensionerande rostmån för 100 års livslängd har valts utifrån extrapolerade upmätta värden på korrosionen vid olika jord- och vattenförhållanden, som ökat med en bedömd "partialkoefficient" för att ta hänsyn till osäkerheten i bestämningen av korrosionshastigheten. För rörplåtar, som inte korrosionsskyddas invändigt gäller också

att man invändigt skall ta hänsyn till en viss rostmån.

4.1.2. Dimensionering med rostmån enligt Pålkommisionens Rapport 98

Enligt Pålkommisionens Rapport 98 "Dimensioneringsanvisningar för slagna slanka stålplåtar" skall alla plåtar dimensioneras för en livslängd av minst 100 år om det inte är uppenbart att livslängden är kortare. Dimensioneringen skall ske med hänsyn till den mest korrosionsutsatta delen av plåten. Dimensioneringen med rostmån enligt PK Rapport 98 gäller inte bara för slanka stålplåtar utan för alla typer av obelagda stålplåtar som drivs ned i ostörd jord.

Dimensionering med rostmån skall utgå från kunskapen om jord- och grundvattenförhållanden på platsen och en bedömning av eventuell framtida förändring i dessa. Dimensioneringen kan indelas i:

- Rostmånsdimensionering vid enkla förhållanden.
- Rostmånsdimensionering vid komplexa och korrosiva förhållanden.

Med enkla förhållanden avses naturlig jord (ej sulfidhaltig jord) och fyllning av friktionsjord med känd sammansättning förutsatt att grundvattnet är sött och ej kemiskt aggressivt och större framtida ändringar av förhållandena ej förutses. Härvid kan dimensionerande rostmån för 100 års livslängd bestämmas från Tabell 4.1

Tabell 4.1
Dimensionerande rost-
mån för 100 år i jord
vid enkla förhållanden.

Jordart	Dimensionerande rostmån, mm	
	över GW ¹⁾	under GW
Sand, grus samt sandiga/grusiga moräner och fyllningar	2	2
Lera, silt, leriga/siltiga moräner	3	2
Gyttig lera/silt, gyttja, torv, dy (vattenkvot > 80 %)	4	3

¹⁾ Över GW inkluderar också t o m 1 m under GW.

Vad som avses med komplexa eller korrosiva förhållanden anges ej specifikt men kan t.ex. utgöras av:

- Äldre innerstadsmiljö med förorenat grundvatten
- Fyllningar med organiskt eller okänt innehåll.
- Jord med salt grundvatten.
- Påldelar i vatten eller i grov fyllning under vatten.
- Deponier.
- Fyllningar med aska, koks eller slagg.
- Mark med elektriska likströmmar.
- Mark vid kemisk processindustri eller avfall från sådan.
- Sulfidjord t.ex. s.k. svartmocka

För sådana förhållanden bör livslängdsdimensionering utföras av geotekniskt och korrosionstekniskt sakkunniga i förening och helst baseras på en korrosivitetsundersökning. Dimensioneringen kan ske genom tillämpning av värdena i Tabell 4.2. Vid förekomst av elektrisk likström, kolaska eller koksbitar i jorden kan inte Tabell 4.2 användas. I sådana fall bör andra skyddsåtgärder än dimensionering med rostmån vidtas t.ex. stålplåtar med foderrör av stål och betonginjutning.

I Rapport 98 anges att rörpålar också skall dimensioneras för invändig korrosion om de inte igjuts med betong eller cementbruk. Här för kan värdena i Tabell 4.3 användas.

4.1.3 Dimensionering enligt Eurokod SS-EN 1993-5

Enligt svensk standard SS-EN 1993-5:2007, Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner - Del 5: Pålar och spont kan hänsyn till korrosion tas genom:

- tillägg av rostmån
- extra säkerhet
- korrosionsskyddande beläggningar
- användning av katodiskt skydd
- injutning i betong eller med injektering

Hänsyn vid dimensioneringen kan tas till att den förväntade korrosionen är olika i olika zoner i jord eller vatten. Vid kortare livstid för konstruktionen än 4 år behöver hänsyn ej tas till korrosion. Vid verifiering av pålars bärförmåga skall man i både brott- och bruksgränstillstånd beakta en jämn avrostning runt hela pålens periferi.

Dimensionerande korrosionshastigheter (uttryckt som tjockleksförlust per tid) vid olika jord- och vattenförhållanden anges som funktion av konstruktionens livslängd i två tabeller enligt nedan. Tabell 4.4 anger dimensionerande korrosion (rostmån) i jord medan Tabell 4.6 anger motsvarande värden i sött- och havsvatten vid olika livslängd. Korrosionshastigheten i luft anges till 0,01 mm/år under normala betingelser och 0,02 mm/år i marin atmosfär. Det anges också att passande värden på korrosionshastigheter med hänsyn till lokala förhållanden kan anges i en Nationell Bilaga till svensk standard SS-EN 1993-5:2007. Korrosionen inuti ihåliga pålar, som har vattentäta ändar eller, som är fyllda med betong kan man försumma.

Jordart	Dimensionerande rostmån, mm	
	över GW	under GW
Jordar som genomsätts av havsvatten utom Bottenviken	5	3
Okontrollerad fyllning av naturlig jord	4	3

Tabell 4.2
Dimensionerande rost-
mån för 100 år i jord,
vid komplexa och kor-
rosiva förhållanden.

Omgivande grundvatten	Dimensionerande rostmån, mm
Sött	1
Salt, bräckt	1,5

Tabell 4.3
Dimensionerande, in-
vändig rostmån för
100 år.

Tabell 4.4
Tjockleksförlust (mm)
på grund av korrosion
på stålplåtar och stål-
spont i jord med och
utan grundvatten, som
underlag vid beräkning
av rostmått vid olika
livslängder.

Jordförhållanden	Tjockleksförlust på grund av korrosion (mm) vid avsedd livslängd				
	5 år	25 år	50 år	75 år	100 år
Ostörd naturlig jord (sand, silt, lera, skifferjord etc.)	0	0,30	0,60	0,90	1,20
Förorenad naturlig jord och jord i industriområde	0,15	0,75	1,50	2,25	3,00
Aggressiv naturlig jord (kärr, myr, torv etc.)	0,20	1,00	1,75	2,50	3,25
Ikke packad och ikke aggressiva fyllningar (lera, skifferjord, sand, silt etc.)	0,18	0,70	1,20	1,70	2,20
Ikke packad och aggressiva fyllningar (innehåll av askor, slagg etc.)	0,50	2,00	3,25	4,50	5,75

Anmärkningar:

- 1) Korrosionshastigheten i packad fyllning är lägre än i ikke packad fyllning. För packad fyllning kan tabellvärdena för ikke packad fyllning halveras.
- 2) Korrosionsvärdena för livslängderna 5 och 25 år är baserade på faktiska mätningar medan värden för andra livslängder har extrapolerats.

Tabell 4.5
Beräknade dimensionerande korrosions-
hastigheter ($\mu\text{m}/\text{år}$) på
stålplåtar och stålspont
i jord med och utan
grundvatten för olika
tidsintervall. Korrosi-
onshastigheterna är
beräknade från tjock-
leksförlusten under de
tidsintervall, som ang-
es i Tabell 4.4.

Jordförhållanden	Beräknad dimensionerande korrosionshastighet ($\mu\text{m}/\text{år}$) för olika tidsintervall			
	0 – 5 år	5 – 25 år	0 – 25 år	25 – 100 år
Ostörd naturlig jord (sand, silt, lera, skifferjord etc.)	0	15	12	12
Förorenad naturlig jord och jord i industriområde	30	30	30	30
Aggressiv naturlig jord (kärr, myr, torv etc.)	40	40	40	30
Ikke packad och ikke aggressiva fyllningar (lera, skifferjord, sand, silt etc.)	36	26	28	20
Ikke packad och aggressiva fyllningar (innehåll av askor, slagg etc.)	100	75	80	50

De i Tabell 4.4 angivna tjockleksförlusterna för olika livslängder omräknas här till korrosionshastighet, Tabell 4.5, för att lättare kunna jämföra dessa med andra redovisade rostmått. I den svenska standarden SS-EN 1993-5:2007 anges inte dessa korrosionshastigheter.

Korrosionshastigheterna för olika jordförhållanden i Tabell 4.5 kan alltså i allmänhet beskrivas som två korrosionshastigheter: en högre korrosionshastighet för tidsintervallet 0 – 25 år och en lägre korrosionshastighet för tidsintervallet 25 – 100 år.

För de beräknade korrosionshastigheterna på stålplåtar i olika jordar i Tabell 4.5 gäller:

- För alla jordförhållanden är korrosionshastigheten konstant mellan 25 och 100 år.

- För alla jordförhållanden, utom förorenad naturlig jord, är korrosionshastigheten högre för intervallet 0 – 25 år än för intervallet 25 – 100 år. Korrosionshastigheten antas alltså avta efter 25 års exponering.
- För förorenad naturlig jord är korrosionshastigheten konstant ($30 \mu\text{m}/\text{år}$) under alla 100 åren.
- För förorenad naturlig jord och aggressiv naturlig jord är korrosionshastigheten konstant under de första 25 åren. Korrosionshastigheten är $30 \mu\text{m}/\text{år}$ i förorenad naturlig jord och $40 \mu\text{m}/\text{år}$ i aggressiv naturlig jord.
- För ikke packad och ikke aggressiv fyllning och ikke packad och aggressiv fyllning är korrosionshastigheten högre för intervallet

0 – 5 år än för intervallet 5 – 25 år.

- På stålplåtar i ostörd naturlig jord sker ingen rostning under de första fem åren.

De angivna rostmånen i ostörd naturlig jord är för låga i förhållande till svenska erfarenheter. Den dimensionerande rostmånen 1,2 mm för 100 år motsvarar den dimensionerande korrosionshastigheten 12 µm/år.

Enligt den statistiska bearbetningen av Statens Järnvägars undersökning av korrosion på stålplåtar i jord kan den karakteristiska korrosionshastigheten (95 % fraktilen) sättas till 12 µm/år för alla naturliga jordarter (sandiga och leriga jordarter samt jordar med organiskt innehåll) vid exponeringstid minst 10 år. Den karakteristiska korrosionshastigheten bör ökas med ungefär 50 % för att överföra den till en dimensionerande korrosionshastighet. Den dimensionerande korrosionshastigheten enligt svensk standard SS-EN 1993-5:2007 är alltså lika stor, som den karakteristiska korrosionshastigheten i Statens Järnvägars undersökning.

För övrigt verkar rostmånen enligt svensk standard SS-EN 1993-5:2007 vara rimliga och användbara.

Emellertid råder tveksamhet om Anmärkning nr 1 i Tabell 4.4: ”Korrosionshastigheten i packad fyllning är lägre än i icke packad fyllning”. För packad fyllning kan tabellvärdena för icke packad fyllning halveras. Det är tveksamt, åtminstone på lång sikt, om packning av fyllningen medför att korrosionshastigheten på stålplåtar halveras jämfört med i icke packad fyllning.

De i Tabell 4.6 angivna tjockleksförlusterna för olika livslängder omräknas här till korrosionshastighet, Tabell 4.7, för att lättare kunna jämföra dessa med andra redovisade rostmåner. I den svenska standarden SS-EN 1993-5:2007 anges inte dessa korrosionshastigheter.

Korrosionshastigheterna för olika vattenförhållanden i Tabell 4.7 kan alltså i princip beskrivas som två korrosionshastigheter: en högre korrosionshastighet för tidsintervallet 0 – 25 år och en lägre korrosionshastighet för tidsintervallet 25 – 100 år.

För de beräknade korrosionshastigheterna på stålplåtar och stålspons i olika vatten i Tabell 4.7 gäller:

- För alla vattenförhållanden, utom för vanligt sötvatten, är korrosionshastigheten konstant mellan 25 och 100 år.
- För alla vattenförhållanden, utom i havsvatten i tempererat klimat, är korrosionshastigheten högre för intervallet 0 – 25 år än för intervallet 25 – 100 år. Korrosionshastigheten avtar alltså efter 25 års exponering.
- För vanligt sötvatten minskar korrosionshastigheten under de första 50 åren och är därefter konstant för intervallet 50 – 100 år.
- För havsvatten i tempererat klimat är korrosionshastigheten tämligen konstant under alla 100 åren.

Vattenförhållanden	Tjockleksförlust på grund av korrosion (mm) vid avsedd livslängd				
	5 år	25 år	50 år	75 år	100 år
Vanligt sötvatten (floder, kanaler etc.) i den mest angripna zonen (vattenlinjen)	0,15	0,55	0,90	1,15	1,40
Mycket förorenat sötvatten (avlopp, industriutlopp etc.) i den mest angripna zonen (vattenlinjen)	0,30	1,30	2,30	3,30	4,30
Havsvatten i tempererat klimat i den mest angripna zonen (låg- och skvalpvattenzonen)	0,55	1,90	3,75	5,60	7,50
Havsvatten i tempererat klimat i undervattenszonen eller tidvattenszonen)	0,25	0,90	1,75	2,60	3,50

Anmärkningar:

- 1) Den högsta korrosionshastigheten återfinns ofta i skvalpvattenszonen eller vid lågvattennivån vid tidvatten. Emellertid erhålls i de flesta fall de största böjpåkänningarna i undervattenszonen.
- 2) Korrosionsvärdena för livslängderna 5 och 25 år är baserade på faktiska mätningar medan värden för andra livslängder har extrapolerats.

Tabell 4.6
Tjockleksförlust (mm) på grund av korrosion på stålplåtar och stålspons i sötvatten och havsvatten, som underlag för beräkning av rostmån vid olika livslängder.

Tabell 4.7

Beräknade dimensionerande korrosionshastigheter ($\mu\text{m}/\text{år}$) på stålplåtar och stålspons i sötvatten och havsvatten för olika tidsintervall. Korrosionshastigheterna är beräknade från tjockleksförlusten under tidsintervall som anges i Tabell 4.6.

Vattenförhållanden	Beräknad dimensionerande korrosionshastighet ($\mu\text{m}/\text{år}$) för olika tidsintervall					
	0 - 5 år	5 - 25 år	0 - 25 år	25 - 50 år	50 - 75 år	75 - 100 år
Vanligt sötvatten (floder, kanaler etc.) i den mest angripna zonen (vattenlinjen)	30	20	22	14	10	10
Mycket förorenat sötvatten (avlopp, industriutlopp etc.) i den mest angripna zonen (vattenlinjen)	60	50	52	40	40	40
Havsvatten i tempererat klimat i den mest angripna zonen (låg- och skvalpvattenzonen)	110	68	76	74	74	76
Havsvatten i tempererat klimat i undervattenszonen eller tidvattenzonen	50	32	36	34	34	36

De angivna dimensionerande rostmånen i svensk standard SS-EN 1993-5:2007 för stålplåtar och stålspons i vatten är mycket för låga i jämförelse med angivna värden i Pålkommisionens Rapport 93. Detta gäller speciellt för både söt- och havsvatten i skvalpzonen. Den dimensionerande korrosionshastigheten för sötvatten ($\leq 200 \mu\text{m}/\text{år}$) för skvalpzonen i sötvatten i Pålkommisionens Rapport 93 är betydligt högre än de dimensionerande korrosionshastigheterna för vanligt sötvatten och för mycket förorenat sötvatten i Tabell 4.7. De dimensionerande korrosionshastigheterna för havsvatten i skvalp- och undervattenszonen är också betydligt högre i Pålkommisionens Rapport 93 än de angivna värdena i Tabell 4.7.

4.1.4 Dimensionering enligt VTT:s förslag

I en rapport av Törnqvist (2004) vid VTT, Esbo, Finland diskuteras lämplig rostmån för 100 år för stålrospålar slagna i jord. Rostmåner anges för både insidan och utsidan av stålrospålen. För insidan föreslås en rostmån på 0,2 mm för 100 år för samtliga rördimensioner. För utsidan föreslås olika rostmåner för tre olika geotekniska fall. För den utvändiga korrosionen har Törnqvist samlat in korrosionshastigheter i en databas. Korrosionshastigheterna har sedan anpassats med ett exponentiellt samband som funktion av exponeringstiden.

Törnqvist har från materialet i databasen anpassat ett exponentiellt samband mellan karakteristisk avfrätning och tid enligt:

$$s_{m, 95} = 0,0332 \cdot t^{0,6452}$$

där:

$s_{m, 95}$ = karakteristisk rostmån, mm

t = tid, år

För tiden 100 år blir den karakteristiska korrosionen enligt ovanstående formel 0,65 mm. Den karakteristiska korrosionen blir alltså 0,65 mm för 100 år.

Törnqvist omvandlar den karakteristiska korrosionen till dimensionerande korrosion genom att införa en gropfrättningsfaktor i ovanstående formel. Gropfrättningsfaktorn har inte den vanliga betydelsen, som kvoten mellan maximifrättdjupet och medelfrättdjupet. Gropfrättningsfaktorn definieras i rapporten av Törnqvist som:

Gropfrättningsfaktor =

$$= \frac{\text{maximalt frätgropsdjup} - \text{medelkorrosionens djup}}{\text{medelkorrosionens djup}}$$

Med medelkorrosion menas medelfrättdjupet vid jämn korrosion.

Den dimensionerande korrosionen (dimensionerande rostmån) beräknas nu enligt formeln:

$$s_d = (1 + v_d) \cdot 0,0332 \cdot t^{0,6452} + 0,2$$

där:

s_d = dimensionerande rostmån, mm

v_d = dimensionerande gropfrättningsfaktor

t = tid, år

I formeln är faktorn 0,2 den invändiga avfrätningen i enheten mm.

Den dimensionerande korrosionen avtar exponentiellt med tiden. Dimensionerande rostmån för 100 år för stålrospålar anges i rapporten av Törnqvist, Tabell 4.8. Den dimensionerande rostmånen anges för tre olika geotekniska förhållanden och rostmånen för enbart utsidan av pålen anges till 1,04, 1,30 respektive 1,81 mm för 100 år. Den dimensionerande rostmånen för insidan av stålspålen är 0,2 mm för 100 år och är lika stor för de tre olika geotekniska förhållandena.

De dimensionerande rostmånen gäller för normala förhållanden. Som normala förhållanden anger Törnqvist:

- Icke aggressiva naturliga jordar och grovkornig fyllnadsjord bestående av mineraljord, över och under grundvattennivån
- Packad (icke aggressiv) fyllnadsjord bestående av uteslutande mineraljord.

För förhållanden, som avviker från normala förhållanden (aggressiva förhållanden) räknar Törnqvist upp:

- Jord, som innehåller rikligt med organiska beståndsdelar
- Jord, som innehåller rikligt med svavel (även naturliga jordar bland annat jordar med sulfidjordslager)
- Lös fyllnadsjord, särskilt där utfyllnaden kan anrikas med salter (bland annat lösa fyllnader där havsvatten kan tränga in)
- Jord med variationer i grundvattenytans nivå

- Alla förorenade jordar
- Jordar med potentialfält orsakade av likströmskällor.

För aggressiva förhållanden kan inte de dimensionerande rostmånen enligt Tabell 4.8 användas. För aggressiva förhållanden dimensioneras rostmånen särskilt från fall till fall.

4.1.5 Diskussion av dimensioneringsreglerna

Det är naturligt att jämföra de angivna dimensionerande rostmånen med de rikliga resultaten från korrosionsundersökningarna vid Statens Järnvägar.

Resultaten från Statens Järnvägars undersökning, Sandegren (1988), har delats upp för fyra olika typjordar: sandiga jordar, leriga jordar, jordar med organiskt material samt samtliga jordarter, Bengtsson med flera (2002). I Tabell 3.7 anges karakteristisk korrosionshastighet och karaktäristisk rostmån för 100 år. Den karakteristiska korrosionshastigheten avser 95 % -fraktilen för alla observationer. I Tabell 4.9 anges karaktäristisk rostmån för två fall: dels för alla observationer och dels för observationer med exponeringstid större eller lika med 10 år.

För pålar med exponeringstid ≥ 10 år varierar den karakteristiska korrosionshastigheten lite mellan de olika typjordarna: 11,3 $\mu\text{m}/\text{år}$ för sandiga jordar, 10,7 $\mu\text{m}/\text{år}$ för leriga jordar, 12,1 $\mu\text{m}/\text{år}$ för jordar med organiskt innehåll och 11,3 $\mu\text{m}/\text{år}$ för samtliga jordar. Den karaktäristiska korrosionshastigheten är således tämligen konstant med maximala värdet 12 $\mu\text{m}/\text{år}$. I och med att korrosionshastigheter

Förhållanden	Dimensionerande gropfrätningsfaktor	Dimensionerande rostmån för 100 år mm	
		Rostmån för enbart utsidan av stålrospålen	Rostmån för både utsidan och insidan av stålrospålen
Homogena naturjordsförhållanden över och under grundvattenytan	0,6	1,0	1,2
Packade mineraljordsutfyllnader över och under grundvattenytan	1,0	1,3	1,5
Opackade mineraljordsutfyllnader över och under grundvattenytan	1,8	1,8	2,0

Tabell 4.8
Dimensionerande rostmån för 100 år för tre olika geotekniska förhållanden enligt Törnqvist (2004). Rostmån anges för enbart utsidan av stålrospålen respektive för både utsidan och insidan av stålrospålen.

Tabell 4.9

Karakteristisk korrosionshastighet och karakteristisk rostmån för 100 år för fyra olika typjordar. I tabellen anges korrosionshastighet och rostmån för två fall: dels för alla observationer och dels för observationer med exponeringstid större eller lika med 10 år. Material från Bengtsson med flera (2002).

Typjord	Urval av delstänger	Karakteristisk korrosionshastighet $\mu\text{m}/\text{år}$	Karakteristisk rostmån för 100 år ⁴ mm
Sandiga jordar ¹	Alla delstänger	10,3	1,0
	Exp. tid ≥ 10 år	11,3	1,1
Leriga jordar ²	Alla delstänger	12,1	1,2
	Exp. tid ≥ 10 år	10,7	1,1
Jordar med organiskt material ³	Alla delstänger	21,3	2,1
	Exp. tid ≥ 10 år	12,1	1,2
Samtliga jordar	Alla delstänger	15,0	1,5
	Exp. tid ≥ 10 år	11,3	1,1

1) Sand, grus och sandiga/grusiga moräner

2) Lera, silt och leriga/siltiga moräner (ej organiska jordar)

3) Gytjig lera/silt, gytja, torv, dy och sulfidlera (organiska jordar)

4) Den karakteristiska rostmånen för 100 år har beräknats från den karakteristiska korrosionshastigheten genom att multiplicera korrosionshastigheten med 100.

med exponeringstid ≥ 10 år används faller värden bort för pålar med kort exponeringstid.

Den karakteristiska rostmånen för 100 år har beräknats från den karakteristiska korrosionshastigheten genom att multiplicera korrosionshastigheten med 100. Vid beräkning av den karakteristiska rostmånen har det antagits att den karakteristiska korrosionshastigheten är konstant med tiden. Den karakteristiska rostmånen för 100 år blir också tämligen lika för de olika typjordarna med det maximala värdet 1,2 mm för 100 år.

Den karakteristiska korrosionshastigheten skall överföras till dimensionerande värden (dimensionerande korrosionshastighet) med hjälp av olika partialkoefficienter som bland annat beaktar osäkerheten i bestämningen av korrosionshastighet.

Om jämförelse görs mellan karakteristisk korrosionshastighet enligt Tabell 4.9 (Bengtsson med flera, 2002) och dimensionerande rostmån enligt Törnqvist, Tabell 4.8, finner man att den karakteristiska rostmånen (1,2 mm för 100 år) är större än den dimensionerande rostmånen för homogena naturförhållanden (1,0 mm för 100 år) och enbart något lägre för packade mineraljordsutfyllnader (1,3 mm för 100 år). Detta indikerar att värdena för den dimensionerande rostmånen, Tabell 4.8, enligt Törnqvist (2004) är för låga. Här bör man ha i åtanke att de karakteristiska rostmånen i Tabell 4.9 (Bengtsson med flera, 2002) skall överföras till dimensionerande rostmån med hjälp av olika partialkoefficienter.

Enligt Törnqvist (2004) beror skillnaden i karakteristisk korrosion mellan VTT:s databas (0,65 mm för 100 år) och Statens Järnvägars undersökningar (1,2 mm för 100 år) på att betydligt fler aggressiva jordar, huvudsakligen sulfidlera, ingår i Statens Järnvägars undersökningar än i VTT:s databas. I normala jordförhållanden enligt VTT ingår inte sulfidleror.

I Ruukki Sverige AB anvisning RR-pålar (Ruukki Sverige AB, 2007) hänvisas till Tabell 4.10 för dimensionering med rostmån och Ruukki Sverige AB refererar beträffande rostmån på stålrospålar till VTT-metoden, Törnqvist (2004).

I Tabell 4.10 anges rostmånen för både ut- och insidan av stålrospålen som ett intervall. Det görs ingen uppdelning av rostmån för ut- respektive insidan på stålrospålen.

VTT-metoden för dimensionering med rostmån gäller för ostörd naturjord dvs. sand, silt, lera etc. För förorenade eller aggressiva jordar hänvisas i anvisningen till svensk standard SS-EN 1993-5:2007. Se Tabell 4.4 i Avsnitt 4.1.3.

Beträffande den invändiga korrosionen i stålrospålar skriver man i anvisningen RR-pålar, Ruukki Sverige AB, 2007:

”Den inre avrostningen i en stålrospåle med ’tät’ pålbergsko och skarvhylsa är i stort försumbar om pålen är installerad i jord med icke korrosivt grundvatten. Även om man räknar med att vatten respektive luft kan läcka in i pålen genom något hål och till exempel följa

Förhållanden	Dimensionerande rostmän för 100 år mm
Homogena naturjordsförhållanden över och under grundvattenytan	1,2 – 1,5
Packade mineraljordsutfyllnader över och under grundvattenytan	1,5 – 2,0
Opackade mineraljordsutfyllnader över och under grundvattenytan	2,0 – 2,5

grundvattnets årliga växlingar blir avrostningen försumbar. På så sätt kan man med tillräcklig säkerhet konstatera att eventuell inre avrostning ingår i de dimensionerande rostmånsvärdena i tabeller 11 och 12.”

Tabell 11 i anvisningen motsvaras här av Tabell 4.10 och Tabell 12 i anvisningen motsvaras här av Tabell 4.4 i aAsnitt 4.1.3.

4.1.6 Jämförelse mellan rostmän på stålplåtar i jord och stålplåtar och stålspons i vatten enligt olika regler

Det finns sammantaget i Sverige idag möjlighet att dimensionerna stålplåtar med rostmän enligt fyra olika dokument:

- Pålkommisionen, Rapport 93, Appendix 1, Camitz (1994)
- Pålkommisionen, Rapport 98, Kapitel 7, Bengtsson et al. (2000)
- Svensk standard SS-EN 1993-5:2007, Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner, Del 5: Plåtar och spont, Kapitel 4, Durability
- Typgodkännandebevis 0656/94 RR-plåtar, daterad 2007-06-29 för innehavaren Ruukki Sverige AB från SITAC, Karlskrona med tillhörande handling RR-plåtar. Anvisning för projektering, dimensionering, utförande och kontroll. Ruukki Sverige AB, Borlänge 2007.

I anvisningen RR-plåtar från Ruukki Sverige AB refereras beträffande rostmän på stålplåtar till rapporten Korrosion på stålplåtar. Dimensionering utgående från empiriskt material, Törnqvist (2004).

I Figur 4.1 och 4.2 visas en jämförelse mellan dimensionerande rostmän för 100 år på stålplåtar i olika typer av jordar enligt svensk stan-

dard SS-EN 1993-5:2007, Törnqvist (2004) och Pålkommisionen, Rapport 93 och 98.

En jämförelse mellan dessa visar att de har olika klassificeringar av jordförhållanden samt olika värden på dimensionerande rostmän. I svensk standard SS-EN 1993-5:2007 och Törnqvist (2004) görs ingen skillnad mellan förhållanden över och under grundvattenytan i jord. Rostmännen enligt svensk standard SS-EN 1993-5:2007 och Törnqvist (2004) skiljer sig endast marginellt från varandra med genomgående något lägre rostmän hos Törnqvist (2004). Rostmännen är för alla jordförhållanden klart högst enligt Pålkommisionens Rapporter 93 och 98.

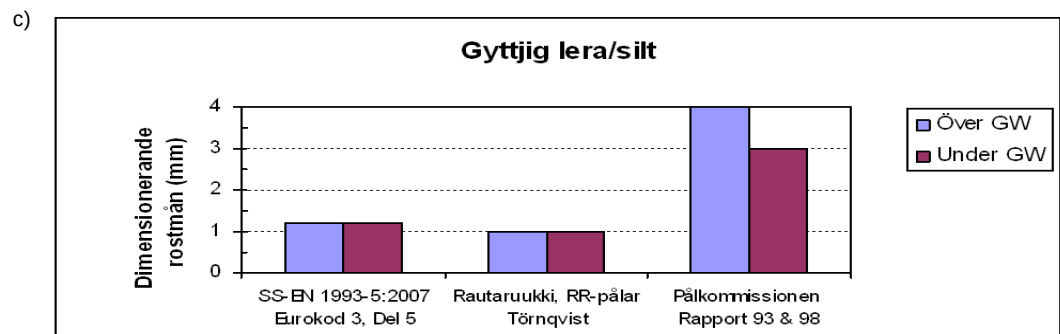
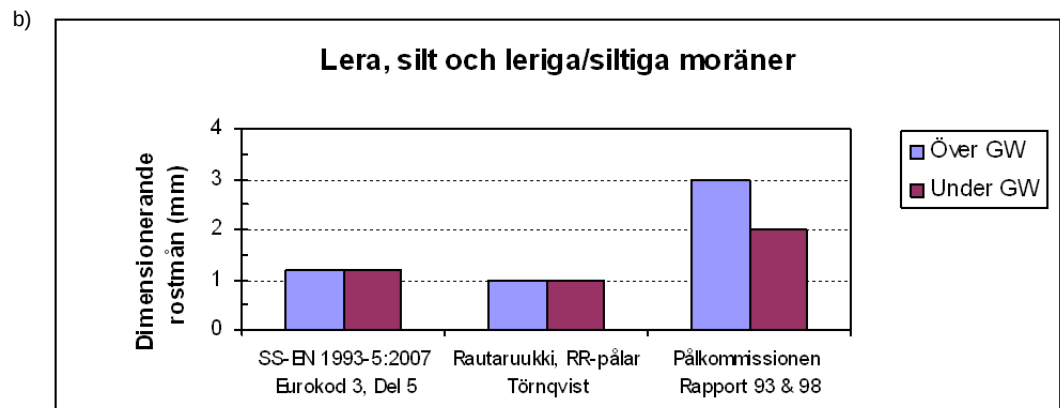
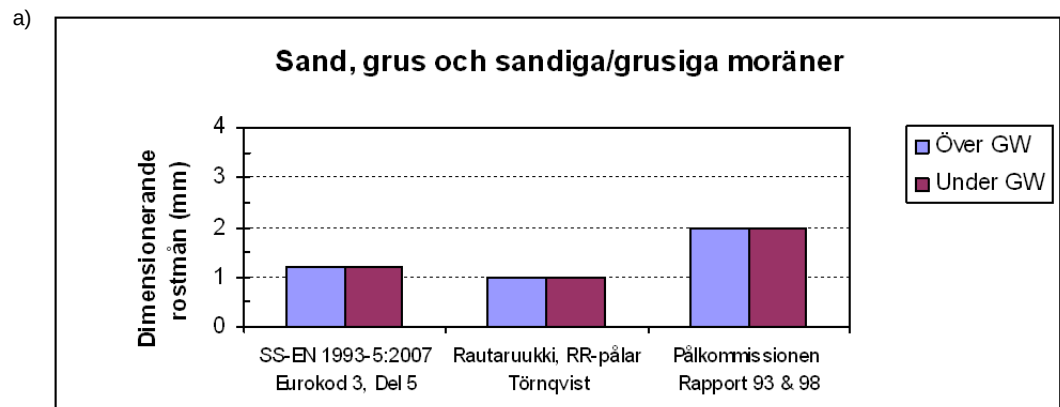
Rostmän för ostörd naturlig jord (1,2 mm för 100 år) enligt svensk standard SS-EN 1993-5:2007 och homogena naturjordsförhållanden (1,0 mm för 100 år) enligt Törnqvist (2004), bedöms efter svenska erfarenheter vara för låga.

Den samlade erfarenheten visar dock att det finns möjlighet att man för vissa naturliga jordförhållanden skulle kunna minska den dimensionerande rostmännen enligt Pålkommisionens Rapporter 93 och 98 något. Det erfordras dock att man kan precisera vid vilka jordförhållanden det kan göras samt hur andra jordförhållanden skall hanteras och verifieras. Vidare bör en närmare studie av förhållandet mellan jämn korrosion (medelavfrätning) och lokal korrosion göras så att man kan vara säker på att den lokala korrosionen inte orsakar ett svårare lastfall än den jämna korrosionen dvs. åstadkommer ett tryck- eller knäckbrott i plåten.

I Figur 4.3 visas en jämförelse mellan dimensionerande rostmän för 100 år på stålplåtar och stålspons i olika typer av vatten enligt svensk standard SS-EN 1993-5:2007 och Pålkommisionen, Rapport 93 & 98.

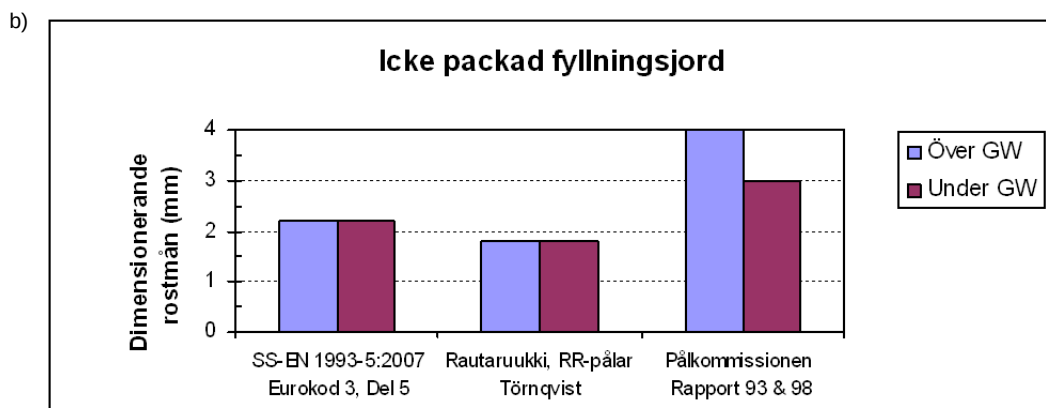
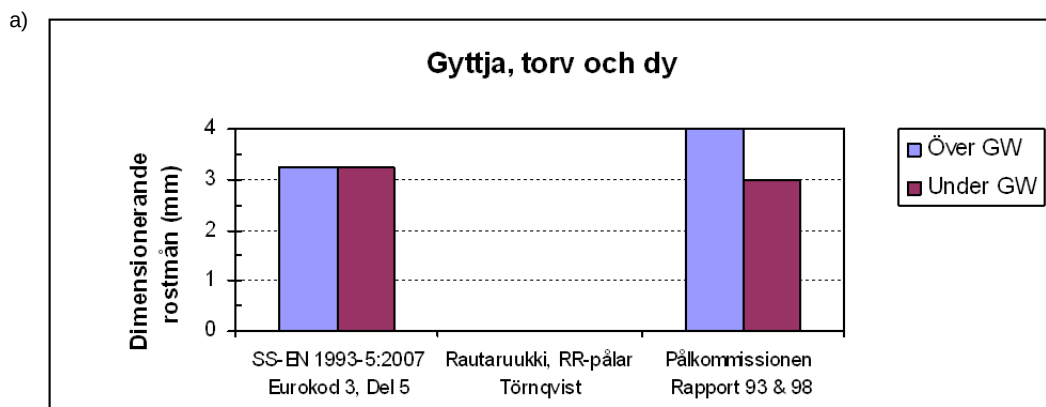
Det föreligger en utomordentlig stor skillnad mellan rostmännen i svensk standard SS-EN 1993-5:2007 och i Pålkommisionens Rapporter 93 och 98. Rostmännen enligt Pålkommisionens Rapporter 93 och 98 är mycket större än rostmännen enligt svensk standard SS-EN 1993-5:2007. En utredning och värdering av korrosionen och rostmännen på stålplåtar och stålspons i vatten är ytterst befogad. En komplettering av litteraturundersökningen enligt Camitz (1994) rekommenderas.

Tabell 4.10
Dimensionerande rostmän för 100 år för tre olika geotekniska förhållanden enligt Ruukki Sverige AB (2007). Rostmän anges för både ut- och insida av stålplåten.



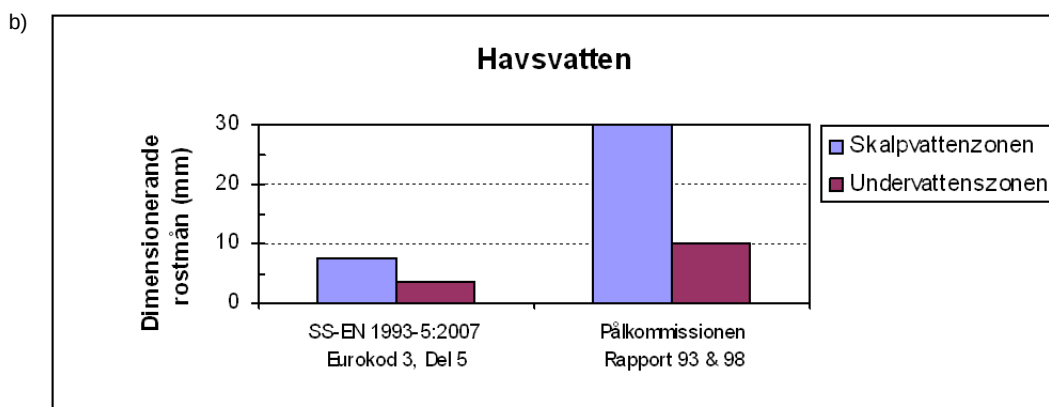
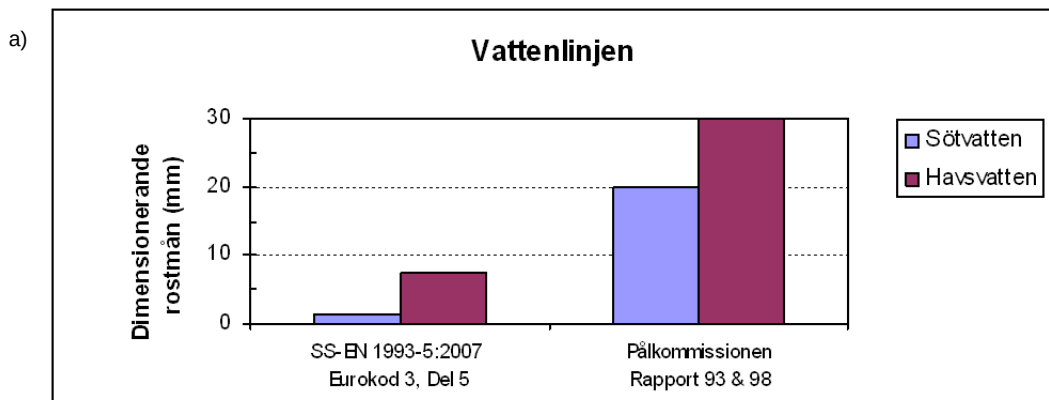
- a) Sand, grus och sandiga/grusiga moräner
 b) Lera, silt och leriga/siltiga moräner
 c) Gytjig lera/silt.

Figur 4.1
 Dimensionerande rostman för 100 år på stål-pålar över och under grundvattenytan (GW) i olika jordar enligt olika dimensioneringsanvisningar. För RR-pålar anges utvändigt rostman.



- a) Gyttja, torv och dy
b) Icke packad fyllningsjord.

Figur 4.2
Dimensionerande rost-
mån för 100 år på stål-
pålar över och under
grundvattenytan (GW) i
olika jordar enligt olika
dimensioneringsanvis-
ningar. För RR-pålar
anges utvändigt rostmån.



- a) Vattenlinjen i sötvatten respektive havsvatten
b) Skalpvatten- respektive undervattenszonen i havsvatten.

Figur 4.3
Dimensionerande rost-
mån för 100 år på stål-
pålar och stålspons i oli-
ka vatten enligt olika
dimensioneringsanvis-
ningar.

4.1.7 Rostmån i kombination med annan skyddsåtgärd

I vissa fall kombineras rostmånen med någon annan skyddsåtgärd, till exempel skyddsbeläggning och/eller katodiskt skydd. När pålen är försedd med ett högvärdigt och effektivt korrosionsskydd, kan rostmånen storlek reduceras. Hur stor reduktion, som kan tillåtas, måste bedömas sakkunnigt med hänsyn till jordens/vattnets aggressivitet, det aktuella skyddssystemets effektivitet och till de lokala förhållandena. Stålpålar kan korrosionsskyddas med en tjock och mekaniskt tålig beläggning. Det finns både organiska och oorganiska beläggningar för stålpålar.

4.2 Korrosionsskyddande beläggningar

Stålpålar kan korrosionsskyddas med en tjock och mekaniskt tålig beläggning. Det finns både organiska och oorganiska beläggningar, som lämpar sig för stålpålar.

Organiska beläggningar

På slanka stålrörspålar är en organisk beläggning i form av en utvändig plastmantel vanligt förekommande. Plastmanteln utgörs av ett flera millimeter tjockt skikt av polyeten (PE) eller polypropen (PP) med ett underliggande tunt epoxiskikt. Kraven på skiktens uppbyggnad finns angivet i europastandarder. Grövre rörpålar med plastmantel förekommer framför allt i vatten, men enstaka svenska projekt med pålning i jord har även utförts med grova stålrörspålar belagda med plastmantel.

Massiva pålar kan, av tekniska skäl, inte beläggas med PE- eller PP-beläggning. På sådana pålar är så kallad tung rotskyddsmålning mest lämpad. Denna form av rotskyddsmålning utförs med antingen tvåkomponenters epoxifärg (EP) eller tvåkomponenters polyuretanfärg (PUR). Färdigt färgskikt är 0,3 – 0,5 mm tjockt. Målningsskiktets uppbyggnad beskrivs i Boverkets Handbok om Stålkonstruktioner, BSK 99. Rostskyddsmålningens utförande beskrivs i Korrosionsinstitutets Bulletin nr. 107, Handbok i rotskyddsmålning. Massiva stålpålar med rotskyddsmålning fö-

rekommer emellertid sällan i jord. Skälet är osäkerhet rörande skyddseffektiviteten och att denna typ av skyddsbeläggning är dyr. I Pålkommisionens Rapport 93 Avsnitt 6.11 görs en kostnadsjämförelse mellan olika typer av korrosionsskyddande åtgärder, Camitz (1994).

Beläggning av zink

Slanka stålrörspålar finns även med oorganisk skyddsbeläggning bestående av ett varmförzinkningsskikt, som täcker rörpålens både ut- och insida. Zinkskiktet bör vara minst 0,15 – 0,20 mm tjockt för att ge ett långvarigt skydd.

Även om pålarnas zinkskikt har lång livslängd så är den trots allt begränsad på grund av den långsamma avfrätningen. Eftersom zinkskiktets tjocklek på pålarna och pålarnas brukstid i allmänhet är kända kan man med ledning av värden på avfrätningshastigheten för zinken beräkna hur lång tid det tar tills zinkskiktet har frätts av i så stor omfattning att stora delar av den underliggande stålytan börjar angripas av korrosion. Dimensionerande värden på största medelavfrätning hos varmförzinkningsskikt i olika jordarter anges i Tabell 4.11. Värdena är baserade på resultat från långtidsundersökningar av varmförzinkat stål i jord dels vid Korrosionsinstitutet dels vid Vattenfall. Man bör notera att korrosionshastigheten för zink i torvjord med ofta låga pH-värden kan bli mycket stor. Annan skyddsåtgärd bör övervägas för del av påle, som står i torv, se Avsnitt 4.3.

Skyddsbeläggningarnas egenskaper i jord och vatten beskrivs i detalj av Eriksson (1976).

Beläggningsskador vid neddrivning av påle

En fråga som länge har diskuterats beträffande skyddsbeläggningar för stålpålar i jord är beläggningarnas hårdighet mot repning och avskrapning genom nötning när pålarna slås ned. Nyligen avslutade Statens geotekniska institut (SGI) en fältundersökning där man har provat rep- och avskrapningshårdigheten hos ett antal beläggningar av typen PE-mantel, epoximålning och varmförzinkning i ett par olika jordlagerföljder, se Avsnitt 3.2.3. Undersökningen

Tabell 4.11.
Dimensionerande värde för största avfrätningshastighet för varmförzinkningsskikt i naturlig jord enligt Pålkommisionens Rapport 98.

Jordart	Största avfrätningshastighet för zinkskikt µm/år
Lerjord	20
Torvjord	30
Friktionsjord	5

resulterade i följande rekommendationer för användning av skyddsbeläggningar på pålar som drivs ned i jord:

- **Pålar med epoxibeläggning** bör inte användas där höga krav ställs på korrosionsskyddet. Möjligen kan epoxibeläggning användas i jord, som enbart består av finsediment och där den relativa fastheten är låg eller mycket låg.
- **Varmförzinkade pålar och pålar med polyetenbeläggning** bör kunna användas i jord av
 - finsediment, oberoende av relativ fasthet
 - finsediment med lokala skikt grovsediment med hög relativ fasthet
 - grovsediment med låg eller mycket låg relativ fasthet
- **Ingen av dessa skyddsbeläggningar** bör användas där pålarna måste slås genom lager av morän eller krossmaterial. Stopp-slagning i morän kan dock tillåtas under förutsättning att korrosionsrisken bedöms som ringa i bottenlagren.

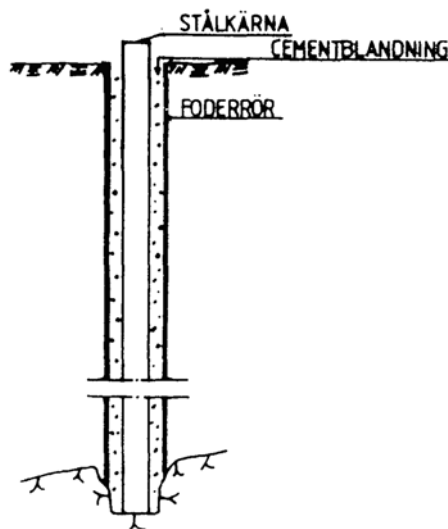
Praktisk betydelse av skador i organisk skyddsbeläggning

I SGI:s undersökning skadades de organiska beläggningarna endast fläckvis i form av mer eller mindre långa repor utmed pålen. Man kan på goda grunder förutsätta att detta förhållande gäller i de flesta jordlagerföljder. Korrosionsangrepp kommer då främst att uppkomma där stållytan är direkt exponerad för jord i beläggningsskadorna. Stålet i organiska beläggningars skador kan dock hindras från att rosta genom tillämpning av katodiskt skydd.

4.3 Ingjutning i injekteringsbruk – stål kärnepålar

Vissa påltyper skyddas mot korrosion genom ingjutning i injekteringsbruk. Bruket hindrar direktkontakt mellan stål pålen och omgivande jord. Dessutom medför den höga alkaliteten (høgt pH-värde) i cementen att det bildas ett skyddande oxidskikt på stållytan.

Ett exempel på ingjutning är borrarad stål kärnepåle. Ett foderrör av stål borrar ned genom jorden. Efter rensning av röret från jord borrar/trycks ett stålämne (stål kärnan) ned genom foderröret till fast botten eller ned i berg. Där på injekteras bruk i utrymmet mellan stål kärnan och foderröret, Figur 4.4. Både det omgivande bruket och foderröret skyddar stål kärnan mot korrosion.

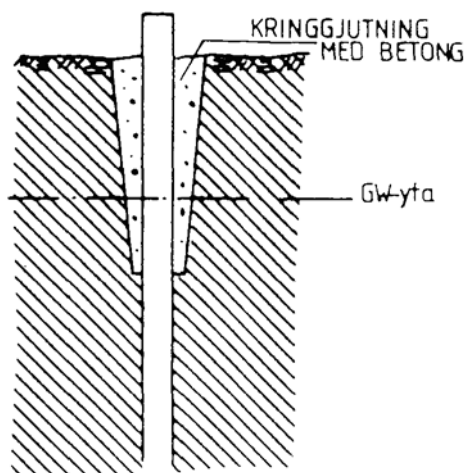


Figur 4.4.
Ingjutning i betong av stål kärnepåle i foderrör.

För stål kärnan gäller i princip samma förhållanden som för armeringsstål i betong. Vid ingjutning antas korrosionshastigheten på dessa vara försumbar. Detta förutsätter dock att betongen inte är starkt uppsprucken. Vid anbringande av injekteringsbruk är det viktigt att stål pålen är centrerad i foderröret och att kaviteter inte uppkommer i bruket. Klorider får inte tillsättas bruket.

Korrosionsskador, som upptäckts på senare år på stora betongkonstruktioner, som broar, parkeringsgarage, vattentorn etc. har berott på att klorider kommit in till armeringen antingen genom avsiktlig tillsats vid gjutningen eller genom att havsvatten eller vatten med vägsalt sköljt över konstruktionen.

Övre delen av en normalt slagen stål påle kan också skyddas genom kringgjutning. Bruk fylls på i utrymmet mellan pålen och ett rör, som sätts ned till önskat djup kring pålen, Figur 4.5. Denna form av lokalt korrosionsskydd förekommer dock sällan.



Figur 4.5.
Kringgjutning med betong av en normalt slagen stål påle.

4.4 Invändigt korrosionsskydd i öppna stålörspålar

Vid slagning av öppna stålörspålar får man räkna med att grundvatten så småningom tränger in genom skarvhylsor och pålskor vilket medför att det kommer att ställa sig en vattenpelare i pålen. Därför måste hänsyn tas även till korrosion på örspålars insida. Den enklaste, pålitligaste och förmodligen minst kostsamma metoden är att skydda pålens insida genom att fylla pålen med cementbruk. Detta är också den vanligaste metoden.

Bruk hålls ned i röret utan armering. I grova stålörspålar byggs vanligen en betongpåle upp genom att stålarmring placeras i rören och betong gjuts i. Ingen korrosion uppstår på insidan av örspålar, som fyllts helt och hållet med cementbruk eller betong, förutsatt att det inte förekommer större kaviteter i bruket/betongen. Därför behöver inte någon rostmån tillämpas på insidan av örspålar fyllda med cementbruk/betong.

4.5 Katodiskt korrosionsskydd

Stålpålar kan korrosionsskyddas med katodiskt skydd. Skydd av pålar i jord är ovanligt medan skydd av pålar i vatten, till exempel pålar i hamnanläggningar, är mer vanligt. Vid katodiskt skydd av pålar i jord bör pålarna vara belagda med en organisk skyddsbeläggning, så att skyddsströmmen blir liten med åtföljande liten risk för skadlig läckströmspåverkan av skyddsströmmen på närliggande metallkonstruktioner. Grundläggande krav på katodiskt skydd av jordförlagda konstruktioner beskrivs i svensk standard SS-EN 12954.

4.5.1 Skyddsprincipen

Katodiskt skydd är en elektrokemisk skydds metod. Den innebär att en svag likström, den så kallade skyddsströmmen, matas kontinuerligt ut genom jorden eller vattnet till stålytan på pålen. Därigenom blir ytan så elektriskt negativ att den får samma potential över hela ytan, vilket medför att de elektrokemiska reaktionerna, som orsakar korrosionen, under-

trycks och därmed avstannar. Skeendet kan liknas vid potentialutjämning i elektriska sammanhang, för undvikande av farliga spänningsskillnader mellan olika metalldelar.

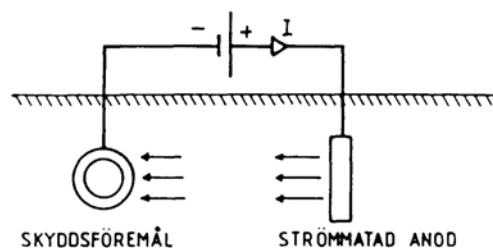
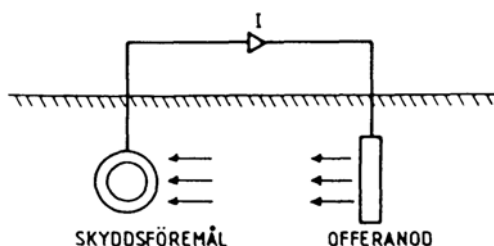
Strömutmatningen regleras så att metallytan får en viss negativ ("katodisk") elektrokemisk potential, s.k. skyddspotential. För att skyddsvirka ska bestå måste potentialen hållas kvar vid skyddspotentialen genom kontinuerlig utmatning av skyddsström. Vid alltför stark strömutmatning uppstår s.k. överskydd med risk för skadliga biverkningar, se nedan.

Den katodiska skyddsströmmen matas ut i jorden/vattnet via speciella metallektroder, sk. anoder, vilka placeras i jorden/vattnet. Strömmen kan alstras på två olika sätt och man skiljer därför mellan två olika typer av katodiskt skydd, nämligen skydd med offeranoder och skydd med påtryckt ström. Se Figur 4.6.

4.5.2 Skydd med offeranoder

Vid skydd med offeranoder, även kallade galvaniska anoder, alstras skyddsströmmen på galvanisk väg. Anodmaterialet är oädlare (mer elektriskt negativt) än stålet, och det föreligger en galvanisk spänning mellan anoden och stålytan, som driver skyddsströmmen. Någon yttre strömkälla behövs alltså inte. I jord används oftast magnesium som anodmaterial. I jord med mycket låg resistivitet, det vill säga med mycket god elektrisk ledningsförmåga, kan även anoder av zink användas. Jordresistiviteten kan bestämmas enligt olika mätmetoder.

I och med strömgivningen samt en viss egenkorrosion förbrukas offeranoder med tiden. Vid dimensionering av skydd av konstruktioner i jord strävar man efter att få en livslängd hos offeranoderna på 15 – 25 år. Vid dimensionering av skydd av pålar och spont i vatten, där det är lättare att byta förbrukade anoder mot nya, kan man i många fall tillåta kortare livslängd för anoderna än i jord.



Figur 4.6.
Principen för katodiskt skydd med offeranoder (vänster) och med påtryckt ström (höger).

4.5.3 Skydd med påtryckt ström

Vid skydd med påtryckt ström, även kallat elektrolytiskt skydd, alstras strömmen med en yttre strömkälla, som vanligen är en nätansluten transformator/likriktare. Anoden och skyddsobjektet ansluts till likriktarens plus- respektive minusutgång, så att ström matas från anoden, genom jorden/vattnet till stål-ytan. Utgående likspänning är normalt lägre än ca. 10 Vdc, och alltid lägre än 50 Vdc, varför det inte uppstår några personfarliga elektriska spänningar i skyddsobjektet.

Materialet i strömmatade anoder är vanligen kiseljärn, magnetitjärn eller titan belagt med en blandning av ädelmetalloxider. Dessa material är i det närmaste inerta vilket innebär att de knappast förbrukas med tiden, och anoden får därmed mycket lång livslängd. Järnanoder är stavformade medan oxidbelagda titananoder vanligen är utformade som trådar, finmaskiga nät eller som tunna stavar.

Genom möjligheten att reglera den utgående likspänningen och därmed skyddsströmmens storlek är tillämpningen av skydd med påtryckt ström inte begränsad av jordens/vattnets ledningsförmåga.

4.5.4 Skadliga biverkningar av katodiskt skydd

Skyddsströmmen, som matas ut vid katodiskt skydd, kan orsaka skadliga biverkningar. På grund av den större drivande spänningen vid skydd med påtryckt ström är risken betydligt större med denna typ av skydd jämfört med skydd med offeranoder.

Korrosionsfarlig sekundärverkan

Katodiskt skydd kan, som redan antytts, medföra vissa biverkningar. Strömutmattningen från skydd med påtryckt ström till en obelagd stålplåle kan i vissa fall bli hög, varför risken för oönskad spridning av skyddsströmmen till närliggande, främmande metallkonstruktioner, så kallad skadlig sekundärverkan, måste beaktas. Strömpåverkan på en främmande konstruktion kan nämligen medföra att det uppstår korrosionsangrepp på denna genom elektrolytisk korrosion. Denna risk är den främsta anledningen till att katodiskt skydd inte tillämpas på icke belagda stålplålar i jord i tätbebyggelse där det är tätt mellan rörledningar, kablar med plåtmantel och andra markförlagda metallkonstruktioner, som kan ta upp skyddsströmmen. I jord bör därför plåarna vara försedda med en elektriskt isolerande beläggning, vilket minskar strömbehovet/strömutmattningen högst väsentligt. Är plålen belagd med en

sådan beläggning går skyddsströmmen endast till stål-ytan där den är frilagd i mekaniska skador och porer i beläggningsskiktet, och strömutmattningen blir då liten.

I havsvatten föreligger knappast någon risk för skadlig sekundärverkan på grund av vattnets goda elektriska ledningsförmåga. Strömmen flyter till plålen utan att ta omvägen via främmande konstruktioner.

Väteförsprödning i martensitiska stål

Höghållfasta stål med martensitisk metallografisk mikrostruktur, kan ta skada genom så kallad väteförsprödning vid överskydd, det vill säga vid allt för stark skyddsström. Detta gäller för både martensitiska kolstål och martensitiska rostfria stål. Väteförsprödning medför nedsättning av stålets hållfasthet. Konstruktioner av sådant stål ska inte skyddas med katodiskt skydd.

4.5.5 Katodiskt skydd i kombination med elektriskt isolerande skyddsbeläggning – Fullständigt korrosionsskydd

Avsikten med att kombinera katodiskt skydd med någon form av isolerande beläggning, till exempel en rostskyddsmålning eller plastmantel, är främst att reducera erforderlig skyddsström. Skyddsströmmen kommer då, som redan sagts, att gå endast till (ofrånkomliga) felställen i skyddsbeläggningen, och skydda stål-ytan mot lokala angrepp i dessa punkter. Man får också en väsentligt förbättrad spridning av skyddsströmmen till samtliga delar av den skyddade konstruktionen. Ett riktigt utformat och underhållet katodiskt skydd av stålplålar med elektriskt isolerande yteläggning ger ett fullständigt och mycket långvarigt skydd av plåarna.

Organisk skyddsbeläggning, som används i kombination med katodiskt skydd måste vara hårdig mot det alkali (høgt pH-värde), som bildas på stål-ytan till följd av det katodiska skyddet. Beläggningen får inte heller tappa vidhäftningen på grund av alkalibildningen. Beläggningar, som tål alkali, är bland annat polyeten och polypropen samt flertalet epoxi- och polyuretanfärger. Alkydfärger kan ta skada av alkalibildningen.

5. Kontroll

För utförande och kontroll av stålpålning allmänt hänvisas till Pålkommisionens Rapport 98, Kapitel 8 samt Bilaga 2 till denna: Checklista för beständighetsdimensionering. Nedanstående rekommendationer pekar på möjligheter till kompletterande undersökningar och kontrollåtgärder.

5.1 Kontroll av jordförhållanden

Som framgår ovan påverkas korrosionshastigheten på stålpålar i jord av en mängd faktorer såsom vatten- och fuktförhållanden, syretillförseln till pålytan, jordens sammansättning och lagerföljd, huruvida jorden blivit om-lagrad eller ej, förekomst av främmande ämnen som t.ex. koks, kolaska och grafit, förekomst av läckströmmar, hur lång tid pålen varit exponerad i jorden, pålmaterialets sammansättning etc. För normalfallet där stålpålar installeras i naturlig jord vid enkla förhållanden enligt **Avsnitt 4.1.1**, är dock dimensionering med rostmån ett säkert sätt att verifiera pålarnas bärförmåga för avsedd livslängd. För sådana fall, som enligt nämnda avsnitt inte kan betraktas som enkla eller betraktas som komplexa eller korrosiva förhållanden bör en korrosivitetsundersökning utföras om man inte direkt väljer att skydda pålarna enligt **Avsnitt 4.2 – 4.5**.

En korrosivitetsundersökning utförs under ledning av en geotekniskt och en korrosionsteknisk sakkunnig i förening. En sådan undersökning bör leda fram till ett ställningstagande om huruvida förhållandena på platsen är så svåra eller komplexa att man avråder från att använda oskyddade stålpålar eller att man kan använda rostmånsdimensionering och i så fall vilken dimensionerande rostmån man bör välja.

Beroende på de geologiska förutsättningarna och övriga förhållanden på platsen kan korrosivitetsundersökningen omfatta följande:

" upptagning av representativa jordprover från hela lagerföljden (från planerad nivå för pålhuvud till bedömd spetsnivå). För att få en uppfattning om jordlagerföljdens variationer med djupet och därav välja provtagningsnivå-

er kan med fördel någon form av sondering utföras före provtagning.

- laboratorieundersökning av upptagna prover med avseende på: jordart, vattenkvot, resistivitet, pH-värde, samt om jorden innehåller organiskt material eller sulfider eller utgörs av fyllning eller innehåller föroreningar av något slag, som kan ha betydelse för korrosionen t.ex. koks, kolaska eller grafit. För att få en uppfattning om riskerna för att påträffa sådana föroreningar, depotier, eller okända fyllningar kan man välja att före provtagning undersöka markens tidigare användning genom studium av gamla kartor, ritningar eller historiska dokument
- bestämning av grundvattenytan och eventuellt jordens permeabilitet i olika skikt. Är förhållandena sådana att man kan förvänta att syrerikt vatten också kan tränga ned i djupare liggande permeabla skikt är detta en viktig upplysning
- resistivitetsmätning över den aktuella ytan som funktion av djupet under markytan
- kontroll av läckströmmar där sådana kan antas finnas jfr. **Avsnitt 5.5**.

5.2 Kontroll av korrosion på nedslagna pålar

Kontroll av korrosionen eller risken därför på nedslagna pålar i jord kan i princip utföras på olika sätt:

- vid belagda pålar ; provpålning med efterföljande uppdragning och mätning av beläggningsskadorna
- nedslagning av provpålar utanför aktuell konstruktion för senare uppdragning och mätning av inträffad korrosion, eventuellt i kombination med in situ-mätningar.

Provpålning med efterföljande uppdragning ger främst information om riskerna för repskador i beläggningar av olika slag.

Det är här viktigt att provpålarna märks och mäts upp före nedslagning och uppdragning för att man skall kunna rekonstruera vad som hänt eftersom alla beläggningar inte är helt täta. Beläggningstjockleken kan mätas med

skiktjockleksmätare medan tätheten kan kontrolleras med porsökare på organiska beläggningar.

Under nedslagningen bör man registrera slagningsmotståndet för pålarna så att man därav eventuellt kan finna samband mellan inträffade beläggningsskador och förändringar i slagningsmotståndet.

Efter uppdragning upprepas skiktjockleksmätningar och täthetsprovningar såsom före nedslagning.

Provpålning med senare uppdragning syftar till att ge möjlighet till senare kontroll av inträffad korrosion på nedslagna pålar. Härför slås ett begränsat antal pålar ned utanför den aktuella konstruktionen på en plats där man senare (efter kanske 5 – 20 år) kan komma åt att dra upp dem. Pålarna bör vara av samma typ som pålarna för konstruktionen. Endast i de fall pålarna ej har försetts med någon beläggning kan pålarna eventuellt ersättas med klenare stålstänger. Före nedslagning bör pålarna märkas upp och mätas på samma sätt som för provpålning och uppdragning ovan så att man senare kan bestämma den verkliga korrosionen på pålarna.

5.3 Kontroll av skyddsverkan vid katodiskt skydd

Offeranoder: Skydd med offeranoder projekteras för en viss livslängd hos anoderna. Vanlig projekterad livslängd i vatten är 10 – 20 år, i jord ofta längre. I fallet med anoder fästade direkt på pålen, såsom ofta är fallet vid skydd av pålar i vatten, behöver normalt ingen mätteknisk kontroll av skyddsverkan utföras. När den projekterade livslängden går mot sitt slut inspekteras anoderna av dykare med avseende på kvarvarande anodmaterial och byts ut mot nya vid behov.

I fallet med offeranoder nedgrävda eller nedsänkta ett stycke från pålen och anslutna till denna via kabel, såsom vid skydd av påle i jord, bör det regelbundet kontrolleras att kablarna och deras anslutningar är intakta. Detta görs enklast genom elektrisk kontaktmätning (resistansmätning) mellan påle och anod.

Genom mätning av styrkan hos skyddsströmmen, som flyter kontinuerligt i anslutningskabeln kan man nöjaktigt bedöma hur stor anodmassa, som återstår och därmed anodens återstående livslängd. Med hjälp av Faradays lag kan man uppskatta hur stor anodmassa, som förbrukas per ampere och tidsenhet, till exem-

pel per år. Faradays lag anger att en magnesiumanod teoretiskt förlorar 4 kg per ampere och år. En zinkanod förlorar 10,7 kg per ampere och år. I verkligheten är dock dessa värden något högre beroende på anodens egenkorrosion, som sker som en följd av jordens eller vattnets korrosiva påverkan. Med kännedom om anodens ursprungliga anodmassa och hur länge den varit i bruk kan sedan återstående livslängd uppskattas. Vid sådan uppskattning brukar man anta att anodens fulla kapacitet är till ända när det återstår cirka 20 % av ursprunglig anodmassa.

Oftast görs ingen mätteknisk kontroll av skyddsverkan hos offeranoder. Vill man ändå verifiera skyddsverkan görs detta genom mätning av pålens katodiska skyddspotential (se nedan).

Påtryckt ström: En installation med katodiskt skydd med påtryckt ström måste få tillsyn och kontrolleras mättekniskt med jämna intervall, till exempel en gång varje eller vart annat år.

Tillsynen innebär att man kontrollerar att den elektriska enheten är i god ordning och att den matar ut avsedd skyddsström.

Skyddsverkan kontrolleras genom mätning av att avsedd nivå för skyddspotentialen fortfarande råder på pålen. Mätningen görs med en speciell mätelektrod, så kallad referenselektrod av typ koppar/kopparsulfat. Mätelektroden och pålen ansluts till en millivoltmeter, till exempel ett universalinstrument, med hög ingångsimpedans ($Z \geq 10 \text{ M}\Omega$). Mätelektroden placeras i markytan. Potentialen mäts som en likströmspotential och form av så kallad frånslagspotential (OFF-potential) för eliminering av det elektriska spänningsfallet i marken, som skyddsströmmen ger upphov till och, som förfalskar registrerad potential.

En mätmetod, som introducerats på senare tid och, som kompletterar potentialmätning är mätning av potential och skyddsström på så kallad mätkupong. Denna är en liten stålplatta med definierad area, som grävs ned intill och ansluts till pålen med kabel. Numera finns också elektroniska system för fjärrövervakning av skyddseffektiviteten via radio eller mobiltelefoni.

Mättekniska kontrollförfaranden vid katodiskt skydd beskrivs närmare i svensk-europeisk standard SS-EN 13509.

5.4 Kontroll av skadlig biverkan av katodiskt skydd

Risk för skadlig biverkan av katodiskt skydd, det vill säga korrosionsfarlig sekundärverkan på främmande konstruktion, kan antingen beräknas redan på projekteringsstadiet, alltså före det att skyddet har anlagts, eller mätas upp efter det att skyddet har tagits i drift. Med kännedom om belägenheten för den främmande konstruktionen och den projekterade styrkan hos den katodiska skyddsströmmen kan man med en särskild formel beräkna riskområdet kring anoderna respektive pålen, som ska skyddas. Ligger den främmande konstruktionen inom riskområdet måste åtgärd vidtas, som skyddar denna mot skadlig sekundärverkan.

Det är också möjligt att mäta upp riskområdets storlek. En så kallad provpolarisering görs, varvid ett stålspett sticks ned på den tänkta platsen för anläggandet av anoden/anoderna. Därpå matas en likström, lika stor som den projekterade, ut från spettet till pålen/pålarna. Spänningsfallet (eg. potentialfallet) i marken mäts från så kallad avlägsen (elektriskt neutral) jord och in mot anodplatsen. Punkten där potentialskillnaden mellan avlägsen jord och elektriskt påverkad jord är 0,5 Vdc utgör riskområdets yttre gräns.

Är den främmande konstruktionen tillgänglig för anslutning av mätkabel kan den faktiska eventuella sekundärverkan mätas. Konstruktionens potential mäts både vid utmatad ström och vid avbruten strömutmatning. Förskjuts konstruktionens potential mer än 100 mV i positiv riktning föreligger skadlig sekundärverkan och motåtgärd måste vidtas.

Förfarandet vid beräkning respektive mätning av riskområdets storlek beskrivs ingående i svensk standard SS-EN 50162 och Korrosionsinstitutets Rapport 1983:4.

5.5 Kontroll av förekomst av läckström

Som framhållits i Pålkommisionen Rapport 93 (Camitz, 1994) förekommer på sina ställen elektriska läckströmmar i marken, framför allt i närheten av starkströmsanläggningar med någon av ledarna i kontakt med jorden. Både likström och växelström förekommer. Det är framför allt likström, som kan ge upphov till sk. elektrolytisk korrosion. Växelström kan knappast ge upphov till sådan korrosion på obelagda stålplåtar i jord. Förekomst av läckström (likström) i marken eller i en jordförlagd konstruktion kan kontrolleras genom elektrisk mätning.

Har konstruktionen ännu inte installerats mäter man om det föreligger ett spänningsfall (spänningsgradienter) i marken på platsen i fråga. Två s.k. referenselektroder sticks ned ett stycke i marken på ett visst avstånd, t ex. 100 m, från varandra. Lämpligt avstånd beror av hur hög jordresistiviteten är. Elektroderna ansluts till en millivoltmeter eller en datalogger. Med hjälp av instrumenten kan man avgöra om det förekommer ett likströmsflöde i marken och även riktningen på strömmarna. Strömflödet kan vara antingen stabilt eller varierande i tid. Det senare förekommer om strömmen härrör från en likströmsmatad järnväg eller spårväg. Vid läckström från järnväg/spårväg registreras spänningsfallet med datalogger kontinuerligt under t ex. ett helt dygn.

Vid mätning på en existerande konstruktion mäts dennas elektropotential. En referenselektrod sticks ned ett stycke i marken. Referenselektroden och konstruktionen ansluts till en millivoltmeter eller datalogger. Den registrerade potentialens värde anger om konstruktionen är påverkad av korrosionsfarlig likström. Även här görs registreringen med datalogger kontinuerligt under ett dygn om potentialen varierar snabbt i tid och således sannolikt härrör från en likströmsmatad järnväg/spårväg.

Båda mätförfarandena beskrivs i svensk-europeisk standard SS-EN 50162 och SS-EN 13509. I dessa anges även hur mätresultat kan tolkas.

6. Slutsatser

6.1 Allmänt

Användningen av stålplåtar har ökat väsentligt under de senaste 25 åren och utgör nu 30 – 40 % av det totala antalet slagna pålmetrar per år i Sverige. Samtidigt ökar samhällets krav på beständigheten för byggnader och anläggningar medan man också inför nya dimensioneringsregler med Eurokoderna. Det finns därför skäl att göra en förnyad sammanställning av kunskaper och erfarenheter om korrosion på stålplåtar i jord kompletterad med senare års erfarenheter utöver dem, som finns redovisade av Camitz (1994). Syftet med denna sammanställning är att sprida information om korrosion på stålplåtar samt ge ett underlag för en förnyad värdering och eventuell revidering av reglerna för dimensionering m.h.t. korrosion på stålplåtar i jord.

Korrosionsprocessen är av elektrokemisk natur vilket innebär att det vid den kemiska processen på stålytan bildas korrosionsströmmar mellan pålytan och jorden. Korrosionsceller bestående av anod- och katodytor, där korrosionen sker vid anodytan, kan vara av olika storlek och styrka vilket påverkar korrosionens storlek och fördelning på pålytan.

När man talar om effekten av korrosion brukar man skilja mellan lokal och jämn korrosion, där man i det förra fallet har korrosion på begränsade delar av pålytan medan man vid jämn korrosion får en jämn avfrätning av större delar av pålytan. För pålar brukar korrosionshastigheten uttryckas såsom en medelavfrätning $\mu\text{m}/\text{år}$ eller $\text{mm}/100 \text{ år}$.

Korrosionshastigheten bestäms främst av syrediffusionen och fuktförhållandena i jorden. Dessa i sin tur kan påverkas av sådana förhållanden som jordens permeabilitet och närheten till grundvattenytan eller vattenförande skikt samt huruvida jorden är omgrävd (utfylld) runt pålen. Korrosionshastigheten kan också påverkas av låg resistivitet i jorden t.ex. till följd av hög salthalt eller lågt pH-värde ($\text{pH} \leq 4$) såsom i vissa torv- eller sulfidjordar. Vidare kan korrosionshastigheten påverkas av vissa mineraler såsom kol, koks och grafit eller förekomst av speciella bakterier i sulfid-

haltig jord s.k. bakteriell korrosion. Även restprodukter i fyllningar kan påverka korrosionen negativt. Grundvattenytans läge kan ha betydelse genom den syrekonzentrationscell, som bildas där. Detta medför att man får den största medelavfrätningen något under grundvattenytan medan gropfrätningen blir störst över grundvattenytan.

Slutligen skall också noteras att också stålets sammansättning kan påverka såväl korrosionshastigheten som korrosionens fördelning över pålytan. På stålplåtar av kolstål, vilket är den vanligaste ståltypen i pålar, sker korrosionen förhållandevis jämnt över hela pålen. I vissa typer av jord kan det dock uppstå avgränsade lokala angrepp med större djup än den jämna korrosionen. På pålar av låglegerat stål tycks det, utöver den jämna korrosionen, finnas en tendens till fler och djupare lokala angrepp än vad som är fallet på pålar av kolstål. På pålar av rostfritt stål förekommer ingen jämn avfrätning. Eventuell korrosion uppkommer endast i form av starkt avgränsade men ofta djupa punktangrepp medan den rostfria stålytan runt angreppet är ”blank” och utan korrosion.

Normalt anses korrosionshastigheten vara densamma under pålarnas hela livslängd även om den för vissa provplatser visat sig avta något under de första 3 – 5 åren efter installation.

6.2 Korrosion på bärstål i jord

Den av Camitz (1994) redovisade rapporten om korrosion och korrosionsskydd av stålplåtar och stålspons i jord och vatten innehåller resultatet av en mycket omfattande litteraturundersökning och erfarenhetsinsamling och sammanfattar kunnandet på detta område fram till ca 1990. Resultatet av undersökningarna har sammanställts i Appendix 1 till rapporten, som visar förslag till dimensionerande värden på medelavfrätningen i $\mu\text{m}/\text{år}$ dels för stålplåtar och stålspons i olika svenska jordar dels för motsvarande konstruktioner i olika zoner i olika slags vatten. Korrosionshastigheterna i jord anges till mellan 20 och 50 $\mu\text{m}/\text{år}$, där de högsta värdena avser strandnära jordar på Västkusten med starkt salthaltigt grundvatten.

Korrosionshastigheterna i vatten anges vara mellan 20 och 300 $\mu\text{m}/\text{år}$, där de högsta värdena avser korrosion i skvalpzonen i salt och bräckt vatten och de lägsta avser korrosion i bottensedimenten. Dessa korrosionshastigheter har legat till grund för de dimensioneringsregler för slanka stålplåtar med hänsyn till korrosion, som redovisas av Bengtsson m.fl. (2000).

År 1981 startade Korrosionsinstitutet och Statens geotekniska institut försök med fältexponering av s.k. krysspålar på fem olika platser i Sverige med olika jordförhållanden. Resultaten av dessa undersökningar redovisas av Vincka m.fl. (2002) och visar att korrosionshastigheten mätt som medelavfrätning efter nio års exponering varierade mellan 0,5 och 8 $\mu\text{m}/\text{år}$ med den högsta korrosionshastigheten i gytjig lera i Stockholm. På två platser: Stockholm och Enköping kunde en avtagande tendens i korrosionshastigheten noteras medan den på övriga var i stort sett densamma. Den lokala korrosionen var som regel störst på pålarnas övre delar (0,5 – 1,0 m djup) utom för pålen i dränerad sand i Linköping där den lokala korrosionen i en frätgrop på 1,5 m djup uppgick till 250 $\mu\text{m}/\text{år}$. Mätt som areaminskning på pålarna blev denna i den mest utsatta sektionen efter nio års exponering mellan 0,3 och 2,6 % av ursprunglig tvärsnittyta med det lägsta värdet i Linköping där den högsta lokala korrosionen uppmätts.

En jämförelse mellan den ovan nämnda korrosionshastigheten på X-pålar och den som uppmätts på nedgrävda vertikala stålstänger visar att den på de senare är 2-4 ggr högre än den är på de nedslagna X-pålarna. Samtidigt kan man inte se någon avtagande tendens på hastigheten för de nedgrävda stängerna.

Inom Pålkommisionen bedömde man att det fanns mer information att vinna genom att de mätningar, som utfördes under en lång följd av år på SJ:s geotekniska kontor och som redovisas av Sandegren (1988), samlades i en databank för bearbetning med en statistisk analys. En sådan genomfördes och redovisas av Bengtsson m.fl. (2002). Analysen visade att korrosionshastigheten för alla de 836 stålstängerna låg mellan 0,0 och 40,0 $\mu\text{m}/\text{år}$ med de högsta värdena i jord med organiskt innehåll. 95 %-fraktilen, som bedömts utgöra den s.k. karakteristiska korrosionshastigheten, låg mellan 10,7 och 12,1 $\mu\text{m}/\text{år}$ efter 10 års exponering. Detta värde bör sedan multipliceras med en partialkoefficient på 1,5 för att täcka in osäkerheten i bedömningen av korrosions-

hastigheten. Härav erhålls den s.k. dimensionerande korrosionshastigheten, som pålarna bör dimensioneras för, till mellan 16 och 18 $\mu\text{m}/\text{år}$. Dessa värden kan jämföras med de ovan av Camitz m.fl. redovisade värdena för jord på 20 till 50 $\mu\text{m}/\text{år}$.

De svenska erfarenheterna har bearbetats ytterligare av Törnqvist (2004) tillsammans med finska och andra i litteraturen redovisade erfarenheter. Denna sammanställning visar bl.a. att korrosionshastigheten avtar med exponeringstiden och att medelkorrosionen i naturlig mark ligger under 1 mm/100 år. Vidare visas att 95 %-fraktilen av uppmätta korrosionsvärden efter en linjär extrapolering av värdena till 100 år är lägre än 12 $\mu\text{m}/\text{år}$ i alla jordar utom dem med organiskt innehåll samt att den s.k. groppfrättningsfaktorn avtar med medelkorrosionen på pålarna. För icke normala eller avvikande jordförhållanden bör man räkna med korrosionshastigheter, som är större och följer SS-EN 1993-5.

Speciellt höga korrosionshastigheter har uppmätts på de s.k. Sandviksrören installerade i starkt kloridhaltig lera vid Åkerhög vid Kungälv, Bergdahl m.fl. (1995). På ett låglegerat stål uppmättes här ett lokalt angrepp något under markytan på upp till 87 $\mu\text{m}/\text{år}$ medan medelkorrosionen på stängen bestämd genom viktsförlust var mellan 6 och 12 $\mu\text{m}/\text{år}$. För övriga Sandviksrör uppmättes korrosionshastigheter mellan 0 och 41 $\mu\text{m}/\text{år}$. Denna information visar att stora lokala korrosionsangrepp kan förekomma och kan sammanhånga med speciella jordförhållanden eller använd typ av stål.

Den samlade erfarenheten enligt ovan visar således att det kan finnas en möjlighet att man för vissa naturliga jordförhållanden skulle kunna minska den dimensionerande korrosionshastigheten något jämfört med vad som anges i Pålkommisionens Rapport 98. Härför erfordras dock att man klarare kan precisera i vilka jordförhållanden, som det kan göras, samt hur andra jordförhållanden skall hanteras eller undersökas. Vidare bör en närmare studie av förhållandet mellan medelavfrätning och lokal korrosion göras så att man blir säker på att den lokala korrosionen inte representerar en svårare lastsituation än medelkorrosionen. Några nya erfarenheter av korrosion i vatten har inte sammanställts i denna utredning men borde ske genom en fördjupad litteraturstudie.

6.3 Korrosion på belagt stål i jord

1983 påbörjade Korrosionsinstitutet också långtidsundersökningar på andra metaller i jord bl.a. förzinkat stål och zink på sju provningsplatser i Sverige. De exponerade provplåtarna grävdes ned till 0,7 och 1,7 m djup under markytan och har exponerats i ca sju år. Den därefter uppmätta korrosionshastigheten var i medeltal mellan 1,4 och 24,0 $\mu\text{m}/\text{år}$ på den övre nivån och mellan 6,7 och 20 $\mu\text{m}/\text{år}$ på den lägre. Korrosionen var minst i sand och högst i torv. En motsvarande undersökning i morän och fyllningsjord visade efter ca 5 respektive 3 års exponering på medelkorrosionshastigheter mellan 1,1 och 9,3 $\mu\text{m}/\text{år}$ varav det högre värdet uppkom i fyllningsjord.

Undersökningar har också utförts på förzinkade kraftledningsstolpar i södra Sverige, se Bergdahl m.fl. (1990). Stolparna, som stått ca 40 år i återfylld jord till 2,5 m djup uppvisade areaförluster på stödbenen av L-järn på mellan 0,2 och 7,5 % utom i ett fall där den var 13,5 %. Dessa areaförluster motsvarar en enkelsidig korrosionshastighet på 1,0 till 11,0 $\mu\text{m}/\text{år}$ utom för den värst korroderade stolpen där den blev 17,5 $\mu\text{m}/\text{år}$. En analys av de uppmätta värdena i förhållande till jordförhållandena visade att den största korrosionen inträffade i torv, lera och sand. Korrosionshastigheten ökade med ökad vattenkvot och om pH-värdet blev ≤ 5 . En hög grundvattenyta och en låg resistivitet ökade också korrosionshastigheten.

En jämförelse mellan de korrosionshastigheter, som uppmäts på zink och förzinkat stål visar att dessa ofta kan bli av samma storleksordning som för kolstål speciellt i sura grundvatten. Endast i kalkhaltig jord har korrosionen visat sig bli lägre. De ovan redovisade korrosionshastigheterna för zink och förzinkningsskikt gör att man måste ifrågasätta nyttan med att förzinka stålplåtar eller delar därav som ett varaktigt korrosionsskydd. De redovisade värdena kan användas för att bedöma vilka värden man bör ansätta som dimensionerande korrosion på förzinkat stål i jord samt välja ut de svåra och komplexa fallen.

En undersökning av Bergdahl och Tränk (2005) beskriver vad som händer beträffande avnötning vid neddrivning av stålplåtar försedda med två organiska beläggningar (polyeten respektive epoxi) och en zinkbeläggning. Plåtarna drevs ned på två provplatser till ca 12 m djup och drogs upp igen efter viss tid i jord. Efter uppdragning undersöktes plåtarna noggrant med avseende på skador i beläggningen.

Härvid kunde man konstatera att samtliga plåtar fått beläggningsskador, som kan leda till korrosion på underliggande stål. De epoxibelagda plåtarna hade sådana skador att de ej bedömdes uppfylla Boverkets konstruktionsregler. De polyetenbelagda plåtarna hade fått få djupare skador medan de förzinkade ej hade fått några nya djupa skador. Denna undersökning visar således att det kanske inte bara är att belägga en påle och hoppas att den inte korroderar utan man måste kanske i vissa fall förvissa sig om att beläggningen också är hel efter nedslagningen.

6.4 Åtgärder mot korrosion

Det vanligaste sättet att skydda sig mot korrosion är att dimensionera med s.k. rostmän dvs. man förutsätter att en viss avrostning sker under konstruktionens livstid. Som framgår ovan kan det dock ibland vara svårt att veta vilken rostmän man skall dimensionera för och i vilka fall man inte kan använda sig av den metoden utan måste finna andra lösningar. En närmare studie härav bedöms kunna utföras på basis av de erfarenheter, som redovisas i denna rapport men ytterligare erfarenhetsunderlag vore önskvärt bland annat avseende långtidseffekten av korrosionen samt bedömning av de svåra fallen.

Dimensionering m.h.t. rostmän kan i Sverige idag ske på basis av olika dokument:

- Pålkommisionens Rapport 93, Appendix 1, Camitz (1994), som anger dimensionerade värden på korrosionshastigheter vid olika jord- och vattenförhållanden.
- Pålkommisionens Rapport 98, Kap. 7, Bengtsson m.fl. (2000), som baseras på Rapport 93, där man försökt skilja på enkla samt komplexa och korrosiva förhållanden. Vidare har man infört begreppet dimensionerande rostmän för 100 års livslängd.
- Svensk standard SS-EN 1993-5:2007, som anger dimensionerande rostmän som funktion av avsedd livslängd, 5 – 100 år. Värden finns dels för olika jordar och för olika vattenförhållanden.
- Typgodkännandebevis 0656/94 RR-plåtar, daterad 2007-06-29 för innehavaren Ruukki Sverige AB från SITAC, Karlskrona med tillhörande handling RR-plåtar. Anvisning för projektering, dimensionering, utförande och kontroll. Ruukki Sverige AB, Borlänge 2007.

En jämförelse mellan de olika sätten att dimensionera med rostmån i jord visar:

- att klassificeringen av olika jord- och vattenförhållanden varierar
- att man för SS-EN 1993-5 tagit hänsyn till att korrosionshastigheten har en avtagande tendens (utan att det är dokumenterat)
- att angivna korrosionshastigheter i SS-EN 1993-5 i många fall är för låga om man jämför med svenska erfarenhetsvärden.
- att rostmånera enligt SS-EN 1993-5 är ungefär desamma som anges för RR-pålar.
- att de rostmåner, som anges i Pålkommisionens rapporter 93 och 98, genomgående ger de högsta värdena på rostmånen.

För stålplåtar och stålsplint i vatten visar en jämförelse på en större skillnad mellan SS-EN 1993-5 och Pålkommisionens rapport 93 och 95. Så t.ex. anger SS-EN 1993-5 för havsvatten i skvalpvattenzonen en dimensionerande rostmån på 7,5 mm/100 år medan den enligt Pålkommisionen är 30 mm/100 år.

Det finns således ett behov av att utifrån de erfarenhetsvärden, som redovisas i denna rapport, göra en förnyad värdering av dimensionerande korrosionshastigheter för olika jordförhållanden, som kan utgöra underlag till en Nationell Bilaga om korrosion till SS-EN 1993-5. Vidare bör en motsvarande värdering göras för plåtar i vatten. Eftersom här inte finns motsvarande erfarenhetsvärden bör en fördjupad litteraturundersökning göras för plåtar i vatten.

Ett sätt att skydda stålplåtar mot korrosion är att gjuta in dem i betong som man t.ex. gör med stålplåtar där man utfyller mellanrummet mellan foderrör och stålplåtar med cementbruk. Även övre delar av slagna plåtar, som kan utsättas för vatten av och till borde förses med sådan ingjutning. Härvid skyddar foderröret plåten från utvändigt korrosion. Det är dock viktigt att klorider eller havsvatten ej tillsätts bruket eller har tillträde till plåtarna.

Skydd av plåtar mot korrosion med s.k. katodiskt skydd förekommer knappast i vanlig jord i Sverige men är vanligare i Norge där man har mer salthaltiga jordar. Det är också mer vanligt för skydd av plåtar i vatten vid t.ex. hamnar. Härvid bör plåtarna vara försedda med en organisk skyddsbeläggning så att den katodiska skyddsströmmen kan hållas låg.

6.5 Kontroll av korrosion

Kontroll av korrosion eller risken därför kan ske på olika sätt:

- genom en korrosivitetsundersökning på platsen varvid man bestämmer de jord- och vattenförhållanden, som kan påverka korrosionens storlek t.ex. jordlagerföljd, förekomst av organiskt material eller sulfider, vattenkvot, resistivitet, pH-värde samt bestämning av grundvattenytans läge.
- genom provpålning och uppdragning av plåtarna för bestämning av nötningsskador på en beläggning
- genom neddrivning av plåtar utanför den egentliga konstruktionen för senare uppdragning och mätning av inträffad korrosion
- genom kontroll av effektiviteten och skaderisken för katodiskt skydd

Någon större erfarenhet av sådana kontroller finns inte i Sverige förutom kontroll av katodiska skydd för andra konstruktioner än stålplåtar. En närmare sammanställning av sådana erfarenheter är önskvärd. En närmare studie av vilka egenskaper i jord, som kan påverka korrosionshastigheten negativt bör också göras för att man skall kunna särskilja svåra och komplexa förhållanden där rostmånsdimensionering inte kan tillämpas.

7. Referenser

- Bengtsson, Å & Berglars, B & Hultsjö, S & Romell, J (2000).** Dimensioneringsanvisningar för slagna slanka stålplåtar. 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 stålplåtar i jord – Statistisk bearbetning. Information 2002:1. Pålkommisionen, Linköping. Finns även på Pålkommisionens hemsida på internet: www.palkommissionen.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 (1990). Statens geotekniska institut, Linköping.
- Bergdahl, U & Eriksson, M (1995).** Stålpålekorrosion. Avrostning av långtidsexponerade stålrör. Dnr 1-9412-599. Statens geotekniska institut, Linköping.
- Bergdahl, U & Tränk, R (2005).** Korrosionsskyddande beläggningar på stålplåtar i jord - Provning av reptålighet. Varia 553. Statens geotekniska institut, Linköping.
- Boverket (2003).** Regelsamling för konstruktion - Boverkets konstruktionsregler, BKR, byggnadsverklagen och byggnadsförordningen. Boverket, Karlskrona.
- Boverket (2007).** Boverkets Handbok om stålkonstruktioner, BSK 07. Boverket, Karlskrona.
- Bro 2004.** Vägverkets allmänna tekniska beskrivning för nybyggande och förbättring av broar, Bro 2004. VV Publikation 2004:56. Del 5, Stål-, trä- och aluminiumkonstruktioner. Bilaga 5-2, Korrosionshänsyn för stålprofiler neddrivna i jord. Vägverket, Borlänge.
- Camitz, G (1980).** Anvisningar för bestämning av jordars resistivitet. Bulletin nr 88. Korrosionsinstitutet, Stockholm.
- Camitz, G (1994).** Korrosion och korrosionsskydd av stålplåtar och stålspons i jord och vatten. Rapport 93. IVA Pålkommisionen, Linköping. (Pålkommisionen, c/o Statens geotekniska institut, Linköping).
- Camitz, G, & Bergdahl, U (2007).** Korrosion på stål i beslag till plåtar av trä, betong och stål. Rapport under utgivning vid Pålkommisionen.
- Camitz, G & Sandberg, B (1984).** Anvisning för mätning av sekundärverkan från katodiskt skydd - Förslagsutgåva. KI Rapport 1983:4. Korrosionsinstitutet, Stockholm.
- Camitz, G & Vinka, T-G (1988).** Corrosion of steel and metal-coated steel in Swedish soils. I: ASTM STP 1013 (Chaker, V & Palmer, J D, eds.), pp 37 - 53. American Society of Testing and Materials, Philadelphia.
- Camitz, G & Vinka, T-G (1989).** Influence of some soil parameters on the corrosion of steel in Swedish soils. Proc. CECOR 2nd International Conference on Corrosion, Napoli 1989, pp 77 - 90. CECOR, c/o Cibe, Rue aux Laines 70, B-1000 Bryssel.
- Camitz, G & Vinka, T-G (2004).** Soil corrosion of stainless steel pipes, vertically installed in the ground. CECOR Plenary Days, Dresden 2004. Sector C, Paper no 2. CECOR, c/o VIVAQUA, Rue aux Laines 70, B-1000 Bryssel.
- Camitz, G & Vinka, T-G & Linder, H (2007).** Corrosion of vertical carbon steel at the ground water table region in soil – Laboratory investigation. CECOR Plenary Days, Dresden 2004. Sector C, Paper no 4. CECOR, c/o VIVAQUA, Rue aux Laines 70, B-1000 Bryssel.
- Draft International Standard ISO/DIS 21809-1, 2008.** Petroleum and natural gas industries - External coatings for buried or submerged pipelines used in pipeline transportation systems - Part 1: Polyolefin coatings (3-layer PE and 3-layer PP). Förslag till ISO standard. International Organization for Standardization, Genève.

- Eriksson, A Ch (1976).** Litteraturundersökning av korrosion på stålplåtar. Internrapport (50 sid) 1976-03-06 i Pålkommisionens beständighetsgrupp. IVA Pålkommisionen, Stockholm.
- Korrosionsinstitutet (1999).** Handbok i rostskyddsmålning av allmänna stålkonstruktioner (Svendenius, G & Hedman, S, red.). Bulletin 107. Korrosionsinstitutet, Stockholm.
- Norin, M & Vinka, T-G (2003a).** Korrosion på kolstål och zink i fyllnadsjord i stadsmiljö. KI Rapport 2003:5. Korrosionsinstitutet, Stockholm.
- Norin, M & Vinka, T-G (2003b).** Corrosion of carbon steel in filling material in an urban environment. Materials and Corrosion, volume 54, pp 641 - 651.
- Norsk Geoteknisk Forening (2005).** Peleveilningen 2005. Norsk Geoteknisk Forening och Den Norska Pelekomité, Oslo.
- Ohsaki, Y (1982).** Corrosion of steel piles driven in soil deposits. Soils and Foundations, Vol. 22, No. 3, pp 57 - 76.
- Romanoff, M (1957).** Underground corrosion. US National Bureau of Standards. Circular no. 579. US Government Printing Office, Washington.
- Ruukki Sverige AB (2007).** RR-plåtar. Anvisningar för projektering, dimensionering, utförande och kontroll. Ruukki Sverige AB, Borlänge.
- Sandegren, E (1988).** Korrosion på stål – vertikalt orienterat – i jord. Slutrapport. Meddelande nr 46. Statens Järnvägars Huvudkontor, Geoteknik och ingenjörsgologi, Stockholm.
- SITAC (2007).** RR-plåtar. Typgodkännandebevis 0656/94, 2007-06-29. Projektnummer T200462-02. Innehavare av typgodkännandebevis: Ruukki Sverige AB, Borlänge. SITAC, Karlskrona.
- Sjögren, L & Camitz, G m. fl. (2008).** Corrosion resistance of stainless steel pipes in soil. European Coal and Steel Community. Final Report. Contract Number 7210-PR-367. European Commission, Technical Steel Research TGS 6, Bryssel.
- Svensk standard SS-EN 10020 (2000).** Definition och klassificering av ståltyper. Utgåva 2. SIS, Stockholm.
- Svensk standard SS-EN 12954 (2001).** Katodiskt skydd av metalliska konstruktioner i jord och vatten - Allmänna principer och tillämpningar på rörledning. Utgåva 1. SIS, Stockholm.
- Svensk standard SS-EN 13509 (2003).** Mätmetoder vid katodiskt skydd. Utgåva 1. SIS, Stockholm.
- Svensk standard SS-EN 10088-1:2005.** Rostfria stål – Del 1: Förteckning över rostfria stål. Utgåva 2. SIS, Stockholm.
- Svensk standard SS-EN 50162, 2005.** Skydd mot korrosion förorsakad av läckströmmar från likströmsanläggningar. Utgåva 1. SIS, Stockholm.
- Svensk standard SS-EN 1993-5: 2007.** Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner - Del 5: Plåtar och spont. Utgåva 1. SIS, Stockholm. Standarden ikraftsätter europastandarden EN 1993-5:2007 som svensk standard. Det tekniska innehållet finns alltså i: European Standard EN 1993-5:2007. Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 5: Piling. European Committee for Standardization (CEN), Bryssel. Se speciellt Chapter 4, Durability.
- TNC 67 (1977).** Korrosionsordlista. Tekniska nomenklaturcentralens publikationer nr 67. Tekniska nomenklaturcentralen, Stockholm.
- Troselius, L (1991).** Korrosionsrisker under mark – stagförankringar i ställverk och spont i dammar. Föredrag vid Korrosionsinstitutets konferens Korrosionsskydd av vattenkraftverk, 9-10 april 1991.
- Törnqvist, J (2004).** Korrosion på stålrospålar. Dimensionering utgående från empiriskt material. ISBN 952-5004-54-6. VTT Bygg och transport, Esbo.
- Vinka, T-G (1997).** Korrosion på metaller i sur moränjord. Rapport till Byggeforskningsrådet. Stockholm.
- Vinka, T-G (2000).** Bedömning av korrosionsrisk: Korrosion på förzinkat stål i jord. Bygg & teknik, årgång 92, nr 1, sid 55 - 58.
- Vinka, T-G (2001).** Microbial corrosion on carbon steel in Swedish soils. EUROCORR 2001. 30 september - 4 oktober 2001, Riva del Garda, Italien. Föredrag nr 248. Congress proceedings på CD-ROM utgiven av Associazione Italiana di Metallurgia, Milano, Italien.
- Vinka, T-G (2003).** Korrosion på metaller i svenska jordar – Sammanställning av resultat från fältexponeringar och praktiska erfarenheter. VA-Forsk Rapport nr 34. Svenskt Vatten AB, Stockholm.
- Vinka, T-G & Bergdahl, U & Camitz, G (2002).** Korrosion på stålplåtar i jord. Bygg & Teknik, årgång 94, nr 1, sid 56 - 58, 61 - 62.

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

Vinka, T-G & Årebäck, M (1996). Korrosionsförhållande hos kolstål och zink i en urban jordlagerföljd. KI Rapport 1996:9. Korrosionsinstitutet, Stockholm.



PÅLKOMMISSIONEN

Meddelanden

- | | |
|--|---|
| <p>1 Slagningsprov av pålskor med bergdubbar.
Bror Fellenius
1963</p> <p>2 Provpålning för broar inom blivande
Olskroks- och Gullbergsmoten i samband
med byggande av Europaväg 6 genom
Göteborg.
Bror Fellenius – Waldemar Pejrud
1964 Slut</p> <p>3 Jämförelse mellan moment, krökningsradie
och sprickvidd i betongpålar slagna genom
lös lera till släntberg vid Tingstadsdelen,
Göteborg.
Bror Fellenius
1964</p> <p>4 Pålprovning för järnvägsbro vid Vännäs.
Bror Fellenius
1964 Slut</p> <p>5 Beräkningsmetoder för sidobelastade pålar.
Bengt Broms
1965 Slut</p> <p>6 Brottlast för snett belastade pålar.
Bengt Broms
1965</p> <p>7 Beräkning av vertikala pålars bärförmåga.
Bengt Broms
1965</p> <p>8 Provpålning mot släntberg vid Skansen
Lejonet, Göteborg.
Waldemar Pejrud
1965</p> <p>9 Inverkan av armeringsmängd, förspänning
och fallhöjd på sprickrisken hos betongpålar
vid slagning.
Sven Sahlin
1965</p> <p>10 Bärförmågan hos armerade betongpålar
slagna till fast bergbotten.
Hjalmar Granholm
1967</p> <p>11 Bärförmågan hos pålar slagna till släntberg.
Bengt Broms
1965</p> <p>12 Dynamisk draghållfasthet hos modellpålar av
oarmerad betong. Resultat av orienterade
försök.
Sven Sahlin – Lars Hellman
1966</p> | <p>13 Pålgruppers bärförmåga.
Bengt Broms
1967</p> <p>14 Påkänningar, sprickbildning och utmattning
vid slagning av armerade modellpålar av
betong.
Bo Göran Heders – Sven Sahlin
1971</p> <p>15 Bärförmåga hos släntberg vid statisk
belastning av bergspets. Resultat av
modellförsök.
Sven-Erik Rehnman
1968</p> <p>16 Stålpålars bärförmåga. Resultat av fältförsök
med lätta slagdon.
Gunnar Fjelkner
1970</p> <p>17 Bergdubbens hållfasthet. Resultat från
statiska belastningsförsök.
Sven-Erik Rehnman
1970</p> <p>18 Negative skin friction on long piles in clay.
I. Results of a full scale investigation.
II. General views, and design
recommendations.
Bengt H Fellenius
1971</p> <p>19 Damping of stress waves in piles during
driving. Results from field tests.
Gunnar W Fjelkner - Bengt B Broms
1972</p> |
|--|---|

Särtryck och preliminära rapporter

- | | |
|---|--|
| <p>1 Allowable bearing capacity of initially bent
piles.
Bengt Broms
Referat från pålkommitténs informationsdag
25 okt 1965</p> | <p>Provbelastning av påle slagen i lera och
friktionsmaterial.
Gunnar Hellström</p> <p>Knäcklasten för momentstyvt skarvade pålar
i lera.
Krister Cederwall
1965</p> |
| <p>2 Provbelastning av stödpålar av betong inom
östra Nordstaden, Göteborg. Delrapport.
Gunnar Hellström
1965</p> | |

3	Bärighet hos släntberg vid statisk belastning av bergspets. Resultat av modellförsök. Sven-Erik Rehnman 1966	18	Pålkraftmätare. Bengt H Fellenius – Thomas Haagen Negative skin friction for long piles driven in clay. Bengt H Fellenius – Bengt Broms 1969
4	Om påslagning och pålbärighet. (Informationsdagen 14/11 1966) 1967 Slut		
5	Resultat av pålprovning vid Göteborg C. Bror Fellenius 1955 (omtryckt 1967)	19	Datorberäkning av stötvågsförlopp i pålar medelst variation av modellparametrar. Delrapport III Lennart Vilander 1969
6	Om stoppslagning av stödpålar. Lars Hellman 1967	20	Nya pålnormer. Föredrag vid informationsmöte 25/4 1969. Göte Åström – Per Sahlström – Erik Sandegren 1969 Slut
7	Undersökning med syfte att uppställa stoppslagningsregler för stålpålar slagna med trycklufthammare. Delrapport 1. Gunnar Fjelkner 1967 Ersatt av Medd 16	21	Negative skin friction on piles in clay. A literature survey. Bengt H Fellenius 1969
8	Industriell tillverkning av betongpålar. Kajsa Sundberg – Arne Forsell 1968	22	Deformationsegenskaper hos slagna betongpålar. Bengt H Fellenius - Torsten Eriksson Friktionspålars bärförmåga. Resultat från fältförsök i Kanada. Bengt H Fellenius 1969
9	Digitalisering av stötvågsmätningar. Delrapport I Lennart Vilander 1968		
10	Stoppslagning av stålpålar med lätta slagdon (trycklufthammare). Delrapport II Gunnar Fjelkner 1968 Ersatt av Medd 16	23	Pålars bärförmåga i elastiskt medium under hänsynstagande till egenspanningar i pålmaterialet. Stig Bernander 1969
11	Förslag till anvisningar för pålprovning och enkel provbelastning. (Andra omarbetade upplagan) 1970	24	IVA Pålkommision 1959-1969. Uppsatser utgivna i samband med Pålkommisionens tioårsjubileum 1969
12	Tillåtna laster på långa stödpålar av betong i östra Nordstaden, Göteborg. Slutrapport. Gunnar Hellström 1969	25	Statistik över antal slagna pålmeter år 1962, 1966 och 1968 1969 Ersatt av SPR 30
13	Kvarstående förspänningskraft i slagna betongpålar. Undersökning av pålar från grunden till Silo 68, Köping. Bo-Göran Hellers 1968	26	Föredrag vid Pålkommisionens jubileumsmöte den 20 november 1969 Den norske pelekomités arbeide. Klaare Flaate Aktuella forskningsbehov inom pålningsområdet. Bengt Broms 1970
14	Föredrag vid Halmstad Järnverks armeringsdag 17/11 1967. Bengt Broms – Gunnar Sundberg – Per Möller – Thorild Blomdahl 1968		
15	Statistik över antal slagna pålmeter 1962 och 1966. 1968 Ersatt av SPR 30	27	Rapport från en resa till Mexiko, USA, Kanada och England 23.8–13.9 1969. Bengt H Fellenius 1970
16	Friktionspålars bärförmåga. En studie av utförda provbelastningar. Sven Hultsjö – Jan Svensson 1969	28	Mätning av fallhejarens anslagshastighet vid påslagning. Karl-Erik Sundström 1970
17	Ett program för beräkning av stötvågsförloppet vid friktionspålning. Delrapport II Lennart Vålander 1969	29	Studier av en friktionspåles verkningssätt Åke Nilsson – Torbjörn Winqvist 1971

- 30 Statistik över antal slagna pålmetrar 1962, 1966, 1968 och 1970.
1971 Ersatt av SPR 38
- 31 Friktionspålning för brostöd nr 2 vid Albysjön, tunnelbana 2 SV, Botkyrkabanan.
Sven-Erik Rehnman
1971
- 32 Aktuellt forskningsbehov för pålområdet i Sverige i juni 1971.
Ulf Bergdahl
1971
- 33 Sättningar vid pålning olika djupgrundläggningsmetoder.
Intryck från pålkonferens
1972
- 34 On the bearing capacity of driven piles.
1972
- 35 Load testing of piles according to the Polish regulations.
B K Mazurkiewicz
1972
- 36 Undersökning av konventionell slagdyna. Beräkningsanalyser och beräkningsresultat för olika fall.
Martti Laine
1972
- 37 Approximativ bestämning av böjstyvheten i ett förspänt, delvis uppsprucket betongtvärsnitt.
Bo-Göran Hellers
1973
- 38 Statistik över antal slagna pålmetrar år 1962, 1966, 1968, 1970 och 1972.
1973
- 39 Inventering och sammanställning av utförda böjprovningar med oskarvade och skarvade betongpålar.
Björn Kvist - Pär Sandin
1973
- 40 Undersökning av avklingande stötvågs utseende efter pasage genom dyna med talriksfjädrar.
Bo Larsson
1973
- 41 Om korrosion på stål, speciellt i betongpålar.
Bengt H Fellenius
1974

Övrigt

Slagning och provbelastning av långa pålar. Försök i Gubbero, Göteborg. (Statens Råd för Byggnadsforskning, rapport 99).

Pålningensprotokoll. Blanketter upprättade enligt Särtryck och preliminära rapporter nr 11. Block om 50 blad Pris per block

- 42 Pålar i lera. En geoteknisk återblick med speciell anknytning till Göteborgs-förhållandena.
Bror Fellenius
1974
- 43 Jordundantäckning vid pålslagning – resultat av modellförsök.
Rainer Massarsch
1974
- 44 Pålning för Silo 68 i Köping. En redovisning av mätresultat.
Ulf Bergdahl – Åke Nilsson
1974

Rapporter

- 45 Aktuellt forskningsbehov för pålområdet i Sverige 1974.
Ulf Bergdahl
1974
- 46 "Root-piles" Small-diameter injected borepiles.
Anton Frank
1975
- 47 Jordgjutna pålar – en redovisning av vanliga metoder.
K Rainer Massarsch
1975
- 48 Svensk statistik över antal tillverkade och slagna pålmetrar åren 1962–1974.
1975
- 49 Deformationsmätningar vid slagning av pålar nära en stenmur – resultat av stereofotogrammetriska mätningar.
K Rainer Massarsch – Gunnar Ivmark
1975
- 50 Pålgrundläggning i Sovjetunionen 1976. Soil movements caused by pile driving in clay.
K Rainer Massarsch
1976
- 52 Angelägenheten hos forskningsprojekt inom pålområdet i Sverige 1975 – enkätresultat.
Ulf Bergdahl – Gunnar Ivmark
1977
- 53 Svensk statistik över antal tillverkade och slagna pålmetrar åren 1962–1976.
1978
- 54 Pålgrupper med sidomotstånd och inspanning.
Håkan Bredenberg – Bengt Broms
1978
- 55 Rålpålars böjstyvhet – resultat av böjprovningar.
Elvin Ottosson
1979
- 56 Provmotbelastning av friktionspålar – En studie av olika provningsmetoder.
U Bergdahl – G Hult
1979

- 57 Swedish Building Code 1975.
Chapter 23.6 Pile Foundations.

Swedish Building Code 1975.
Approval Rules No. 1975:8 Piles
Translated by B Broms
1979
- 58 Grävpålanvisningar.
Dimensionering, utförande och kontroll av
grävda, i jorden gjutna pålar.
1979
- 59 Anvisningar för provpålning med
efterföljande provbelastning.
1980
- 60 Negativ mantelfriktion längs pålar.
Bengt Broms
1979
1980
- 61 Recent pile research.
Activitis of The Swedish Commission
on Pile Research.
Bengt Broms
1980
- 62 Svensk statistik över antal tillverkade och
slagna pålmetrar åren 1962–1978.
1980
- 63 Slagning av betongpålar med trycklufthejare.
Resultat av fältförsök i Västerås 1973.
Gunnar Fjellner – Åke Eriksson
– Håkan Bredenberg
1981
- 64 Kohesionspålars bärförmåga.
En studie av utförda provbelastningar på
kohesionspålar av betong.
Ulf Bergdahl – Åke Eriksson – Ture Nilsson
1981
- 65 Swedish Building Code 1980.
Chapter 23.3 Pile Foundations

Swedish Building Code 1975.
Approval Rules No. 1975:8 Piles.
Translated by Bengt Broms, 1981
(in English)
- 66 Svensk statistik över antal tillverkade och
slagna pålmetrar åren 1962-1980.
1982
- 67 Negativ mantelfriktion längs pålar.
Resultat av enkät år 1979.
Lars Bjerin – Jan Fallsvik
1982
- 68 Parameterstudie av olika faktorerers inverkan
på pålars bärförmåga som funktion av
sjunkningen
Carl-John Grävare – Ingemar Hermansson
1982
- 69 Stålpålar - Användningsområden och praxis
för utförande.
Håkan Bredenberg – Ulf Eriksson
– Anders Eriksson – Göran Camitz
1983
- 70 Buller vid pål- och spontslagning.
En studie av mätmetoder, buflernivåer och
bekämpningsåtgärder.
Ove Bennerhult – Ulf Bergdahl
1983
- 71 Svensk statistik över antal tillverkade och
slagna pålmetrar åren 1962–1982.
1983
- 72 Förspänd tallriksfjäderdyna.
Resultat av stötvågsteoretiska studier,
datorsimulering, modell- och
fullskaleprovning.
Bo BergLars
1983
- 73 Svensk pålningsteknik under 1980-talet.
Håkan Bredenberg – Crister Bådholm
– Lars Hellman – Göran Holm
1984
- 74 Skarv för kombinationspålar träbetong.
Resultat av drag- och böjprovningar.
Elvin Ottosson
1984
- 75 Förtillverkade betongpålar.
Förslag till standard med
dimensioneringsunderlag.
1984
- 76 Initialspänningens variation vid pålslagning.
Elisabeth Stensgård – Elisabet Olsson
1984
- 77 Grävpålar i friktionsjord
Anvisningar för dynamisk förbelastning
Bo Berggren - Per-Evert Bengtsson
1985
- 78 Statistik över antal tillverkade och slagna
pålmetrar i Sverige åren 1962-1984
1985
- 79 Expanderkroppar
Anvisningar för dimensionering, utförande
och kontroll
1988
- 80 Statistik över antal tillverkade och slagna
pålmetrar i Sverige åren 1962–1986
1988
- 81 Systempålar
Stödpålar av höghållfasta, korrosions-
skyddade stålrör, slagna med lätta
höghastighetshejare.
Anvisningar för beräkning av
dimensionerande bärförmåga.
Anders Fredriksson – Sven Hultsjö
– Håkan Stille
1989
- 82 β -metoden vid pålberäkning, en förstudie.
Claes Alén – Mats Jansson – Hans Lindgren
– Lars Olsson – Jan Romell
1990
- 83 Beräkning av pålars last-rörelsesamband
med utgångspunkt från sonderingsdata.
Håkan Bredenberg – Staffan Hintze
1990

- | | |
|---|--|
| <p>84 Beräkning av dimensionerande bärförmåga för slagna pålar med hänsyn till pålmaterial och omgivande jord.
Per-Evert Bengtsson – Åke Bengtsson – Anders Fredriksson
1991</p> <p>84a Beräkning av dimensionerande lastkapacitet för slagna pålar med hänsyn till pålmaterial och omgivande jord.
Anders Fredriksson – Per-Evert Bengtsson – Åke Bengtsson
1995
Ersätter Rapport 84</p> <p>85 Statistik över antal tillverkade och slagna pålmeter i Sverige åren 1962 – 1989.
1991</p> <p>86 Friktionspållars bärförmåga och last/förskjutningssamband.
Karin Rankka
1991</p> <p>87 Bro C339 över Ekolsundsviken. Grundläggning på stålörpallar - konstruktion och arbetsutförande.
Håkan Bredenberg
1991</p> <p>88 Sprickbildning i betongpallar slagna i vatten eller i jordarter med hög permeabilitet.
Stig Bernander
1992</p> <p>89 Integritetskontroll av pålar med stötvågmätning.
Inemar Hermansson – Jan Romell – Carl-John Gråvare
1992</p> <p>90 Grova stålörpallar – anvisningar för dimensionering, utförande och kontroll.
1993</p> <p>91 Friktionspallar – bärförmågans tillväxt med tiden.
Björn Åstedt – Lars Weiner – Göran Holm
1994</p> <p>92 Datorsimulering av pålslagning.
Bo Berglars – Carl-John Gråvare – Per Löfling – Lars Weiner
1993</p> <p>93 Korrosion och korrosionsskydd av stålörpallar och stålspont i jord och vatten.
Göran Camitz
1994</p> <p>84a Beräkning av dimensionerande lastkapacitet för slagna pålar med hänsyn till pålmaterial och omgivande jord.
1995</p> <p>94 Standardpallar av betong – lastkapacitet och geoteknisk bärförmåga.
1996</p> <p>95 Omgivningspåverkan vid pål- och spontslagning
Staffan Hintze – Sven Liedberg – Rainer Massarsch</p> | <p>– Magnus Hanson / Hans Elvhammar – Björn Lundahl – Sven-Erik Rehnman
1997</p> <p>96:1 Dimensioneringsprinciper för pålar – Lastkapacitet.
1998</p> <p>97 Stålkärnepallar – anvisningar för projektering, dimensionering, utförande och kontroll.
Håkan Bredenberg
2000</p> <p>98 Dimensioneringsanvisningar för slagna, slanka stålörpallar.
Åke Bengtsson – Bo Berglars – Sven Hultsjö – Jan Romell
2000</p> <p>99 Vibratorers användningsmöjligheter vid drivning av pålar och spont.
K. Rainer Massarsch
2000</p> <p>100 Kohesionspallar.
Per Eriksson – Leif Jendeby – Tord Olsson – Tomas Svensson
2004</p> <p>101 Transversalbelastade pålar – statiskt verkningssätt och dimensioneringsanvisningar.
– Per-Ola Svahn – Claes Alén
2006</p> <p>102 Injekterade pålar.
Stefan Aronsson – Torbjörn Edstam – Urban Svensson
2004</p> <p>103 Slagna friktionspallar.
– Gary Axelsson – Sadek Baker
2007</p> <p>104 Borrade stålörpallar.
Anvisningar för projektering, dimensionering, utförande och kontroll.
– Håkan Bredenberg – Bo Berglars – Wilhelm Rankka – Gunnar Holmberg – Sami Eronen – Hannu Jokiniemi
2009</p> |
|---|--|

I september 1959 bildades Pålkommittén för påslagning och påbärighet.

Till grund för kommissionens verksamhet ligger samhällets och branschens behov av forskning och information inom pålningsområdet. Medlemmar är entreprenörer, tillverkare, konsulter, forskare, kommuner samt representanter från olika myndigheter. Organisationen Pålkommisionen, som sammanfogar dessa grupper, är unik i Europa.

Ytterligare upplysningar om Pålkommisionens verksamhet och medlemskap lämnas av kommissionens sekreterare.

Pålkommisionen

c/o Statens geotekniska institut
581 93 Linköping, Tel: 013-20 18 00, Fax: 013-20 19 14
Internet: www.palkommisionen.org