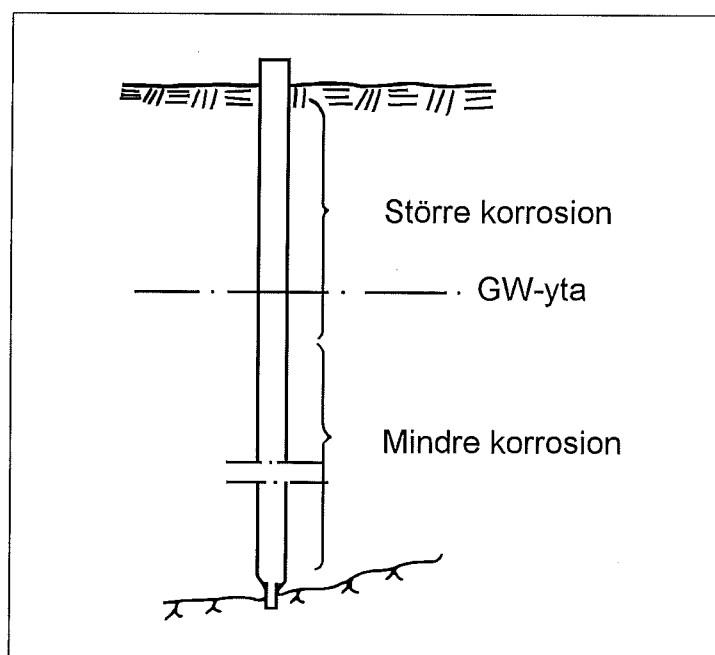


PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

Korrosion och korrosionsskydd av stålpålar och stålspons i jord och vatten



Göran Camitz

PÅLKOMMISSIONEN

I september 1959 bildades Pålkommittén för påslagning och påbärighet. Efter några år införlivades kommittén med Ingenjörsvetenskapsakademien (IVA) och fick då sitt nuvarande namn IVA Pålkommissionen.

Pålkommissionen har till uppgift att bedriva forsknings- och informationsverksamhet inom pålningsområdet. Medlemmar är entreprenörer, tillverkare, konsulter, forskare, kommuner samt representanter från olika myndigheter. Till grund för kommissionens verksamhet ligger samhällets och branschens behov av forskning och information inom pålningsområdet. Verksamheten finansieras dels med årliga kostnadsandelar från medlemmarna, dels med forskningsanslag från Byggforskningsrådet (BFR).

Ytterligare upplysningar om Pålkommissionens verksamhet och medlemskap lämnas av kommissionens sekreterare Connie Olsson, Statens geotekniska institut, tel. 013-20 18 00.

INGENJÖRSVETENSKAPSAKADEMIEN
ROYAL SWEDISH ACADEMY OF ENGINEERING SCIENCES

PÅLKOMMISSIONEN

Commission on Pile Research

rapport 93

Korrosion och korrosionsskydd av stålpålar och stålspons i jord och vatten

Göran Camitz
Korrosionsinstitutet

Linköping 1994

Rapport	IVA Pålkommisionen 581 93 Linköping
Beställning	Statens geotekniska institut Biblioteket Tel. 013-20 18 04 Fax. 013-20 19 14
ISSN	0347-1047
ISRN	IVA/PAL/R--94/93--SE
Redigering och layout	SGL, Avd för Information och Marknad
Upplaga	400 ex
Tryck	Tryck-Center, Linköping, juli 1994

Förord

Korrosionen är en viktig faktor att ta hänsyn till vid dimensionering av grundläggningar med stålplåtar eller stålspons. IVA Pålskommissionen har därför i olika perioder behandlat stålplåtars och stålspons korrosion.

I och med att grova stålrörspålar fått ökad användning på senare år vid pålgrundläggning av stora byggnadsverk har frågan om stålplåtars beständighet ånyo blivit aktuell. Följaktligen tillsatte Pålskommissionen 1991 arbetsgruppen "Korrosion på stålplåtar". Det behövdes en heltäckande framställning som behandlar hur korrosion uppträder på pålar och spons i olika miljöer och som redogör för åtgärder med vilka man på ett säkert sätt kan ta hänsyn till väntad korrosion. I uppgiften ingick även att utarbeta ett förslag till klassning av svenska jordarters och vattentypers korrosivitet mot oskyddade stålplåtar och stålspons, att användas som ett hjälpmedel vid dimensionering av rostmån eller vid val av andra skyddsåtgärder.

Från början omfattade arbetet stålplåtar i jord men utökades senare med stålplåtar och stålspons i vatten. Arbetet har bedrivits parallellt med Pålskommissionens utarbetande av dimensioneringssanvisningar för grova stålrörspålar (Pålskommissionens rapport 90), varför korrosionsskydd av sådana pålar behandlas särskilt ingående i denna rapport. Rapporten har utarbetats vid Korrosionsinstitutet för Pålskommissionen.

Rapporten behandlar både teoretiska aspekter och praktiska frågor inom området korrosion och korrosionsskydd av stålplåtar och stålspons. Genom att den är en state-of-the-art rapport kan den med fördel användas som handbok inom området.

Rapporten vänder sig till bland andra påltillverkare, konsulter, entreprenörer, geotekniker samt forskare inom området korrosion i jord/vatten och inom geoteknik.

Arbetsgruppen "Korrosion på stålplåtar" har bestått av följande personer:

Arne Bohman	Hercules Grundläggning AB	ordförande
Göran Camitz	Korrosionsinstitutet	utredare, författare
Tor-Gunnar Vinka	Korrosionsinstitutet	utredare
Per-Evert Bengtsson	Statens geotekniska institut	sekreterare
Ulf Bergdahl	Statens geotekniska institut	rådgivare
Allan Ekström	Banverket	"
Björn Lundahl	Stabilator AB	"
Clas-Göran Rydén	Vägverket	"
Robert Ronnebrant	Vägverket	"

Rapporten har redigerats av Jan Lindgren, Statens geotekniska institut.

Stockholm i juni 1994

Arne Bohman

Göran Camitz

Innehåll

FÖRORD	
SUMMARY	8
SAMMANFATTNING	9
KORROSIONSTEKNISK ORDLISTA	10
1. SYFTE OCH BAKGRUND	15
2. INLEDNING	17
3. KORROSION PÅ STÅLPÅLAR OCH STÅLSPONT SAMT INVERKANDE FAKTORER	18
3.1 Allmänt	18
3.2 Korrosionens elektrokemiska natur	18
3.3 Jämnt respektive lokalt korrosionsangrepp	19
3.4 Mätning av korrosionshastighet	20
3.5 Korrosion i jord	21
3.5.1 Jordkorrosion	
3.5.2 Galvanisk korrosion	
3.5.3 Läckströmskorrosion	
3.6 Korrosion i naturliga vatten	27
3.7 Korrosion i utomhusatmosfär	29
3.8 Summering	30
4. JÄMFÖRELSE AV KORROSIONSBENÄGENHET HOS KOLSTÅL OCH SEJÄRN I JORD OCH VATTEN	31
5. UNDERSÖKNINGAR AV KORROSION PÅ STÅLPÅLAR OCH STÅLSPONT	32
5.1 Undersökningar på stålplåtar i jord	32
5.1.1 Svensk långtidsundersökning av korrosion på stålplåtar i jord	
5.1.2 Svensk undersökning av korrosion på stålplåtar i grundvattenzonen	
5.1.3 Svensk undersökning av korrosion på stål i uppgrävd och återfylld jord	
5.1.4 Svensk undersökning av lokal korrosion på vertikala stålstänger i grundvattenzonen	
5.1.5 Amerikanska undersökningar av korrosionen på stålplåtar i jord	
5.1.6 Norska undersökningar av korrosionen på stålplåtar i jord med hög kloridhalt	
5.1.7 Japanska undersökningar av korrosionen på stålplåtar i jord	
5.1.8 Undersökning av korrosionen på stålplåtar i jord med ständig tjäle	
5.1.9 Andra undersökningar av korrosionen på enstaka stålplåtar i jord	
5.2 Undersökningar på stålplåtar och stålspont i vatten och i bottensediment	45
5.2.1 Svensk undersökning i sötvatten och bräckt vatten	
5.2.2 Svensk undersökning på större djup i havsvatten	

5.2.3	Svensk undersökning i strömmande sötvatten	
5.2.4	Danska och norska undersökningar i havsvatten	
5.2.5	Amerikanska undersökningar i havsvatten	
5.2.6	Brittisk undersökning i havsvatten	
5.2.7	Japansk undersökning i havsvatten	
5.2.8	Tysk undersökning i söt- och havsvatten	
5.2.9	Holländsk undersökning i havsvatten och bräckt vatten	
5.2.10	Summering	
6.	ÅTGÄRDER MOT KORROSION	60
6.1	Rostmån	60
6.2	Polyetenmantel	62
6.2.1	Historik	
6.2.2	Applicering av PE-mantel	
6.2.3	Skyddsförmåga	
6.2.4	Hårdighet mot repning	
6.2.5	Betydelsen av mekaniska skador	
6.2.6	Katodiskt skydd av stålytan i skador i PE-manteln	
6.2.7	Skydd av svetsskarvar	
6.3	Rostskyddsmålning med våtapplicerade rostskyddsfärger	67
6.3.1	Allmänt om rostskyddssystem	
6.3.2	Förbehandling av stålytan	
6.3.3	Färgernas kombinerbarhet med katodiskt skydd	
6.3.4	Rostskyddssystem i jord	
6.3.5	Rostskyddssystem i vatten	
6.4	Rostskydd med torrapplicerade pulverfärger	70
6.4.1	Applicering av pulverfärger	
6.4.2	Pulverfärgernas skyddsförmåga	
6.5	Varm- och sprutförzinkning	72
6.5.1	Applicering av zinksikt	
6.5.2	Zinksiktets beständighet och skyddsverkan	
6.5.3	Skyddsförmåga i jord	
6.5.4	Skyddsförmåga i vatten	
6.5.5	Korrosionsskyddsmålning på zinksikt	
6.6	Slitstarka, icke-konventionella skyddsbeläggningar	77
6.7	Ingjutning i injekteringsbruk	77
6.8	Katodiskt korrosionsskydd	79
6.8.1	Allmänt om katodiskt skydd	
6.8.2	Skyddsprincipen, skyddskriterier och kontroll av skyddsverkan	
6.8.3	Katodiskt skydd i kombination med skyddsbeläggning	
6.8.4	Funktionen hos katodiskt skydd	
6.8.5	Skadlig sekundärverkan	
6.8.6	Praktisk utformning av katodiskt skydd	
6.8.7	Övervakning och kontrollmätning	
6.9	Åtgärder på kajer med stålspons eller stålrörspålar	89
6.10	Ändrad sammansättning hos stålet	90
6.11	Kostnader för åtgärder mot korrosion	91

6.12 Summering	93
7. STANDARDS OCH HANDBÖCKER	95
7.1 Standarder för korrosionsskydd	95
7.2 Handböcker i korrosion och korrosionsskydd	96
8. KUNSKAPSLUCKOR OCH BEHOV AV KOMPLETTERANDE ARBETE	98
9. SAMMANFATTANDE SLUTSATSER	101
10. REFERENSER	105
Appendix 1: Klassning av olika jordars och vattens korrosivitet mot stålplåtar och stålsplint	109
Appendix 2: Observationer vid korrosionsundersökningar av plåtar och splinter i 10 svenska hamnar	112

Summary

Corrosion and protection of steel piles and sheet piles in soil and water

This investigation assumes that steel piles and sheet piles in soil and water are expected to remain in place for a long period of time without corrosion affecting their bearing capacity. In many cases, the life span requirement in soil is in the range of 100 years. The general aim of the investigation is to provide information for taking corrosion into account when designing steel piles and sheet piles.

The basis for the investigation is an extensive literature survey and acquisition of experiences, which have been processed in considerable detail. The report thus summarises present knowledge in the area of corrosion and corrosion protection of steel piles and sheet piles in different types of soil and water.

The report begins with a theoretical presentation of the way in which corrosion attacks steel piles and sheet piles and the factors influencing this process. A comparison is made with the corrosion resistance of unprotected piles of carbon steel and piles of ductile iron.

This is followed by a summary of the results of Swedish and foreign field tests of corrosion of steel piles and sheet piles in soil and water. The emphasis is on reporting the corrosion rates measured in the tests.

Detailed accounts are given of the various measures that can be used to inhibit corrosion on piles and sheet piles. These are the introduction of a corrosion allowance (i.e. oversized cross-sections of piles), anti-corrosion painting, application of a polyethylene coating (on steel tube piles), zinc coating, electro-chemical (cathodic) protection and casting in cement mortar or concrete. Detailed comments are given on the protection efficiency of the anti-corrosion systems in various conditions. Information is also provided on calculation of the corrosion allowance. Finally, the approximate costs of the various protective measures are stated.

The corrosivity of different types of soils and waters in Sweden towards unprotected steel piles and sheet piles has been classified in APPENDIX 1 of the report. The degree of corrosivity is expressed as the average penetration in $\mu\text{m}/\text{year}$. The purpose of this classification is to serve as a guide in calculating corrosion allowances or choosing other protection measures for such structures.

The investigation has identified inadequate knowledge in certain areas, which might be clarified through further research and/or practical investigations.

The report includes a corrosion glossary, together with a list of standards and handbooks applicable to the area of corrosion protection of steel piles and sheet piles.

Sammanfattning

Denna utredning har utgått från att stålplåtar och stålsplint i jord och vatten förväntas stå mycket lång tid, utan att korrosionen skall få inkräkta på deras bärformåga. Livslängdskravet i jord är i många fall av storleksordningen 100 år. Utredningens övergripande syfte är att ge underlag för hur korrosionen kan beaktas vid dimensionering av stålplåtar och stålsplint.

Till grund för utredningen ligger en omfattande litteraturundersökning och erfarenhetsinsamling. En långtgående bearbetning har gjorts av litteratur och erfarenheter. Rapporten sammanfattar således dagens kunskaper på området korrosion och korrosionsskydd av stålplåtar och stålsplint i olika jord- och vattentyper.

Rapporten inleds med en teoretisk framställning av hur korrosionen uppträder på stålplåtar och stålsplint och vilka faktorer som inverkar. I anslutning till detta jämförs korrosionsbenägenheten hos oskyddade plåtar av kolstål och plåtar av segjärn.

Därefter sammanfattas resultaten från svenska och utländska fältundersökningar av korrosion på stålplåtar och stålsplint i jord och vatten. Tyngdpunkten har lagts på en redovisning av de korrosionshastigheter som uppmättes i undersökningarna.

Vidare redogörs detaljerat för olika åtgärder som kan vidtas mot korrosion på plåtar och splint. Dessa är tillämpning av en rostmån (dvs överdimensionering av plåtens tvärsnitt), rostskyddsmålning, polyetenmantel (på stålplåtar), förzinkning, elektrokemiskt (katodiskt) skydd och ingjutning i cementbruk eller betong. De olika korrosionsskyddssystemens skyddsförmåga under olika betingelser kommenteras ingående. Vidare anges hur rostmånets storlek beräknas. Avslutningsvis anges den ungefärliga kostnaden för de olika skyddsåtgärderna.

I rapportens APPENDIX 1 har svenska jordarters och vattentypers korrosivitet mot oskyddade stålplåtar och stålsplint graderats. Korrosivitetsgraden har uttryckts som medelavfrätning i $\mu\text{m}/\text{år}$. Avsikten med denna korrosivitetsklassning är att den skall utgöra ett hjälpmedel vid dimensionering av rostmån eller vid val av annan skyddsåtgärd på stålplåtar och stålsplint.

I utredningen har ett antal kunskapsluckor identifierats, vilka skulle behöva klarläggas genom ytterligare utredning och/eller praktiska undersökningar.

I rapporten ingår även en korrosionsteknisk ordlista samt en förteckning över standarder och handböcker som är tillämpbara på området korrosionsskydd av stålplåtar och stålsplint.

Korrosionsteknisk ordlista

För korrosionstekniska begrepp som inte återfinns i denna ordlista, se Tekniska Nomenklaturcentralen, TNC 67: Korrosionsordlista.

Allmän korrosion (jämn korrosion)	korrosion som förlöper ungefär med samma hastighet på hela korroderande ytan.
Anod	a) den del av metallytan i en korrosionscell som oxideras, dvs angrips genom korrosion; jfr <i>katod</i> . b) se <i>skyddsanod</i> .
Anodbädd	skyddsanod med kringfyllning vid katodiskt skydd i jord.
Betning	doppning i syrabad för avlägsnande av t ex korrosionsprodukter eller vals- resp gjuthud.
Bimetallkorrosion	se <i>galvanisk korrosion</i> .
Djupanod	vertikal anodbädd förlagd på stort djup i borrarat hål.
Elektrisk dränering	sätt att skydda metallkonstruktion mot läckströmskorrosion genom att förbinda konstruktionen med den negativa sidan i den strömalstrande anläggningen. Elektrisk dränering kan vara av typen direkt, polariserad eller forcerad. Se även svensk standard SEN 08 04 01.
Elektrod	metall eller annan elektronledare i kontakt med en elektrolyt och genom vilken elektrisk ström kan gå in i eller lämna elektrolyten.
Elektrodpotential	elektrisk potentialskillnad mellan elektrod och omgivande elektrolyt. Uppmäts med referenselektrod placerad i elektrolyten.
Elektrokemiskt korrosionsskydd	sätt att motverka en metalls korrosion i en elektrolyt genom reglering av metallens elektrodpotential till ett lämpligt värde. Se även <i>katodiskt skydd</i> .
Elektrolyt:	medium som kan leda ström genom jontransport, t ex vatten och fuktig jord.
Elektrolytisk korrosion	korrosion orsakad av att en elektrisk ström, härrörande från en främmande strömkälla lämnar metallytan och går ut i omgivande elektrolyt.

Förzinkning	ytbeläggning av stål med zink. Förzinkning kan utföras genom varmdoppning (varmförzinkning), sprutning (sprutförzinkning) eller elektrolys (elförzinkning).
Galvanisk korrosion (bimetallkorrosion)	korrosion på en metall förorsakad av metalledande kontakt med en ädlare metall, t ex korrosion på stål i kontakt med koppar.
Gropfrätning	lokal korrosion som leder till angrepp med ringa utbredning men ofta med betydande djup.
Jordkorrosion	korrosion på jordförlagd metall under inverkan av jordens kemiska och fysikaliska egenskaper.
Katod	a) den del av metallytan i en korrosionscell där ett ämne (t ex syre) reduceras, vilket underhåller oxidationen (korrosionen) på anoden. b) skyddsobjektet vid katodiskt skydd.
Katodisk vidhäftningsförlust	upphävande av en skyddsbeläggning vidhäftning till stålytan runt om en beläggningsskada på grund av alkalibildning vid katodiskt skydd.
Katodiskt skydd	elektrokemiskt korrosionsskydd, som innebär att metallens elektrodpotential sänks från korrosionspotentialen till ett värde, skyddspotentialen, där korrosionen är praktiskt försumbar. Potentialsänkningen sker genom matning av likström från skyddsanoden genom elektrolyten till metallytan. Skydd med <i>påtryckt ström</i> (elektrolytiskt skydd) innebär att strömmen matas från likriktarenhet. Skydd med <i>offeranod</i> (galvaniskt skydd) innebär att strömmen alstras på galvanisk väg.
Kolstål (olegerat stål)	stål med kol som väsentlig beståndsdel vid sidan om järn. Kolhalten är lägre än ca 1,3 %.
Korrosionscell	en typ av elektrokemisk cell på en metall, bestående av en anodyta, en katodyta och en elektrolyt. På anodytan sker oxidation (upplösning av metallen) och på katodytan reduceras ett ämne, vanligen syre. Positiv ström flyter genom elektrolyten från anodytan till katodytan.
Korrosionshastighet	hastighet varmed en metall korroderar. Uttrycks vanligen som massminskning per area och tid ($\text{g/m}^2 \cdot \text{år}$) eller som frätdjup alternativt dimensionsminskning per tid ($\mu\text{m}/\text{år}$).
Korrosionspotential ($E_{\text{kor}}^{\text{kor}}$)	elektrodpotentialen hos en fritt korroderande metallyta. Korrosionspotential kan antingen vara en <i>vilopotential</i> eller en potential som har förskjutits i positiv eller negativ riktning till följd av att främmande likström (t ex läckström) flyter ut ur respektive in i stålytan.

Korrosionsprodukt	reaktionsprodukt vid korrosion i vilken den korroderande metallen ingår i oxiderad form. Korrosionsprodukten (rost) på stål består vanligen av en järn-syreförening men kan i t ex sulfidrik jord bestå av en järn-svavelförening.
Lokal korrosion	korrosion som förlöper med särskilt stor hastighet på begränsade delar av den korroderande metallytan. Jfr <i>allmän korrosion</i> och <i>gropfrätning</i> .
Likriktarenhet (för katodiskt skydd)	nätansluten elektrisk enhet som matar matar skyddsström. Enheten består i huvudsak av en transformator som transformerar ned nätspänningen till skyddsspänning (normalt lägre än 20 V) och en likriktare som överför växelströmmen till likström. Enheten kan arbeta på tre olika sätt: med fast utgående skyddsspänning och variabel skyddsström (<i>spänningsstyv likriktare</i>), med variabel skyddsspänning och fast skyddsström (<i>strömstyv likriktare</i>) eller med variabel skyddsström och fast potential (<i>potentialstyrd likriktare</i>). På stålplåtar och stålspons används normalt strömstyv likriktare.
Luftningscell:	en typ av korrosionscell som uppstår på grund av att elektrolytens syrehalt är olika på olika partier av metallytan. Partier med god tillgång på syre blir katod och syrefattiga partier blir anod. Luftningscell kan uppstå på stål bland annat i heterogen jord och strax under vattenlinjen på stål delvis nedsänkt i vatten, s k vattenlinjekorrosion.
Läckströmskorrosion	elektrolytisk korrosion orsakad av läckström från elektrisk <u>likströms</u> -anläggning med någon del i kontakt med jord. Exempel på anläggning som kan ge upphov till sådan läckström är likströmsdriven spårväg, anläggning för överföring av högspänd likström och likriktare för likströmssvetsning respektive för matning av katodiskt skydd med påtryckt ström.
Offeranod (galvanisk anod):	skyddsanod som, när den ansluts till skyddsobjektet, avger katodisk skyddsström på galvanisk väg genom att anodmetallen är mera oädel än skyddsobjektet. Jfr funktionen hos ett ficklampsbatteri. Vid skydd av stål är offeranoden av aluminium, zink eller magnesium. Offeranod förbrukas i takt med dess strömväginning.
Polyeten (PE-)mantel	skyddsbeläggning av polyeten utvändigt på stålrörspåle. Anbringas genom sintring av PE-pulver eller genom extrudering av PE-massa.
Påtryckt ström	se <i>katodiskt skydd</i> .
Pulverfärg	ett slags torrapplikerad rostskyddsfärg. Utgångsmaterialet är plastpulver som vanligen appliceras genom elektrostatisk påläggning eller genom virvelsintring. Förekommer inte på plåtar eller spons.

Referenselektrod	opolariserbar mätelektrod för bestämning av elektropotential. Vid mätning av stålkonstruktioners potential i jord används vanligen referenselektrod av typen mättad koppar/kopparsulfat (Cu/CuSO_4). Vid mätning i vatten används elektrod av typen mättad kalomel (SCE) eller mättad silver/silverklorid (Ag/AgCl). Alla referenselektroder har en viss, fast potential på normalvätgaselektrodens potentialskala. Vid rapportering av uppmätt elektropotential måste det anges vilken referenselektrod som använts.
Resistivitet	(i korrosionssammanhang): vattens eller jords specifika motstånd mot att leda ström. Resistivitet är inverterade värdet av konduktivitet (elektrisk ledningsförmåga) och anges i $\Omega \cdot \text{m}$ (tidigare i $\Omega \cdot \text{cm}$).
Rostmån (korrosionstillägg)	ökning av godstjockleken hos t ex stålplåt eller stålspons med syftet att vid viss korrosionshastighet öka funktionstiden. Rostmånen (t_R) beräknas enligt : $t_R [\text{mm}] = \text{väntad medelavfrätning} [\text{mm}/\text{år}] \times \text{dimensionerad livslängd} [\text{år}]$.
Rostskyddsfärg	färg avsedd för korrosionsskydd av järn eller stål. Vanligast är våt-applikerade färger som, vid skydd av plåtar och spons, ofta är epoxibaserade. Se även <i>pulverfärg</i> .
Segjärn	en typ av gjutjärn där grafiten föreligger i kulform, vilket ger materialet högre brottgräns samt mycket högre förlängning och slagseghet än gråjärnet. Segjärn används som material i plåtar.
Sekundärverkan (från katodiskt skydd)	ökning av korrosionshastigheten för en närliggande, främmande metallkonstruktion på grund av att den katodiska skyddsströmmen, på dess väg till skyddsobjektet, uppträder som läckström och förorsakar läckströmskorrosion.
Skyddsanod	elektrisk ledare, placerad i elektrolyten, genom vilken skyddsström matas till metallytan som skall skyddas katodiskt. Vid elektrolytiskt skydd är anoden strömmatad. Vid galvaniskt skydd är anoden en offeranod.
Skyddspotential (E_{skydd})	elektropotential vid vilken katodiskt skydd erhålles, dvs där korrosionen är praktiskt försumbar.
Skyddsström	likström, galvanisk eller likriktad, som matas från skyddsanod, genom elektrolyten till metallytan för uppnående av skyddspotential.
Skyddsströmtäthet (katodisk)	kvot mellan skyddsström och area hos metallyta som skyddas katodiskt. Anges vanligen i mA/m^2 .
Sprutförzinkning	se <i>förzinkning</i> .

Strömmatad anod	skyddsanod genom vilken skyddsström matas från likriktarenhet. Anodmaterialet är vanligen i det närmaste inert varför det förbrukas mycket lite i takt med strömgivningen. Materialet är oftast kiseljärn, magnetitjärn eller platinerat titan.
Varmförzinkning	se <i>förzinkning</i> .
Vilopotential	korrosionspotential utan inverkan av elektriska strömmar.

1. Syfte och bakgrund

Syftet med denna utredning har varit:

- att klargöra hur korrosion uppträder på stålplåtar och stålspons och vilka faktorer som inverkar,
- att jämföra kolstålets och segjärnets korrosionsbenägenhet,
- att sammanfatta resultat från svenska och utländska fältundersökningar av korrosion på stålplåtar och stålspons i jord och vatten,
- att på basis av dagens kunnande göra en första, grov klassning av korrosiviteten hos jordarter, jordlagerföljder och olika vatten
- att redogöra för åtgärder mot korrosion på plåtar och spons och kommentera skyddsförmågan hos tekniska korrosionsskyddssystem, samt
- att identifiera kunskapsluckor och behov av kompletterande arbete.

Det övergripande målet för utredningen är att ge underlag för beaktande av korrosionen vid dimensionering av stålplåtar och stålspons i jord och vatten.

Bakgrunden till utredningen är att frågan om stålplåtars och stålspons beständighet har diskuterats länge. IVAs Pålskommission har sålunda behandlat stålplåtars korrosion i olika perioder. 1970 tog kommissionen upp trä-, betong- och stålplåtars beständighet till allsidig belysning. Anders Eriksson, Allmänna Ingenjörskontoret utförde då en litteraturundersökning om korrosion på stålplåtar [1]. I arbetsgruppen Stålplåtar - användningsområden och praxis för utförande [2] behandlades 1980 korrosionsfrågorna av Anders Eriksson och författaren till föreliggande rapport.

I och med att grova stålplåtar fått ökad användning på senare år vid plåtarfundament av stora byggnadsverk, till exempel Igelstabsbron (järnvägsbro vid Södertälje) och Ekolsundsbron (motorvägsbro vid Bålsta/Stockholm), har frågan om stålplåtars beständighet ånyo blivit aktuell. Följaktligen tillsatte Pålskommissionen 1991 arbetsgruppen "Korrosion på stålplåtar". Man ansåg att det behövdes en heltäckande framställning som behandlar hur korrosion uppträder på plåtar och spons i olika miljöer och som redogör för åtgärder med vilka man på ett säkert sätt kan ta hänsyn till väntad korrosion. Från början omfattade arbetet stålplåtar i jord men utökades senare med stålplåtar och stålspons i vatten. Arbetet har bedrivits parallellt med Pålskommissionens utarbetande av dimensioneringsanvisningar för grova stålplåtar, varför korrosionsskydd av sådana plåtar behandlas särskilt ingående i föreliggande rapport. Rapporten har utarbetats vid Korrosionsinstitutet för Pålskommissionen.

Arbetsgruppen ”Korrosion på stålplålar” har bestått av följande personer:

Arne Bohman	Hercules Grundläggning AB	ordförande
Göran Camitz	Korrosionsinstitutet	utredare, författare
Tor-Gunnar Vinka	Korrosionsinstitutet	utredare
Per-Evert Bengtsson	Statens geotekniska institut	sekreterare
Ulf Bergdahl	Statens geotekniska institut	rådgivare
Allan Ekström	Banverket	”
Björn Lundahl	Stabilator AB	”
Clas-Göran Rydén	Vägverket	”
Robert Ronnebrant	Vägverket	”

2. Inledning

Stålplåtar har använts för grundläggning i stor skala sedan tidigt 1900-tal. Den senaste statistiken från IVAs Pålkommission visar att det i Sverige under 1992 slogs 221.000 meter stålplåtar, vilket utgjorde drygt 11 % av totala antalet slagna pålmetrar. Frågan om pålarnas beständighet i jord och om korrosionens praktiska betydelse för stålplåtars bärförmåga har länge diskuterats. De tidigaste litteraturuppgifterna om undersökningar av korrosionen på stålplåtar som stått ett antal år i jord härrör från 1930-talet [3]. Sedan dess har flera väldokumenterade fältundersökningar genomförts, varav några i Sverige.

Redan på 1940-talet började John Olsson vid SJs Geotekniska kontor att undersöka avfrätningen på uppdragna stänger och rör. Bror Fellenius och därefter Erik Sandegren och Allan Jerbo systematiserade SJs undersökningar och slog ned stålstänger i väldefinierade jordlagerföljder. På 1970-talet inledde Korrosionsinstitutet (rapportförfattaren) tillsammans med Ulf Bergdahl vid Statens geotekniska institut långtidsexponeringar i jord av tunga stålplåtar i grundvattenzonen på fem provplatser. Vid Vattenfall har Kurt Fr. Trägårdh, Vivan Victor och senast Lars Troselius undersökt korrosionen på stålstänger som i olika omgångar med början på 1950-talet grävts ned vertikalt på ett större antal platser i kraftledningsgator. Under tioårsperioden 1977–1986 utförde Vattenbyggnadsbyrån, VBB, på uppdrag av dåvarande Svenska hamnförbundet, en omfattande undersökning av korrosionstillståndet hos stålplåte- och stålsponskajer i tio svenska hamnar. I rapporten har resultaten från svenska och från flertalet utländska större korrosionsundersökningar på stålplåtar och stålsponter i jord och vatten bearbetats och sammanställts.

Hänsyn till korrosionen kan tas på principiellt två skilda sätt. Det ena innebär att stålet tillåts rosta och att en rostmån runt om pålens tvärsnitt läggs till sedan man dimensionerat pålen/sponten för lastupptagning. Det andra sättet innebär att pålen korrosionsskyddas, det vill säga att korrosionen motverkas. I vissa fall kombineras de båda metoderna. I rapporten redogörs ingående för tillämpning av rostmån och olika korrosionsskyddssystem.

I ett särskilt avsnitt, Appendix 1, har olika jordarters och vattentypers korrosivitet mot oskyddade stålplåtar och stålspons klassats och uttryckts som medelavfrätning i mm/år . Avsikten med den föreslagna klassningen är att den, i väntan på allmänna svenska anvisningar, skall utgöra ett hjälpmedel vid tillämpning av rostmån och val av korrosionsskyddssystem på plåtar och spons i svenska jordar och vatten.

3. Korrosion på stålplåtar och stålspons samt inverkande faktorer

3.1 Allmänt

Korrosion på stålplåtar och andra metallkonstruktioner i jord och vatten orsakas av elektro-kemiska reaktioner mellan metallytan och omgivande fuktiga jord resp vatten. Stålet löses upp och det bildas korrosionsprodukter, rost. Samma process sker på en stålyta, med vattenfilm, exponerad i utomhusatmosfär.

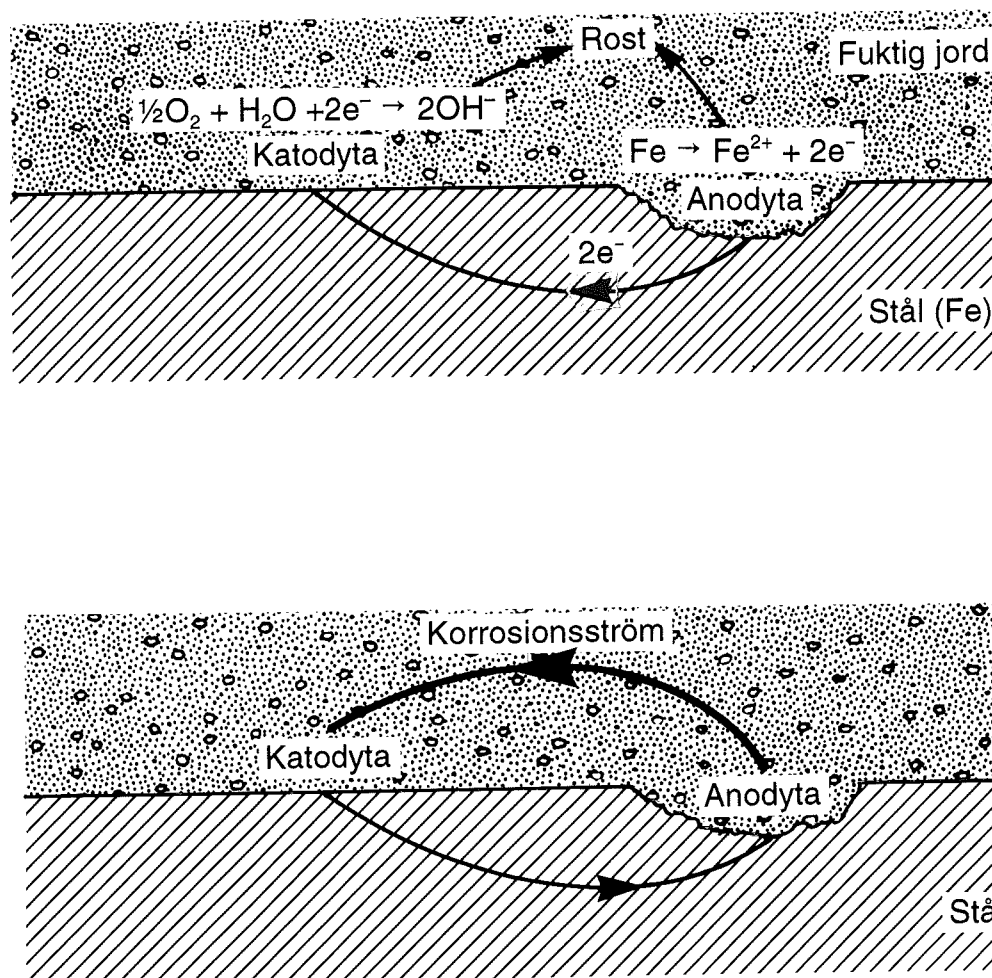
Vatten är ett homogent medium och korrosionen i detta sker under inverkan av förhållandevis få faktorer, främst syrehalt, lösta salter och temperatur. Jord är däremot ett heterogent medium i vilket korrosionen är mera komplex och sker under komplicerad inverkan av ett större antal faktorer. Korrosion på stål i fuktig utomhusatmosfär sker också under inverkan av många faktorer och beror i hög grad av i vilken utomhusmiljö stålet är exponerat. I detta kapitel behandlas korrosion i jord, vatten och utomhusatmosfär var för sig. Huvudvikten ligger på korrosion i jord.

3.2 Korrosionens elektrokemiska natur

Korrosion på stål i jord, vatten och utomhusatmosfär är av elektrokemisk natur. Detta innebär att medan det sker kemiska reaktioner på stålytan flyter en elektrisk ström, korrosionsströmmen, mellan stålytan och jorden/vattnet. Förloppet sker i korrosionsceller, som bildats på stålytan. Dessa består av en anodyta och en katodyta samt en elektrolyt, det vill säga den fuktiga jorden eller vattnet, se **Fig 1**. Beroende på vilka faktorer som inverkar, kan ett stort antal eller endast ett fåtal anod- och katodytor förekomma på stålytan. De kan ibland vara stora och ibland små. Vid kombinationen liten anodyta - stor katodyta kan korrosionshastigheten lokalt bli hög. Vid s k allmän korrosion förekommer ett mycket stort antal små, ungefär lika stora anod- och katodytor intill varandra på stålytan. Vid s k lokal korrosion är antalet anod- och katodytor litet, med ofta liten anod och stor katod, mer eller mindre separerade från varandra. I extremfallet gropfrätning kan det föreligga endast en anod- och katodyta, markant separerade från varandra.

Under korrosionsförloppet sker samtidigt vid anod- respektive katodyterna två skilda elektrodreaktioner. Vid anodytan sker en oxidation av stålet, som upplöses. Här uppstår således själva korrosionsangreppet. Vid katodytan sker en reduktion av ett oxidationsmedel. Vanligen är det syre (oxygen), som är löst i jordvattnet, som reduceras på katodytan. I jord eller vatten med pH-värde lägre än ca 4 kan även vätejoner reduceras i sådan grad att katodreaktionen får ett tillskott, som medför ökad korrosionshastighet på anodytan.

Elektrodreaktionerna ger upphov till en elektrisk potentialskillnad mellan anod- och katodytan. Potentialskillnaden alstrar en elektrisk ström, korrosionsström, som flyter i jorden/vattnet från anodytan till katodytan och tillbaka till anodytan genom stålet, se **Fig. 1**. Hur hög korrosions-



Figur 1. Korrosionscell på stål i jord eller vatten. Övre bilden visar de elektrokemiska reaktionsförloppen. Nedre bilden visar korrosionsströmmens väg i samma korrosionscell.

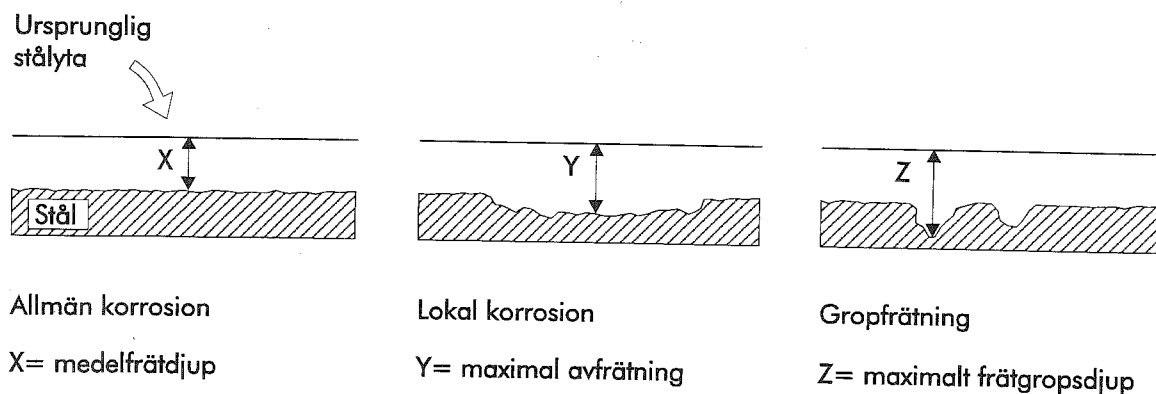
hastigheten blir på anodytan beror bland annat på hur lätt korrosionsströmmen kan flyta i korrosionscellen. Är jordens/vattnets elektriska ledningsförmåga hög, kan strömmen flyta lätt och korrosionshastigheten bli hög.

Om av någon anledning ett av förloppen i korrosionscellen hämmas, kommer hela processen att ske långsammare. Försvåras till exempel syretransporten fram till katodytan kommer korrosionshastigheten att avta på anodytan. Syrediffusionen har en nyckelroll vid korrosion på stål i jord och vatten.

3.3 Jämnt respektive lokalt korrosionsangrepp

Många faktorer inverkar på korrosionen och angreppens djup och utbredning blir olika under olika betingelser. Man skiljer mellan *lokal korrosion* och *allmän* (även kallad *jämn*) *korrosion*. Vid lokal korrosion blir angreppen koncentrerade till begränsade delar av stålytan. Ett exempel är gropfrätning, där angreppet har ringa utbredning men stort djup. Utpräglad grop-

frätning är dock ovanligt på kolstål. Vid allmän korrosion fås en relativt jämn avfrätning över hela eller en större del av ytan. Oftast är korrosionshastigheten avsevärt högre vid lokal korrosion, se Fig. 2.



Figur 2. Typer av korrosionsangrepp på kolstål i jord eller vatten.

Ibland är en konstruktion mer känslig för den ena formen av angrepp medan den andra formen inte nämnvärt påverkar konstruktionens funktion. Så kan till exempel en enda genomgående frätgrop i en oljecistern eller rörledning vara förödande medan en långsam jämn avfrätning inte behöver föranleda någon åtgärd. Det omvända gäller för bärande konstruktioner, till exempel spont eller pålar. En utbredd jämn avfrätning kan betyda mer för konstruktionens bärförmåga än något eller några mer eller mindre djupa lokala frätangrepp.

3.4 Mätning av korrosionshastighet

Korrosionshastighet på järn och stål brukar uttryckas antingen som massförlust per tidsenhet hos det korroderande föremålet eller som frättdjup per tidsenhet.

Vid massförlustundersökningar vägs provföremålet före och efter exponeringen sedan korrosionsprodukterna avlägsnats genom betning eller maskinell borstning. Korrosionshastigheten avseende massminskning per exponerad area och exponeringstid brukar anges i enheten $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{år})$ och sedan omräknas till **medelavfrätning** i enheten $\mu\text{m}/\text{år}$ ($1 \mu\text{m} = 0,001 \text{ mm}$). Medelavfrätningen är alltså stålföremålets viktninskning omräknad till jämnt utbredd avverkning av stålet per tidsenhet. Medelavfrätningen är i dubbel bemärkelse en genomsnittlig korrosionshastighet: dels genomsnittlig korrosionshastighet för hela exponeringstiden, dels genomsnittligt frättdjup på metallytan.

På ett föremål som inte kan vägas kan avfrätningen bestämmas med mikrometerskruv eller ultraljudsmätare. På ytor som är någorlunda jämnt korroderade mäts i ett större antal punkter kvarvarande godstjocklek, varefter medelvärdet räknas ut. **Medelfrättdjupet** (μm) erhålls genom att subtrahera medelvärdet av återstående godstjocklek från ursprunglig godstjocklek. Är exponeringstiden känd kan medelavfrätningen ($\mu\text{m}/\text{år}$) beräknas.

Medelavfrätningen skall skiljas från **maximal avfrätning**. Den maximala avfrätningen avser lokal korrosion, dvs avfrätning på ett begränsat område där korrosionen är störst. Det maximala frättdjupet måste fastställas genom direkt mätning på det starkast angripna stället. Är exponeringstiden känd kan **maximal avfrätningshastighet** beräknas.

Gropfrätning avser lokal korrosion som ger upphov till avgränsade frätgropar på stålytan. Det **maximala frätgropsdjupet**, som avser djupet hos den djupaste frätgropen, brukar mätas. Frättdjupet kan bestämmas med mikroskop eller med nålmikrometer. Om exponeringstiden är känd kan **maximal gropfrätningshastighet** beräknas, som är en genomsnittlig hastighet för hela exponeringstiden.

Vanligen är korrosionshastigheten betydligt högre i början av en exponering än under resten av exponeringsperioden, beroende på att korrosionsprodukterna (rosten) med tiden får en bromsande verkan på korrosionen. Fältundersökningar av korrosion måste av denna anledning pågå så lång tid (i jord åtminstone ca 5 år) att korrosionshastigheten stabiliserar sig, om den skall användas för prognoser om konstruktionens livslängd.

3.5 Korrosion i jord

Korrosion på järn och stål i jord kan ske under inverkan av i första hand tre, principiellt olika faktorer, varför man skiljer mellan:

- Jordkorrosion
- Galvanisk korrosion
- Läckströmskorrosion

Jordkorrosion sker under inverkan av jordens och grundvattnets kemiska och fysikaliska egenskaper. Galvanisk korrosion innebär korrosion på t ex stål förorsakad av elledande kontakt med en galvaniskt ädlare metall, t ex koppar. Läckströmskorrosion orsakas av läckströmmar från elektrisk likströmsanläggning. Eftersom galvanisk korrosion och läckströmskorrosion orsakas av yttre faktorer, och som endast till sin storlek har med medierna jord och vatten att göra, orienteras här endast kortfattat om dessa korrosionstyper. Tyngdpunkten har istället lagts på en förklaring av jordkorrosion, det vill säga korrosion som främst påverkas av jordens egenskaper och som är den korrosion som är av störst betydelse för stålplåtar och stålspont i jord.

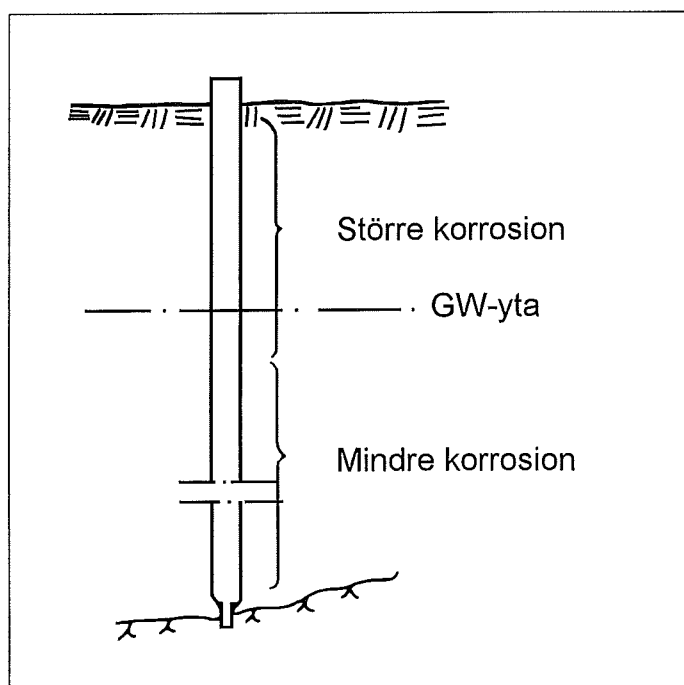
3.5.1 Jordkorrosion

Inverkande faktorer

Som tidigare nämnts krävs närvaro av luftsyre och fuktig jord vid stålytan för att korrosion skall uppstå. Små vattenfyllda porer mellan jordpartiklarna försvårar syrets diffusion till stålytan 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 betydligt lägre än i omlagrad jord. Vidare utgör grundvattenytan en spärr för syrediffusionen, varför korrosionen normalt är mindre ett stycke under grundvattenytan än vid och ovan grundvattenytan. Detta förklarar varför man på västkusten har mätt upp låga korrosionshastigheter

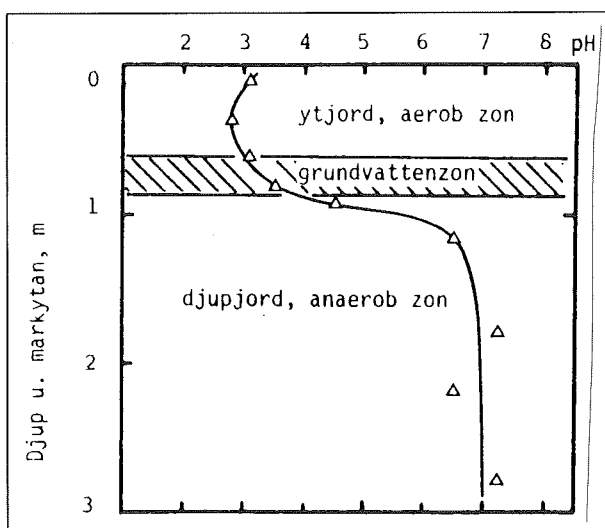
på stålplåtar i leror under grundvattenytan trots andra korrosionsfrämjande förhållanden, som hög kloridhalt och god elektrisk ledningsförmåga (låg resistivitet).

I själva verket är korrosionen vanligen 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 **Fig. 3**. Att korrosionen kan bli betydande lokalt i den omättade zonen strax ovanför grundvattenytan har visats tydligt i laboratorieundersökningar på Korrosionsinstitutet [4]. I jordarter som medger närvaro av surt vatten, påträffas dessutom de lägsta pH-värdena över grundvattenytan, vilket också medverkar till ökad korrosion upptill på plåten. Under grundvattenytan är i allmänhet pH-värdet högre, det vill säga surhetsgraden är lägre, se **Fig. 4**.



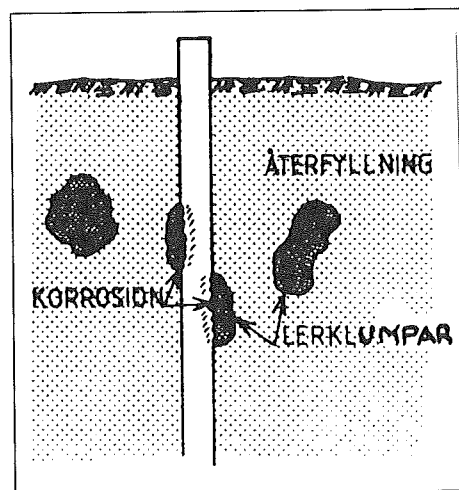
Figur 3. Korrosion på en stålplåte är vanligen störst ovan grundvattenytan på grund av ett för korrosionen optimalt förhållande mellan luftsyre och vatten i jordens porsystem.

Figur 4. pH-profil i sulfidrik lera, Ersnäs, Norrbotten. I den luftade zonen över grundvattenytan är jorden sur (lågt pH) på grund av att sulfiderna har oxiderat till sulfat. Strax under grundvattenytan stiger pH och jorden är i det närmaste neutral.

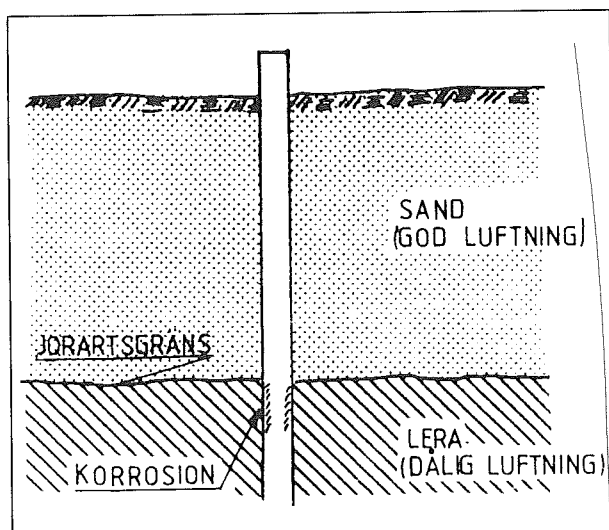


Genom att syrediffusionen till stålytan är förhållandevis god ovan grundvattenytan kan den lätt bli lokalt försämrad om till exempel jorden på vissa ställen är något hårdare packad eller om man återfyllt med blandade schaktmassor kring pålens övre del. Utgörs schaktmassorna till exempel av lerklumpar inblandade i ett grövre material exempelvis sand, kan lerklumpar komma att ligga an mot stålytan medan resten av ytan täcks av sand. Syretillförseln blir därigenom sämre under lerklumparna. Därvid uppstår en så kallad luftningscell vilket innebär att stålytan i den välluftade sanden blir katod medan ytan under lerklumparna blir anod och ett lokalt korrosionsangrepp uppstår, se Fig. 5.

Figur 5. Lokal korrosion på stålplåte i den luftade zonen ovan grundvattenytan orsakad av att inhomogena schaktmassor återfyllts kring pålen. Där lerklumpar ligger an mot pålen har luftningsceller uppkommit med anodytan under lerklumparna, där lokala korrosionsangrepp uppstår.



Luftningsceller kan också uppkomma vid skarpt skiktad jord. Står stålplåten till exempel i lera överlagrad av en mera permeabel jord som sand kommer syretillförseln till stålytan att vara förhållandevis god i sanden medan den försvåras i leran. Stålytan i sanden blir katodisk medan ytan i leran närmast under jordartsgränsen blir anodisk och korroderar, se Fig. 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 till exempel i lerskikt.



Figur 6. Korrosion på stålplåte orsakad av att pålen står i skarpt skiktad jord. En luftningscell har uppkommit på pålen på grund av jordlagrens olika genomsläpplighet för luftsyre. Ett lokalt angrepp uppstår vid skiktgränsen.

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 stålplåtars korrosion, vilka refereras i kapitel 5, framgår det emellertid att det inte går att finna någon tydlig inverkan av dessa faktorer under grundvattenytan på stålplåtar 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 ovanför grundvattenytan.

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 (*desulfovibrio desulfuricans*) och deras livsprocess innebär att sulfat reduceras till sulfid vilket ökar aggressiviteten lokalt på järn- eller stålytan. 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. Något fall med mikrobiell korrosion på obelagda stålplåtar i jord har inte påträffats vare sig i litteraturen eller i de svenska korrosionsundersökningar som utförts på plåtar i jord.

Korrosion i naturligt lagrad och omlagrad jord och i fyllnadsjord

Ostörd jord är naturligt lagrad med ett i huvudsak intakt 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 större porer och kanaler, vilket ökar syrediffusionen och vattenomsättningen. Genom omlagringen ökar även förutsättningarna för uppkomst av luftningsceller. Dessa förhållanden är i huvudsak förklaringen till att korrosionen i allmänhet är större i omlagrad än i ostörd jord.

I en svensk fältundersökning, som refereras i avsnitt 5.1.2, 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.

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 moderjorden på platsen som utfylls. I fyllnadsjord, som utgörs av naturlig jord (sand, silt, lera etc) är den naturliga packningen av jordpartiklarna normalt 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”, såsom flygaska, sopor, byggavfall etc, med helt andra kemiska och fysikaliska egenskaper än fyllnadsjord av naturligt ursprung. Fyllning med icke naturlig jord kan därför vara starkt korrosiv.

Svenska jordars korrosivitet

Ibland framförs uppfattningen att svenska jordar i allmänhet är föga korrosiva. Då och då förekommer uppgiften att endast 10 % av de svenska jordarna är korrosiva och resten icke korrosiva. Detta är en missuppfattning och man kan fråga sig vilken bakgrunden är till denna kvantifiering. Troligen härrör denna uppfattning från undersökningar på 1950-talet där man undersökte ett mycket stort antal jordprover tagna i kraftledningsgator. Jordproven analyserades och man bedömde korrosiviteten på basis av analysresultaten. Någon mätning av korrosionen på nedgrävda metallprover gjordes inte vid denna tidpunkt. Senare undersökningar vid Vattenfall och Korrosionsinstitutet visar att det inte finns fog för nämnda uppfattning. Snarare är svenska jordar i många fall korrosiva vilket i första hand beror på lågt eller inget innehåll av kalciumkarbonat. Ytterligare faktorer som medverkar till korrosiviteten är att svenska jordar ofta har hög fukthalt, lågt pH i de översta jordlagren samt hög halt av svavelföreningar.

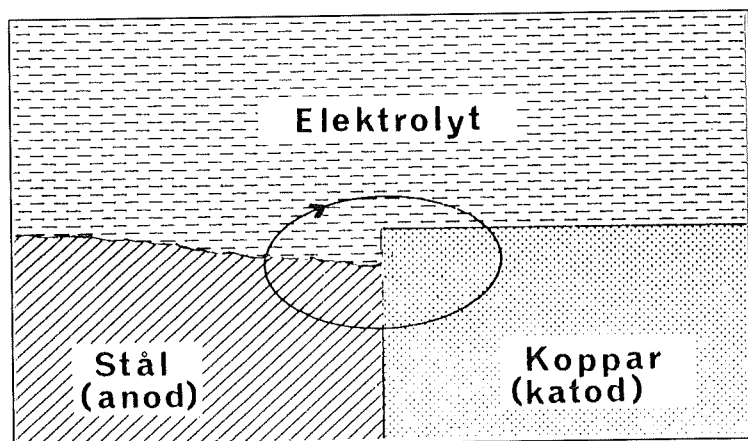
Rostens betydelse för friktionen mellan påle och jord

Rosten, det vill säga korrosionsprodukterna består i jord och vatten vanligen av en järnsyreförening. Rosten har vanligen en 3-4 ggr större volym än det ursprungliga, bortfräta stålet. På nakna stålplåtar och stålspond i jord blir rosten sittande kvar på stålytan vilket har den positiva effekten att friktionen mellan påle och jord ökar.

I täta kohesionsjordar under grundvattenytan, där syretillgången är dålig, består rosten i huvudsak av magnetit (Fe_3O_4) som har något mindre volym än den rost som bildas i mera välluftade jordar. Där består rosten till största delen av en mera voluminös blandning av olika modifieringar av järnhydroxidoxid, FeOOH . I friktionsjordar som sand och grövre moräner bildas det dessutom ett mycket voluminöst skrostpansar på stålytan som består av rost med fastkitade sandkorn och som har stark vidhäftning till stålet.

3.5.2 Galvanisk korrosion

Galvanisk korrosion (även kallad bimetallkorrosion) på stål i jord eller vatten uppkommer om stålet står i elektriskt ledande förbindelse med en ädlare metall, t ex koppar. De två olika ädla metallerna bildar i kontakt med varandra en bimetallcell där den ädlare metallen (koppar) blir katodisk och den oädla (stål) blir anodisk och korroderar, medan det flyter en galvanisk ström mellan metallerna, Fig. 7. Jämför med funktionen hos ett ficklampsbatteri.



Figur 7. Galvanisk korrosion (bimetallkorrosion) på kolstål i metalledande kontakt med koppar. Stål är oädla än koppar, varför stålet blir anod och korroderar medan koppars blir katod.

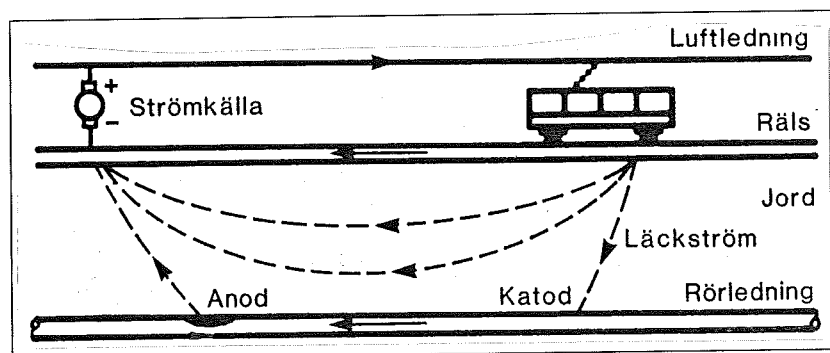
Den galvaniska korrosionen ökar med ökat areaförhållande mellan katod/anod, det vill säga ju större kopparyta i förhållande till stålyta desto större korrosion på stålet. Ökad syrediffusion till katodytan och minskad jord/vattenresistivitet gynnar också den galvaniska korrosionen.

I praktiken är inte galvanisk korrosion något problem på stålplåtar eller stålspont. Nakna plåtar och spont har så stor area att även om det föreligger kontakt med en koppardetalj är risken normalt liten för galvaniska korrosionsskador. Kraftstationer, ställverk och liknande stora elektriska anläggningar har omfattande jordning med jordningslinor och jordtag med förhållandevis stor sammanlagd koppararea. Vid pålning omedelbart intill sådan anläggning kan pålarna/sponten komma i elledande kontakt (till exempel indirekt via stålarmeringen i betong) med kopparjordningen, varför risken för galvanisk korrosion bör beaktas i sådana fall.

Galvanisk korrosion elimineras genom att den elledande kontakten upphävs, till exempel genom elektriskt isolerande mellanlägg. Även katodiskt skydd är effektivt mot galvanisk korrosion.

3.5.3 Läckströmskorrosion

Läckströmskorrosion orsakas av strömmar i jord och vatten vilka härrör från elektriska likströmsanläggningar. Växelström ger inte upphov till läckströmskorrosion på stålplåtar. Det är i första hand konstruktioner med stor utsträckning i horisontalled, såsom rörledningar och metallmantlade kablar, som kan utsättas för läckströmskorrosion. Läckströmmen kan gå in i en punkt på en rörledning, flyta en sträcka i rörgodset för att återgå till jorden i en punkt längre bort. I punkten där strömutträde sker uppstår korrosionsangrepp genom elektrolytisk korrosion, **Fig. 8**.



Figur 8. Läckströmskorrosion på jordförlagd rörledning orsakad av läckströmmar från likströmsdriven spårväg. En del av returströmmen återleds inte från spårvagnen genom rälsen som avsetts utan tar vägen genom jorden. Läckströmmen går in i rörledningen och följer denna en sträcka till en punkt där den lämnar röret och återvänder genom jorden till matarstationen för att sluta strömkretsen. Vid strömutträdet ur röret uppstår elektrolytisk korrosion med gropfrätning som följd.

I Sverige finns i första hand två typer av stora likströmsanläggningar som kan alstra läckströmmar. Den ena är likströmsdrivna spårvägar. Sådana finns i Stockholmsområdet (förortsbanor, ett par spårvagnslinjer och tunnelbanan), Göteborg och Norrköping. Den andra är anläggningar för matning av högspänd likström över stora avstånd i havsvatten, så kallade HVDC-anläggningar. Elektroder för sådana anläggningar finns på fastlandskusten på Särö söder om Göteborg, Eknö söder om Västervik samt norr om Forsmark i Uppland. En anläggning är under

byggnad utanför Smygehuk i södra Skåne. Även mataranläggning för katodiskt korrosionsskydd med påtryckt ström kan under vissa förhållanden ge upphov till läckströmskorrosion genom så kallad sekundärverkan. Se vidare avsnitt 6.8.5.

Stålplåtar och stålspons påverkas, framförallt på grund av ringa utsträckning i horisontalled, inte av läckströmmar av praktisk betydelse. Vid pålning eller sponsning i omedelbar närhet av matarstation för likströmsdriven spårväg eller strömelektroder i HVDC-anläggning bör dock risken för läckströmskorrosion beaktas.

Läckströmskorrosion elimineras i första hand genom så kallad elektrisk dränering, vilket innebär att läckströmmen avleds från den påverkade konstruktionen via kabel tillbaka till den strömalstrande anläggningen. Även katodiskt skydd med speciell utformning kan tillämpas. Åtgärder mot läckströmskorrosion behandlas i svensk standard SEN 08 04 01.

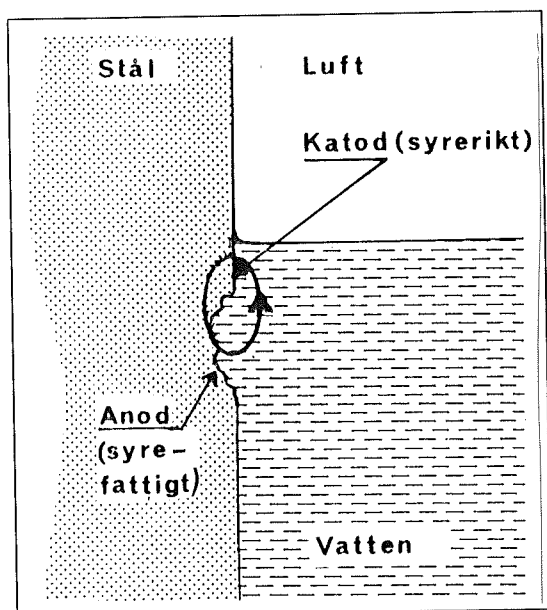
3.6 Korrosion i naturliga vatten

Vid korrosion i naturliga vatten skiljer man mellan sötvatten och havsvatten.

Sötvattnets korrosivitet är i första hand beroende av sådana faktorer som syrehalt, pH-värde, kloridhalt och vattnets förmåga att fälla ut kalk på stålytan.

I likhet med syrehaltens betydelse för jordars korrosivitet är vattnets syrehalt avgörande för dess korrosivitet, eftersom detta ämne deltar i den katodiska delen av den elektrokemiska korrosionsreaktionen. Vid brist på syre uteblir korrosionsprocessen. I stillastående vatten avtar vanligen syrehalten, och således också korrosionshastigheten med djupet under vattenytan. I strömmande vatten, såsom undervattensströmmar i sjövattnet eller i vattendrag kan dock syrehalten och därmed korrosionshastigheten vara hög även på större djup.

Olikheter i syrehalten vid och omedelbart under vattenytan är orsaken till den speciella korrosionsformen vattenlinjekorrosion, se **Fig. 9**. Den kan uppstå på en stålkonstruktion som sträcker sig upp ur vatten. Angreppet uppstår strax under vattenytan.



I regioner med kalkfattig berggrund och jord har vattnet i sjöar och vattendrag lågt pH-värde. Se kartan i **Fig. 10**. Även miljöförsurad regn har givit upphov till lågt pH i sjöar främst i sydvästra Sverige. I vatten med låga pH-värden motverkas

Figur 9. Vattenlinjekorrosion uppstår genom en luftningscell. Området närmast vattenytan är syrerikt och blir katod. Området längre ned är syrefattigare och blir anod.

bildningen av skyddande korrosionsprodukter på stålytan vilket medför högre korrosionshastighet än i vatten med högre pH-värden. I mycket surt vatten, pH-värde lägre än 4, får korrosionen ett "tillskott" genom att stålet korroderar under vätegasutveckling.

Är vattnets kalcium- och bikarbonathalt och pH-värde tillräckligt höga är vattnet kalkfällande. Det innebär att det på kemisk väg fälls ut kalk i korrosionsprodukterna vilket ger en mer eller mindre skyddande beläggning på stålytan medförande lägre korrosionshastighet. Genom att analysera vattnet kan man genom beräkning av det så kallad Langliers index fastställa om vattnet är kalkfällande.

Havsvatten är, på grund av den höga kloridhalten, i allmänhet mera korrosivt än sötvatten. Havsvattnets korrosivitetsgrad beror av sådana faktorer som syrehalt, temperatur, eventuell utspädning av sötvatten och påväxt på stålytan.

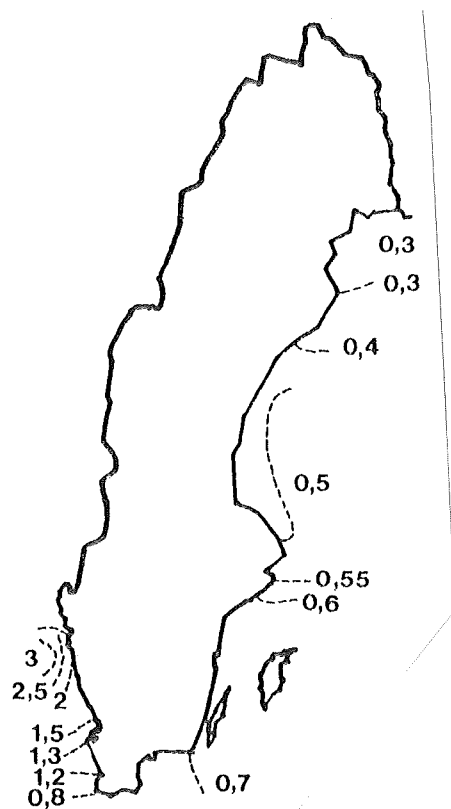
Rent havsvatten i de stora oceanerna har i det närmaste konstant sammansättning. Dess pH-värde avviker inte mycket från 8,1 och dess salthalt är ca 3,5 viktprocent, i huvudsak natriumklorid. I hamnar och även på andra ställen i närheten av land kan havsvatten dock ha avvikande sammansättning, bland annat lägre salthalt, men också föroreningar. Detta beror på utflöde av vattendrag eller utsläpp av förorenat avloppsvatten. Hos Östersjövattnet avtar salthalten alltmer, ju större avståndet till Atlanten blir, se **Fig. 11**.

På stålytor i havsvatten bildas det ofta påväxt av havsorganismer. Under påväxten kan den lokala korrosionen bli större genom så kallad avlagringskorrosion. Påväxten kan dock under vissa förhållanden, på grund av dess täthet, verka korrosionsskyddande. På grund av dagsljusets begränsade nedträngningsdjup ändras påväxten till typ och omfattning med djupet under havsytan, vilket påverkar korrosionen.

Havsvatten är i allmänhet i kraftig rörelse, vilket bidrar till koncentrationsutjämning. Det kan dock förekomma distinkta skillnader mellan olika djup så att korrosionsförhållandena skiljer



Figur 10. pH-värdet i Sveriges sjöar vinter och vår. Svarta områden innebär pH mindre än 5 och gråa områden pH mer än 7.



Figur 11. Havsvattnets salthalt (NaCl i %) vid Sveriges kuster.

mellan olika zoner på till exempel en lång stålplåte. I vissa delar av havet förekommer nämligen ett språngskikt, som åtskiljer och försvårar konvektion mellan bottenvattnet och den ovanför liggande zonen. I exempelvis Gullmarsfjorden på den svenska västkusten ligger gränsskiktet på ca 30 m djup. Bottenvattnet utgörs här av Nordsjövatten, medan zonen ovanför har lägre salthalt till följd av utspädning med ytvatten från de vattendrag som mynnar i fjorden. På andra håll kan gränsskiktet ligga grundare.

Texten i detta avsnitt har till stora delar hämtats från E Mattssons handbok Elektrokemi och korrosionslära.

3.7 Korrosion i utomhusatmosfär

På en torr stålyta i luft försiggår ingen korrosion. Om det däremot bildas en fuktfilm på stålytan sker korrosion i korrosionsceller enligt samma elektrokemiska process som vid korrosion på stål i jord och vatten. Avgörande för korrosionshastigheten i utomhusatmosfär är hur långa perioder stålytan är täckt av vatten (den så kallade våttiden), vattenfilmens tjocklek och förekomst av korrosionsstimulerande ämnen i vattnet.

Vid korrosion i utomhusatmosfär skiljer man mellan stålytor som är regnskyddade och icke regnskyddade. Effekten av nederbörd och upptorkning är nämligen olika för stålytors korrosion under dessa båda förhållanden. Mängden vatten på regnskyddade stålytor är beroende av luftens relativa fuktighet. Under ett visst värde på den relativa fuktigheten, den så kallade kritiska fuktigheten (för stål: RF ca 80 %) är fuktfilmen så tunn att korrosionshastigheten på en ren stålyta är försumbar. Över den kritiska fuktigheten tilltar korrosionen påtagligt med stigande relativ fuktighet. Den andel av tiden då relativa fuktigheten är 80 % eller högre brukar räknas som våttid, under vilken korrosionen sker med beaktansvärd hastighet. Våttiden kan beräknas med hjälp av meteorologiska data. Det bör påpekas att beaktansvärd atmosfärisk korrosion kan ske även vid lägre relativ luftfuktighet än 80 %, om hygroskopiska salter finns på stålytan.

Beroende av i vilken miljö stålytan exponeras innehåller fuktfilmen i mer eller mindre grad sådana ämnen som syre, svaveloxider, kväveoxider, koldioxid, klorid och fasta partiklar såsom sot och damm. Dessa ämnen har stor inverkan på korrosionen. Med kännedom om våttiden och i vilken miljö (stadsatmosfär, lantatmosfär, marin atmosfär etc) stålytan är exponerad kan korrosionshastigheten beräknas. Medelavfrätningen för kolstål vid fortfarighetstillstånd i olika typer av utomhusatmosfär anges i **Tabell 1**.

En ISO-Standard (ISO 9223, 9224) finns för bedömning av korrosionshastigheter på stål i utomhusatmosfär.

Tabell 1. Kolståls medelavfrätning vid fortfarighetstillstånd i olika typer av utomhusmiljöer.

Miljö	Medelavfrätning
Lantatmosfär	5-10 $\mu\text{m}/\text{år}$
Stadsatmosfär	10-30 $\mu\text{m}/\text{år}$
Sötvattenatmosfär, med vattenstänk	10-50 $\mu\text{m}/\text{år}$
Havsatmosfär, utan vattenstänk	10-30 $\mu\text{m}/\text{år}$
Havsatmosfär, med vattenstänk	20-100 $\mu\text{m}/\text{år}$
Industriatmosfär, med aggressiva luftföroreningar	30-60 $\mu\text{m}/\text{år}$

3.8 Summering

Korrosion i jord, vatten och fuktig utomhusatmosfär är av elektrokemisk natur. Förloppet sker i korrosionsceller på stålytan bestående av en anodyta (där angreppet uppstår), en katodyta (där syre reduceras) och elektrolyten som reagerar med dessa ytor. Vid allmän korrosion blir avfrätningen relativt jämn över hela stålytan medan angreppet vid lokal korrosion blir koncentrerat till begränsade delar. Utpräglad gropfrätning är sällsynt på obelagt kolstål i jord och vatten.

Korrosionshastigheten kan mätas med mikrometerskruv eller ultraljudsmätare och uttryckas som dimensionsminskning per tid ($\mu\text{m}/\text{år}$). Den kan också mätas genom vägning av provföremålet före och efter exponeringen och uttryckas som massförlust per area och tid ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{år}$) vilket kan omräknas till medelfrättdjup per tid, medelavfrätning ($\mu\text{m}/\text{år}$).

I jord förekommer korrosionstyperna jordkorrosion, galvanisk korrosion och läckströmskorrosion. För plåtar och spons är jordkorrosion av störst betydelse. Jordkorrosion på dessa bestäms i första hand av syrediffusionen genom jorden fram till stålytan. Eftersom grundvattenytan utgör en diffusionsspärr är korrosionen större i den omättade zonen mellan markytan och ned till strax under grundvattenytan. I denna zon inverkar i viss mån faktorer som jordart och pH-värde, vilka har mindre inverkan på korrosionen längre ned på plåten.

På plåtar och spons i stillastående sötvatten eller havsvatten avtar korrosionen, på grund av avtagande syrehalt, med djupet. I strömmande vatten kan korrosionen bli betydande på större djup. Kalkfällande sötvatten hämmar korrosionen. I kalkfattiga regioner är pH-värde, alkalinitet och kalciumhalt låga i sjöar och vattendrag, vilket stimulerar korrosionen. Havsvatten är, på grund av dess höga salthalt, mera korrosivt än sötvatten. I hamnar och vikar kan havsvattnet vara utspädd med sötvatten från utströmmande vattendrag. Påväxt på stål i havsvatten inverkar på korrosionshastigheten.

Avgörande för korrosionen i utomhusatmosfär är hur långa perioder stålytan är täckt av vatten(våttiden) och förekomst av korrosionsstimulerande ämnen i fuktfilmen. Känner man våttiden och i vilken miljö stålytan är exponerad kan korrosionshastigheten beräknas.

4. Jämförelse av korrosionsbenägenhet hos kolstål och segjärn i jord och vatten

När segjärnspålar började användas på 1980-talet uppkom frågan om segjärnets korrosion i jord. I en omfattande litteraturundersökning jämförde Korrosionsinstitutet korrosionsbenägenheten i jord hos segjärn och kolstål [5]. Man kom fram till följande:

- ”Det saknas jämförande undersökningar av stålplåtar och segjärnspålar nedslagna vertikalt i jord.
- Jämförande undersökningar av korrosionsbenägenheten hos oskyddade kolstålsrör och segjärnsrör har genomförts i omgrävd och återfylld jord, [6]. 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 stålplåtar som drivs ned i ostörd jord uppträder på sinsemellan likartat sätt ur korrosionssynpunkt.
- De största korrosionsangreppen på segjärnspålar och stålplåtar kan väntas på den del av pålen som befinner sig mellan markytan och ned till strax under grundvattenytan.”

Praktiska erfarenheter från många decenniers distribution av vatten och gas i jordförlagda ledningsnät tyder till och med på en något bättre korrosionshårdighet vad avser gropfrätning hos segjärn än hos stål i jord [7]. Möjligen skulle det grafitskikt, blandat med rost, som bildas på segjärnsytan vid korrosionen ha en svagt korrosionshämmande effekt.

I en annan litteraturundersökning [8] jämförde Korrosionsinstitutet korrosionsbenägenheten hos olika typer av gjutjärn (segijärn, 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, med avseende på medelavfrätning, hos segjärnspålar i jord och vatten kan jämföras med den hos stålplåtar. Vad som i denna skrift sägs om korrosion på stålplåtar gäller sålunda även för segjärnspålar.

5. Undersökningar av korrosion på stålplåtar och stålspons

Frågan om stålplåtars beständighet i jord och huruvida korrosionen praktiskt kan inverka på stålplåtars bärförmåga och livslängd har, som redan sagts i rapportens inledning, diskuterats i mer än 60 år. Följaktligen har åtskilliga praktiska undersökningar gjorts, varav flertalet utgörs av observationer på enskilda stålplåtar eller sponsplankor som stått ett antal år i jord. Antalet systematiska undersökningar där man slagit ned stålplåtar och efter ett antal år dragit upp dem för undersökning är däremot mindre. Stålplåtar och stålspons används ofta i fundament under kajer, pirar och liknande installationer i söt- och saltvatten. Dessa miljöer, särskilt den marina är korrosiva och följaktligen har flera undersökningar gjorts på plåtar och sponter utsatta för dessa förhållanden. Här summeras större, systematiska undersökningar i jord och vatten, som genomförts på olika håll i världen.

5.1 Undersökningar på stålplåtar i jord

5.1.1 Svensk långtidsundersökning av korrosion på stålplåtar i jord

Sandegren [9], tidigare vid Geotekniska kontoret vid Statens Järnvägar (SJ), har i samarbete med Korrosionsinstitutet genomfört en omfattande långtidsundersökning i fält av korrosionen på långa stålstänger som drivits ned i jord. Undersökningen genomfördes på 19 provplatser i olika delar av Sverige. Jordlagerföljden var olika sinsemellan platserna. Undersökningen omfattade de flesta ”typiska” jordarterna och jordlagerföljderna som förekommer i Sverige. På två av provplatserna (Stockholm och Norrköping) förekom överst fyllning innehållande bland annat byggrester, koksrester och slagg. Grundvattenytan ligger genomgående ganska högt. På de flesta provplatserna ligger den på djupet 0-2 m under markytan. Djupast, 2-3 m, ligger den på provplats Kalmar.

Undersökningen inleddes 1954 då provstänger sattes ned i Resteröd/Uddevalle. På övriga provplatser sattes provstängerna ned i huvudsak under första hälften av 1960-talet. På varje provplats exponerades flera provstänger, på de flesta platserna fem stycken, vilka togs upp efter olika lång exponeringstid. Detta möjliggjorde studium av hur korrosionshastigheten utvecklades med tiden.

Undersökningen avslutades i mitten av 1980-talet varvid samtliga kvarvarande provstänger drogs upp och besiktigades. Vid denna sista uppdragningsomgång fanns det på de flesta provplatserna 2-3 provstänger kvar, vilka genom att de drogs upp samtidigt, hade stått lika länge i jorden. På de flesta provplatserna var den längsta exponeringstiden ca 20 år. Den allra längsta exponeringstiden var 31 år (Resteröd/Uddevalle) och den kortaste 5 år (Ugglum/Partille).

Totalt exponerades 82 provstänger. Provstängerna bestod av ett antal runda, 1 m långa stålstänger, (sonderingsstänger av kolstål) med diametern 20 mm, som skruvats ihop till en enda provstång med en viss längd, som varierade från provplats till provplats. De längsta prov-

stängerna var 40 m och de kortaste 3 m. I undersökningen ingick totalt 850 enmetersstänger.

Efter uppdragning skruvades stängerna isär och massförlusten bestämdes hos varje enskild enmetersstång. Detta förfaringssätt gjorde det möjligt att bestämma korrosionshastigheten i form av medelavfrätning på varje meter från markytan ned till den djupast belägna delstången. Stängerna undersöktes även okulärt med avseende på märkbart, lokalt angrepp. Inga allvarliga sådana angrepp noterades. Endast ”skrovlig yta” observerades på en del stänger.

Undersökningen är unik dels genom att den omfattar så många provstänger och att exponeringarna pågick så lång tid, dels genom den sinnrika utformningen av ihopskruvade provstänger, vilket alltså medgav noggrann mätning av korrosionshastigheten på varje meter från markytan ned genom jordlagerföljden. Någon undersökning av korrosionen på stålplåtar (stålstänger) slagna i ostörd jord av liknande omfattning som denna har såvitt bekant inte gjorts någon annanstans.

Sandegren redovisar i sin slutrapport [9] den stora mängden undersökningsresultat i tabellform och i ett antal diagram. En långtgående bearbetning av uppmätta korrosionshastigheter för praktisk tillämpning låg utanför forskningsrapportens ram. De värdefulla resultaten har därför inte fått den praktiska användning de förtjänar.

I denna utredning har SJs resultat utvärderats med avseende på medelavfrätningen på den provstång (de provstänger) som stått längst i jord på varje provplats, se **Tabell 2**. Därvid framkom det

- att korrosionen i samtliga fall var ”liten”, såväl i den luftade zonen ovan grundvattenytan som under denna, oavsett jordart,
- att största medelavfrätning på en enskild delstång (1-metersstång) var 23 $\mu\text{m}/\text{år}$. Störst medelavfrätning på övriga provplatser var i de flesta fall betydligt lägre än 20 $\mu\text{m}/\text{år}$. (Korrosionshastigheten 20 $\mu\text{m}/\text{år}$ motsvarar en avfrätning av 2 mm runt om hela omkretsen på 100 år, det vill säga en total minskning av tvärsnittet på 4 mm.),
- att den maximala korrosionen - största medelavfrätningen - påträffades i ungefär hälften av fallen över eller strax under grundvattenytan. I övriga fall förekom störst medelavfrätning på större djup, åtskilliga meter, under grundvattenytan,
- att på de flesta provplatserna har den maximala avfrätningen minskat med tiden, medan den på ett par platser är någorlunda konstant i tid.

Genomgående i hela undersökningen avlägsnades rostsiktet på uppdragna stänger genom manuell stålborstning och inte genom betning i syrabad. Detta innebär att om man inte lyckats stålborsta bort all rost kommer korrosionshastigheten att underskattas något, eftersom kvarstående rost då kom att ingå vid vägningen.

I syfte att klarlägga betydelsen av metod för rostborttagning gjordes vid Korrosionsinstitutet en specialundersökning på SJs provstänger. Ca 70 delstänger som stått längst (ca 20 år) på olika provplatser betades och massförlusten jämfördes med den som erhöles efter stålborstning-

Tabell 2. Största medelavfrätningen (mest korroderad delstång) på längst exponerad provstång på varje provplats i SJs undersökning av korrosion i jord. Störst medelavfrätning är angiven dels ovan, dels under grundvattenytan (GW). [9]. Jordlagerföljden är endast summariskt återgiven.

Provplats	Störst medelavfrätning på enskild delstång (1-metersstång) vid sista provintagningen, $\mu\text{m}/\text{år}$		Exponeringstid, år	Total stånglängd, m	Antal uppdragna provstänger vid sista provintagningen	Jordart
	ovan eller i GW	under GW				
C1 Norrköping	4	6	20	17	1	Koksfylln. sand gyttj.lera,glaciallera
C2 Norrköping	4	13	22	15	2	Torrskorpelera, gyttj.lera, lera
C3 Guntorp/Kungälv	15	6	24	14	1	Makadam, gyttj.lera, lera, silt
C5 Boden	13	17	17	8	3	Sulfidlera, varvig lera
C6 Kramfors	9	13	22	11	2	Sulfidlera, varvig siltig lera
C7 Resteröd/Uddevalla	1	2	31	17	1	Lera
C9 Ugglum/Partille	23	8	5	40	2	Lera, siltig lera
C21:1 Stockholm	0	11	20	23	2	Fyllning, glaciallera
C21:2 Stockholm	1	11	20	20	2	Fyllning, glaciallera
C31 Solna	5	17	21	9	2	Lera, varvig lera
C33 Malmö	6	6	21	4	2	Kalkhaltig lera
C36 Trensåm/Karlshamn	6	7	20	10	2	Dy, lera
C37 Kalmar	8	7	20	4	2	Sand, silt, lera
C38 Vinslöv/Hässleholm	6	5	20	5	2	Dy, sand, lera
C39 Jönköping	2	5	21	8	2	Lera, dy, sand, gyttja
C85 Hållby/Eskilstuna	2	-	6	3	1	-
C139 Kalix	4	9	9	3	1	Sand, sandig lera
C148 Umeå	8	15	6	10	5	Silt, gyttj.lera
C149 Borlänge	2	4	11	15	2	Silt, sand

en. Det visade sig att underskattningen av korrosionshastigheten var så liten, 0,5 - 1,5 $\mu\text{m}/\text{år}$, att den saknar praktisk betydelse. De värden på medelavfrätningen som är angivna i **Tabell 2** motsvarar alltså verklig korrosion.

5.1.2 Svensk undersökning av korrosion på stålplåtar i grundvattenzonen

Vid Korrosionsinstitutet pågår sedan 1979 en långtidsundersökning av korrosion på stål och andra metaller i jord på sju provplatser med sinsemellan olika jordart. Bland det stora antalet

prover finns tunga stålplåtar med X-profil som slagits ned till tre meters djup och som undersöks tillsammans med Statens geotekniska institut. Grundvattenytan ligger på ca en meters djup och varierar måttligt med årstiderna. På provplats Linköping-övre ligger grundvattenytan dock på 10 meters djup.

Exponeringen av stålplåtarna har två syften. Det ena är att undersöka korrosionen på plåtar som står i grundvattenzonen, vilken anses vara den mest korrosiva zonen för en stålplåt. Det andra syftet är att jämföra korrosionen på stålplåtar som drivits ned i ostörd jord med korrosionen på plåtar som ställts ned i samma jord, men som grävts upp och därefter återfyllts kring plåten. Jämförelsen görs både med avseende på medelavfrätning (massförlustbestämd) och på maximal lokal frätning (uppmätta djup i lokala frätangrepp).

Stålplåtar (X-profil) drevs ned vertikalt i den ostörda jorden och grova stålstänger (plattstål) ställdes ned vertikalt i grävda provgropar intill stålplåtarna, varefter jorden återfylldes kring stängerna. Exponeringen sker vid fem av Korrosionsinstitutets och Statens geotekniska instituts provstationer i jord. Jordarterna är lera (två typer), gyttjig lera (två typer) och sand. Undersökningen genomförs under väl kontrollerade betingelser. Den första provtagningen gjordes efter 5 år och visade:

- att den jämna korrosionen, medelavfrätningen (massförlustbestämd) på plåtarna är låg, maximalt 12 $\mu\text{m}/\text{år}$, trots att plåtarna står i den mest korrosiva zonen (grundvattenzonen) i vertikalled räknat,
- att medelavfrätningen på plåtarna var störst i gyttjig lera medan de djupaste lokala angreppen förekom i sand,
- att medelavfrätningen var minst dubbelt så stor på nedgrävda stålstänger (omrörd jord) som på neddrivna stålplåtar (ostörd jord),
- att djupet i de djupaste lokala angreppen var lika stort på stålplåtarna som på stålstängerna.

En sammanfattning av resultaten visas i **Tabell 3**.

På några plåtar, Linköping och Göteborg, hade de lokala angreppen förhållandevis stor utbredning, flera 10-tals cm^2 . Plåtarna hade emellertid stått endast 5 år i jord. Nyligen togs plåtar och plattstänger in efter ca 10 års exponering. Undersökningen av dessa väntas ge information om huruvida den lokala korrosionen är konstant eller avtar med tiden.

Korrosionsinstitutet har nyligen tagit över en långtidsundersökning som Sandvik AB inledde för ca 25 år sedan. Den omfattar ett 50-tal ca 3,5 m långa stålrör som drivits ned genom grundvattenzonen på tre platser med dokumenterad jordlagerföljd och grundvattennivå. I provmaterialet ingår både kolstålrör och rostfria rör. Rören togs upp sommaren 1992, men utvärderingen har ännu inte gjorts. Undersökningen väntas ge värdefull information om korrosionen från markytan ned under grundvattenytan efter längre exponeringstid.

Tabell 3. Korrosionshastigheten på nedslagna stålplåtar och vertikalt nedgrävda plattstänger efter ca 5 år i jord på Korrosionsinstitutets provplatser.

Fältstation <i>Jordart</i>	Prov	Medelavfrätning, hastighet i $\mu\text{m}/\text{år}$	Lokal frätning, hastighet i $\mu\text{m}/\text{år}$
Enköping <i>lera</i>	Stålpåle (nedtryckt)	3	-
	Plattstång (nedgrävd)	12	-
Sollentuna <i>lera</i>	Stålpåle (nedtryckt)	8	92
	Plattstång (nedgrävd)	15	84
Göteborg <i>gyttjig lera</i>	Stålpåle (nedtryckt)	7	105
	Plattstång (nedgrävd)	25	115
Stockholm <i>gyttjig lera</i>	Stålpåle (nedtryckt)	12	91
	Plattstång (nedgrävd)	19	94
Linköping övre <i>"torr" sand</i>	Stålpåle (nedtryckt)	3	199
	Plattstång (nedgrävd)	7	170
Linköping nedre <i>vattenmättad sand</i>	Stålpåle (nedtryckt)	2	-
	Plattstång (nedgrävd)	7	-

5.1.3 Svensk undersökning av korrosion på stål i uppgrävd och återfylld jord

I den långtidsundersökning som refereras i föregående avsnitt 5.1.2 och som utförs av Korrosionsinstitutet ingår även stålprover som exponeras nedgrävda i provgröpar, det vill säga i jord som grävts upp och därefter återfyllts över proverna [10]. Undersökningen syftar till att mäta korrosionshastigheten på vanliga metaller i typiska svenska jordarter och till att klargöra vilka faktorer som inverkar på korrosionen. Undersökningen genomförs på nio fältstationer med olika jordart.

Proverna utgörs av plattstänger (längd 2 m) och plåtar (0,10x0,15 m). Plattstängerna exponeras liggande och plåtarna stående. Proverna har grävts ned på två olika djup och det finns alltså två provnivåer på varje plats. Den övre provnivån ligger på ca 0,7 m och den undre nivån på ca 1,7 m djup under markytan. Platserna är valda så att grundvattnet står förhållandevis högt och så att grundvattenytan varierar måttligt med årstiderna. Detta innebär att den övre provnivån i allmänhet ligger över och den nedre nivån i allmänhet under grundvattenytan.

Prover tas upp för undersökning med några års mellanrum. Medelavfrätningen på prover av kolstål efter 3-5 års exponering visas i **Tabell 4**. Av tabellen framgår det:

- att medelavfrätningen både över och under grundvattenytan är lägre än $20 \mu\text{m}/\text{år}$ i samtliga fall utom på den övre provnivån i gyttjig lera (Göteborg och Stockholm) och i en lera (Sollentuna),
- att på dessa tre platser med förhöjd medelavfrätning är denna mellan 20 och $40 \mu\text{m}/\text{år}$. Den främsta förklaringen till den högre medelavfrätningen är att jordens pH-värde är mycket lågt ($\text{pH} < 4,5$) ovanför grundvattenytan på dessa platser.

Tabell 4. Medelavfrätningen på kolstålsprover (plåtar och plattstänger) nedgrävda över och under grundvattenytan (GW), efter 3-5 års exponering på Korrosionsinstitutets provplatser.

Fältstation <i>Jordart</i>	Prov	Exponeringstid, år	Medelavfrätning, $\mu\text{m}/\text{år}$	
			över GW	under GW
Enköping <i>lera</i>	Plattstänger	4	13	10
	Plåtar	3	13	8
Sollentuna <i>lera</i>	Plattstänger	4	24	9
	Plåtar	3	14	6
Kramfors <i>sulfidlera</i>	Plattstänger	4	17	6
	Plåtar	5	12	6
Göteborg <i>gyttjig lera</i>	Plattstänger	4	23	14
	Plåtar	3	27	13
Stockholm <i>gyttjig lera</i>	Plattstänger	4	36	17
	Plåtar	3	38	16
Laxå <i>torv</i>	Plattstänger	5	18	17
	Plåtar	3	17	5
Linköping <i>sand</i>	Plattstänger	4	7	3
	Plåtar	3	7	12
Falun <i>sandig morän</i>	Plåtar	5	7	-
Höör <i>sandig morän</i>	Plåtar	5	11	-

- att medelavfrätningen genomgående är lägre under grundvattenytan, med undantag av i ren sand.

Hittills har medelavfrätningen minskat något för varje provintagning. Utvärdering av prover intagna efter 7-9 års exponering pågår för närvarande. När denna är klar kommer det att visa sig om denna trend har fortsatt.

5.1.4 Svensk undersökning av lokal korrosion på vertikala stålstänger i grundvattenzonen

Under 1950- och 1960-talen, då de flesta överföringskraftledningarna från Norrland till Syd- och Mellansverige byggdes ut, satte Vattenfall ned provstänger av obehandlat och varmförzinkat stål i jorden på ett större antal stolpplatser i kraftledningsgatorna. Avsikten var att undersöka korrosionshastigheten i olika jordarter och vid olika grundvattenförhållanden.

Proverna utgörs av vinkelstänger med längden 1,5 eller 2,5 meter. De grävdes ned vertikalt så att ett par decimeter stack upp ovanför markytan. Zinkskiktets tjocklek på de varmförzinkade stängerna var ursprungligen ca 130 μm . Som provplatser valdes sådana stolpplatser där höga korrosionshastigheter kunde väntas på kolstål och zink. På varje provplats sattes flera stänger av varje sort ned, vilket medgivit utvärdering av korrosionen efter olika långa exponeringsti-

der. På varje plats bestämdes jordart, jordresistivitet, pH-värde, grundvattenytans läge (flera observationer) samt jordens kemiska sammansättning med avseende på klorid och totalsvavel. I undersökningen ingick lerjordar (12 st), torvjordar (10 st) och moränjordar (18 st). Lerorna utgjordes av oorganisk lera, gyttjig lera och sulfidlera, varav en del av de senare hade mycket lågt pH-värde,. Ingen av lerjordarna hade högre pH-värde än 6.

Korrosionen på de obehandlade stålstångerna utvärderades dels genom bestämning av deras massförlust (medelavfrätningen), dels genom mätning av dimensionsminskningen på var 15:e centimeter utmed stången, med hjälp av mikrometerskruv. Genom det senare mätförfarandet kunde den maximala avfrätningen (lokala avfrätningen på stångens mest angripna parti) bestämmas och angreppets position i förhållande till grundvattenytan fastställas.

Medelavfrätningen hos zinkskiktet på de varmförzinkade stålstångerna utvärderades genom bestämning av stångernas massförlust. Den maximala avfrätningen bestämdes genom mätning med skiktjockleksmätare av kvarvarande zinkskikt på var 15:e centimeter utmed stången. Resultat från undersökningen med varmförzinkade provstänger redovisas i avsnitt 6.5.

Troselius [11] har sammanfattat undersökningsresultat erhållna med obehandlade stålstänger fram till 1975 och visar på samband mellan maximal avfrätning och jordart respektive grundvattenytans läge, **Tabell 5**. Vid denna tidpunkt fanns inte tillräckligt underlag för en sådan sambandsanalys för lerjordar, varför lera saknas i tabellen. Troselius slutsatser är:

- Grundvatten ytans läge 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 ett större parti på stången.
- Den maximala avfrätningen blir lägst i de fall grundvattenytan konstant, under hela året, ligger under stången.

Vinka [12] har sammanställt Vattenfalls samtliga undersökningsresultat erhållna fram till slutet av 1980-talet, **Tabell 6**. Av sammanställningen framgår det att den maximala avfrätningen varierar inom vida gränser i alla tre jordarterna, 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 konstant står i markytan. Störst maximal avfrätning uppstod i lerjordar medan medelavfrätningen är så liten att det inte går att finna samband mellan denna och jordart.

Tabell 5. Samband mellan maximal avfrätning på vertikala stålstänger och jordart respektive grundvattenytans (GW) läge i Vattenfalls undersökningar [11].

Grundvattenytans läge	Maximal avfrätning, $\mu\text{m}/\text{år}$	
	Morän	Torv
GW-ytan i markbandet	15	40
Varierande GW-yta på stängen	10	30
GW-ytan ständigt under stängen	5	—

Tabell 6. Maximal avfrätning och medelavfrätning på provstänger av obehandlat kolstål, vertikalt nedgrävda i jord i Vattenfalls undersökningar [11], [12].

Jordart	Antal provplatser	Maximal avfrätning ¹⁾ $\mu\text{m}/\text{år}$	Medelavfrätning ²⁾ $\mu\text{m}/\text{år}$
Lerjordar	12	13-82	6-8
Torvjordar	4	29-40	4-8
Moränjordar	11	5-19	2-8

- 1) Korrosionshastighet på stängens mest angripna parti uppmätt med mikrometerskruv.
2) Genomsnittlig korrosionshastighet mätt genom massförlustbestämning.

5.1.5 Amerikanska undersökningar av korrosionen på stålplåtar i jord

Romanoff [3] och [13] vid U.S. National Bureau of Standards undersökte så många som 44 tunga stålplåtar (H-profiler och spons) som hade stått nedslagna mellan 8 och 50 år i olika jordar. En sammanställning av resultaten av ungefär hälften av de undersökta plåtarna och sponsen visas i **Tabell 7a** och **7b**. Några av slutsatserna var i citat:

- Inga märkbara korrosionsangrepp förekom på stålplåtar under grundvattenytan i ostörd jord, oavsett jordens egenskaper.
- Ovan grundvattenytan och i fyllnadsjord innehållande slag varierade korrosionshastigheten men den var inte hög.
- Ostörda jordar har så låg syre(oxygen)halt på några få fots djup under markytan eller under grundvattenzonen att inga märkbara korrosionsangrepp uppstår på stålplåtar.
- Det fanns ingen korrelation mellan korrosionens storlek på plåtarna och någon av de jordparametrar som har korrelation med korrosionen på nedgrävda rörledningar. Möjligen fanns det ett svagt samband mellan jordens pH-värde och plåtarnas korrosion i grundvattenzonen.

Tabell 7a. Resultaten från de 19 först undersökta stålplåtarna i jord i den amerikanska undersökningen, [3]. National Bureau of Standards' undersökningar 1950–1961.

Nr, plats (stat) och påltyp	Jordart	År i jord	Jordresistivitet, $\Omega \cdot \text{cm}$	pH	Korrosion		
					över GW- ytan	i GW- zonen	under GW- ytan
1. Bonnet Carre Spillway (LA) H-balk	Sand, organisk silt, lera	17	400–1,050	6,7–8,1	U	M	U
2. Sparrows Point (MD) H-balk	Fyllning (slagg, sand) sand, silt, lera	18	1,13C 4,000	3,7–6,6	P 0,9	P 2,8	S
3. Quachita River (AR) Spont	Siltig lera, lera	40	1,370–12,400	4,9–7,3	–	–	U
4. Grenada Dam (MS) Spont	Fyllning (silt), skiffer, organisk lera	12	3,800–15,400	3,6–4,9	M P 3,1	–	–
5. Sardis Dam (MS) Spont	Fyllning (blandad) sand, lera	20	1,690	2,9	–	–	P 1,5
6. Chef Menteur Pass (LA) Spont	Siltig sand, lera	32	300–440	6,9–7,8	–	M	P 3,7
7. Wilmington Marine Terminal (DEL) Spont	Fyllning (bl a slagg), organisk silt, sand, lera	23	–	–	P 3,8	–	–
8. Lumber River (N CAR) I-balk	Sandig silt, sandig lera	37	1,100–4,900	2,3–5,9	–	P 1,5	P 1,5
9. Memphis Floodwall (TN)	Lera, siltig lera	7	1,100–8,600	7,6–7,8	U	P 0,9	–
10. Memphis Floodwall (TN)	Lera. siltig lera	7	1,030–7,900	6,8–7,8	U	U	–
11. Vicksburg Floodwall (MS)	Sandig silt, lera	7	850–7,000	7,4–8,2	P 1,0	P 1,2	–
12. Vicksburg Floodwall (MS)	Siltig sand, lera	7	625–9,200	7,1–8,6	M	M	–
13. Sardis Dam (MS)	Fyllning (sand, silt)	20	3,000–7,510	5,4–6,0	–	M	S
14. Grenada Dam North (MS)	Fyllning (sand silt)	11	1,700–16,500	4,0–4,4	P 2,7	–	–
15. Grenada Dam South (MS)	Fyllning (sandig silt), sand	11	4,300–11,000	6,9	P 4,1	–	–
16. Berwick Lock West (LA)	Fyllning (siltig lera), lera	11	800–1,290	8,1	S	S	S
17. Berwick Lock East (LA)	Fyllning (lera), lera	11	750–1,610	7,9–8,1	–	P 1,9	S
18. Algiers Lock (LA)	Siltig lera, organisk lera	12	345–1,300	7,7–8,4	–	P 1,0	–
19. Enid Dam (MS)	Siltig lera, sand, silt	12	8,000–10,200	5,1–5,3	M	–	–

Nr 1–8: Stålplåtar, uppdragna och undersökta i sin helhet.

Nr 9–19: Stålspons, framgrävda till 1,5–3 m djup och undersökta på plats.

U=Ingen korrosion: stålytan helt opåverkad; valshuden intakt över praktiskt taget hela ytan. Ytan kan vara ”skrovlig” på mindre områden, men det finns inga frätgropar vars djup överstiger valshudens tjocklek.

M=Jämn korrosion: valshuden bortfränt över stora områden; ytan är ”skrovlig”. Frätgropars djup överstiger inte valshudens tjocklek.

S=Grunda, ytliga angrepp och märkbara lokala angrepp. Frätgropars djup överstiger inte 0,6 mm.

P=Lokala angrepp i form av frätgropar, fåror eller djupare avfräta ytor med frätdjup över 0,6 mm. Siffran anger största frätdjup i mm.

Tabell 7 b. Resultat av amerikanska korrosionsundersökningar på uppdragna stålspjäl.
Några av National Bureau of standards' undersökningar 1962-1968 [13].

Nr, plats (stat) och byggnadsverk	Påltyp	Tid i jord	Under-sökt på-längd	Djup under mark-ytan	Korrosion		Jordegenskaper			
					Frät-gropar max djup mm	Ytans utseende	GW-yan djup m	Jordart	pH	Resistivitet $\Omega \cdot \text{cm}$
1. Freeport (Texas) damm	spont	21	9,6	0-2 2-7,5 7,5-8,5 8,5-9,6	1,3 inga inga inga	Enstaka frätgropar vid mark- yan och GW-yan Opäverkad av korrosion Ytlig korrosion Opäverkad av korrosion	1,35	Siltig lera Lera, siltig lera Lera, siltig lera Siltig lera	7,5 7,2-7,3 7,3-7,5	150-350 100-160 78-130
2. Minnesota City (Minnesota) skiljevägg i sluss vid Mississippi River	spont	29	10,8	0,3-4 4-11	0,2 inga	Enstaka lokala angrepp och ytlig korrosion vid GW-yan Opäverkad av korrosion	0,6	Fin sand Siltig sand	7,2-7,3 4,7-5,4	36 000 1860-3400
3. Winona (Minnesota) skiljevägg i sluss vid Mississippi River	spont	28	13	0-4,3 4,3-6,1 6,1-12,8 12,8-13,4	1,4 inga inga inga	Några lokala angrepp vid GW-yan med djup 0,7-1,4 mm. Övrigas djup < 0,5 mm. Opäverkad av korrosion. Opäverkad av korrosion. Opäverkad av korrosion.	1,8	Fin sand. Siltig sand. Fin sand. Lerig, siltig sand.	7,5-7,7 6,8-7,2 4,8-5,6 6,2-7,3	41000 2660 14700 1880
4. Dresbach (Minnesota) skiljevägg i sluss vid Mississippi River	spont	27	9,2	0-0,6 0,6-3 3-6,7 6,7-7 7-9,2	0,8 inga 0,2 inga inga	Spridda angrepp och enstaka lokala angrepp. Opäverkad av korrosion. Åtskilliga små lokala angrepp max djup 0,2. Opäverkad av korrosion Opäverkad av korrosion.	0,6	Fin sand. Sand. Sandig silt. Grå lera. Silt, siltig lera.	7,5-7,6 5,4-6,9 6,8-7,4 - 6,7	44000 1750-8700 3100-4000 - 3400-5000
5. Olcott (New York) pirl i Lake Ontario	I-balk (genom vatten ned i botten-sediment)	50	1,2	0-0,1 0,2-1,2	1,1 inga	Enstaka gropar vid botten. Ytlig korrosion.	0,0	Jordprov saknas. Jordprov saknas.	- -	- -
6. Buffalo (New York) ramp vid Niagara River	spont	36	2,6	0-1,8 1,8-2,6	inga 1,3	Inga mätbara lokala angrepp. Allmän korrosion, en frätgropp 1,3 mm djup, övriga frätgropar var ej djupare än valshuden.	2,6	Siltig sand. Siltig sand, lerklumpar.	7,7-7,8	1540-2820 1610-1920
7. Erie (Pennsylvania) vägbrytare vid Presque Isle	spont	32	1,0	0-1	1,6	Många frätgropar mellan 0,7-1,6 mm djupa, enstaka gropar upp till 1,1 mm djup vid GW-yan, resten av spanten allmän korrosion.	1,0	Fin sand.	7,9	23000
8. Fairport (Ohio) ramp vid Grand River	spont	30	6,8	0-1,5 1,5-2,4 2,4-6,8	<0,5 inga inga	Järn avfräning över största delen med några enstaka frätgropar. Opäverkad av korrosion, valshuden nästan helt intakt.	2,4	Fyllning, stenig sand. Lerig silt Silt, sand, grup blålera.	8,0 7,6 7,2-7,7	4200 3500 1120-6000

Romanoff jämför även korrosionen på neddrivna stålplåtar med korrosionen på järn- och stålkonstruktioner som grävs ned i samma jord. Han kommenterar:

- Jord som har starkt korrosiv verkan på järn och stål i omrörd jord i grävda gropar hade ingen korrosiv verkan på stålplåtar som drivits ned i samma, men ostörda jord.
- Den mindre korrosionen på stålplåtar kan tillskrivas den lägre syrgasdiffusionen i ostörd jord.

Korrosionsinstitutets undersökning, som refereras i föregående avsnitt, bekräftar dessa iakttagelser.

5.1.6 Norska undersökningar av korrosionen på stålplåtar i jord med hög kloridhalt

Vid Norges Geotekniska Institut finns en lång tradition kring forskning på området korrosion på stålplåtar, främst i marina leror med hög kloridhalt [14], [15], [16], [17]. Tungesvik, Moum och Fischer [15], [16] undersökte sju stålplåtar som stått nedslagna i jord mellan 10 och 70 år i grundläggningar under olika slags byggnadsverk. De rapporterade:

- Den största medelavfrätningen låg mellan 20 och 40 $\mu\text{m}/\text{år}$ 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 $\Omega\cdot\text{m}$; författarens anmärkning.)
- I lerjordar där den ursprungliga salthalten har avtagit på grund av urlakning och där jordresistiviteten ligger mellan 20 och 100 $\Omega\cdot\text{m}$ var korrosionshastigheten inte högre än 2-10 $\mu\text{m}/\text{år}$.
- Resultaten är endast tillämpliga på förhållandena i vattenmättade sediment under torrskorpan. I torrskorpan i salthaltig lera kan korrosionshastigheten vara högre.

5.1.7 Japanska undersökningar av korrosionen på stålplåtar i jord

Ohsaki [18], 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 jord.

Stålplåtarna bestod av 15 m långa vinkelstänger (10x100x100 mm) med kvarsittande valshud. De drevs med fallhejare i ostörd jord. På en provplats göts överändan av några plåtar in i stålarmad betong så att plåtarna kom i kontakt med armeringsstålet. Syftet var att undersöka om kontakten med stålarmeringen (som har en ädel korrosionspotential) skulle kunna orsaka förhöjd korrosion på plåtarna strax utanför betongingjutningen. Plåtarna drogs sedan upp i tre olika omgångar; efter 2, 5 och 10 års exponering. Rosten avlägsnades genom maskinell stålborstning och dimensionsminskning, orsakad av korrosionen, mättes med mikrometerskruv i ett stort antal punkter på varje stång.

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

- De uppdragna pålarna var i utmärkt skick. Påverkan av korrosionen var minimal och oberoende av jordens karaktär.
- Den största medelavfrätningen (korrosionshastigheten på det mest korroderade partiet) på en enskild påle efter 10 år var 26 $\mu\text{m}/\text{år}$. Medelavfrätningen i genomsnitt för samtliga pålar i hela undersökningen var 11 $\mu\text{m}/\text{år}$.
- 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 strata med strömmande grundvatten.
- Ingjutning av övre delen av stålplåtar i stålarmad betong skyddade den ingjutna påldelen effektivt. Ingen skadlig galvanisk korrosionseffekt kunde observeras på det nakna stålet strax nedanför betongingjutningen.
- Det är svårt att urskilja någon speciell jordparameter som påverkade korrosionen på ett avgörande sätt. Möjligen kan ett visst samband skönjas mellan korrosionen och jordens pH-värde.
- Stålets sammansättning (kolstål, kopparhaltigt kolstål eller rosttrögt stål) hade ingen urskiljbar inverkan på korrosionshastigheten.

Undersökningsresultaten är sammanfattade i **Tabell 8**.

5.1.8 Undersökning av korrosionen på stålplåtar i jord med ständig tjäle

I länder på högre breddgrader är det av betydelse att ha kännedom om korrosionen på stålplåtar som drivs ned i jord med ständig tjäle, s k permafrostjord. Romanoff [19] 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 permafrosten, dvs där var jorden 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.

Tabell 8. Sammanställning av resultaten i den japanska undersökningen av stålplåtar i jord [18].
Plåtarna drogs upp efter 2, 5 och 10 års exponering.

Provplats	Jordart	Antal under- sökta plåtar som stått 10 år i jord	Största medel- avfrätning, efter 10 år, $\mu\text{m}/\text{år}$	Totalt antal undersökta plåtar	Medelvärde av samtliga plåtars medelavfrätning, $\mu\text{m}/\text{år}$
1. Tokyo	Lera (alluvial)	3	9	9	5
2. Okayama	Silt, sand, lera (återvunnen havsbotten)	2	22	12	11
3. Hiroshima	Sand, sandig silt	4	21	10	12
4. Kanagawa	Silt (eolisk)	3	21	9	11
5. Hyogo	Sand, silt (återvunnen havsbotten)	3	16	15	8
6. Tokyo	Silt, sand, grus, silt (varierande GW-yta, 7–10 m, strömmande grundvatten)	3	26	9	9
7. Tokyo	Lera, sand, lera, sand (30 m från likströmsdriven järnväg)	3	22	12	15
8. Akita	Silt (återvunnen havsbotten i bräckvatten)	3	13	9	9
9. Saitama	Sand, siltig lera	2	10	11	6
10. Okayama	Platsen belägen 500 m från plats nr 2, samma jordart	4	25	30	13

- Resultaten från denna undersökning av korrosionen i permafrostjord överensstämmer med de resultat som publicerats från tidigare korrosionsundersökningar på stålplåtar i andra delar av U.S.A, [3], [13].

5.1.9 Andra undersökningar av korrosionen på enstaka stålplåtar i jord

Utöver de större undersökningar som redovisats här finns i litteraturen ytterligare ett antal undersökningar beskrivna som utgör observationer på enstaka stålplåtar, som dock i flera fall stått mycket länge i jord. Sandegren [20] har vid en av Korrosionsinstitutets konferenser sammanställt resultaten från flertalet av dessa. I sammanfattning överensstämmer resultaten från dessa undersökningar väl med de som refererats i föreliggande rapport.

5.2 Undersökningar på stålplåtar och stålspont i vatten och i bottensediment

Ett vanligt användningsområde för stålplåtar och stålspont är kajer, pirar och liknande installationer i marin miljö. Där står plåtarna vanligen i tre medier: i bottensediment (jord), i vatten och i luft. Både korrosionsförhållandena och åtgärderna blir mera komplicerade än när stålplåtar är slagna direkt i jord. Av denna anledning har flera systematiska undersökningar genomförts av korrosionen på stålplåtar och stålspont utsatta för dessa förhållanden. Här refereras några större sådana undersökningar.

5.2.1 Svensk undersökning i sötvatten och bräckt vatten

Eriksson, Mattsson, Klingenberg & Wannerberg (ref 21) och Klingenberg & Bergström [22] utförde under 1977-1986 ingående korrosionsmätningar på kajspont i 10 svenska hamnar, varav åtta i bräckt öresunds- och östersjövatten från Malmö upp till Härnösand och två i sötvatten, Karlstad och Stockholm-Mälaren. Se uppställningen i **Tabell 9**. 18 kajer undersöktes i totalt ca 100 sektioner. Spontplankornas dimensionsminskning mättes med ultraljud från botten upp till ovanför vattenytan, varvid både medelavfrätningen och den maximala avfrätningen kunde fastställas.

Tabell 9. Maximal avfrätning på stålspontkajer strax under medelvattenytan i svenska hamnar [22].

Hamn	Maximal avfrätning $\mu\text{m}/\text{år}$	Antal undersökta kajer	Salthalt %	Vattentyp
Karlstad	(270) ¹	1	0	sötvatten
Stockholm-Mälaren	150	2	0	"
Härnösand	330	4	0,2	bräckt vatten
Norrsundet	270	1	0,2	"
Skutskär	180	1	0,2	"
Norrtälje	200	1	0,3	"
Stockholm-Saltsjön	340	5	0,3	"
Karlskrona	340	1	0,7	"
Karlshamn	420-(550) ²	2	0,7	"
Malmö	290	6	1,0	"

1) osäkert värde (ny stålspont)

2) osäkert värde (speciella förhållanden)

Både den största medelavfrätningen, som var 200-300 $\mu\text{m}/\text{år}$, och den största maximala avfrätningen, som var upp till 340 $\mu\text{m}/\text{år}$, påträffades mellan medelvattenytan (MV) och lägsta medelvattenytan (LMV) i varje undersökt sektion. Korrosionen nära botten, där böjmomentpåkänningen är störst i sponten, var i samtliga hamnar liten, mindre eller lika med 100 $\mu\text{m}/\text{år}$. På tre spontkajer var korrosionen vid botten dock något högre. Detta tillskrivs att dessa kajer är hårt frekventerade av stora fartyg som åstadkommer kraftiga propellerströmmar, vilket stimulerar korrosionen längre ned på sponterna genom att syrerikt vatten förs ned på större djup.

Största maximala avfrätning, inklusive lokala angrepp, som påträffades i respektive hamn anges i **Tabell 9**.

De många mätningarna på stockholmskajer med stålsponter eller stålrörspålar kan användas till att jämföra korrosionen i bräckt vatten med den i sötvatten. Den maximala avfrätningen på kajer i Stockholm anges i **Tabell 10**. Korrosionen tycks alltså vara dubbelt så stor i bräckt vatten som i sötvatten. Exempel på korrosionsprofilen från botten upp till vattenytan på stålsponter i Stockholm-Saltsjön (Frihamnen) och i Stockholm-Mälaren (Karl-Johan Slussen) visas i **Fig. 12**. Av figuren framgår det att korrosionsangreppens djup ökar uppåt mot vattenytan.

Tabell 10. Jämförelse av medelavfrätningen på stålsponskajer i bräckt vatten och i sötvatten i Stockholm.

Zon	Störst medelavfrätning, $\mu\text{m}/\text{år}$	
	Stockholm-Saltsjön bräckt vatten	Stockholm-Mälaren sötvatten
Skvalpzonen	300(± 100)	150(± 50)
Undervattenzonen	100	50

På några kajer var krönbalken nedgjuten under lägsta vattenyta på sponsens utsida. Ingen förstärkt galvanisk korrosion kunde noteras på det nakna stålet strax nedanför den nedre betongkanten.

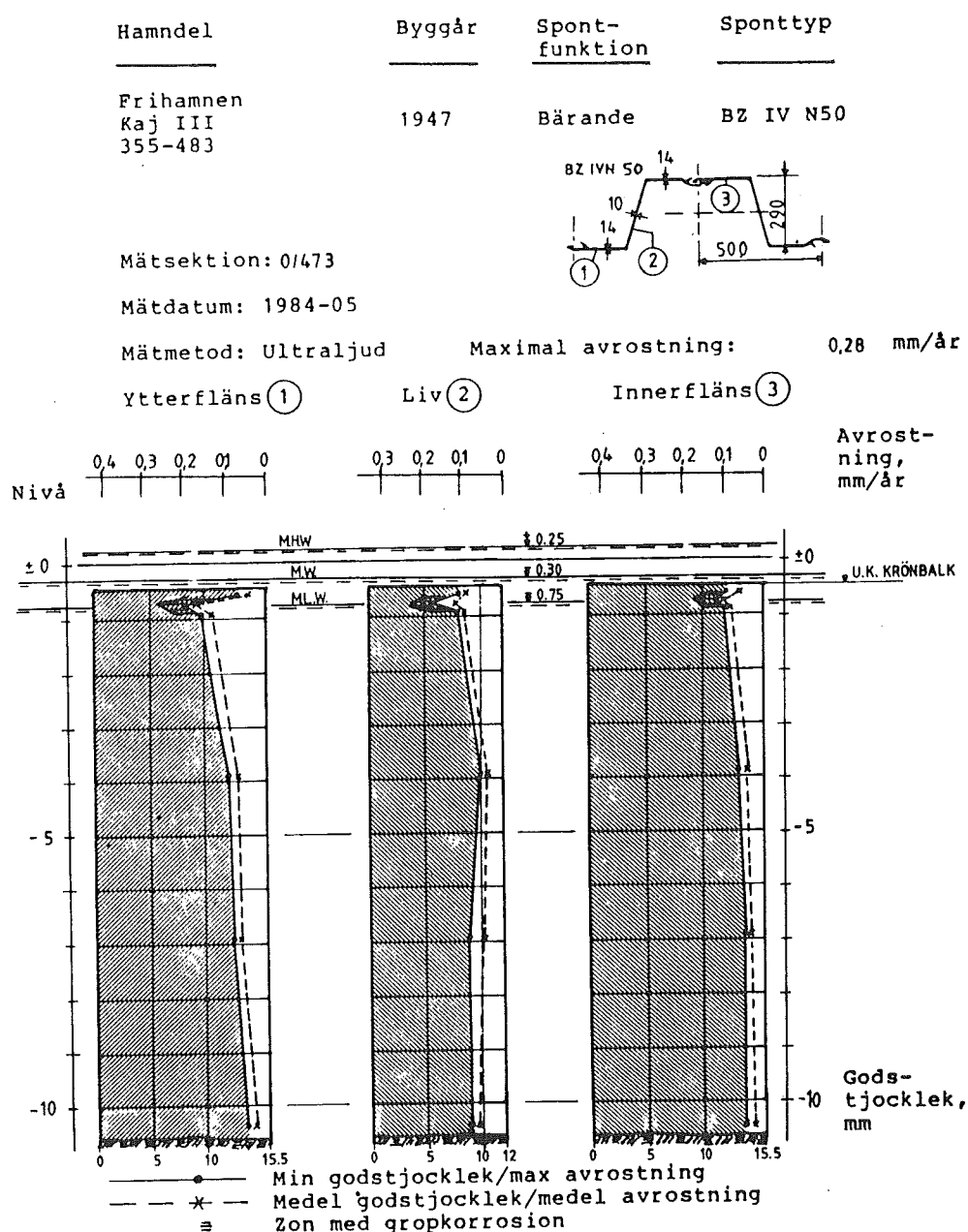
Några andra viktiga observationer som gjordes i denna omfattande korrosionsundersökning i svenska hamnar har sammanfattats i rapportens **Appendix 2**.

Det bör påpekas att resultat från mätningar på sponter och pålar saknas från västkusten. Den marina miljön längs västkusten påminner mer om förhållandena längs de norska och danska nordsjökusterna. I dessa länder har tidigare utförts omfattande undersökningar av korrosion på stålspons, vars resultat kan tillämpas på svenska västkusthamnar. Se avsnitt 5.2.4.

5.2.2 Svensk undersökning på större djup i havsvatten

Korrosionsinstitutet genomförde under 1980-talet en omfattande undersökning av korrosions-hastigheten, medelavfrätningen, på bland annat kolstål och låglegerat stål på 10 och 130 meters djup i havsvatten dels i Kosterfjorden, Bohuslän, dels utanför Bergen i Norge [23]. Korrosionshastigheten uttryckt som medelavfrätning efter drygt ett års exponering av provplåtarna anges i **Tabell 11**.

Ingen lokal korrosion i form av gropfrätning förekom på dessa djup, endast jämn korrosion.



Figur 12. Korrosionsprofil utmed stålspont från botten upp till underkant på krönbalk i bräckt vatten i Stockholm, Frihamnen [21].

5.2.3 Svensk undersökning i strömmande sötvatten

I ett samarbetsprojekt mellan Vägverket och Korrosionsinstitutet undersöktes korrosionen på bland annat stål och stål belagt med olika metallbeläggningar i strömmande sötvatten med olika kemiska sammansättning [24], [25]. Undersökningarna gjordes i vägtrummor belägna i åtta vattendrag på olika ställen i landet. Provpåtar var monterade inuti vägtrumorna så att de befann sig relativt nära men alltid under vattenytan. Vattendjupet varierade mellan ca 0,5 och 1 meter beroende på årstid. Exponeringarna pågick som längst 4 år. Korrosionen på kolstål, uttryckt som medelavfrätning, var mellan 20 och 60 $\mu\text{m}/\text{år}$. Se **Tabell 12**.

Tabell 11. Medelavfrätning på stålplåtar på större djup i havsvatten i Sverige och Norge [23].

Djup	Medelavfrätning, $\mu\text{m}/\text{år}$	
	Kosterfjorden	Bergen
10 meter	80	50
130 meter	50	50

Tabell 12. Korrosion på kolstål på 0,5 till 1 meters djup i strömmande vatten i sju svenska vattendrag [24], [25].

Provplats	Medelavfrätning, $\mu\text{m}/\text{år}$	Strömningshastighet, m/sek	pH	Resistivitet, $\Omega \cdot \text{m}$
1. Nolsjön (Tiveden)	25	0 - 2	4,6 - 5,4	52 - 250
2. Stormyra (Södertörn)	40	0 - 0,75	6,4 - 6,6	55 - 142
3. Bergshamra (Uppland)	25	0 - 2	6,6 - 8,2	14 - 33
4. Gyltinge (Halland)	50	<2	6,2	161
5. Kornhult (Halland)	60	<2	6,6	108
6. Skintaby (Småland)	20	<2	7,5	24
7. Torup (Småland)	50	<2	6,3	147

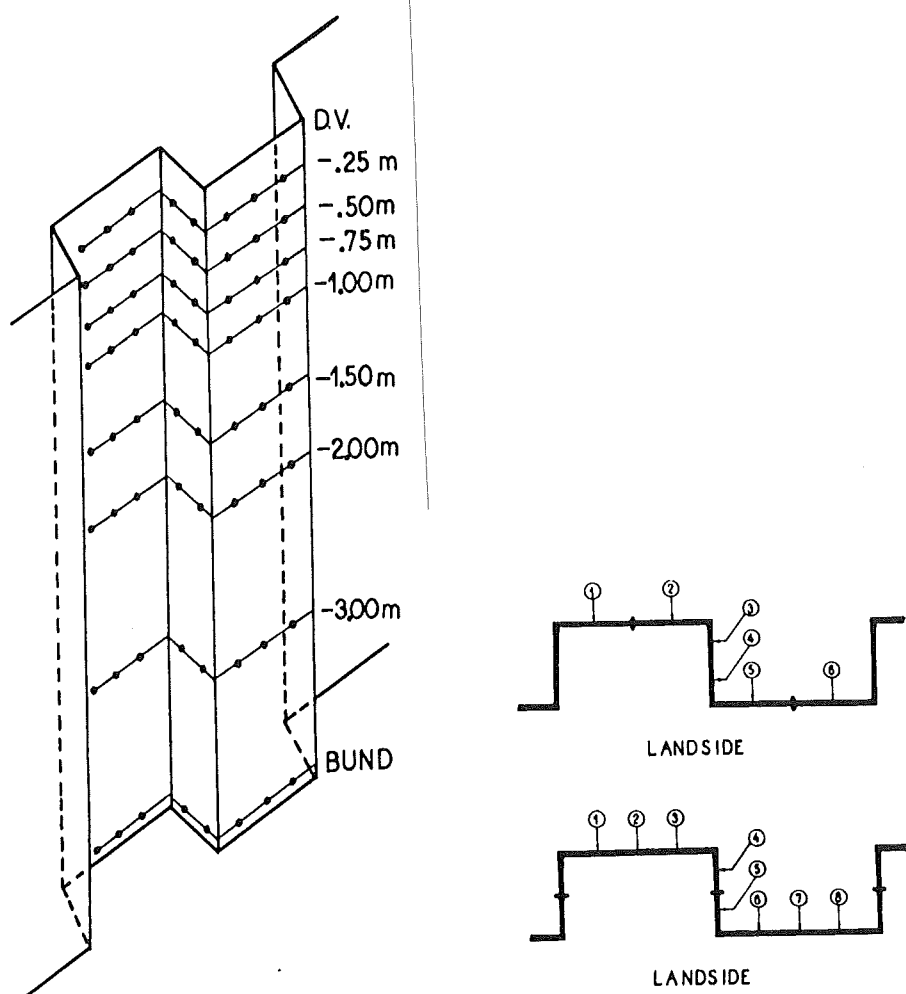
Anm: Vid provplatserna 1-3 har pH och resistivitet bestämts vid fem skilda tillfällen. Vid övriga provplatser gjordes bestämningen vid endast ett tillfälle.

Inga provplåtar var placerade så att korrosionen i vattenlinjen kunde utvärderas. Mätningar av korrosionsangrepp direkt på vägtrumorna visade dock att korrosionshastigheten är i stort sett 5 gånger högre vid vattenytan än längre ned, alltså i storleksordningen 100 till 300 $\mu\text{m}/\text{år}$.

5.2.4 Danska och norska undersökningar i havsvatten

Korrosionsförhållandena på stålplåtar och stålsponter i marin miljö på den svenska västkusten kan, som sagts nyligen, liknas vid de utmed de danska och norska nordsjökusterna.

I Danmark har Korrosionscentralen i samarbete med Havnekorrosionsutvalget mätt dimensionsminskning till följd av korrosion på stålspontar i ett 20-tal hamnar [26]. Mätprogrammet var mycket systematiskt upplagt. Kvarvarande godstjocklek mättes med ultraljud på en in- och utåtgående spont på olika djup under vattenytan ned till botten, **Fig. 13**. På varje mätnivå registrerades godstjockleken i 6 till 8 mätpunkter, beroende på spontlåsens utformning. På varje kaj företogs mätningar i vertikalled på minst tre ställen. På långa kajer gjordes mätningar på var 50:e meter.



Figur 13. Mätpunkterna och mätnivåerna vid ultraljudsmätning av kvarvarande stål Gods i den danska undersökningen av korrosion på stålspontkajer [26].

Man fann, i likhet med andra undersökningar, att den största korrosionen uppträder strax under vattenytan. I denna zon var den maximala avfrätningen, med några få undantag, mellan 250 och 350 $\mu\text{m}/\text{år}$. På nivån strax under vattenytan var dock skillnaden ganska stor mellan största och minsta avfrätning på en och samma spontkaj, **Tabell 13**. Längre ner på sponterna var korrosionen betydligt mindre. I ett par fall var korrosionen så stor som 500 $\mu\text{m}/\text{år}$ strax under vattenytan, vilket tillskrivs speciella lokala korrosionsförhållanden som orsakats genom avfall från fiskeindustrin på platsen.

Tabell 13. Lägsta och högsta korrosionshastighet (medelavfrätning) strax under medelvattenytan på stålspontkajer i danska hamnar (ref 26).

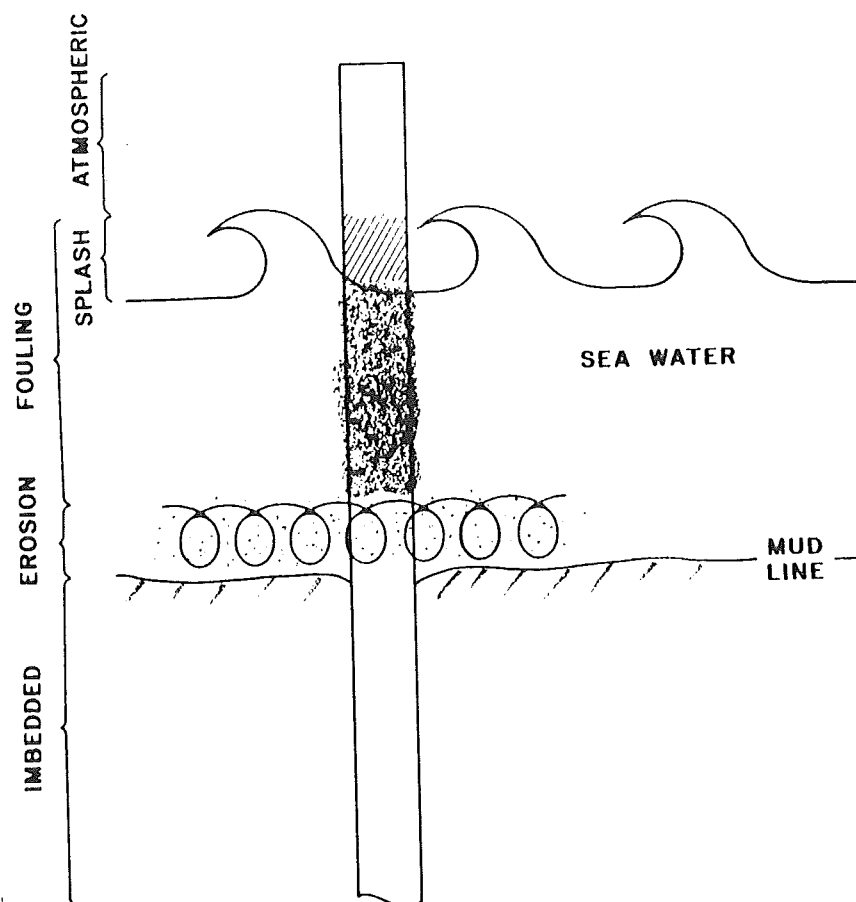
Hamn	Medelavfrätning strax under vattenytan, $\mu\text{m}/\text{år}$
Augustenborg	110-200
Esbjerg	90-300
Fredericia	180-700
Gedser	200-250
Kolding	160-220
Kongebroen ved Middelfart	140-220
København	150-290
Lemvig	110-300
Ved Masned Sundbroen	350
Middelfart	250-280
Nordby, Fanø	200
Nykøbing F	150-300
Ved Oddesundsbroen	500
Rørdal	150-200
Skovshoved	120-400
Thyborøn	150-220
Århus	120-280

I Norge [21] har man också mätt korrosionen på pålar och sponter i ett flertal hamnar. Den maximala avfrätningen där var av samma storleksordning och påträffades i samma positioner i förhållande till vattenytan som i de danska undersökningarna. Vid de norska mätningarna fann man i en del fall hög korrosionshastighet, upp till $300 \mu\text{m}/\text{år}$, nära botten. Det är möjligt att detta sammanhänger med starka undervattensströmmar med syrerikt vatten utmed den norska nordsjökusten. Detta förhållande är känt från korrosionsundersökningar på norska offshore-plattformar. Riktigt så starka undervattensströmmar förekommer inte på den svenska västkusten.

5.2.5 Amerikanska undersökningar i havsvatten

Escalante m fl [27] genomförde på 1960- och 1970-talen en omfattande undersökning med ett 30-tal rostskyddsmålade och ett par katodiskt skyddade stålplåtar som stått 8 år i havsvatten ca 100 m ut från stranden i Virginia, USA. Plåtarna (H-balkar och grova stålrör) var slagna sex meter ned i den sandiga havsbotten och de sträckte sig tre meter genom vattnet ett stycke upp ovanför havsytan. Det var i första hand målningssystemens skyddseffektivitet i de tre medierna som undersöktes men de fyra nakna stålplåtar som användes som referensplåtar ger värdefull information om korrosionshastigheter. Skyddseffektiviteten hos några målningssystem behandlas i avsnitt 6.2.2 "Rostskyddsmålning".

De djupaste angreppen uppstod vid högsta medelvattenytan (HVM) och däröver samt vid havsbotten, **Fig. 14a** och **14b**. Angreppen vid HVM tillskrivs de aggressiva förhållandena som alltid uppstår i skvalpzonen till följd av blötning-avrinning-blötning etc. Angreppen vid botten tillskrivs en erosionseffekt från den fram- och tillbakarullande bottensanden. Med botten av annat slag, t ex dy, uppstår inte denna typ av angrepp. Korrosionshastigheten i de olika



Figur 14a. Korrosionsförhållandena som de oskyddade stålplåtar utsattes för i en amerikansk korrosionsundersökning av plåtar i marin miljö, enligt Escalante [27]. Se även FIG 14b.

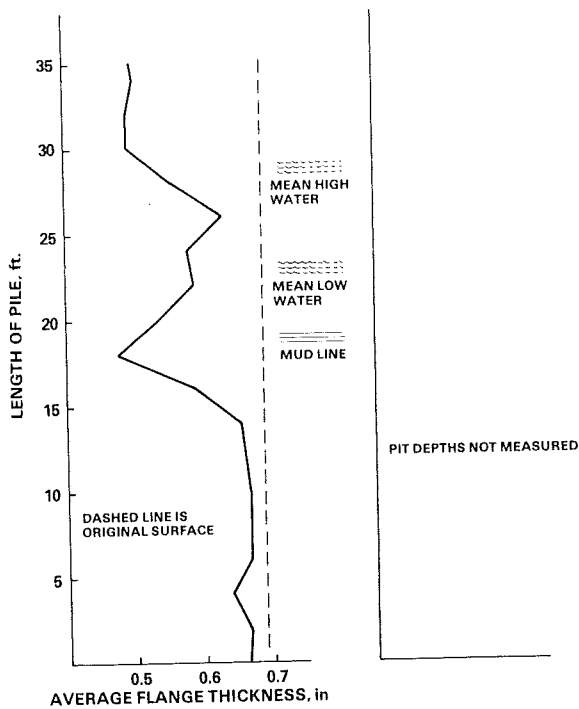
zonerna är sammanställd i **Tabell 14**. Av **Fig. 14b** framgår även största lokala frätdjup (i tum) i de olika zonerna efter 8 år.

Edwards [28] genomförde i början av 1960-talet en undersökning av korrosionen på stålsponter som stått exponerade 19 år i åtta olika hamnar i USA. Medelavfrätningen (både som medelvärde av samtliga spontplankor och som maximal medelavfrätning) visas i **Fig. 15**. Den största medelavfrätningen i de olika zonerna är sammanställd i **Tabell 15**. Kurvan för medelvärdet av samtliga mätningar i figuren visar att medelavfrätningen kan vara betydligt lägre än den maximala medelavfrätningen.

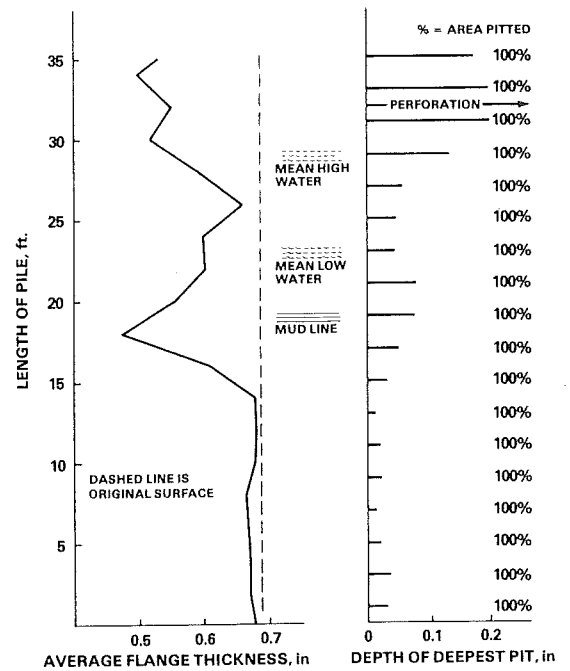
Tabell 14. Medelavfrätningen på stålplåtar i havsvatten i Virginia, USA (ref 27).

Zon	Medelavfrätning, $\mu\text{m}/\text{år}$
Skvalpzonen	200-300
Undervattenszonen	100-200
Vid botten (erosion)	250-350
I bottensanden	≤ 50

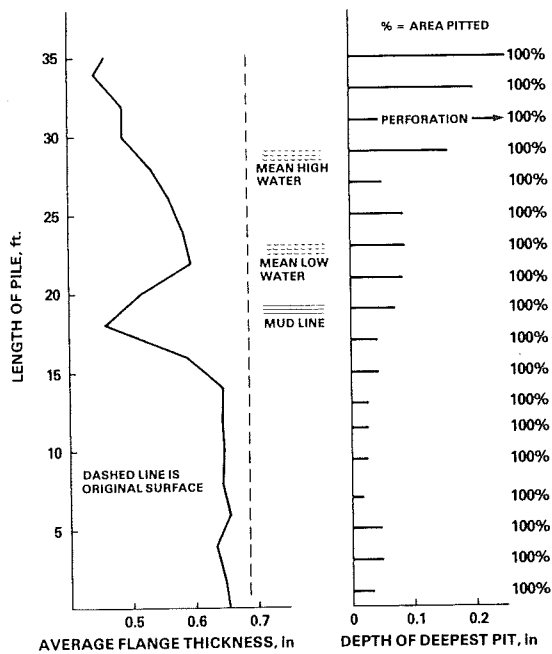
1A BARE CARBON STEEL



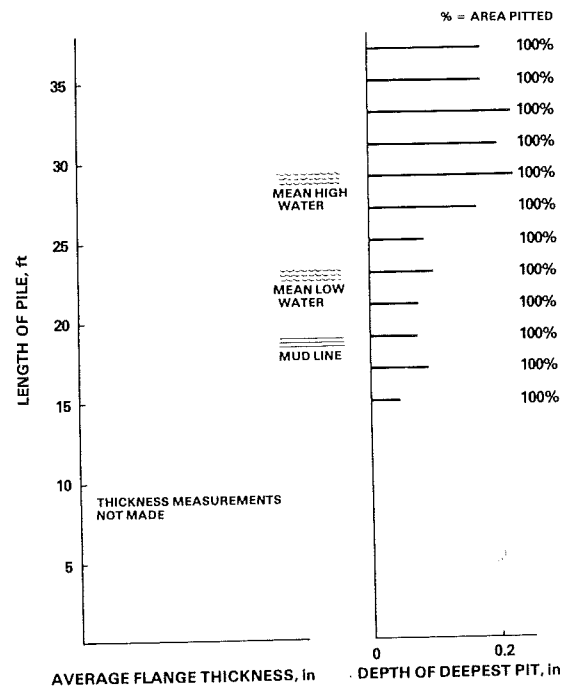
30A BARE CARBON STEEL



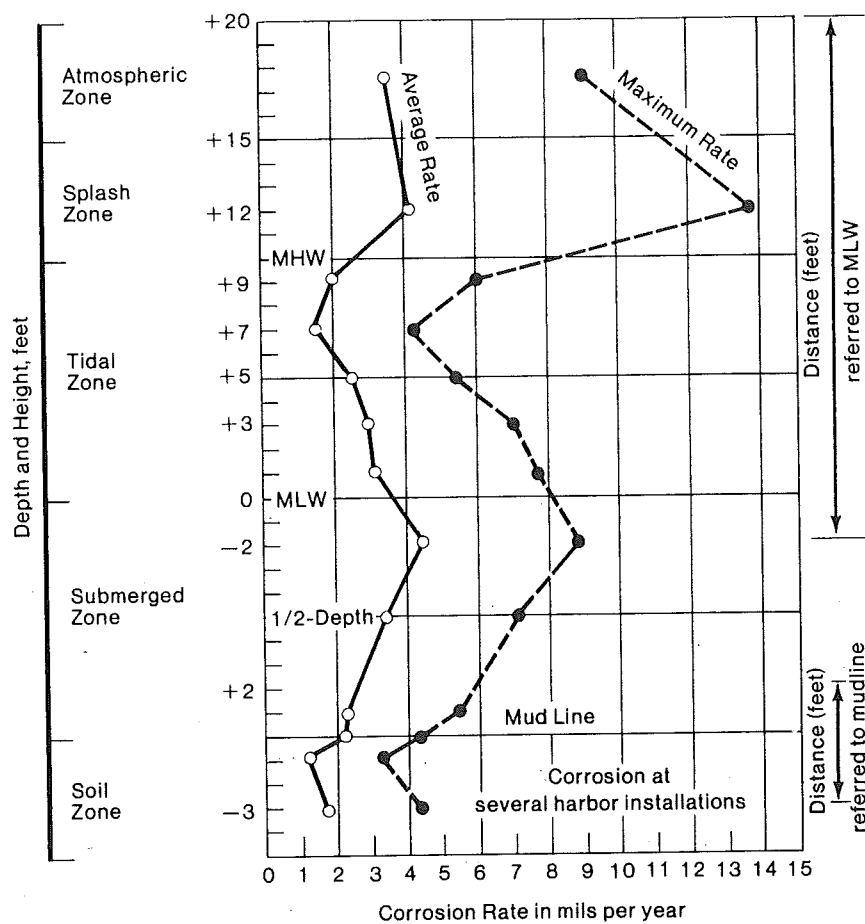
31A BARE CARBON STEEL



26A BARE CARBON STEEL (PIPE)



Figur 14b. Dimensionsminskning till följd av korrosion samt maximala frätgropsdjupet på de fyra oskyddade stålplåarna (H-profil och stål rör) i en amerikansk korrosionsundersökning i marin miljö, enligt Escalante [27]. Se även FIG 14a. (ft=feet=0,30 m. in=inch=25 mm)



Figur 15. Medelavfrätningen på stålspons i åtta amerikanska hamnar, enligt Edwards (ref 28). Helden linje: medelvärde av samtliga mätningar. Streckad linje: största uppmätta medelavfrätning på en enskild sponsplanka. (1 mils = 25 μm).

Tabell 15. Största medelavfrätning som påträffades på stålsponter i åtta hamnar i USA [28].

Zon	Största medelavfrätning, $\mu\text{m}/\text{år}$
Skvalpzonen	350
Undervattenszonen	230
I bottensedimentet (nära botten)	100

5.2.6 Brittisk undersökning i havsvatten

Morley [29] har åt British Steel Corporation sammanställt ett stort antal mätningar av korrosionen på stålplåtar och stålsponter i hamnar runt om i Storbritannien, se **Fig. 16** och **17**. Diagrammen i figurerna visar fördelningen av korrosionshastigheter som uppmätts i respektive zon. Medelvärde av samtliga mätvärden samt högsta korrosionshastighet i 95 % av samtliga mätningar i respektive zon har sammanställts i **Tabell 16**.

5.2.7 Japansk undersökning i havsvatten

I en handbok utgiven av Japanese Association for steel pipe piles (se kapitel 7) refereras japanska undersökningar av korrosionen på stålplåtar och stålsponter som stått flera decennier i sju olika hamnar i Japan. Resultaten är sammanfattade i **Tabell 17**.

5.2.8 Tysk undersökning i söt- och havsvatten

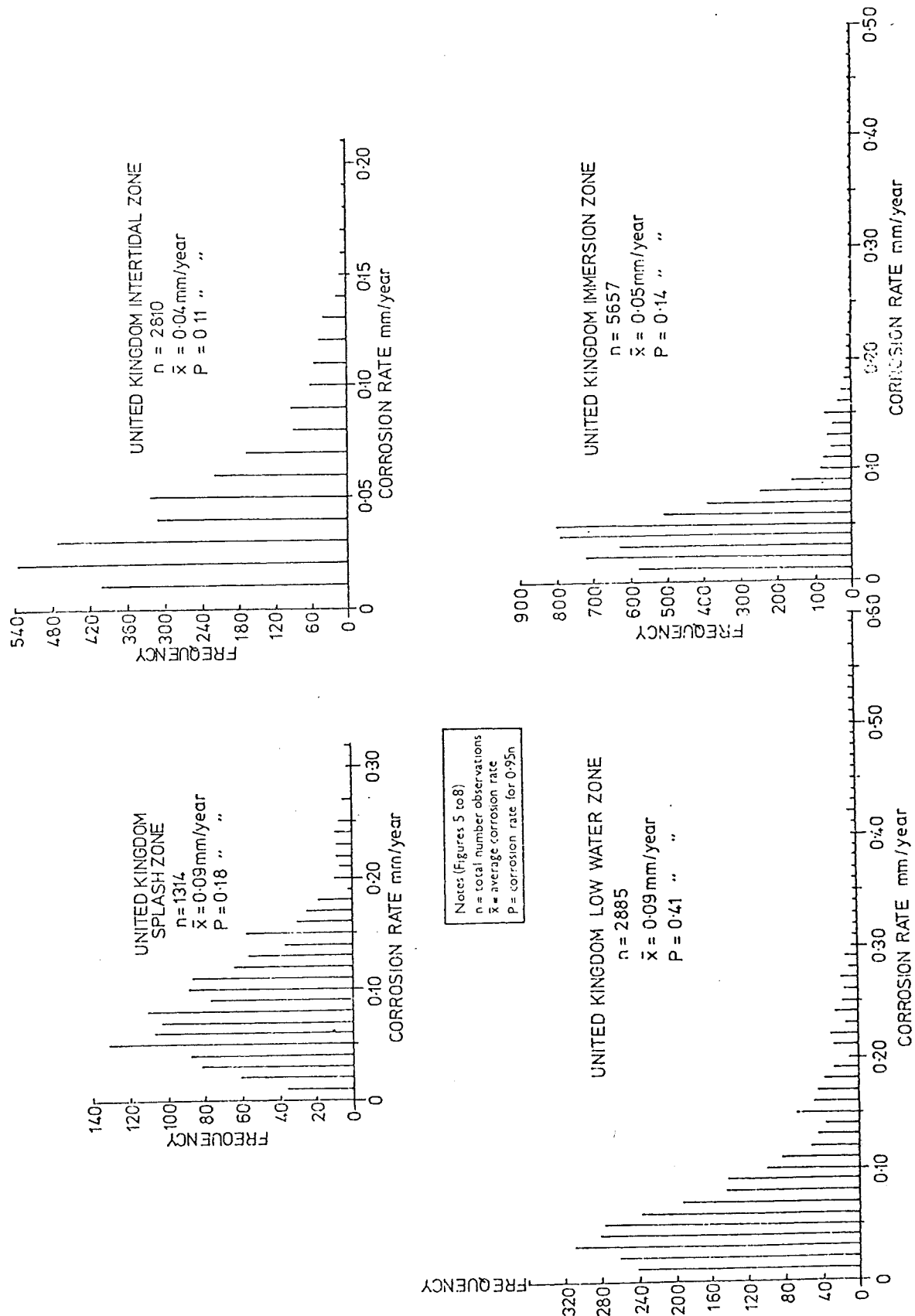
Girnau [30] vid Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen, har i en mycket omfattande litteratursammanställning angående korrosionsskydd av bärande stålkonstruktioner sammanfattat resultaten från olika tyska korrosionsundersökningar på spontkajer. I undersökningarna ingick elva spontkajer i havsvatten i hamnar på tyska nordsjö- och östersjökusterna (Wilhelmshaven, Emden, Bremerhaven, Cuxhaven, Amrum och Kiel) samt nio spontkajer i sötvatten i tyska flod- och kanalhamnar (Ruhr, Lippe, Wesel, Weser och Ems).

Mätning av kvarvarande godstjocklek gjordes i vissa fall på hela spontplankor som dragits upp och i andra fall på delar som sågats ur befintliga spontplankor. Intressant med dessa undersökningar är att korrosionen mättes inte bara på olika djup under vattenytan utan också i luftzonen strax ovan vattenytan. Undersökningarna utfördes i huvudsak under 1950- och 1960-talen. Sponternas ålder vid undersökningstillfällena varierade mellan 20 och 50 år i samtliga fall utom två där åldern var 6 respektive 8 år.

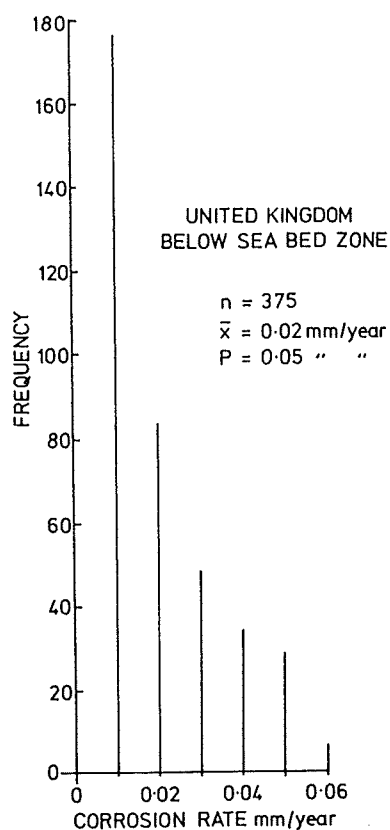
De tyska mätningarna visar, i likhet med vad som framkommit i de andra refererade undersökningarna, att de djupaste korrosionsangreppen uppstår i och strax under vattenytan. Medelavfrätningen i denna zon varierade mellan 70 och 250 $\mu\text{m}/\text{år}$ i havsvatten och mellan 10 och 85 $\mu\text{m}/\text{år}$ i sötvatten. Genomgående, i samtliga zoner, var medelavfrätningen i sötvattenmiljöer lägre än i havsvattenmiljöer. Resultaten är sammanställda i **Tabell 18**.

5.2.9 Holländsk undersökning i havsvatten och bräckt vatten

Det holländska forskningsinstitutet Metaalinstituut TNO har, på uppdrag av Commission of the European Communities - technical steel research programme, mätt korrosionen på stålspontkajer i åtta holländska nordsjöhamnar [31]. Sju hamnar var belägna i havsvatten (salthalt 2,8-3,1 % NaCl) och en i bräckt vatten (salthalt 1,8 % NaCl). Kvarvarande godstjocklek mättes med ultraljudmätare antingen in situ på befintlig stålspons eller på uppdragna spontplankor. Stålsponternas ålder vid undersökningstillfällena varierade mellan 15 och 43 år. Uppmätta korrosionshastigheter framgår av **Tabell 19**.



Figur 16. Korrosionshastigheten på stålplåtar och stålspont i brittiska hamnar baserade på ett stort antal mätningar, enligt Morley (ref 29). Värderna anges för skvalpzonen, tidvattenzonen, lågvattenzonen och undervattenzonen.



Figur 17. Korrosionshastigheten på den del av stålplåtar och stålspont som stått i bottensediment i brittiska hamnar, enligt Morley [29].

Tabell 16. Korrosionshastigheter på stålplåtar och stålspont i olika hamnar i Storbritannien [29].

Zon	Korrosionshastighet, $\mu\text{m}/\text{år}$		Antal mätpunkter
	medelvärde ¹⁾	största värde i 95% av mätningarna ²⁾	
Skvalpzonen	90	180	1314
Tidvattenzonen	40	110	2810
Lågvattenzonen	90	410	2885
Undervattenzonen	50	140	5657
I bottensedimentet (nära botten)	20	50	375

1) Medelvärde av samtliga mätningar i respektive zon

2) I 5% av mätningarna i respektive zon var korrosionshastigheten större än detta värde

Tabell 17. Medelavfrätningen på stålplåtar och stålsponter i olika japanska hamnar.
(ref Handbok från Japanese Association for Steel Pipe Piles)

Zon	Medelavfrätning, $\mu\text{m}/\text{år}$
Skvalpzonen	100–270
Lågvattenzonen	50–110
Undervattenzonen	40–130
I bottensedimentet	20

Tabell 18. Medelavfrätningen i olika zoner på tyska spontkajer i elva havsvattenhamnar och nio sötvattenhamnar [30].

Zon	Medelavfrätning, $\mu\text{m}/\text{år}$	
	Havsvatten	Sötvatten
Atmosfärszonen	35-100	10-50
Skvalpzonen	70-250	10-85
Undervattenzonen	40-100	10-35
I bottensediment	10-20	15

Tabell 19. Medelavfrätningen i olika zoner på åtta holländska stålsponskajer i havsvatten och bräckt vatten [31].

Zon	Medelavfrätning, $\mu\text{m}/\text{år}$
Atmosfärszonen	50-70
Skvalpzonen	120-270
Undervattenzonen	25-90
I bottensediment	15

Några av slutsatserna var:

- Livslängden hos oskyddade stålspontkajer bestäms av korrosionshastigheten i och strax under medellågvattenytan.
- Är spontkajens baksida utfylld med jord är korrosionen försumbar på denna sida av spontan.
- Korrosionen är inte mindre på stålspont av s k rosttrögt stål (kolstål med liten koppartillsats, ca 0,4 % Cu) än den är på spont av vanligt kolstål.
- Vattnets salthalt, som i denna undersökning varierade mellan 1,8 och 3,1 % NaCl, hade ingen märkbar inverkan på korrosionshastigheten.

5.2.10 Summering

Korrosionen på stålplåtar och stålspont i jord och vatten är relativt väl kartlagd genom flera systematiska långtidsundersökningar där man mätt på plåtar och spontplankor som stått länge i jord eller i sötvatten eller saltvatten.

I kapitlet refereras sex större undersökningar med plåtar eller provstänger som stått neddrivna ett större antal år i ostörd jord under väldefinierade förhållanden. Därutöver refereras två undersökningar med nedgrävda stålprover där undersökningsprogrammen varit så utformade att resultaten är tillämpliga på stålplåtar som står i jord som grävts upp och sedan återfyllts och packats kring plåtarna. I den ena undersökningen ingick nedgrävda kolstålplåtar och i den andra vertikalt nedgrävda kolstålstänger. Samtliga refererade undersökningar omfattar ett mycket stort antal observationer.

Resultaten från jordundersökningarna visar genomgående att grundvattenytans läge och därmed jordens luftningsgrad har en dominerande roll som bestämmande parameter för korrosionen på stålplåtar. Under grundvattenytan är medelavfrätningen normalt liten - sällan mer än 20 µm/år, och oftast betydligt lägre. Vidare är lokala korrosionsangrepp av betydelse mycket sällsynta ett stycke under grundvattenytan.

I och ovan grundvattenzonen är medelavfrätningen vanligen något högre - dock sällan högre än 40 µm/år. Däremot kan lokala angrepp, med betydligt högre korrosionshastighet än medelavfrätningen, uppstå i och ovan grundvattenytan. I två svenska undersökningar med neddrivna stålplåtar respektive vertikalt nedgrävda stålstänger var korrosionshastigheten i de djupaste lokala angreppen ca 200 µm/år i den ena undersökningen och ca 80 µm/år i den andra. Observationerna är dock för få för att det skall vara möjligt att med någon större säkerhet ange typiska värden på korrosionshastigheten i sådana lokala angrepp. Denna fråga behöver undersökas ytterligare.

Vidare refereras i kapitlet tio större korrosionsundersökningar på stålplåtar och spontplankor som stått exponerade ett större antal år i olika vattenmiljöer. De flesta undersökningarna är gjorda i havsvatten, men några har också utförts i sötvatten och bräckt vatten. En undersökning har gjorts i vattendrag med strömmande sötvatten.

Av undersökningarna framgår det att i samtliga vattentyper är de djupaste korrosionsangreppen koncentrerade till i och ikring vattenlinjen. I undervattenzonen är angreppen i allmänhet betydligt mindre djupa. Nere i bottensedimentet är korrosionen liten och av samma storleksordning som i jord på land. I luftzonen är korrosionen också mindre, men inte utan betydelse. Typiska värden på medelavfrätningen i de olika korrosionszonerna på stålplåtar och stålspons i havsvatten är 100 $\mu\text{m}/\text{år}$ i atmosfärszonen, 300 $\mu\text{m}/\text{år}$ i skvalpzonen, 100 $\mu\text{m}/\text{år}$ i undervattenzonen och 50 $\mu\text{m}/\text{år}$ i bottensedimentet. Motsvarande värden i icke strömmande sötvatten är 50, 200, 100 och 20 $\mu\text{m}/\text{år}$. För mer detaljerad information om storleken på medelavfrätningen i olika vattenmiljöer och hur värdena har tagits fram hänvisas till kapitlets referat av undersökningarna.

6. Åtgärder mot korrosion

Av föregående kapitel framgick det att avfrätningen är mycket liten med tiden på oskyddade stålplåtar som slås i jord. Eftersom stålplåtar i jord förutsätts få lång livslängd - storleksordningen 100 år - tar man emellertid i Sverige enligt Bestämmelser för Stålkonstruktioner, BSK hänsyn till korrosionen vid projektering och utförande av grundläggning med stålplåtar. Detta gäller även för stålplåtar och stålsplint i vatten. Hänsyn till korrosionen kan tas på principiellt två skilda sätt. Det ena innebär att stålet tillåts rosta och att en rostmån runt om pålens tvärsnitt räknas bort vid beräkning av pålens bärförmåga. Det andra sättet innebär att pålen korrosionsskyddas och därigenom hindras från att rosta. I vissa fall kombineras de båda metoderna.

I texten hänvisas till olika standarder, anvisningar och handböcker. Dessa är sammanställda i kapitel 7.

6.1 Rostmån

Tillämpning av rostmån ("korrosionstillägg") innebär, som sagts nyligen, att man på projekteringsstadiet vid beräkning av pålens lastupptagning tar hänsyn till att en del av godset kommer att rosta bort under pålens livslängd. En del av godset runt pålens hela tvärsnitt räknas alltså bort. Vid tillämpning av rostmån är det nödvändigt att i varje enskilt fall göra en bedömning av väntad korrosionshastighet och att fastställa pålens avsedda livslängd.

Rostmånen storlek beräknas enligt:

Rostmån (mm) = väntad korrosionshastighet (mm/år) x avsedd livslängd (år).

Vid beräkningen används vanligen korrosionshastigheten i form av största medelavfrätning.

Tillämpning av rostmån är den vanligaste och enklaste åtgärden mot korrosion på stålplåtar och stålsplint i jord. I Vägverkets BRONORM 88 anges att stålplåtar som drivs ned alltid skall ha en rostmån på minimum 2 mm, som ett grundskydd, oavsett om pålarna är försedda med något annat korrosionsskydd.

I vissa fall kombineras rostmånen med någon annan skyddsåtgärd, till exempel skyddsbeläggning. I en del fall, när pålen är försedd med ett högvärdigt och effektivt korrosionsskydd, kan rostmånen storlek reduceras. Hur stor reduktion som kan tillåtas måste bedömas med hänsyn till jordens/vattnets aggressivitet, det aktuella skyddssystemets effektivitet och till de lokala förhållandena, t ex om det i stenig och blockig jord finns risk för större mekaniska skador i en eventuell skyddsbeläggning och som kan ha praktisk inverkan på pålens korrosion.

Vid användning av rörpålar, som saknar invändigt skydd och som kan bli helt eller delvis vattenfyllda, måste hänsyn tas även till den invändiga korrosionen. I sådana fall måste man även räkna med en "invändig" rostmån eller vidta någon annan effektiv skyddsåtgärd, till exempel fylla rörpålen med cementbruk (se vidare avsnitt 6.7).

Det finns inga allmänt accepterade svenska anvisningar för val av storlek på rostmänen på stålplåtar vid olika jordförhållanden och byggnadsverk. I **Tabell 20** visas en sammanställning av olika japanska anvisningar för val av storlek på rostmänen.

Tabell 20. Sammanställning av japanska anvisningar för storlek på rostmänen på stålplåtar vid grundläggning av olika typer av byggnadsverk. (Översättning av tabell i japansk handbok Steel pipe pile corrosion control.)

Nr	Typ av byggnadsverk och myndighet	Anvisning för storlek på rostmån på icke korrosionsskyddade stålplåtar		
1.	Byggnadsverk i hamnar	Medium		Antagen korrosionshastighet vid beräkning av rostmån
		Havsvatten	Ovan HWL HWL → botten I bottensedimentet	0,3 mm/år 0,2 mm/år 0,05 mm/år
		Jord	Ovan GW-ytan Under GW-ytan	0,05 mm/år 0,03 mm/år
		Invändiga mantelytan på stålörspålar antages icke vara utsatta för korrosion (stålplåte fylld med betong)		
2.	Vägbroar (Japan Road Association)	I de fall grundläggningen inte påverkas av havsvatten, avloppsvatten från industri eller annat aggressivt vatten och om ingen särskild korrosionsundersökning utförts: tillämpning av 2 mm rostmån på stålplåtar i jord med sött grundvatten.		
3.	Brofundament etc. (Japan National Railway)	<u>Rostmån i jord</u> Stålrörspåles utsida: 2 mm Stålrörspåles insida: 0,5 mm Stålpåles stållyta i kontakt med betong (täcksikt ≥6 mm) 0 mm		
		Rostmänen anses vara förbrukad efter 80 år i måttligt korrosiv jord.		
4.	Byggnader (Architectural Institution of Japan)	Rostmån beräknad på korrosionshastigheten 0,02 mm/år är i allmänhet tillräcklig på stålplåtar i jord.		
5.	Byggnader (Japan Housing Corp.)	<u>Rostmån i jord</u> Stålrörspåles utsida: 2 mm Stålrörspåles insida: 0 mm (pålen fylld med betong) (utom i spec fall)		
6.	(The City of Tokyo)	a) Vid beräkning av rostmån på stålörspålars utsida antages dimensionerad livslängd vara 70 år. b) Rostmån på stålörspålens insida skall vara 0,5 mm.		
7.	(Housing Bureau, Ministry of Construction)	a) Rostmänen beräknas enligt: 80 x korrosionshastighet (µm/år) som fastställts genom korrosionsmätning i jord på platsen. b) Om ingen korrosionsmätning utförts tillämpas rostmänen ≥2 mm på stålplåtar i jord.		

I rapportens APPENDIX 1 har olika jordarters och vattentypers korrosivitet mot stålpålar och stålspons klassats och uttryckts som medelavfrätning. Avsikten är att klassningen, i väntan på allmänna svenska anvisningar, skall utgöra hjälpmedel vid dimensionering av rostmån på stålpålar i svenska jordar och vatten.

6.2 Polyetenmantel

6.2.1 Historik

Stålrörspålar, både av typen slanka och grova, kan korrosionsskyddas effektivt genom att en polyeten(PE)mantel appliceras på stålrören på fabrik. Tekniken att belägga stålrör med en polyetenmantel utvecklades under 1960-talet för att tillmötesgå naturgasbranschens önskemål om en mekaniskt hårdig, åldringsbeständig och effektivt skyddande beläggning för jordförlagda naturgasrörledningar. Tidigare hade man använt stålrör med en tjock och förhållandevis mjuk beläggning av jute- eller glasfiberarmerad bitumen (en asfaltsprodukt) eller stenkolsolja. På 1970-talet dominerade PE-belagda rör helt på kontinenten och idag förekommer det knappast nya stålrör med bitumen eller stenkolsolja i Mellan- och Nordeuropa.

Grova stålrörspålar med PE-mantel började tidigt användas i Japan och Sydostasien för grundläggning av t ex hamnkajer, pirlar och brofundament. De senaste åren har flera broar i Norden (främst i Finland) grundlagts med grova stålrörspålar varav ett par med PE-mantel. Det vanliga är att endast det översta röret (rörlängd 12-16 m) i pålen behöver vara försett med PE-mantel medan resten av rören kan vara nakna eftersom korrosionen på större djup normalt är liten.

Slanka stålrörspålar (diameter mindre än 100 mm) med PE-mantel har använts i stor skala i Sverige sedan mitten av 1970-talet. I dessa pålar har samtliga rör PE-mantel. Skarvhyllsorna är varmförzinkade (skiktjocklek 80 µm) och kan dessutom erhållas med epoximålning utanpå zinksiktet. Pålspetsen är epoximålad (2 skikt). Pålen används främst under byggnader.

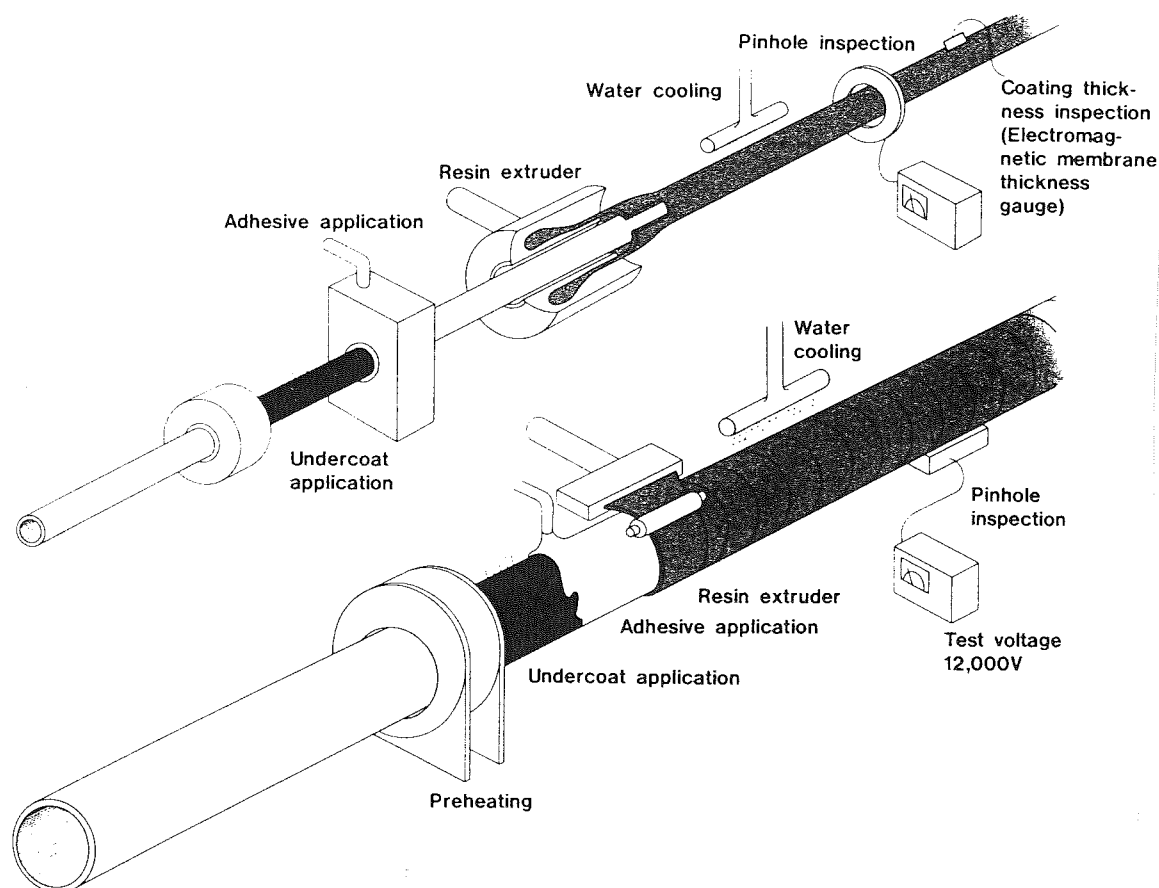
6.2.2 Applicering av PE-mantel

PE-manteln appliceras på stålröret vanligen genom ett extruderingsförfarande. Manteln kan även byggas upp genom att PE-pulver smälts och sintras fast på ett uppvärmt stålrör. Sintringsmetoden är äldre och används mera sällan idag. I båda fallen rengörs stålytan noggrant från olja, fett och smuts innan belägningsoperationen. Därefter blåstras ytan till noggrannhetsgrad Sa 2½ enligt ISO 8501/1 (Svensk Standard SS 05 59 00). Applicering av PE-manteln sker omedelbart efter rengöring och blästring.

Vid extruderingsförfarandet erhålls en 2-skiktsbeläggning. Den appliceras genom att ett lim först läggs på det blåtrade och förvärmade (cirka 200 °C) stålröret och omedelbart därefter extruderas smält polyeten över ytan. Färdig skiktjocklek är 1,8-3,7 mm beroende på rördiameter. Ju större och tyngre rör desto större skiktjocklek.

För att förbättra vidhäftningen mellan polyetenet och stålytan läggs numera ett epoxiskikt direkt på stålytan varvid en 3-skiktsbeläggning erhålls. Beläggningssystemet är uppbyggt av en tunn primer av epoxifärg eller pulverepoxi närmast den blåtrade och förvärmade (cirka 210 °C) stålytan. Därpå ligger ett tunt limskikt och ytterst extruderad polyeten. Epoxins skiktjocklek

är cirka 50 μm , medan polyetenets skiktjocklek är samma som vid vanligt extruderad polyeten. Detta beläggningssystem är relativt nytt och anses vara det mest högklassiga genom att både polyetenets och epoxins fördelar utnyttjas. Beläggningen används där särskilt höga krav ställs på PE-manteln vidhäftning och reptålighet. Med epoxiskiktet nästan fördubblas vidhäftningen; från 70 till 120 N/cm [32]. Beläggningsproceduren visas i **Fig. 18**.



Figur 18. Förfarandet vid applicering av PE-mantel med underliggande epoxiprimer på stål rör [35]. Överst slangextrudering på klenare rör och underst lindningsextrudering på grövre rör.

Krav på utgångsmaterial, färdig skiktjocklek, porfrihet och hårdighet mot mekanisk och kemisk påverkan samt mot UV-strålning är reglerade i Tysk standard DIN 30 670 och i Fransk standard NF A 49-705 och 49-710. Utarbetande av europeisk standard (EN) pågår. ISO-standard finns inte men initiativ till sådan har tagits.

6.2.3 Skyddsförmåga

En intakt PE-mantel ger ett fullständigt skydd mot korrosionsangrepp på stålroret. Polyetenets åldringsbeständighet (hårdighet mot nedbrytning) är mycket god. Någon avflagnings, av den typ som kan ske hos rostskyddsfärger, förekommer inte. Baserade på accelererade laboratorieprovningar finns det uppgifter [33] om att det tar i storleksordningen 75-100 år innan molekylstrukturen kan väntas börja förändras i den polyeten som används för stål rör. För stål rorsplåtar är således PE-manteln vidhäftning till stålroret samt hårdigheten mot repning och avskalning, vid den påfrestning pålen utsätts för vid neddrivningen, av särskild betydelse.

6.2.4 Härdighet mot repning

Von Baeckmann [34] gjorde en omfattande undersökning av uppkomsten av mekaniska skador i skyddsbeläggningen på stålror i rörledningar som korsar vägar och järnvägar och där stålroren hade pressats genom väg- respektive järnvägsbanken med pressborrningsförfarandet. Undersökningen gjordes på elektrokemisk väg och innebar att en likström matades genom jorden till röret tills stålets elektrokemiska potential hade sänkts från korrosionspotentialen (vilopotential) till den skyddspotentialen -850 mV (mätt med en koppar/kopparsulfatelektrod) varvid strömtätheten räknad på total röryta noterades, se **Tabell 21**. Eftersom likströmmen endast flyter till ståltytor som blottats genom mekaniska skador och eftersom man vet ungefär hur stor strömtäthet som krävs på blottat stål för den aktuella potentialsänkningen har det i föreliggande undersökning varit möjligt att beräkna hur stor ståltyta som är blottlagd i genomsnitt per m² PE-belagd ståltyta. Vid beräkningarna antogs strömtätheten 50 mA/m² blottlagt stål. Resultatet har förts in till höger i **Tabell 21**.

Av tabellen framgår det att på de sammanlagt 60 rör som hade PE-mantel och som pressats genom jord med lera, sand och grus utan block var den blottlagda ståltytan i skrapskador i medeltal endast 8-10 mm² skada/m² PE-belagd röryta. Endast 0,0008-0,001 % av PE-manteln var alltså repad ända in till stålet, i medeltal räknat på samtliga rör. På de sammanlagt sju PE-mantlade rör som pressats genom blockig jord var ståltytan blottlagd i medeltal i 160-600 mm² skada/m² PE-belagd röryta. Här var alltså 0,016-0,06 % av PE-manteln repad ända in till stålet, räknat i medeltal på de sju rören, Undersökningen visar att även i svårforcerad, blockig jord blir skadorna ringa i PE-manteln.

I en japansk fältundersökning [35] kontrollerades härdigheten mot repning hos PE-manteln på en rörpåle. En PE-mantlad grov stålrorespåle (diameter 406 mm) slogs genom ett fyllnadslager på sand och silt ned till djupet 11,3 m, varefter pålen drogs upp. PE-manteln undersöktes i mikroskop och med ytråhetsmätare med avseende på repor. Inte någonstans var PE-manteln repad in till stålet. Ca 80 % av reporna var grundare än 0,02 mm. Största enskilda djupet var 0,5 mm. Härdigheten mot intryckning hade inte försämrats hos PE-manteln genom påslagningen. Sammanfattning av resultaten ges i **Figur 19**.

Påslagning i grusig eller stenig jord ger förmodligen större mekaniska skador än de som uppstod i de nyssnämnda undersökningarna. Undersökningarna visar dock att PE-manteln har så god vidhäftning till stålroret att den, trots den kraftiga nötningen, inte kanar av helt från stålroret, vilket har befarats av en del.

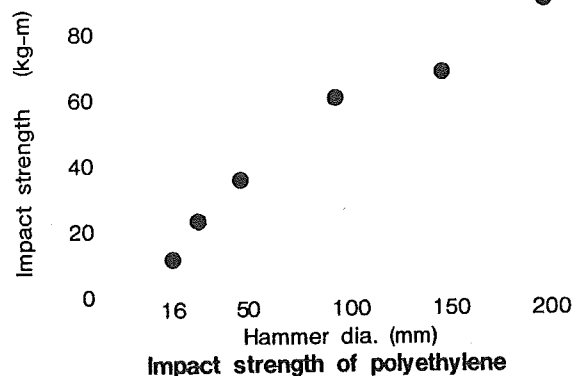
6.2.5 Betydelsen av mekaniska skador

En intressant fråga är hur korrosionen utvecklas i en mekanisk skada i PE-manteln, så djup att stålet är blottlagt. Från åtskilliga undersökningar på jordförlagda stålror med skrapskador i PE-manteln vet man att korrosionsangrepp uppstår endast på den blottade ståltytan. Om PE-manteln sitter fast mot röret runt om skrapskadan sker det alltså inte någon underrostning under PE-beläggningen. PE-belagda stålror med epoxiprimer är särskilt motståndskraftiga mot underrostning. PE-manteln på sådana rör har den egenskapen att den skärs och skjivas sönder endast där den repas, åtminstone att döma av erfarenheterna från jordförlagda rör.

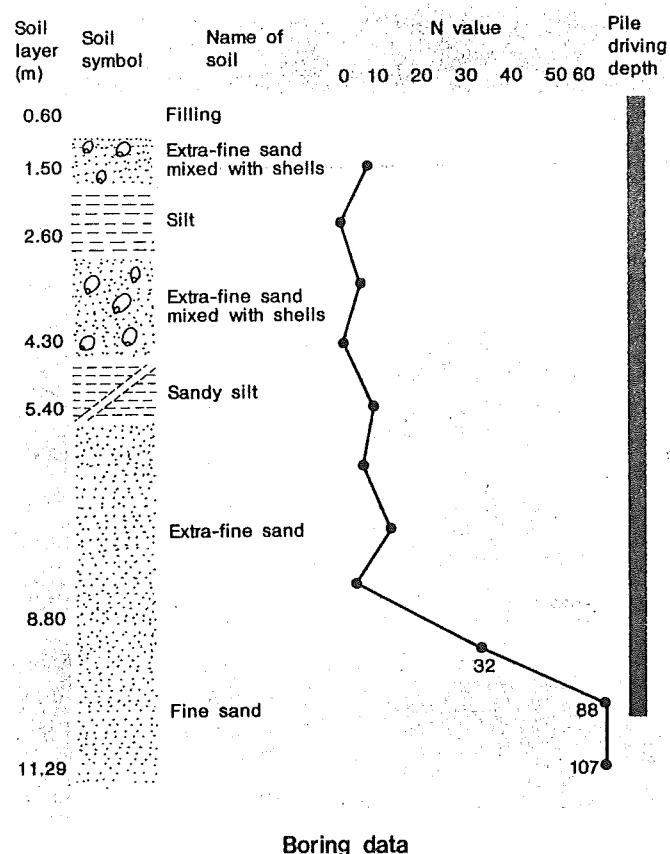
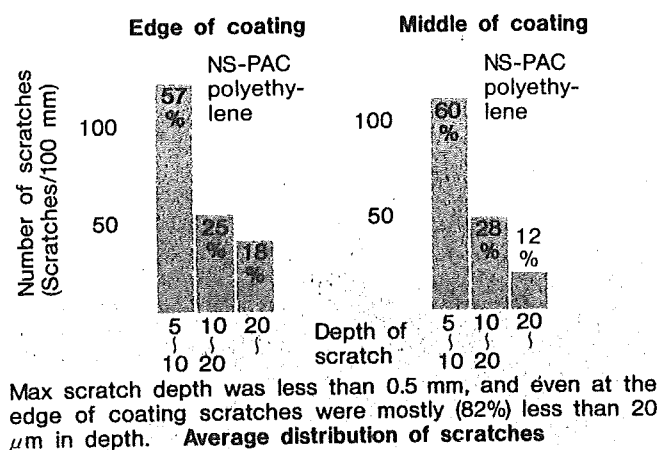
Tabell 21. Medel- och extremvärden för skyddsströmtätheten på skydds- och gasrör pressade genom väg- eller järnvägsbank enligt von Baekmann [34] samt beräknad blottlagd stålyta i mm², på avskrapade ställen, per m² skyddsbelagd röryta.

Antal rör	Rördiameter (mm)	Rörlängd (m)	Beläggning	Jordart	Skyddsströmtäthet (µA/m ² röryta)			Beräknad avskrapad yta per m ² röryta (mm ² skada per m ² röryta)		
					Medel	Min	Max	Medel	Min	Max
2	1000	20-53	Bitumen, 4 mm	Lera, sand	1000	750	1250	20000	15000	25000
1	2000	44	Tjärepoxi, 1,5 mm	Sand	500	—	—	10000	—	—
21	500-900	6-66	Tjärepoxi, 1,5 mm	Sand, lera, grus och berg	600	72	4350	12000	1440	87000
21	600	20-50	PE-sintrad, 3 mm	Sand, lera och grus	0,5	0,01	2,6	10	0,2	52
4	1200	80-120	PE-sintrad utan bento-nitsmörjning	Sten, sand och klipp-block	30	13	47	600	260	940
3	1200	90-100	PE-sintrad med bento-nitsmörjning	Sten, sand och klipp-block	8	5	9,1	160	100	182
39	100-200	10-30	PE-extruderat, 2,3 mm	Sandhaltig lera	0,4	0,01	7	8	0,2	140

1 Impact resistance



2 Resistance to abrasion



Boring data
After an NS-PAC steel-pipe pile of 406.4 mmφ×11,000 mmL was driven into the soil shown in the above boring data and drawn out, the depth and number of scratches were measured using a stereomicroscope and surface roughness tester.

Figur 19. Resultat från japansk undersökning av rep- och nötningståligheten hos PE-mantel på grov stålörspåle neddriven till 11 m djup [35]. Stapeldiagrammet visar fördelningen av repornas djup. Diagrammet till höger visar jordlagerföljden

En följdfråga är om korrosionshastigheten blir högre på stålytan i en beläggningsskada jämfört med om stålörspålen skulle vara obelagd. Genom att PE-manteln med underliggande epoxiskikt har så högt elektriskt motstånd (isolationsmotstånd, r_u , i storleksordningen $10^{10} \Omega \cdot m^2$) kan inte korrosionsströmmen flyta genom beläggningen varför stålytan under beläggningen runt om en beläggningsskada inte blir någon effektiv katodyta som kan underhålla en anodprocess på det blottlagda stålet i beläggningsskadan. Både anod- och katodprocessen sker alltså på den blottlagda stålytan. Detta innebär i sin tur att korrosionshastigheten inte blir större på den blottlagda stålytan i en beläggningsskada än på stålytan på en obelagd stålörspåle.

Ytterligare en fråga av intresse är var på en PE-mantlad stålörspåle de kraftigaste rep-skadorna kan väntas uppstå. Därvid kan man anta att PE-manteln på pålens övre del blir minst skadad eftersom denna del drivs ned sist och därmed också kortast sträcka. Det är också möjligt att den nedre påldelen tillsammans med eventuell pålsko utövar en viss prylverkan på ytligt beläget grövre stenmaterial, varvid detta får mindre nötande och skrapande verkan på det sist neddrivna pålsegmentet. Risken för djupa korrosionsangrepp på en förhållandevis mera skrapad nederdel motverkas av att korrosionen normalt är mindre på större djup.

6.2.6 Katodiskt skydd av stålytan i skador i PE-manteln

Korrosionen på stålytan i mekaniska skador i PE-manteln kan elimineras genom tillämpning av katodiskt skydd (se även avsnitt 6.8). Genom att PE-manteln har så hög elektrisk isolationsförmåga behövs skyddsström endast till stålytor som är blottlagda i mekaniska skador, varför den totala skyddsströmmen blir mycket liten. Därigenom förenklas det katodiska skyddets utformning avsevärt och det krävs betydligt färre skyddsanoder än om plåtarna skulle sakna skyddsbeläggning. Tillämpas skydd med offeranoder blir anodförbrukningen liten på grund av det låga strömbehovet. Kombinationen PE-mantel och katodiskt skydd innebär hög säkerhet mot korrosionsskador.

6.2.7 Skydd av svets skarvar

I de fall två eller flera rör med PE-mantel ingår i en stålrörspåle där stålrören skarvas genom svetsning måste själva svets skarven rostskyddas efter svetsningen. Skarvar på svetsade rörledningar skyddas antingen genom grundmålnings med t ex bitumen och därefter tejpning med PE-tejp (som är svagt uppvärmd för att få den smidig att linda) eller genom påkrympning av en värmekrympfolie av förnätad (X-bunden) PE. I båda fallen torkas och blåstras stålytan innan appliceringen. Vid skyddsisolering på svetsade plåtskarvar torde värmekrympfolie vara att föredra, åtminstone på plåtar som slås i jord, emedan folien har bättre mekaniska egenskaper än tejp. Applicering av krympfolie kräver erfarenhet för att det inte skall uppstå luftfickor.

6.3 Rostskyddsmålning med våtapplicerade rostskyddsfärger

6.3.1 Allmänt om rostskyddssystem

Vid rostskyddsmålning av stålkonstruktioner gäller Bestämmelser för Stålkonstruktioner (BSK), avsnitten 1:23, 8:7 och 9:75. Där ges bland annat exempel på en rad olika färgsystem som är godtagbara i miljöer med olika aggressivitetsgrad. En del av färgsystemen är bitumen- eller tjärbaserade vilka man visserligen har goda tekniska erfarenheter av men som på grund av hälsorisker är på väg att ersättas med mindre hälsofarliga färger.

Vid sk tung rostskyddsmålning (tjocka färgskikt på stora stålkonstruktioner) används därför idag nästan uteslutande färgsystem bestående av ren epoxi eller hartsmodifierad epoxi. Färgerna kännetecknas av att de har mycket god korrosionsskyddsförmåga. Vidhäftningen till stål och hårdheten mot avflagning är god.

Korrosionsinstitutet har givit ut Handbok i rostskyddsmålning som behandlar bland annat olika rostskyddsfärger, krav på utförande av målning, underhåll av målade ytor, ekonomiska aspekter samt upphandling av målningsarbeten.

6.3.2 Förbehandling av stålytan

Kvaliteten på förbehandlingen av stålytan och renheten i den miljö i vilken rostskyddsmålningen sker är av största vikt för erhållande av en högkvalitativ skyddsbeläggning med lång skyddseffekt.

Förbehandling och målning bör ske inomhus i kontrollerad miljö på en fast målningstation. Stålytan rengörs noggrant från olja, fett och smuts. Därpå torrblästras ytan till noggrannhetsgrad Sa 2½ (metallvit yta) enligt ISO 8501/1 (Svensk standard SS 05 59 00). Färgen appliceras genast efter blästringen och efter att blästerdamm har avlägsnats.

6.3.3 Färgernas kombinerbarhet med katodiskt skydd

Vissa rostskyddsfärger kan skadas genom kemisk eller elektrisk inverkan av katodiskt skydd om stålkonstruktionen är försedd med sådant skydd. Dels kan blåsbildning i färgen påskyndas genom elektroosmos. Dels kan vidhäftningen försämrats runt mekaniska skador i färgen genom en katodisk vidhäftningsförlust till följd av det höga pH-värdet som det katodiska skyddet ger upphov till på blottlagda stålytor.

De färgsystem som rekommenderas i denna skrift har mycket hög hårdighet mot dessa fenomen. De kan alltså utan vidare kombineras med katodiskt skydd.

6.3.4 Rostskyddssystem i jord

Val av skyddsfärg

I BSK, avsnitt 8:72, rekommenderas att bärande konstruktioner i jord såsom stålplåtar rostskyddas med en 1-skiktsbeläggning bestående av ett 280 µm tjockt skikt av tjäreepoxi. Ett likvärdigt alternativ är en 2-skiktsbeläggning bestående av varmförzinkning (70 µm) som grundskikt och på denna ett täckskikt bestående av tvåkomponentsepxi eller uretan (80 µm) alternativt tjäreepoxi (200 µm). Även klorkautschuk kan användas som täckskikt.

I Vägverkets Bronorm 88 finns specifikationer för rostskyddsmålning av bärande stålprofiler för neddrivning i jord. Bland andra anges ett målningssystem med lösningsmedelsfattig epoxi, så kallad isbrytarfärg. Systemet består av grundfärg (skiktjocklek minimum 50 µm), mellanfärg (min 125 µm) och täckfärg (min 125 µm). Totala skiktjockleken får inte överstiga 600 µm. Alternativt kan ett målningssystem med lösningsmedelsfri epoxi användas, vilken påföres antingen i ett enda skikt (min 400 µm) eller i två skikt (vardera skiktet min 200 µm). Totala skiktjockleken får inte överstiga 1000 µm. I Bronormen finns godtagna färgprodukter angivna. Endast rostskyddsmålning accepteras inte som fullvärdigt hänsynstagande till korrosionen utan rostmån på minimum 2 mm hos stålprofilen måste också tillämpas.

I Sverige används sällan rostskyddsmålade stålplåtar i jord. Ett exempel är dock pålgrundläggningen som utfördes 1977 av grannfastigheten till MEA på Norrmalmstorg i Stockholm. Den salthaltiga fyllnadsjorden bedömdes vara särskilt korrosiv. Grundläggningen utfördes med 68 direktslagna epoximålade (skiktjocklek 0,30 mm) stål kärnepålar med diameter 140 mm och längd ca 18 m. Pålarna var rostskyddsmålade ned till ca 12 m djup. Pålgrundläggningen försågs även med elektrokemiskt (katodiskt) korrosionsskydd.

Hårdighet mot repning

En intakt epoxibeläggning kan anses ge ett fullständigt skydd under mycket lång tid mot korrosionsskador på en stålplåta i jord. För epoxi och tjäreepoxi är, i likhet med för PE-mantel, hårdigheten mot repning och avskalning därför av särskild betydelse vid bedömning av beläggningens skyddseffektivitet.

Såvitt bekant finns det i litteraturen ingen undersökning av reptåligheten och skyddseffektiviteten hos epoxibeläggning på stålplåtar som slagits i jord på land.

Vid utvärdering av reptålighet i jord kan emellertid den tyska undersökningen [34], som refereras i avsnitt 6.2 om PE-mantel, användas. Av **Tabell 21** framgår det att på de sammanlagt 22 tjärepoximålade rören som pressats genom en väg- eller järnvägsbank var stållytan blottlagd genom skrapning i medeltal 10 000-12 000 mm²/m² målad röryta. 1-1,2 % av tjärepoxibeläggningen var alltså repad ända in till stålet, räknat i medeltal på samtliga rör. Jämfört med PE-mantel har alltså tjärepoxi sämre reptålighet i svärgenomtränglig jord, men avskrapad epoxiyta är fortfarande förhållandevis liten.

Färgsystemens skyddsförmåga

Man kan vänta en viss, om än långsam underrostning av skyddsfärgen runt om repor och andra hanteringsskador. På grund av den låga syrehalten, låga temperaturen och avsaknaden av UV-strålning i jord är dock underrostningen sannolikt långsammare än i vatten. För ett högkvalitativt färgsystem bedöms det ta uppemot 15 till 20 år innan underrostningen har gått så långt att betydande ytor har tappat vidhäftningen till stålet.

Till skillnad från i vatten flagar inte färgen av i jord utan blir sittande kvar med en vattenfylld spalt mellan färg och stållyta. Även då torde färgen ha en viss korrosionshämmande verkan genom färgskiktets bromsande effekt på syrediffusionen in till stållytan. Den allmänna korrosionen under beläggning som tappat vidhäftningen bedöms därför vara något lägre än om stålplåten skulle sakna rostskyddsfärg. På lång sikt bryts dock färgen ned och dess skyddsförmåga upphör.

6.3.5 Rostskyddssystem i vatten

Val av skyddsfärg

Vattenfall AB har lång erfarenhet av tung rostskyddsmålning i söt- och saltvatten. På basis av sina erfarenheter har Vattenfall utarbetat interna Målningsanvisningar för stålkonstruktioner. I dessa rekommenderar man för stål exponerat i både söt- och saltvatten målning med en grundfärg bestående av järnglimmerpigmenterad tvåkomponents epoxifärg och på denna en täckfärg bestående av två lager hartsmodifierad epoxifärg. Båda färgtyperna finns med i BSK. I söt-vatten skall den totala skiktjockleken vara min 280 µm och i saltvatten min 380 µm.

I Norge pågår en omfattande provning av moderna rostskyddsfärger i strömmande sötvatten [36]. Hittills har 5 års exponering utvärderats. Svensk sammanfattning av undersökningen finns i [37]. Den norska undersökningen verifierar Vattenfalls erfarenheter.

Skydd mot mekaniska skador

På alla typer av rostskyddsfärger sker det förr eller senare underrostning med åtföljande färgavflagnings runt mekaniska skador i färgskiktet. Även om de färger som föreslås i detta kapitel har god hårdighet mot underrostning rekommenderas att man hanterar rostskyddsmålade stålplåtar försiktigt i syfte att så långt möjligt undvika skador i färgen. Upptäckta skador bör repareras enligt färgleverantörens anvisningar. Katodiskt skydd har den positiva effekten på dessa färger att det minimerar underrostning.

Is och flytande föremål har en kraftigt nötande påverkan på rostskyddsfärgen på plåtar som står i vatten. Slitage kan elimineras genom att plåten förses med isskydd, t ex i form av en omslutande plåtskärm alternativt ingjutning i betong ned till ca 1 m under lägsta vattenyta.

Färgsystemens skyddsförmåga

Intentionen vid utarbetandet av BSK och Vattenfalls Målningsanvisningar har varit att de färgsystem som rekommenderas skall ge ett effektivt korrosionsskydd i vatten åtminstone ca 15 år. Därefter får man räkna med att färgen har börjat flaga och att det behövs mer eller mindre omfattande reparationsmålning.

Reparationsmålning på plåtar som står i det fria ovan vatten görs på traditionellt sätt med borttagning av löst sittande färg, blästring av nakna stålytor och applicering av ny färg.

Plåtar som står i vatten kan numera också reparationsmålas. På senare tid har det nämligen utvecklats kittliknande färgsystem som kan appliceras under vatten. En dykare blästrar bort rosten på stålytan och för på färgmassan direkt på stålet. Fångdamm och länsugning behövs alltså inte. Någon utvärdering av dessa färgsystems långtidsskyddsverkan har dock inte påträffats i denna utredning.

Någon svensk undersökning av rostskyddsfärger på plåtar i vatten finns inte men den amerikanska undersökningen [27] av skyddsförmågan hos olika rostskyddssystem på plåtar som slagits strax utanför strandlinjen, och som refereras i avsnitt 5.2.5, ger värdefull information om skyddsförmågan hos skyddsfärger i havsvatten och i sandig havsbotten. Skyddseffektiviteten efter ca 10 år hos några typiska färgsystem visas i **Figur 20**, och korrosionsförhållandena på några nakna referensplåtar framgår av **Figur 14**. Skyddsfärgerna är tjärepxi, mastic på fenolbas, aluminiumpigmenterad tjärepxi samt ett system bestående av zinkrik epoxiprimer och tjärepxi som täckfärg. Samtliga färgsystem hade mycket hög skyddseffektivitet i undervattens- och skvalpzoner och i bottenanden. Tjärepxisystemet hade lägre skyddsförmåga i skvalpzonen.

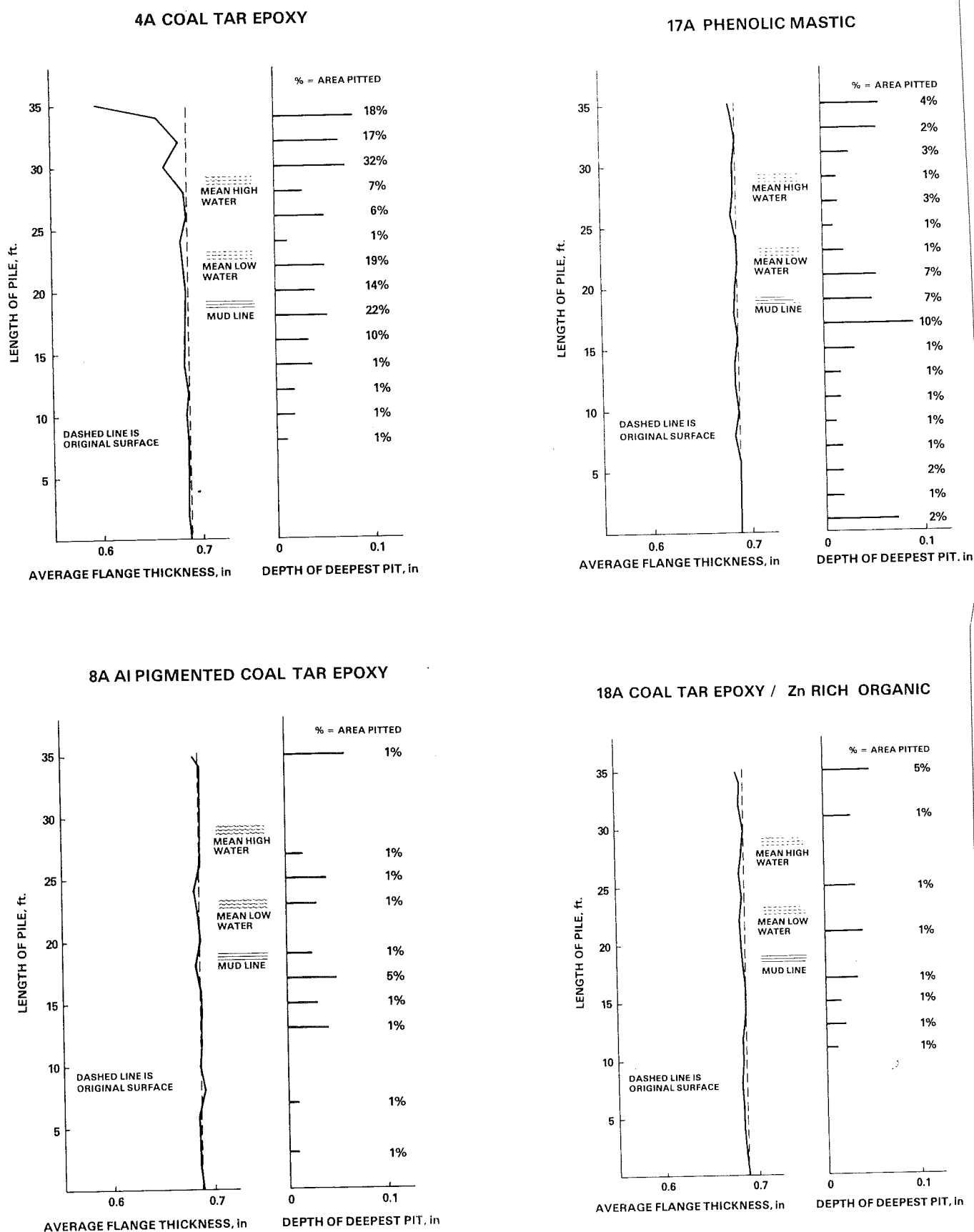
6.4 Rostskydd med torrapplicerade pulverfärger

På senare tid har av främst hälsoskäl så kallade pulverfärger, det vill säga torrt färgpulver som sintras fast på stålytan, blivit allt vanligare som rostskyddsfärg. Även stål- och gjutjärnsrör kan numera beläggas med pulverfärg. Stålpålar har dock så vitt bekant ännu inte belagts med pulverfärg.

Några allmänna rekommendationer beträffande val av pulverfärger och utförande av pulverbeläggningar finns ännu inte.

6.4.1 Applicering av pulverfärger

Utgångsmaterialet är ett plastpulver. Appliceringen sker vanligen genom elektrostatisk påläggning eller genom virvelsintring. För rör är virvelsintring vanligast. Stålytan skall vara förbehandlad på samma sätt som vid rostskyddsmålning. För att plastpulvret skall kunna sintra fast och bilda en sammanhängande beläggning på stålytan måste stålröret hettas upp till ca 200 °C, varefter det sänks ned i en fluidiserande bädd av plastpulvret. Tjockleken hos färdigt plastskikt



Figur 20. Skyddseffektiviteten hos rostskyddsmålningar med olika typer av epoxi samt masticbeläggning på stålplåtar (H-profil) efter åtta år i marin miljö, enligt Escalante [14]. Diagrammen visar dimensionsminskning till följd av korrosion samt maximala frätgropsdjupen och hur stor yta i procent som är angripen genom gropfrätning. (ft=feet=0,30 m. in=inch=25 mm)

bestäms av dopptiden. Färdig skiktjocklek på tunga stålrör är vanligen 0,5-1 mm.

Förmodligen kan rörplåtar beläggas med pulverfärg utan tekniska hinder. Massiva stålplåtar torde dock med dagens teknik vara svåra att pulverbelägga på grund av svårighet att värma dem till kontrollerad temperatur.

6.4.2 Pulverfärgernas skyddsförmåga

Några dokumenterade erfarenheter av pulverfärger på stålplåtar eller stålspons finns inte. Korrosionsinstitutet gjorde dock under 1980-talet en omfattande undersökning av skyddsförmågan hos ett stort antal pulverfärger [38]. Belagda stålplåtar försågs med repor in till stålet och exponerades flera år bland annat i saltvattenbemängd luft nära stranden på Västkusten (Bohus län). Som referensprov ingick plåtar våtapplicerade med tjärepoxi. Färgerna utvärderades med avseende på förmågan att motstå blåsbildning och underrostning vid reporna. Man fann att ingen av pulverfärgerna som saknade våtapplicerad grundfärg uppfyllde ställda krav. Både blåsbildning och underrostning förekom. Pulverbeläggning utan grundfärg ger alltså ett dåligt korrosionsskydd. Plåtar som först våtapplicerats med grundfärg innan pulver applicerades klarade sig betydligt bättre. Referensproverna med tjärepoximalade plåtar uppvisade i särklass bäst resultat, vilket visar att våtapplicerade rostskyddsfärger är överlägsna pulverfärgerna. Det pågår utveckling av både pulverfärgerna i sig och av deras applicering på stål.

6.5 Varm- och sprutförzinkning

Förzinkning är en av de vanligaste metoderna för rostskydd av stål. I många jordar och vatten ger zinken ett effektivt och långvarigt skydd av stålet. I vissa jord- och vattentyper är dock zinkens avfrätning så stor att det knappast lönar sig att använda förzinkning, utan att zinkskiktet skyddsmålas, på plåtar som förutsätts få lång livslängd.

Vissa plåttypen, främst s k slanka stålrörspålar, korrosionsskyddas genom varmförzinkning. Även skarvhylsor skyddas på detta sätt. Zinkskiktets tjocklek är ca 100 µm.

Nordisk Förzinkningsförening har givit ut handboken "Varmförzinkning", som innehåller riklig information om zinkskiktets egenskaper, kvalitetsfordringar, standardiserade provningsmetoder m m. Åtskilligt i detta kapitel har hämtats ur denna handbok.

6.5.1 Applicering av zinkskiktet

På större stålobjekt kan zinkskiktet appliceras genom varmförzinkning eller sprutförzinkning.

Varmförzinkning utförs på verkstad. Stålobjektet rengörs i en avfettningslösning, sköljs varefter rost och glödska avlägsnas genom betning i utspädd syra, vanligen saltsyra. Därpå doppas objektet i ett bad (ca 460 °C) med smält zink och flussmedel. Närmast stålet bildas en järnzinklegering vars järnhalt avtar utåt så att det yttersta skiktet består av ren zink. På stålkonstruktioner avsedda för användning i vatten eller jord är zinkskiktets tjocklek vanligen 100-200 µm. Ju tjockare skikt desto större livslängd. Stålet måste vara kiseltät för att så tjocka skikt skall kunna uppnås.

Sprutförzinkning kan utföras antingen på förzinkningsverkstad eller ute på byggarbetsplats. Metoden är lämplig för större stålobjekt med inte alltför komplicerad form. Stålet rengörs genom blästring till minst noggrannhetsgrad Sa 2½ enligt ISO 8501/1. Zink i form av tråd eller pulver matas in i en zinkspruta och smälts av en gaslåga eller ljusbåge. De smälta zinkdropparna kastas mot stålytan med hjälp av tryckluft. Skiktjockleken kan varieras till upp till 300 µm. Vid denna process bildas ingen järnzinklegering utan skiktet består av ren zink som endast har mekanisk vidhäftning till stålytan. Zinkytan är porig och innehåller oxider.

Zinkskikten som erhålls vid varm- respektive sprutförzinkning kan anses vara i stort sett likvärdiga med avseende på korrosionshårdighet. Vid böckning kan zinkskiktet, särskilt ett sprutat skikt, spricka. Sprickorna kan dock lagas. Sprutförzinkade skikt har sämre vidhäftning till stålet än varmförzinkade skikt.

6.5.2 Zinkskiktets beständighet och skyddsverkan

Zink är en oädel metall men har trots det mycket god korrosionsbeständighet i flera miljöer. Varmförzinkat stål används i mycket stor skala i konstruktioner i luft, vatten och jord och erfarenheterna är i de flesta fall goda. Förklaringen är att det i fuktig miljö bildas ett skyddande skikt av zinksalter på zinkytan. Därför blir zinkens avfrätning liten, ibland endast någon µm per år. Under vissa förhållanden, t ex i kemiskt sura medier (lågt pH-värde) och i strömmande respektive mjuka vatten kan emellertid skyddsskiktet bli instabilt eller inte utbildas alls, varvid zinkens avfrätning blir större, upp till några tiotals µm per år. Avfrätningshastigheten på zink i olika miljöer är sammanfattad i **Tabell 22**, vilken hämtats från SIS Handbok 160, Val av ytbehandling. Avfrätningen sker relativt jämnt över hela zinkytan. Någon utpräglad lokal korrosion förekommer knappast i jord eller normala vatten.

Zinkskiktet verkar skyddande på två sätt. Dels utgör det en skyddande beläggning som täcker stålet, dels har den oädlas zinken förmågan att ge en viss katodskyddsverkan åt stålet i mindre repor och andra skador i skiktet. Skyddsverkan i vatten sträcker sig några mm. Katodskyddsverkan innebär också att det inte sker någon underrostning under zinkbeläggningen på det sätt som kan ske under rostskyddsfärger.

6.5.3 Skyddsförmåga i jord

Zinkens beständighet i jord är beroende av de lokala jordförhållandena, i första hand jordens pH, luftning och karbonatinnehåll samt grundvattenytans belägenhet i förhållande till föremålet.

Några systematiska undersökningar av zinkskiktets beständighet på stålplåtar som drivits ned i icke omgrävd jord synes inte ha utförts. Däremot har ett par större långtidsundersökningar gjorts av korrosionen på varmförzinkat stål som grävts ned på en eller ett par meters djup. Det skall dock påpekas att korrosiviteten både mot zink och stål blir större i omgrävd, ytlig jord än i ostörd jord, särskilt på större djup.

Vid Vattenfall har Troselius (ref 11) undersökt korrosionen på provstänger av obehandlat och varmförzinkat stål vilka stått vertikalt i jorden under flera decennier i kraftledningsgator. Hur undersökningen genomfördes redovisas i avsnitt 5.1.4. En sammanställning av resultat erhållna fram till i mitten av 1970-talet återfinns i **Tabell 23**, vilken avser *maximal* avfrätning på zink-

Tabell 22. Avfrätning av zinkbeläggningar i olika miljöer i Norden (ref SIS Handbok 160)).

Miljö	Avfrätning, $\mu\text{m}/\text{år}$	Anmärkning
INDUSTRIATMOSFÄR Normal Svår	2 - 10 10 - 25	
STADSATMOSFÄR	1 - 3	
LANTATMOSFÄR	0,5 - 1,5	
HAVSATMOSFÄR Utan saltvattenstänk Med saltvattenstänk	1 - 3 2 - 3	Lokal topografi, avstånd från kust samt huvudsaklig vindriktning är av stor betydelse
INOMHUSATMOSFÄR	<0,5	
HAVSVATTEN SÖTVATTEN Hårt Mjukt	10 - 50 2 - 4 Upp till 20	Vattnets rörelsehastighet och temperatur inverkar kraftigt. Vattnets rörelsehastighet och temperatur inverkar kraftigt.
JORD	1 - 30*	Starkt beroende av jordarten och grund-vattenytan.

*) Författarens anmärkning: I originaltabellen anges intervallet 4-500 $\mu\text{m}/\text{år}$ för medelavfrätning i jord. Detta är sannolikt tryckfel. Här angivet intervall (1-30 $\mu\text{m}/\text{år}$) är baserat på erfarenheter vid Vattenfall, Korrosionsinstitutet och Nordisk Förszinkningsförening.

Tabell 23. Sammanställning av Vattenfalls undersökning av samband mellan grundvattenytans (GW) läge och maximal avfrätning på zinksiktet på varmförzinkade stålstänger, vertikalt nedgrävda i kraftledningsgator [11].

Grundvattenytans läge	Maximal avfrätning hos zink, ¹⁾ $\mu\text{m}/\text{år}$	
	morän	torv
GW-ytan i markbandet	15	15
Varierande GW-yta på stängen	5	8
GW-ytan ständigt under stängen	1	-

1) Zinkens korrosionshastighet på stängens mest angripna parti uppmätt med skiktjockleksmätare.

skiktet (avfrätning på det mest angripna partiet på provstången). Av tabellen framgår det att grundvattennivåns läge har stor betydelse för zinkskiktets korrosionshårdighet. Zinkskiktet korroderar mindre i välluftad, ”torr” jord än i dåligt luftad, ”blöt” jord. En snabbare syretillförsel genom jorden gynnar passiveringen av zinkytan och avfrätningen blir därför mindre i ”torr” jord.

Vinka [12] har sammanställt Vattenfalls samtliga undersökningsresultat erhållna fram till slutet av 1980-talet, **Tabell 24**. Av sammanställningen framgår det att den maximala avfrätningen kan vara stor, även om den varierar inom vida gränser oavsett jordart. Medelavfrätningen är mindre och varierar också inom ungefär samma intervall oavsett jordart.

Tabell 24. Maximal avfrätning och medelavfrätning på zinkskiktet hos varmförzinkade provstänger i jord i Vattenfalls undersökning [12].

Jordart	Antal provplatser	Maximal avfrätning ¹⁾ µm/år	Medelavfrätning ²⁾ µm/år
Lerjordar	12	2-22	2-10
Torvjordar	10	2-20	1-11
Moränjordar	18	1-20	1-8

- 1) Zinkens korrosionshastighet på stångens mest angripna parti uppmätt med skikttjockleksmätare.
- 2) Zinkens genomsnittliga korrosionshastighet uppmätt genom massförlustbestämning.

Korrosionsinstitutet [10], [39] har undersökt korrosionen på varmförzinkade stålplåtar som varit nedgrävda i grundvattenzonen på 0,7 och 1,7 m djup i olika jordarter. På grund av grundvattnets årstidsberoende pendling över provplåtarna är förhållandena i den uppgrävda och återfyllda jorden korrosiva. Avfrätningen är i de flesta fallen 10-30 µm per år och motsvarar vad som kan väntas i en ytlig, pendlande grundvattenzon i omgrävd jord. Resultaten från Korrosionsinstitutets undersökning samt från en annan pågående stor fältundersökning vid institutet är sammanfattade i **Tabell 25**. Av Vattenfalls och Korrosionsinstitutets undersökningar framgår jordartens betydelse. Leriga jordar och torv har större korrosivitet än sand och sandig morän.

Sammanfattningsvis är zinkens korrosion i jord komplicerad och bestäms av invecklade samband mellan kemiska och fysikaliska faktorer. Det finns inga undersökningar av zinkens korrosionshastighet på plåtar neddrivna i ostörd jord. På förzinkade provplåtar och provstänger placerade i uppgrävd och återfylld jord relativt nära markytan har däremot zinkens korrosionsbenägenhet undersökts mera ingående i svenska jordarter. Undersökningarna visar att korrosionshastigheten (medelavfrätningen) kan variera inom vida gränser, från några få upp till 30 µm/år, med de högsta hastigheterna antingen i grundvattenzonen eller i jord som har lågt pH-värde och/eller saknar karbonatinnehåll. Mycket talar dock för att korrosionshastigheten är

Tabell 25. Sammanställning av Korrosionsinstitutets undersökningar av korrosionen på varmförzinkade stålplåtar i återfylld jord [28], [45].

Jordart	Avfrätning hos zink, $\mu\text{m}/\text{år}$
Lera och gyttjig lera	10 – 30
Torv	10 – 30
Sand	2 – 4
Sandig morän, neutralt pH	2 – 3
Sandig morän, lågt pH	8

lägre i ostörd än i omgrävd jord. I torv, sulfidjord och i annan jord med lågt pH-värde torde emellertid korrosionshastigheten vara hög, 10-tals $\mu\text{m}/\text{år}$, även om jorden är ostörd. På platser där grundvattnet tidvis står i eller över markytan, t ex i myrområden och sankmarker, kan korrosionshastigheten också bli hög.

6.5.4 Skyddsförmåga i vatten

Zinkskiktets beständighet i vatten är i hög grad beroende av pH-värde, vattensammansättning och strömningshastighet. Zinkens korrosionshastighet är normalt låg i pH-området 7-12. Utanför detta område är korrosionen snabbare.

Hårda vatten med hög alkalinitet som innehåller kalcium och magnesium är föga aggressiva genom att dessa ämnen tillsammans med vattnets karbonater bildar ett svårslösligt och skyddande skikt av korrosionsprodukter som hindrar avfrätning. Mjuka vatten angriper zink eftersom de salter som bildar det skyddande skiktet saknas. Aggressiva mjuka vatten finns i många vattendrag och sjöar i Sverige, Norge och Finland. Längre ner i Europa är vattnen vanligen hårda. Har vattnet högre strömningshastighet än ca 0,5 m/s hindras bildningen av det skyddande skiktet på zinkytan och avfrätningen blir snabbare, se **Tabell 22**. Innehåller det strömmande vattnet fasta partiklar, till exempel sandkorn, sker det dessutom en mekanisk avnötning av zinkskiktet, varvid det kan förbrukas på kort tid.

6.5.5 Korrosionsskyddsmålning på zinkskikt

Genom skyddsmålning av zinkskiktet kombineras de positiva egenskaperna hos de två skyddsmetoderna. Skyddsfärgen förlänger zinkskiktets livslängd avsevärt och zinkskiktet hindrar rostning i små skador som går ned till stålet.

För att skyddsfärgen skall få god vidhäftning ruggas zinkytan upp genom svepblästring varvid

ytan också blir ren. Särskilda krav ställs på blästermedlet och blästringsproceduren. Sprutförzinkade skikt brukar beläggas med en s k sealer, som täpper igen porerna i zinkskiktet, innan skyddsmålningen.

För målning genom högtryckssprutning rekommenderas epoxi-, uretan- eller klor-kautschukfärger. Epoxifärgen skall vara av 2-komponentstyp och polyamidhärdad och torrhalten bör inte vara alltför hög. Uppgifter om skiktjocklekar, eventuell primer och färgtillsatser vid målning på zinkytor ges i handboken "Varmförzinkning" och i BSK.

6.6 Slitstarka, icke-konventionella skyddsbeläggningar

Utöver de skyddsbeläggningar som hittills har behandlats (PE-mantel, rostskyddsfärger och förzinkning) förekommer det speciella, icke-konventionella skyddsbeläggningar som kan tillämpas på stålplåtar. Beläggningarna karaktäriseras av att de är tjocka (flera mm skiktjocklek) och mycket mekaniskt hårdiga. Exempel är:

- Plast- eller stålfiberarmerad betong
- Sandimpregnerad hårdplast

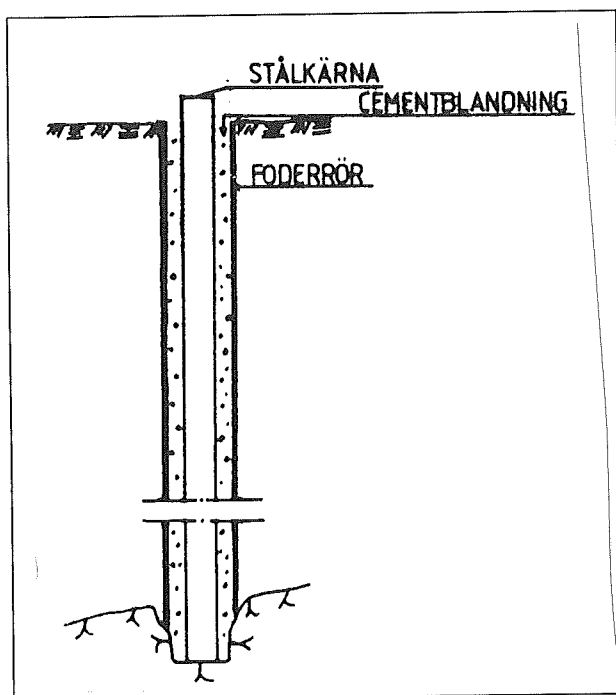
Vanligen appliceras dessa beläggningar utanpå en rostskyddsprimer och deras huvudsakliga uppgift är att utgöra ett mekaniskt skydd mot skador i primern. De används bland annat på viktiga plåtar, stag och rör utsatta för synnerligen starka påfrestningar, till exempel på offshorekonstruktioner. Beläggningarna är speciella såtillvida att de knappat tillämpas rutinmässigt utan måste specialbeställas. Erfarenhet från användning av denna typ av beläggning uppges finnas bland annat inom norsk offshoreindustri. Någon dokumenterad utvärdering av beläggningarna har emellertid inte påträffats, varför de inte behandlas närmare i denna rapport.

6.7 Ingjutning i injekteringsbruk

Vissa påltyper skyddas mot korrosion genom ingjutning i injekteringsbruk. Bruket hindrar direktkontakt mellan stålplåten och omgivande jord. Dessutom medför den höga alkaliteten i cementen att det bildas ett skyddande oxidskikt på stålytan.

Ett exempel på ingjutning är borrarad stålplåtpåle. Ett foderrör av stål borrar ned genom jorden. Efter rensning från jord inuti sticks ett stålämne (stålplåten) ned i foderröret. Därpå injekteras bruk i utrymmet mellan stålplåten och foderröret, **Fig. 21**. Både det kringgjutna bruket och foderröret skyddar stålplåten mot korrosion. Enligt Vägverkets Bronorm 88 får stålplåte kringgjuten med betong i kvarsittande foderrör utföras utan skyddsbeläggning och dimensioneras utan rostmån på den ingjutna delen.

För stålplåten 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 stålplåten är centrerad i foderröret och att kaviteter inte uppkommer i bruket. Klorider får inte tillsättas.

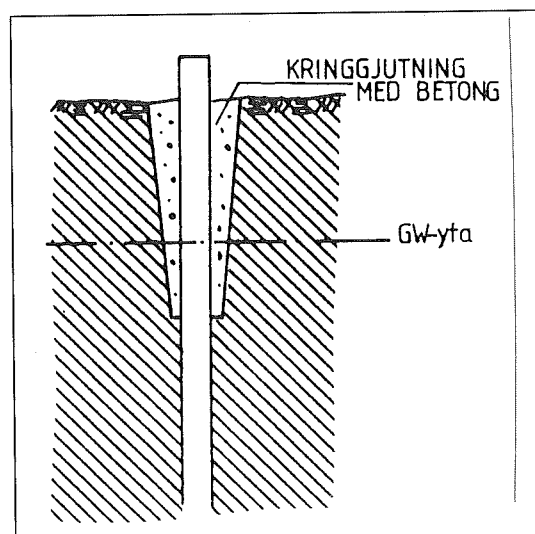


Figur 21. Ingjutning i betong av stål kärnepåle i foderrör.

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

Övre delen av en normalt slagen stålplåle kan också skyddas genom kringgjutning. Bruk fylls på i utrymmet mellan plålen och ett rör, som satts ned till önskat djup kring plålen, **Fig. 22**.

Stålrörs- och segjärnspålar brukar fyllas med cementbruk som skydd mot korrosionsangrepp på rörens insida. Bruk hålls ned i röret utan armering. I grova stålrörspålar byggs en betongplåle upp genom att stålarmoring placeras i röret och betong gjuts i. Ingen korrosion uppstår på insidan av rörplålar som fyllts med cementbruk eller betong.



Figur 22. Kringgjutning av övre delen av en normalt slagen stålplåle.

6.8 Katodiskt korrosionsskydd

6.8.1 Allmänt om katodiskt skydd

Katodiskt skydd är en elektrokemisk skyddsmetod som tillämpas i vid utsträckning på metallkonstruktioner i jord, vatten och i vissa andra aggressiva elektrolyter i bland annat cellulosaindustrin och kemisk/teknisk industri. På grund av att skyddsmetoden ger möjlighet att med stor säkerhet kontrollera korrosionen används katodiskt skydd särskilt där korrosionsskador inte kan tolereras. Av den anledningen är katodiskt skydd föreskrivet för jordförlagda naturgasledningar och cisterner för förvaring av gasol, bensin, dieselolja, fotogen etc samt för vissa installationer i kärnkraftverk.

6.8.2 Skyddsprincipen, skyddskriterier och kontroll av skyddsverkan

Katodiskt skydd innebär att en svag elektrisk likström matas genom jorden/vattnet till stålytan som skall skyddas. Därigenom blir stålet så elektriskt negativt att de elektrokemiska reaktioner som orsakar korrosionen undertrycks.

Skyddsverkan erhålls genom att stålets elektropotential sänks från den potential som råder vid korrosion, korrosionspotentialen, till en viss, mera negativ potential, den s k skyddspotentialen, vid vilken korrosion inte kan ske av termodynamiska skäl. Kriteriet på att fullständigt katodiskt skydd har uppnåtts i jord och vatten är att potentialen har sänkts till -850 mV eller lägre, uppmätt med en referenselektrod av typ koppar/kopparsulfat (Cu/CuSO_4).

Ett annat skyddskriterium, som tillämpas särskilt på stålkonstruktioner med stora nakna stålytor, är sänkning av potentialen med minst 100 mV från korrosionspotentialen som råder i det aktuella fallet.

I vissa situationer, till exempel på skyddsobjekt med komplicerad geometri, är det inte möjligt att uppfylla något av nämnda skyddskriterier. Det ska dock framhållas att varje sänkning av skyddsföremålets potential medför en sänkning av dess korrosionshastighet. Om man av någon anledning inte helt kan uppnå kriteriet för fullständigt skydd (-850 mV; Cu/CuSO_4) kan alltså skyddsanordningen ändå ge en avsevärd reducering av korrosionshastigheten.

I tveksamma fall kan skyddsverkan kontrolleras genom jämförande exponering av två provplåtar eller provstänger som hängs ned i vattnet eller slås respektive grävs ned intill skyddsobjektet. Den ena plåten ansluts elektriskt till objektet medan den andra exponeras utan elektrisk anslutning. Den anslutna plåten blir då skyddad i samma utsträckning som skyddsobjektet medan den icke anslutna plåten korroderar som om objektet skulle sakna katodiskt skydd. Innan utplaceringen vägs plåtarna noggrant. Plåtarna exponeras under till exempel ett år varefter de tas upp, rengörs och vägs på nytt. Verkan av det katodiska skyddet utvärderas genom jämförelse av plåtarnas massförlust.

För att nå avsedd potentialsänkning fordras en viss skyddsström per ytenhet på den skyddade konstruktionen, s k skyddsströmtäthet, uttryckt i mA/m^2 skyddsyta. Erforderlig skyddsströmtäthet för att nå fullständigt katodiskt skydd varierar från fall till fall. Den bestäms för obelagt stål till största delen av syrekoncentrationen vid stålytan. Erforderlig strömtäthet är således låg

i jord, större i stillastående vatten och störst i vatten som är i rörelse. Är stålytan belagd med skyddsbeläggning är erforderlig strömtäthet flera tiopotenser lägre.

6.8.3 Katodiskt skydd i kombination med skyddsbeläggning

Avsikten med att kombinera katodiskt skydd med någon form av skyddsbeläggning är främst, som framgår av föregående stycke, att krympa erforderlig strömtäthet. Skyddsströmmen kommer då att gå till (de ofrånkomliga) felställena i skyddsbeläggningen, och skydda stålytan mot lokala korrosionsangrepp i dessa punkter. Fördelar är:

- god spridning av skyddsströmmen till samtliga delar av den skyddade konstruktionen
- mindre skyddsanläggning och mindre antal anoder behövs jämfört med om stålytan är obelagd
- minskad risk för sekundärverkan (skadlig verkan från skyddsströmmen) på främmande metallkonstruktioner i närheten
- det katodiska skyddet motverkar underrostning och påföljande flagning av rostskyddsfärger vid felställena i beläggningen
- med kombinationen katodiskt skydd och skyddsbeläggning kan korrosionen kontrolleras med mycket hög säkerhet.

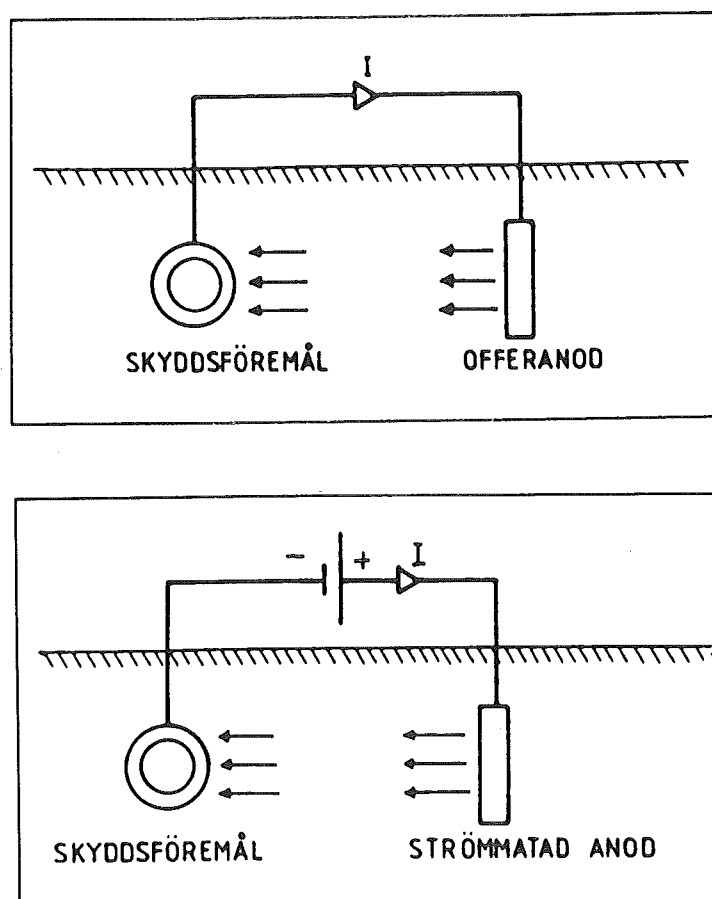
Skyddsbeläggning som används i kombination med katodiskt skydd måste vara resistent mot det alkali (mycket högt pH) som bildas på rörytan till följd av det katodiska skyddet. Beläggningar som tål alkali är bitumen och många plaster, exempelvis epoxi och polyeten. Dock är inte alla plastfärger, t ex alkydfärger, hårdiga mot alkali. Se vidare avsnitt 6.3.3.

Vid s k överskydd, dvs överdrivet stor potentialsänkning till värden långt mera negativa än normal skyddspotential, blir alkalibildningen så stark att vidhäftningen kan försämrats mellan beläggning och stål kring en beläggningsskada, s k katodisk vidhäftningsförlust. Fenomenet bedöms ha föga praktisk betydelse på den styva PE-manteln på stålrörspålar, men kan så småningom leda till avflagning av rostskyddsfärger. Katodisk vidhäftningsförlust anses kunna bli påtaglig vid potentialvärden mera negativa än ca -1200 mV (Cu/CuSO₄), varför skyddspotentialen bör ligga ovanför detta värde.

6.8.4 Funktionen hos katodiskt skydd

Skyddsströmmen matas ut i jorden/vattnet via speciella elektroder, s k skyddsanoder. Strömmen kan alstras på två sätt och man skiljer mellan två olika typer av katodiskt skydd.

Vid *skydd med offeranoder* (även kallat galvaniskt skydd) alstras skyddsströmmen på galvanisk väg. Anodmaterialet är oädlare än stål, varför det föreligger en galvanisk spänning som driver skyddsströmmen mellan anoden och stålet, se **Fig. 23**. Någon yttre strömkälla behövs således inte.



Figur 23. Principen för katodiskt skydd med offeranod (överst) och med påtryckt ström (nederst).

Vid skydd av stål står tre olika anodmaterial till buds: aluminium, zink och magnesium. Vilket av dessa som skall tillämpas bestäms i första hand av jordens/vattnets ledningsförmåga. Aluminium används endast i havsvatten, zink i bräckt vatten och i jord med salthaltigt grundvatten samt magnesium i sötvatten, i bräckt vatten med låg salthalt och i jord med normalt grundvatten. Anodmetallen är gjuten på en stålstav (anodarmering).

Anodmetallerna är speciallegeringar för vilka det finns utländska standarder. Vanligt aluminium, zink etc fungerar inte som anodmaterial.

I och med strömgivningen samt en viss egenkorrosion förbrukas offeranoder med tiden. Skydd av plåtar och sponter dimensioneras vanligen med livslängden 15-20 år. Därefter måste nya anoder placeras ut.

Offeranoder kan anslutas till stålkonstruktionen antingen genom fastskruvning eller fastsvetsning direkt på konstruktionen eller via en elkabel. En fördel med anslutning via elkabel är att detta möjliggör mätning av anodens strömgivning varigenom det är möjligt att med god precision avgöra när anoden kommer att vara förbrukad respektive om den är förbrukad.

Vid *skydd med påtryckt ström* (även kallat elektrolytiskt skydd) alstras skyddsströmmen med en yttre strömkälla, vanligen en nätansluten transformator- och likriktarenhet. Anoden och

stålplåten ansluts till likriktarens plus- respektive minusutgång så att ström matas från anoden till stålet, se **Fig. 23**. Enheten är klassad för matning av skyddsklenspänning, varför det inte uppstår några personfarliga spänningar i skyddsobjektet. Utgående likspänning är normalt lägre än ca 15 V.

Materialet i strömmatade anoder är vanligen kiseljärn, magnetit eller platina belagt på titan. Dessa material är i det närmaste inerta vilket innebär att de knappast förbrukas med strömgivningen. Järn- och magnetitanoder är stavformade medan platinerade titananoder kan vara utformade som plattor, trådar, tunna stavar etc.

Strömmatade anoder placeras alltid separerade från stålytan, antingen som fjärranoder, med stort avstånd till skyddsobjektet, eller som näranoder, direkt på objektet men utan anliggningskontakt. Genom möjligheten att reglera utgående likspänning är skydd med påtryckt ström inte begränsat av jordens/vattnets elektriska ledningsförmåga.

6.8.5 Skadlig sekundärverkan

Katodiskt skydd kan under vissa omständigheter orsaka skadlig sekundärverkan på andra metallkonstruktioner. Fenomenet innebär att en del av skyddsströmmen kan uppträda som läckström och ge upphov till frätskador på en närliggande, främmande metallkonstruktion som inte är i metalledande kontakt med den skyddade konstruktionen. Strömmen kan t ex på en närliggande rörledning gå in i en punkt, flyta en sträcka och därefter gå ut ur rörgodset i en punkt längre bort. Där uppstår frätskador till följd av elektrolytisk (läckströms-)korrosion.

Skadlig sekundärverkan kan i första hand orsakas av skydd med påtryckt ström med förhållandevis stor strömutmatning från anoderna. Kring de strömmatade anoderna föreligger det ett riskområde vars verkan avtar utåt och vars yttre gräns bestäms av strömtätheten i jorden/vattnet och jordens/vattnets resistivitet. Gränsen kan bestämmas genom beräkning alternativt elektrisk mätning på plats. I havsvatten är riskområdet mycket litet medan det är större i jord. Skydd med offeranoder kan inte, på grund av anodernas begränsade strömgivning, orsaka sekundärverkan annat än i synnerligen speciella fall.

Ett effektivt sätt att minimera risken för skadlig sekundärverkan i jord är att tillämpa s k djupanod, dvs placering av anoderna på stort djup under markyta. Idén med djupanod är att riskområdet kring anoderna inte skall gå upp till ytliga jordlager för undvikande av sekundärverkan på mera ytligt belägna rörledningar, etc.

I allmänhet är sekundärverkan inget problem. Den som projekterar det katodiska skyddet är enligt svensk föreskrift STEV-FS 1988-1, § 112, skyldig att kontrollera att inte närliggande konstruktioner påverkas. Skulle skadlig påverkan uppstå finns det olika möjligheter att eliminera skador, vilket beskrivs i svensk standard SEN 08 04 01. Enklaste åtgärden är att ansluta den påverkade konstruktionen elektriskt till skyddsobjektet.

6.8.6 Praktisk utformning av katodiskt skydd

Stålsponskajer

Viktiga stålsponskajer som står i havsvatten runt om i världen är i flertalet fall katodiskt skyddade. I Sverige är många större kajer på västkusten skyddade. På senare tid har även kajer i Skåne, Blekinge och på ostkusten försetts med katodiskt skydd. Kajer som nyanläggs idag förses vanligen med skydd från början. Stålsponskajer är sällan rostskyddsmålade, varför det totala skyddsströmbehovet till kajen är ganska stort.

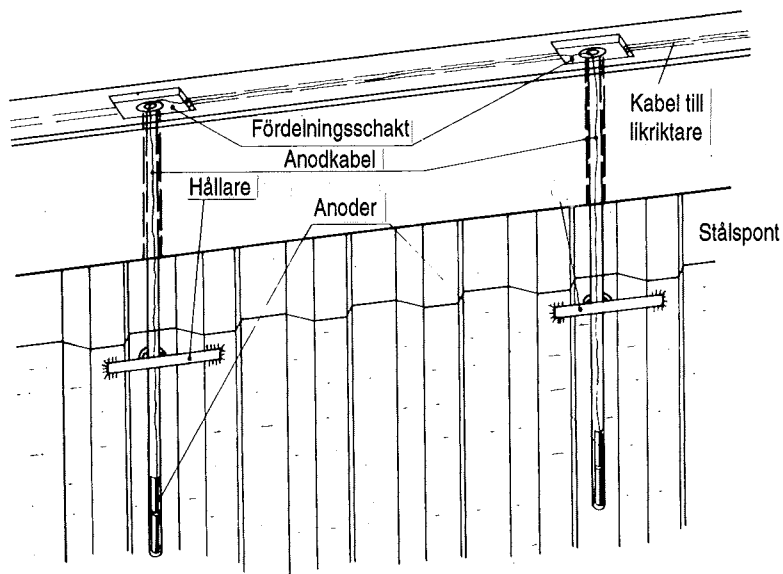
Sponskajer skyddas antingen med påtryckt ström eller med offeranoder. I havsvatten, som har mycket god elektrisk ledningsförmåga, används vanligen offeranoder av aluminium. De placeras symmetriskt utmed kajen och svetsas fast på inåtgående spons. I bräckt vatten i Östersjön kan offeranoder av zink tillämpas upp till i nivå med den uppländska kusten. Djupt inne i Stockholms skärgård kan dock vattnets salthalt lokalt vara liten. Där ger inte zinkanoder tillräckligt skydd. Skall offeranoder tillämpas norr därom måste magnesiumanoder användas. I sötvatten kommer endast magnesiumanoder ifråga. Magnesiumanoder har emellertid kortare livslängd än zink- och aluminiumanoder.

I bräckt vatten och i sötvatten blir den nödvändiga totala offeranodmassan så stor att skydd med påtryckt ström (som inte begränsas av hög vattenresistivitet) i många fall blir mera tekniskt och kostnadsmässigt effektivt. På kajer som trafikeras av fartyg monteras strömmatade anoder i hållare direkt på sponten, se **Fig. 24**. Anledningen är huvudsakligen att man vill eliminera risken för skadlig påverkan på fartygen från den katodiska skyddsströmmen när de ligger vid kaj. Vid skydd av sponskaj utan fartygstrafik kan strömmatade anoder läggas på botten ett stycke ut från kajen, så att strömspridningen blir mera effektiv och ett mindre antal anoder behövs, se **Fig. 25**.

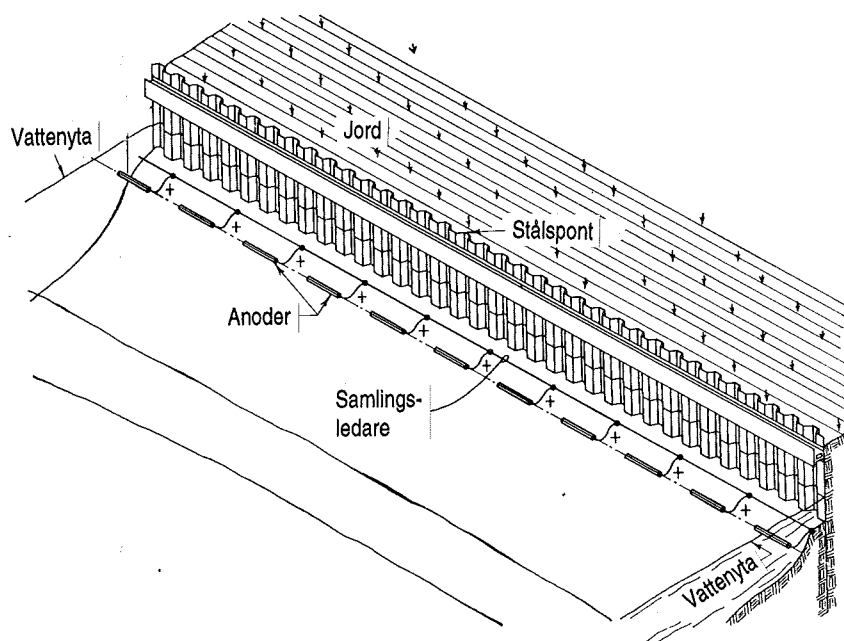
På 1970-talet utförde Korrosionsinstitutet en långtidsundersökning av katodiskt skydd med påtryckt ström av omålade stålsponskajer i sötvatten med dålig elektrisk ledningsförmåga [40]. I projektet undersöktes en rad, för skyddets funktion, viktiga faktorer och projektrapporten innehåller många lösningar på speciella problem som kan uppstå vid katodiskt skydd i högresistivt sötvatten. I undersökningen konstaterades bland annat:

- I högresistiva sötvatten kan obelagda stålspons och stålplåtar mycket väl korrosionsskyddas med katodiskt skydd.
- I sötvatten är strömspridningen på en stålsponskaj dålig både i sidled och mellan in- och utgående spontplankor, varför anodplacering måste väljas med omsorg.
- Erforderlig katodisk skyddsströmtäthet kan vara stor, 100–150 mA/m² stålyta, på obelagt stål i sötvatten.
- Vid projektering av katodiskt skydd med påtryckt ström i sötvatten måste risken för sekundärverkan på närbelägna metallkonstruktioner beaktas.

Innan skydd installeras på en sponskaj bör den metalliska kontakten mellan spontplankorna



Figur 24. Katodiskt skydd med påtryckt ström av stålsponskaj. Strömmatade stavanoder är monterade direkt på inåtgående spons.



Figur 25. Katodiskt skydd med påtryckt ström av stålsponskaj. Strömmatade stavanoder ligger i bottenlammet ett stycke ut från spanten.

kontrolleras genom elektrisk motståndsmätning. God metallkontakt är nödvändig för att skyddsströmmen skall kunna flyta obehindrat mellan sponsplankorna. Är kontakten bristfällig kan detta avhjälpas genom att t ex ett plattstål svetsas som ett hammarband utmed kajen med kontakt till varje sponsplanka.

Stålplåtar i vatten

I vatten skyddas både belagda och obelagda stålplåtar med katodiskt skydd. I vatten med dålig ledningsförmåga (sötvatten och i bräckt vatten med låg salthalt) blir dock strömspridningen dålig på obelagda plåtar. Vid skydd av belagda plåtar elimineras problemet med strömspridning och skyddsströmbehovet minskar drastiskt och totala kostnaden för skyddet blir väsentligt lägre än för obelagda plåtar. I en del fall är plåtarna belagda endast i atmosfärs- och skvalpzonerna ett stycke ned under vattenlinjen. Både skydd med påtryckt ström och skydd med offeranoder tillämpas på plåtar i vatten. Beträffande sambandet mellan material i offeranoder och vattnets elektriska ledningsförmåga gäller samma förhållanden som för stålsponskajer.

Vid skydd med påtryckt ström kan de strömmatade anoderna placeras antingen fastmonterade i speciell ställning som läggs på botten, hängande i ställning mellan plåtarna eller monterade direkt på plåtarna, se **Fig, 26, 27, 28, 29 och 30**.

Analogt med vad som gäller för stålsponskajer måste det föreligga metalldande kontakt mellan plåtarna om en anod skall ge skydd till flera plåtar. Installeras skydd med påtryckt ström på obelagda plåtar under kaj som trafikerats av fartyg måste anoderna placeras så att skyddsströmmen inte ger upphov till skadlig sekundärverkan på fartygen när de ligger vid kaj. Sker lastning/lossning av explosionsfarlig vätska eller gas vid kajen och skydd med påtryckt ström tillämpas måste den elektriska matningsenheten placeras utanför det klassade explosionsfarliga området.

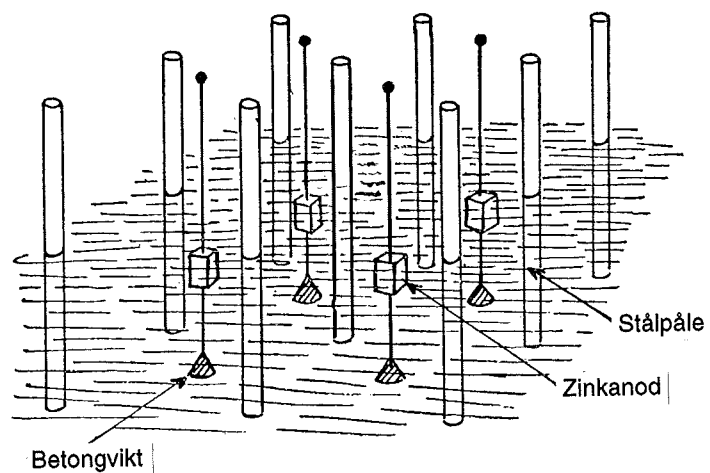
Insidan på en vattenfylld stålrörspåle - obelagd eller rostskyddsmålad - kan korrosionsskyddas med katodiskt skydd. Skyddsanoden hängs ned i vattnet inuti pålen. Tillämpas strömmatad anod måste den monteras i hållare så att anoden inte kan komma i direktkontakt med rörpålens insida. Offeranod kan tillåtas komma i kontakt med stålytan.

Vid skydd med påtryckt ström i havsvatten bildas små mängder klorgas på anoderna. Material i anodhållare, kabelisoleringar, skyddsror etc måste därför vara klorbeständigt.

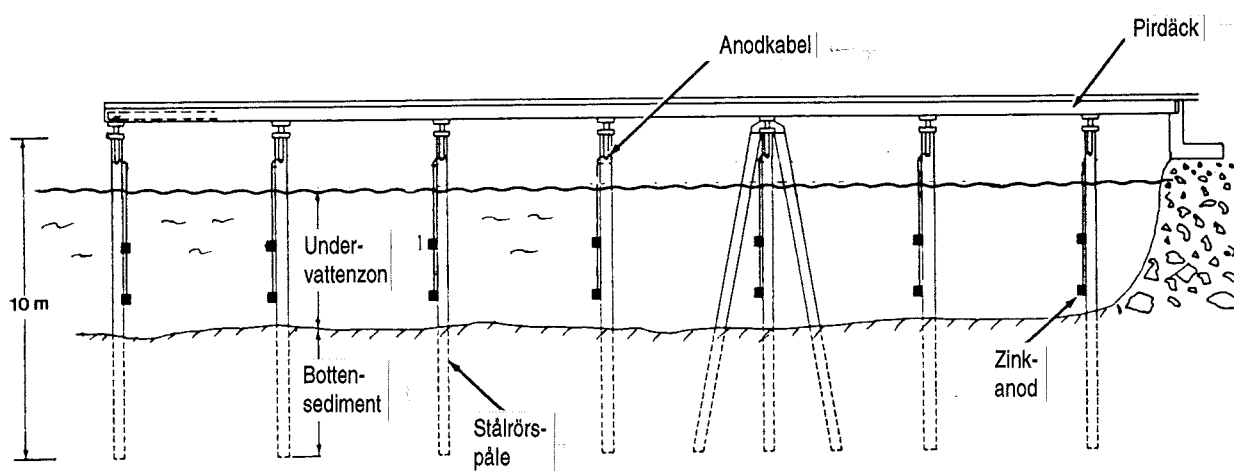
Stålplåtar i jord

Vid katodiskt skydd av stålplåtar i jord placeras anoderna i en s k anodbädd i jorden ett stycke från plåtarna. I syfte att minimera övergångsresistansen mellan anod och jord omges anoderna med en lågresistiv s k anodfyllning. Denna utgörs för strömmatade anoder av elledande koks och för offeranoder av en blandning av bentonit, gips och natriumsulfat.

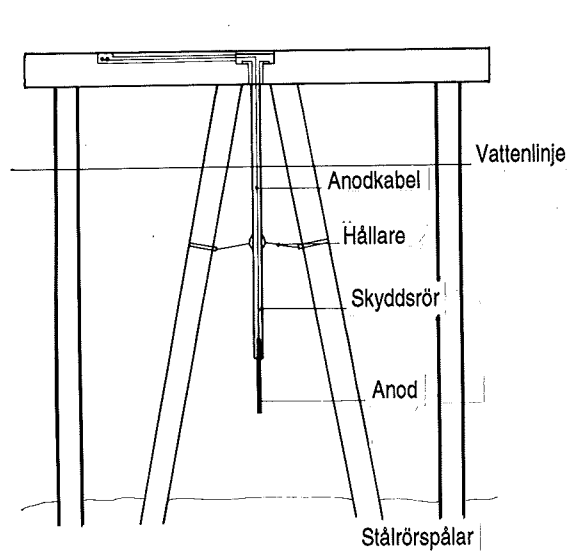
Anoderna kan placeras i s k djupanodbädd. Denna består av ett vertikalt borrarat hål i marken med ett foderrör av stål. I vanliga fall är djupet 10 m eller mer. Anoderna hängs ned och kringfylls med koks. Ovanpå koksutfyllningen läggs grus upp till markytan. Den luckra grusutfyllningens uppgift är att vädra ut gas som bildas på anoderna och som annars kan blockera strömvägningsfysiskt. Med djupanod minimeras risken för skadlig sekundärverkan på yttliga rörledningar, kablar etc.



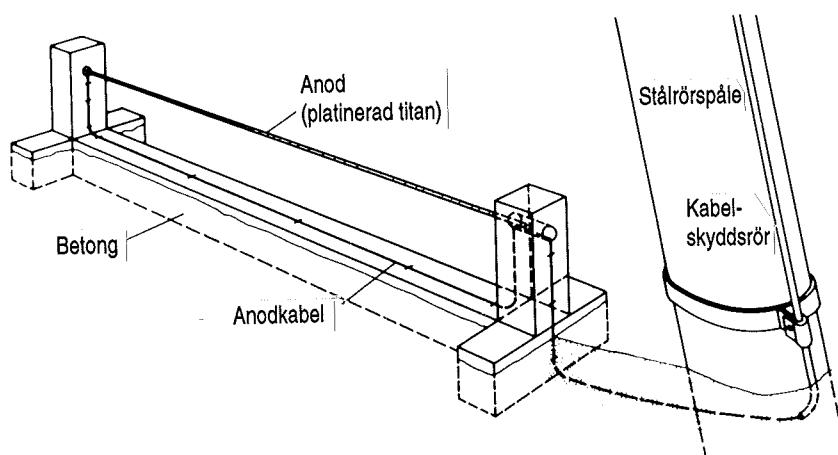
Figur 26. Katodiskt skydd av stålplålar i vatten med hjälp av offeranoder. Anoderna hänger fritt mellan pålarna.



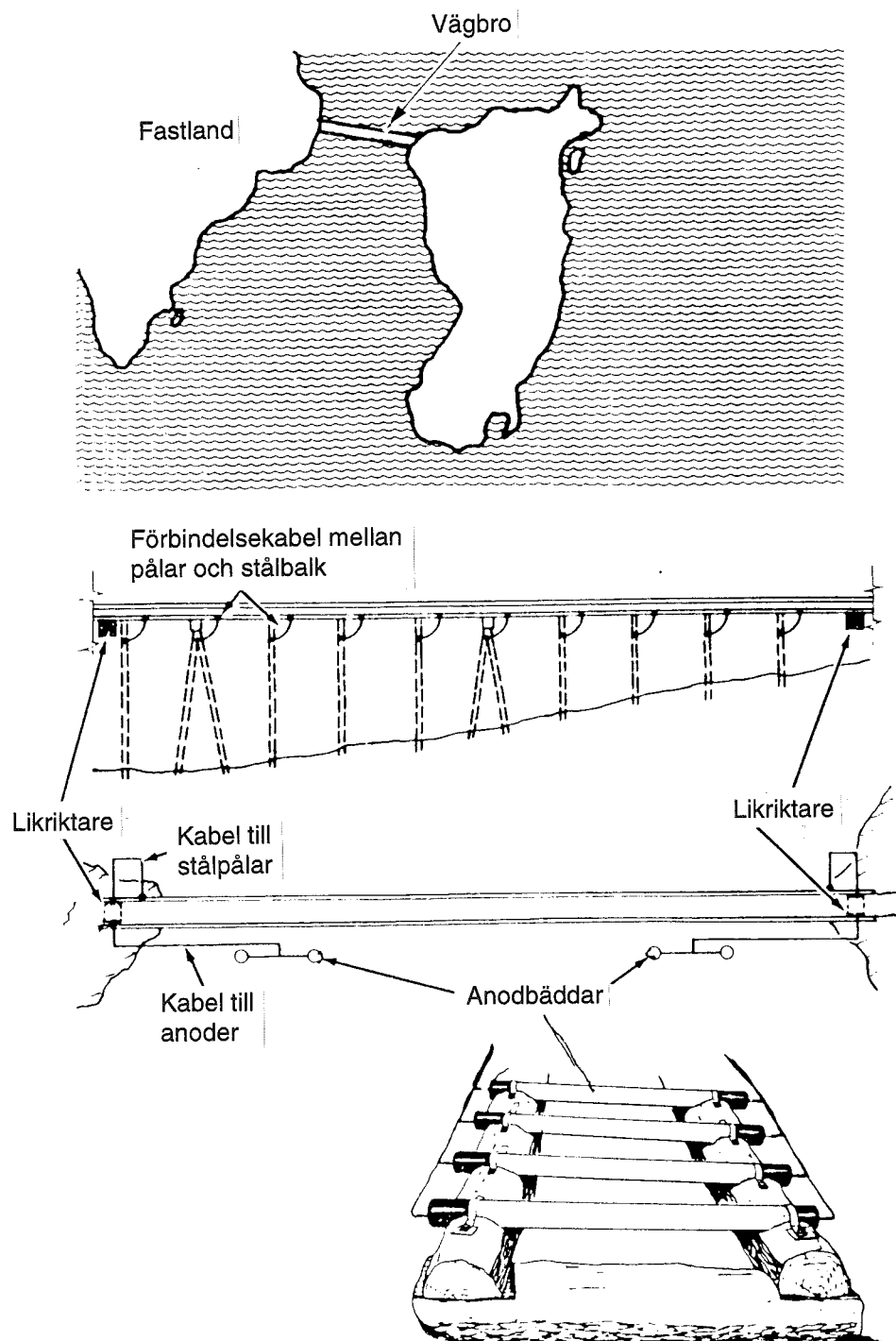
Figur 27. Katodiskt skydd med offeranoder (zinkanoder) av stålplålar under en pir. Två offeranoder är fast monterade på varje påle.



Figur 28. Katodiskt skydd med påtryckt ström av stålspont i vatten. Strömmatad anod fastmonterad i skyddsror mellan pålarna.



Figur 29. Anodarrangemang för katodiskt skydd med påtryckt ström av stålspont i vatten. Strömmatad anod (platinerad titan) monterad i ställning på botten.



Figur 30. Katodiskt skydd med påtryckt ström av stålplåarna under en vägbro. De strömmatade anoderna ligger i två grupper på sjöbotten ett stycke ut från vardera brofästet.

En grupp obelagda stålplåtar i jord kräver förhållandevis stor skyddsström, flera ampere, varvid risken ökar för skadlig sekundärverkan på närliggande, främmande metallkonstruktioner t ex rörledningar och blymantlade telekablar. Av den anledningen bör stålplåtar i jord vara belagda om de skall skyddas katodiskt, såvida inte det kan visas att riskområdet för sekundärverkan kring anoderna är och kommer att förbli fritt från främmande konstruktioner. Ett alternativ är att låta plåtarna vara belagda från markytan ned till ett visst djup och tillämpa sk djupanod.

I Sverige finns endast ett fåtal installationer med katodiskt skydd av plåtar i jord. I Norge finns däremot ett 40-tal skyddsanläggningar, främst i marin lera. En svensk anläggning finns, som redan nämnts i avsnitt 6.3.4, under en fastighet vid Norrmalmstorg (kv Styrpinnen) i Stockholm. Där skyddas 68 direktslagna stålplåtar (utan foderrör) med diameter 140 mm och längd 18 m. Plåtarna är epoximalade ned till 12 m djup. Anoderna är installerade som djupanoder. Strömutmatningen från likriktarenheten övervakas genom att enheten kopplats via fastighetens larmsystem till en larmcentral. Anläggningens strömförbrukning är inte större än för en 60 W glödlampa, vilket innebär en försumbar kostnad för effektförbrukningen.

6.8.7 Övervakning och kontrollmätning

Katodiskt skydd med offeranoder där anoderna är fastsvetsade på plåtarna/sponterna förutsätts i normalfallet fungera utan tillsyn och kontrollmätningar. Är offeranoderna anslutna via kabel bör man då och då kontrollera att kabeln inte har lossnat eller gått av genom avgrävning, påsegling, fiskeriverksamhet etc.

En anläggning med påtryckt ström fordrar återkommande övervakning och i de flesta fall även kontrollmätningar. Övervakningen omfattar tillsyn av att den elektriska matningsenheten är i gott skick och att den inte har skadats genom vandalism, påkörning, åsknedslag eller dylikt. I övervakningen bör även ingå avläsning av amperemeter och kWh-mätare. Med jämna mellanrum, t ex en gång per år, kontrollmätts skyddseffektiviteten. Mätningen innebär kontroll av skyddspotentialen på kritiska punkter på plåtarna/sponterna antingen med fast monterade eller med mobila referenselektroder. Denna mätning måste göras av personal med kompetens på området. För kontrollmätning under vatten finns svenska dykare med mätkompetens.

6.9 Åtgärder på kajer med stålspons eller stålrörspålar

Korrosionsförebyggande åtgärder och reparation av kajer med stålspons eller stålrörspålar är kostsamt och innebär särskilda tekniska lösningar. Här redovisas i sammandrag erfarenheter från ett svenskt företag verksamt med kajunderhåll [41].

Skvalpzonen

Oskyddade stålsponskajer utsätts i salt- och bräckvatten som regel för en korrosionshastighet i vattenlinjen av storleksordningen 0,3 mm/år. Detta kräver reparationsåtgärder efter 25-30 år. Spontens tvärkraftskapacitet nära förankringsstagens nivå blir otillräcklig om spontprofilens livtjocklek understiger 2,5 mm. Får sponten stå oskyddad ytterligare ca 10 år finns risk för genomrostning. Detta kan orsaka farlig underminering av hamnplanet då fyllningen sipprar ut genom rosthål i sponten.

En effektiv åtgärd för att motverka denna olägenhet är att sponsens krönbalk på utsidan av sponsen gjuts ner till ca 1 m under medellågvattenytan. Detta kan utföras både på en ny och på en befintlig kaj. Kostnaden i de båda fallen är av storleksordningen 5000 kr/m respektive 15 000 kr/m kaj. Oskyddade stålörspålar är som regel utsatta för samma korrosionshastighet som stålspons. Det är väsentligt att kvarvarande stålsocklek är större än 3 mm för att klara de skjupåkänningar, som isflak kan ge upphov till när stora båtar lägger till vid kaj, såvida inte det armerade betongtvärsnittet inuti stålörret dimensionerats för denna belastning.

Stålörspålar kan i vattenlinjen skyddas ner till ca 2 m under MLW med ett omslutande isskydd. Om ett isskydd med ca 2 m diameter installeras i samband med pålningen är kostnaden ca 5 000 kr/påle. Kostnaden för att installera ett motsvarande skydd på pålar i en befintlig kaj är 2-3 gånger högre.

Undervattenszonen

Korrosionshastigheten i undervattenszonen är som regel en tredjedel jämfört med i skvalpzonen. Stålsponskajens momentkapacitet nära sjöbotten blir otillräcklig efter 50-100 år.

För oskyddade stålörspålar minskar knäcksäkerheten med tiden. Vid dimensionering av stålspons och stålörspålar för undervattenszonen rekommenderas en utformning med rostmån för att uppfylla erforderlig bärförmåga under önskad livslängd.

Ett alternativ eller komplement i undervattenszonen är katodiskt korrosionsskydd med offeranoder eller påtryckt ström. Detta har i Sverige visat sig fungera väl på syd- och västkusten. För kajer belägna i områden med frekvent vintersjöfart måste kabelinföringar och anodinfästningar vara synnerligen robusta för att klara de påfrestningar som krafter från is i rörelse kan ge upphov till.

6.10 Ändrad sammansättning hos stålet

Vid olika undersökningar av korrosionen på stål i jord har man funnit att variationer av sammansättningen hos vanliga kolstål och låglegerade konstruktionsstål inte betyder något för korrosionshårdigheten, [3], [18]. I jord och vatten har sk rosttröga stål, dvs kolstål med inlegerade låga halter av krom, fosfor och koppar, inte bättre korrosionshårdighet än normala kolstål.

Däremot har höglegerade stål, såsom de rostfria stålen, betydligt bättre korrosionshårdighet i jord. I jordar med mycket hög kloridhalt, såsom till exempel leror på västkusten, kan dock lokal korrosion i form av gropfrätning uppkomma också på rostfria stål. Rostfria stålsorter är emellertid avsevärt dyrare än kolstål och låglegerade stål. Vidare är svetsning av rostfria stål vid till exempel skarvning betydligt mer komplicerad. Rostfria stål kan därför knappast komma ifråga för stålplåning.

6.11 Kostnader för åtgärder mot korrosion

I detta kapitel redovisas kostnader för olika korrosionsskyddande åtgärder på stålplåtar och stålspond. Kostnadsuppgifterna, som avser 1992 års kostnadsläge, har erhållits från pålleverantörer och konsulter på områdena rostskyddsmålning, katodiskt skydd och varmförzinkning samt från pålningsentreprenörer. I syfte att underlätta jämförelser har kostnaderna så långt som möjligt uttryckts i kronor per löpmeter påle. Det skall påpekas att kostnaderna är ungefärliga och att de varierar från fall till fall, varför de endast bör användas för kostnadsuppskattningar.

Rostmån

Här ges ett exempel på kostnadsökningen vid tillämpning av rostmån på plåtar i jord, dvs överdimensionering av plåtarna.

Antag att grova stålörspålar, yttre diameter 610 mm, skall användas och lastupptagning hos örstålet skall tillämpas. Nyttig godstjocklek är 8 mm. Väntad medelavfrätning i den aktuella jorden antas vara 0,03 mm/år och avsedd brukstid är 100 år.

Rostmånen (t_R) beräknas:

$$\begin{aligned} t_R [\text{mm}] &= \text{väntad medelavfrätning} [\text{mm/år}] \times \text{dimensionerad livslängd} [\text{år}] \\ &= 0,030 [\text{mm/år}] \times 100 [\text{år}] = 3 [\text{mm}] \end{aligned}$$

Stålörrets godstjocklek skall alltså ökas från 8 till 11 mm. Ökning av godstjockleken med 3 mm för en stålörspåle av denna storlek innebär enligt uppgift [42] kostnadsökningen ca 105 kronor per längdmeter örpåle (ca 4,50 kronor per kg stål).

PE-mantel

Kostnadsökningen för PE-mantel på en grov stålörspåle, ytterdiameter 610 mm, är enligt uppgift [42] med dagens priser ca 200 kronor per längdmeter påle (ca 100 kronor per m² påle). PE-mantel appliceras vanligen i örfabriken varför det inte tillkommer några transportkostnader.

Rostskyddsmålning

Kostnaden för rostskyddsmålning av stålplåtar på verkstad, med epoxi eller tjärepoxi i enlighet med vad som krävs i Bestämmelser för Stålkonstruktioner, uppskattas med dagens priser till ca 300 kronor per m² stållyta, vilket för en stålörspåle med ytterdiameter 610 mm motsvarar ca 550 kronor per längdmeter påle. Kostnaden inkluderar blästring av stållytan och efterkontroll av målningsskiktet [43]. Denna kostnad gäller i stort sett oavsett pålprofil, t ex H-balk, X-profil, massivt rundstål, grov stålörspåle eller räls. Kostnaden för transport till och från målningsskiktet är inte medräknade.

Varmförzinkning

Kostnaden för varmförzinkning kan enligt uppgift [44] räknas i kronor per kg stål som skall förzinkas, när det är fråga om massiva stålplåtar. Kostnaden är därvid med dagens priser ca 3 kronor per kg stål. Varmförzinkning av en stålplåt med vikten t ex 50 kg per längdmeter plåt blir således ca 150 kronor per plåtmeter. Kostnader för transport till och från galvaniseringsverkstaden är inte medräknade.

Katodiskt skydd av stålsponskaj

Vid katodiskt skydd med offeranoder (aluminiumanoder) av stålsponskaj med vattendjupet 5-10 meter är anodkostnaden i storleksordningen 1500-2000 kronor per löpmeter kaj vid 15-20 års dimensionerad anodlivslängd. Till detta kommer installationskostnad på 500-700 kronor per löpmeter kaj. Totalkostnaden är ungefär densamma vid anodinstallation i samband med sponslagning för ny kaj som vid renovering av gammal, rostskadad spons.

Katodiskt skydd av stålplåtar i jord och vatten

Kostnaden för katodiskt skydd av stålplåtar i jord eller vatten kan inte definieras generellt eftersom varje installation projekteras var för sig. Utöver kostnad för projektering, tillkommer vid skydd med offeranoder kostnad för anoder och installation. Vid skydd med påtryckt ström tillkommer kostnad för strömmatningsdon (likriktare), anoder, kablar och installation.

Som exempel uppges [45] kostnaden för skydd med offeranod vara ca 275 kronor per längdmeter för en icke ytbelagd stålörspåle (diameter 600 mm) med längden 10 meter, varav 7 meter står i havsvatten och 3 meter ned i bottensediment. Kostnaden inbegriper montering av anoder och avser aluminiumanoder med en anodmassa som ger fullständigt korrosionsskydd under ca 20 år.

Skulle samma stålörspåle vara försedd med PE-mantel ned till pålspetsen reduceras totala kostnaden för det katodiska skyddet till ca 35 kronor per löpmeter plåt, under det konservativa antagandet att 10 % av PE-mantelns yta är mekaniskt skadad in till stålet. Den stora kostnadsreduktionen beror på att PE-manteln kraftigt reducerar skyddsströmsbehovet varvid det krävs betydligt mindre anodmassa.

Kostnadsjämförelse - grov stålörspåle

För jämförelsens skull anges här den ungefärliga kostnaden för olika typer av åtgärder på en grov stålörspåle med diameter 600 mm. Kostnaden, uttryckt i kronor per löpmeter plåt, för de olika skyddsåtgärderna är angiven i **Tabell 26**.

Tabell 26. Jämförelse av kostnader för olika korrosionsskyddande åtgärder på en grov stålrörspåle.

Skyddsåtgärd på stålrörspåle, DN 600	Kostnad ¹⁾ kr/meter påle
Rostmån (3 mm)	100
PE-mantel	200
Katodiskt skydd - offeranod på stål med PE-mantel	<50
Katodiskt skydd - offeranod på obelagt stål ²⁾	275
Rostskyddsmålning	550
Förzinkning	450

1) 1992 års kostnadsläge

2) Avser påle i havsvatten.

6.12 Summering

På grund av kravet på lång livslängd måste korrosionen beaktas vid grundläggning med stålplåtar och stålspons både i jord och vatten. Detta sker genom tillämpning av rostmån, dvs överdimensionering, eller genom att plåtar/sponsen korrosionsskyddas. Metoderna kan kombineras. Korrosionsskyddet kan utgöras av rostskyddsmålning, PE-mantel (på stålrörspålar), förzinkning, elektrokemiskt (katodiskt) skydd eller ingjutning i cementbruk eller betong.

För stålplåtar i jord är tillämpning av rostmån det vanligaste sättet att ta hänsyn till väntad korrosion. Plåtar i jord korrosionsskyddas sällan.

Stålrörspålar kan korrosionsskyddas effektivt genom att en flera millimeter tjock PE-mantel med underliggande epoxiskikt appliceras på rören i rörfabriken. På rörplåtar i vatten, där den mekaniska påfrestningen på PE-manteln är liten, ger denna skyddsmetod ett effektivt och långvarigt korrosionsskydd. Vid neddrivning av PE-mantlade rörplåtar i grov jord måste hänsyn tas till risken för mekaniska skador i PE-manteln.

Stålplåtar och sponsplankor kan rostskyddsmålas enligt olika svenska anvisningar. Moderna färgsystem består vanligen av ren eller hartsmodifierad epoxi. Även vid neddrivning av rostskyddsmålade plåtar i grov jord måste hänsyn tas till skaderisken i färgskiktet.

Riktigt applicerade, bedöms högvärdiga rostskyddssystem kunna korrosionsskydda en stålplåta i jord eller vatten uppemot 15 till 20 år. PE-mantel med underliggande epoxiskikt på stålrörspålar bedöms ge ännu längre skyddsverkan.

Med katodiskt skydd kan korrosionen på stålplåtar kontrolleras med stor säkerhet. Skyddet kan anordnas antingen med offeranoder eller med påtryckt ström med strömmatade anoder. Optimal skyddsverkan erhålls om katodiskt skydd kombineras med rostskyddsmålning eller, i fallet med stålörörplåtar, med PE-mantel. Plåtar i jord bör vara ytbelagda om de skall skyddas katodiskt. Skyddsström flyter då endast till beläggningsskador och skyddar det blottlagda stålet i dessa. Total strömutmatning blir därigenom liten, medförande lägre anläggningskostnad och minimerad risk för skadlig sekundärverkan av skyddsströmmen på andra närliggande metallkonstruktioner. Vid katodiskt skydd av stålsponskajer brukar dessa vara obelagda. Skyddsanoderna monteras vanligen direkt på sponsten.

Varmförzinkning ger, om zinkskiktet är tillräckligt tjockt, normalt ett långvarigt korrosionsskydd av stålplåtar i de flesta jordar. I vissa jordar, särskilt sådana med lågt pH-värde, kan emellertid zinkens avfrätningshastighet bli så stor att zinkskiktets livslängd förkortas avsevärt. Lågt pH-värde förekommer normalt bara i den luftade zonen ovan lägsta grundvattenyta. I sådana fall kan zinkskiktets livslängd på påldelen i denna zon förlängas betydligt genom att zinkytan målas med skyddsfärg.

Zinkskiktets beständighet i vatten är i hög grad beroende av pH-värde, vattensammansättning och vattnets strömningshastighet. Utanför pH-området 7—12 är zinkens avfrätningshastighet hög. Mjuka vatten angriper zink medan hårda vatten är föga aggressiva. I vatten med högre strömningshastighet än ca 0,5 m/s är avfrätningshastigheten betydande.

Ingjutning av stålplåtar i cementbruk ger, på grund av det höga pH-värdet, ett mycket effektivt och långvarigt korrosionsskydd. Insidan på stålörörplåtar, som fylls med cementbruk eller betong, korroderar inte. Bruket eller betongen får inte innehålla klorider.

Kajer med stålspons eller stålörörplåtar kan korrosionsskyddas effektivt i vattenlinjen genom att krönbalken gjuts ned ett stycke under lågvattenytan. Vid dimensionering av ny kaj kan korrosionen i undervattenszonen beaktas genom tillämpning av rostmån eller elimineras med katodiskt skydd. På befintlig kaj kan pågående korrosion i undervattenszonen upphävas med katodiskt skydd.

Korrosionsbenägenheten hos olegerat och låglegerat stål i jord kan inte påverkas genom ändrad sammansättning hos stålet. Användning av plåtar av rostfritt stål torde vara orealistiskt ur ekonomisk synpunkt.

För plåtar i jord innebär tillämpning av rostmån normalt lägre kostnad än användning av aktiva skyddsåtgärder. På stålörörplåtar i korrosivt vatten, där rostmån inte kan tillämpas ensamt, har i normalfallet skydd med PE-mantel lägst kostnad bland aktiva skyddsåtgärder. Kombineras PE-mantel med katodiskt skydd med offeranod, för skydd av stålet i beläggningsskador, blir kostnadsökningen endast marginell.

7. Standarder och handböcker

7.1 Standarder för korrosionsskydd

På olika ställen i texten hänvisas till standarder och anvisningar för korrosionsskydd. Dessa är sammanställda i detta avsnitt.

Organiska skyddsbeläggningar

- 1 Tysk standard: DIN 30 670, Umhüllungen von Stahlrohren und - Formstücken mit Polyethylen. (April 1991).
- 2 Vattenfall Energisystem AB: PU-meddelande Målningsanvisning för stålkonstruktioner (BEK3-LT/HH TE 20). Stockholm, 1990-11-05.
- 3 BSK-Bestämmelser för stålkonstruktioner. Avsnitten 1:23, 8:7 och 9:75. Statens Planverk och AB Svensk Byggtjänst. Stockholm, 1987.
- 4 Bronorm 88, Publ 1993:203. Bilaga 3-9, Korrosionshänsyn för i jord neddrivna stålprofiler. Vägverket. Borlänge, 1993.
- 5 Svensk standard SS 05 59 00, Rostgrader hos ståltytor och noggrannhetsgrader vid ståltytors förbehandling för rostskyddsmålning. Utgåva 3. SIS-Standardiseringskommissionen 1988. (Motsvarar ISO 8501-1:1988)
- 6 International standard ISO 8501-1:1988, Preparation of steel substates before application of paints and related products - Visual assessment of surface cleanliness. (Motsvarar SS 05 59 00)

Förzinkning

- 7 Svensk standard SS 3583, oorganiska ytbeläggningar - Zinkbeläggningar påförda genom styckvis varmdoppning - Allmänna upplysningar och fordringar.

Katodiskt skydd

- 8 Starkströmsföreskrifterna STEV-FS 1988:1, § 112. Statens Energiverk, Stockholm, 1988.
- 9 Svensk standard SEN 08 04 01, Läckströmmar och katodiskt skydd. SIS- Standardiseringskommissionen. Stockholm, 1976.
- 10 Anvisning för mätning av sekundärverkan från katodiskt skydd. KI-Rapport 1983:4. Korrosionsinstitutet. Stockholm, 1983.

Korrosionsundersökningar i jord

- 11 Anvisning för bestämning av jordars resistivitet. KI Bulletin nr 88. Korrosionsinstitutet. Stockholm, 1980.
- 12 Anvisning för bestämning av jordars pH-värde. KI Bulletin nr 89. Korrosionsinstitutet. Stockholm, 1980.

7.2 Handböcker i korrosion och korrosionsskydd

I detta avsnitt presenteras handböcker i korrosion och korrosionsskydd vilka är relevanta för korrosionsfrågor rörande stålplåtar och stålsponter. På olika ställen i texten hänvisas till en del av handböckerna.

Korrosion i jord och vatten

- 1 Mattsson, E: Elektrokemi och korrosionslära. Andra utgåvan. KI-Bulletin nr 100. Korrosionsinstitutet, Stockholm 1992. (Boken finns på olika språk.)
- 2 Wranglén, G: Metaller korrosion och ytskydd, Almqvist & Wiksell, Stockholm 1967. (Boken finns på olika språk.)

Korrosionsskyddande beläggningar

- 3 Handbok i rostskyddsmålning av allmänna stålkonstruktioner. KI-Bulletin nr 85. Korrosionsinstitutet, Stockholm 1984.
- 4 Handbook of corrosion protection for steel pile structures in marine environments. Editors: Dismuke, T & Coburn, S & Hirsch, C. American Iron and Steel Institute. Washington D.C., 1981.
- 5 Steel pipe pile corrosion control. Handbok utgiven av Japanese Association for Steel Pipe Piles. Tokyo 1982.
- 6 Varmförzinkning. Handbok utgiven av Nordisk Förzinkningsförening. Stockholm, augusti 1989.
- 7 Val av ytbehandling - oorganiska beläggningar. SIS Handbok 160. Standardiseringskommissionen. Stockholm, november 1986.

Katodiskt korrosionsskydd

- 8 Bader, G: Katodiskt skydd av konstruktioner i jord. KI-Bulletin nr 60. Korrosionsinstitutet, Stockholm 1970.

- 9 Camitz, G: Katodiskt skydd av konstruktioner i vatten - praktikfall. KI-Bulletin nr 75. Korrosionsinstitutet, 1975.
- 10 Morgan, J: Cathodic protection. National Association of Corrosion Engineers (NACE), 1987. Beställs från; American Technical Publishers Ltd, 27-29 Knowl Piece, Wilburn Way, HERTFORDSHIRE SG4 0SX, Great Britain.
- 11 von Baeckmann & Schwenk, W & Prinz, W: Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes. VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1989. Tyskland (3:e utgåvan).

8. Kunskapsluckor och behov av kompletterande arbete

I denna utredning har ett antal frågeställningar identifierats vilka skulle behöva klarläggas genom ytterligare utredning och/eller praktiska undersökningar.

Ytterligare bearbetning av jordundersökningarna

Resultaten från de refererade undersökningarna av korrosion på stålplåtar i jord ger mycket värdefull information. I de flesta fallen är både uppmätt korrosion och jordlagerföljder och jordparametrar väldokumenterade. Resultaten är emellertid så många och de är i flera fall presenterade på ett sådant sätt att de är svåröverskådliga. En vidare bearbetning och sammanställning av resultaten i enhetlig form skulle kunna ge ytterligare information, som inte har kunnat beläggas i denna rapport, exempelvis samband mellan korrosionen och jordparametrar.

Regler för tillämpning av rostmån

Tillämpning av rostmån är det vanligaste sättet att ta hänsyn till väntad korrosion i jord och i undervattenszonen. Det finns emellertid inga allmänt accepterade svenska regler för hur stor rostmånen skall vara vid olika betingelser. Bland annat föreliggande rapport skulle kunna utgöra underlag för utformning av regler för tillämpning av rostmån.

Lokala korrosionsangrepp i jordens luftade zon

På stålplåtar i jord tycks det i vissa fall kunna uppstå lokala korrosionsangrepp i den luftade zonen ovan grundvattenytan. I SJs stora undersökning med stålstänger i jord observerades inga sådana angrepp. Å andra sidan stod grundvattnet ganska nära markytan på SJs provplatser. I Korrosionsinstitutets och Statens geotekniska instituts undersökning på stålplåtar har däremot avgränsade men relativt djupa angrepp påträffats i den luftade zonen. I en preliminär undersökning av nyligen dragna rörpålar, som Sandvik AB slog ned för 25 år sedan, gjordes samma observation.

Dessa förhållanden skulle behöva analyseras ytterligare i syfte att klarlägga om angreppen kan ha praktisk betydelse för stålplåtars bärförmåga och om angreppen kan föranleda behov av tjockare rostmån och/eller förstärkt korrosionsskydd på påldelar i den luftade zonen.

Mekaniska skador i organiska skyddsbeläggningar

Det är uppenbart att organiska skyddsbeläggningar såsom PE-mantel och rostskyddsmålning, kan skadas mekaniskt vid neddrivning av pålar i t ex steniga jordar och fyllningsjord. Det tycks saknas undersökningar av skyddsbeläggningarnas mekaniska hårdighet vid pålning och av den praktiska betydelsen av repor i beläggningen. Den mekaniska hårdigheten skulle kunna undersökas genom att pålar med olika beläggningssystem slås i någorlunda väldefinierade jordlagerföljder och sedan dras upp för inspektion. Speciellt bör vidhäftningen invid pålskarvar studeras.

Betydelsen av repor för korrosionens utbredning skulle kunna undersökas genom att slå belagda plåtar med avsiktligt skadad beläggning i korrosiv jord och låta dem stå ett antal år innan de dras upp för besiktning.

Förzinkningens beständighet i ostörd jord

Förzinkade stålplåtar används i stor omfattning i jord. Zinkens korrosion i jord är komplicerad och bestäms av invecklade samband mellan kemiska och fysikaliska faktorer. Det finns inga undersökningar av zinkens korrosionshastighet på plåtar neddrivna i ostörd jord. I omgrävd jord har däremot zinkens korrosionsbenägenhet undersökts mera ingående i svenska jordarter. Undersökningarna visar att korrosionshastigheten kan variera inom vida gränser. Mycket talar dock för att korrosionshastigheten är lägre i ostörd än i omgrävd jord. Hur beständigt zinksiktet är i ostörd torv, sulfidjord och i annan jord med lågt pH-värde är emellertid oklart.

Frågan skulle kunna klarläggas genom uppdragning av och mätning av kvarvarande skiktjocklek hos zinken på ett antal varmförzinkade stålrörspålar eller andra förzinkade rör, som stått en längre tid i väldokumenterade jordlagerföljder.

Vägledning för val av korrosionsskyddande åtgärder

Som framgått av den tidigare texten finns det en rad olika korrosionsskydd av stålplåtar och stålspons i jord och vatten. Beroende på de aktuella förhållandena är de olika skyddstyperna mer eller mindre lämpliga i varje enskilt fall. Ibland är det lämpligt med en kombination av två eller flera skyddsåtgärder medan kombinationen är mindre lämplig i andra situationer. Korrosionsskydd måste därför väljas från fall till fall. Val av korrosionsskydd fordrar god kännedom om skyddens funktion och kunnande av korrosionsförloppen i vatten respektive jord.

Det skulle vara möjligt att utarbeta en vägledning innehållande ett antal typfall av grundläggningar med stålplåtar med exempel på lämpliga korrosionsskyddande åtgärder i de olika fallen. En sådan vägledning skulle säkerligen underlätta för projektörer av grundläggningar.

Observationsplåtar vid framtida, större grundläggningsarbeten

De jordarter och vattentyper, som de refererade korrosionsundersökningarna utförts i, är representativa för åtskilliga miljöer i Sverige. Med tanke på den stora variationsrikedomen vad gäller jordlagerföljder och vattentyper, speciellt sötvatten, i landet är dock med nödvändighet undersökningsmaterialet begränsat. I fyllningsjord, mekaniskt påverkad jord och i kontaminerad jord är undersökningsmaterialet också begränsat.

Genom att i samband med större grundläggningsarbeten slå respektive sätta ned stålprovstänger i jord, särskilt i fyllningsjord i stadsmiljö, eller i vatten och efter några år låta ta upp stängerna för utvärdering av korrosionen, skulle ny och värdefull information kunna tillföras och komplettera befintligt kunnande. Detta gäller särskilt den lokala korrosionens djup och utbredning på stålplåtar. En sådan undersökning ger dessutom detaljerad information om de faktiska korrosionsförhållandena för den aktuella grundläggningen.

För att en sådan undersökning skall ge rättvisande information och för att det i efterhand skall

kunna gå att utvärdera korrosionshastigheten fordras det att undersökningen genomförs på ett systematiskt sätt. Bland annat måste provpålens ursprungliga dimension vara känd.

Framtida uppföljning av nyare korrosionsundersökningar

I rapporten redovisas undersökningsresultat som rapporterats fram till ungefär 1990. Både i Sverige och utomlands pågår emellertid undersökningar av korrosion och korrosionsskydd på plåtar och spons som ännu ej har rapporterats. Det rekommenderas därför att man om ett antal år gör en förnyad sammanställning av undersökningar publicerade efter 1990, i syfte att kontrollera om det finns anledning till ändring eller justering av faktamaterialet i rapporten.

9. Sammanfattande slutsatser

Denna utredning har utgått från att stålplåtar och stålsplint i jord och vatten förväntas stå mycket lång tid utan att korrosionen skall få inkräkta på deras bärformåga. Livslängdskravet i jord är i många fall av storleksordningen 100 år. Utredningen kan sammanfattas i följande slutsatser:

Korrosionshastigheter och korrosionens uppträdande

- Korrosionen på stålplåtar och stålsplint i jord och vatten är relativt väl kartlagd genom flera systematiska långtidsundersökningar där man mätt på plåtar och splint som stått länge i jord eller i söt- eller saltvatten.
- Korrosionen kan på stålplåtar i jord uppträda dels i form av en relativt jämn avfrätning av stålytan, dels i form av djupare, lokala angrepp. En rad faktorer inverkar på korrosionsangreppens djup och utbredning. Det är den jämna avfrätningen som har störst betydelse för bärformågan hos plåtar och splint.
- På påldelar under grundvattenytan är både medelavfrätningen och den lokala korrosionshastigheten normalt liten, sällan mer än 20–30 $\mu\text{m}/\text{år}$ (0,020–0,030 mm/år) och oftast betydligt lägre. Orsaken till den ringa korrosionen är att grundvattnet och den täta jorden starkt hämmar syrediffusionen till stålytan så att den katodiska reaktionen (syrgasreduktion) går långsamt och begränsar korrosionshastigheten.
- På påldelar i den luftade zonen mellan markytan och grundvattenytan där syrediffusionen inte är lika hämmad är medelavfrätningen vanligen något högre än under grundvattenytan, dock sällan högre än 40 $\mu\text{m}/\text{år}$ (0,040 mm/år). Detta gäller både i ostörd och omgrävd/återfylld jord.
- I den luftade zonen kan lokala angrepp uppstå med betydligt högre korrosionshastighet än medelavfrätningen. I två svenska långtidsundersökningar med neddrivna stålplåtar respektive vertikalt nedgrävda stålstänger var korrosionshastigheten i de djupaste lokala angreppen ca 200 $\mu\text{m}/\text{år}$ respektive ca 80 $\mu\text{m}/\text{år}$ i den luftade zonen.
- Det experimentella underlaget är otillräckligt för bedömning av om de lokala angreppen, som i vissa fall kan uppstå i den luftade zonen, har praktisk betydelse för massiva stålplåtars bärformåga och om angreppen kan föranleda behov av tjockare rostmån och/eller förstärkt korrosionsskydd.
- På plåtar och splint i vatten kan olika korrosionszoner med olika stor korrosionshastighet särskiljas. Utpräglad gropfrätning är ovanlig på kolstål i naturliga vatten.
- I vatten är korrosionen störst kring vattenlinjen medan angreppsdjupet avtar nedåt i vattnet. Typiska värden på medelavfrätningen i de olika korrosionszonerna på stålplåtar och stålsplint i havsvatten är 100 $\mu\text{m}/\text{år}$ i atmosfärszonen, 300 $\mu\text{m}/\text{år}$ i skvalpzonen, 100 $\mu\text{m}/\text{år}$ i

undervattenszonen och upp till 50 µm/år i bottensedimentet. Motsvarande värden i icke strömmande sötvatten är 50, 200, 100 och 20 µm/år. Korrosionen är således betydligt större i vatten än i jord.

- Oskyddade segjärnspålar och stålplåtar i jord och vatten bedöms uppträda på sinsemellan likartat sätt ur korrosionssynpunkt. Det som i rapporten sagts om korrosion på stålplåtar gäller således även för segjärnspålar.

Åtgärder mot korrosion

- På grund av kravet på lång livslängd måste korrosionen beaktas vid grundläggning med stålplåtar och stålsplint både i jord och vatten. Detta sker genom tillämpning av rostmål, dvs överdimensionering, eller genom att plåtarna/splinten korrosionsskyddas. Metoderna kan kombineras. Korrosionsskyddet kan utgöras av rostskyddsmålning, PE-mantel (på stålplåtar), förzinkning, elektrokemiskt (katodiskt) skydd eller ingjutning i cementbruk eller betong.
- Tillämpning av rostmål är det vanligaste och enklaste sättet att ta hänsyn till väntad korrosion på stålplåtar i jord. I många fall fordras det en viss minsta rostmål, som ett grundskydd, oavsett om plåten är försedd med något annat korrosionsskydd.
- Det finns inga allmänt accepterade svenska regler för hur stor rostmålen skall vara vid olika betingelser. Den klassning av svenska jordarters och vattentypers korrosivitet, som gjorts i rapportens APPENDIX 1, skulle kunna utgöra underlag för regler för tillämpning av rostmål.
- PE-mantel med underliggande epoxiskikt som korrosionsskydd av stålplåtar har hög skyddseffektivitet. Rep- och avskalningståligheten vid påslagning i grov jord är oklar, men undersökningar av PE-mantlade gasrör som pressats genom väg- och järnvägsbankar har visat att endast liten stålplata blottläggs genom repning. Troligen uppstår de största mekaniska skadorna på en PE-mantlad plåtes nedre del, där å andra sidan korrosionen är mindre än närmare markytan. På rörplåtar i vatten kan PE-manteln skyddas mot mekaniska skador med ett omslutande isskydd.
- Stålplåtar kan rostskyddsmålas bland annat enligt anvisningar i Bestämmelser för Stålkonstruktioner, Vattenfalls Målningsanvisningar och Vägverkets BRONORM 88. Moderna färgsystem består vanligen av ren epoxi eller hartsmodifierad epoxi. Även för rostskyddsmålning är rep- och avskalningståligheten i jord oklar, men också epoximålade gasrör skadades i förhållandevis liten omfattning vid pressning genom väg- och järnvägsbankar.
- Högvärdiga rostskyddssystem målade på noggrant förbehandlad stålplata bedöms kunna korrosionsskydda en stålplata i jord eller vatten uppemot 15 till 20 år. Vid kombination med katodiskt skydd förlängs skyddsbeläggningars skyddsverkan genom att underrostning motverkas i mekaniska skador i skyddsskiktet.
- På stålplåtar är PE-mantel med epoxigrundfärg billigare och bedöms ge längre skyddsverkan än enbart rostskyddsmålning.

- Varmförzinkning ger, om zinkskiktet är tillräckligt tjockt, normalt ett långvarigt korrosionsskydd av stålplåtar i de flesta jordar. I vissa jordar, särskilt sådana med lågt pH-värde (kemiskt sur jord), kan emellertid zinkens avfrätningshastighet bli så stor att zinkskiktets livslängd förkortas avsevärt. Lågt pH-värde förekommer normalt bara i den luftade zonen ovan lägsta grundvattenyta. Zinkskiktets livslängd på påldelen i denna zon kan förlängas väsentligt genom att zinkytan målas med skyddsfärg.
- Varmförzinkningens beständighet i vatten är i hög grad beroende av pH-värde, vattensammansättning och vattnets strömningshastighet. Utanför pH-området 7–12 är zinkens avfrätningshastighet hög. Mjuka vatten angriper zink medan hårda vatten är föga aggressiva. I vatten med högre strömningshastighet än ca 0,5 m/s är avfrätningshastigheten betydande.
- Ingjutning av stålplåtar i cementbruk ger ett mycket effektivt och långvarigt korrosionsskydd. Övre delen av en normalt slagen stålplåta kan kringgjutas med bruk varvid korrosionssangrepp i den luftade markzonen motverkas. Insidan på stålörspålar, som fylls med cementbruk eller betong, korroderar inte. Bruket eller betongen får inte innehålla klorider.
- Med katodiskt skydd kan korrosionen på stålplåtar kontrolleras med stor säkerhet. Optimal skyddsverkan erhålls om skyddet kombineras med ytbeläggning på plåtarna, eller i fallet med stålörspålar, med PE-mantel. Skyddsström flyter då endast till beläggningsskador och skyddar det blottlagda stålet i dessa. Total strömutmatning blir därigenom liten, medförande lägre anläggningskostnad och minimerad risk för att andra närliggande metallkonstruktioner skall skadas av skyddsströmmen genom sekundärverkan.
- För obelagda stålplåtar i jord begränsas tillämpningen av skyddsmetoden av risken för sekundärverkan på närbelägna metallkonstruktioner i jorden. Plåtar i jord bör av denna anledning vara ytbelagda, åtminstone från markytan och ett antal meter nedåt, om de skall skyddas katodiskt. Katodiskt skydd av plåtar i havsvatten innebär i allmänhet inga problem eftersom havsvatten leder ström utomordentligt väl.
- Vid katodiskt skydd av stålsfontkajer brukar dessa vara obelagda. Skyddsanoderna monteras direkt på fonten, bland annat för undvikande av sekundärverkan på t ex fartyg vid kaj.
- Kajer med stålsfont eller stålörspålar kan korrosionsskyddas effektivt i vattenlinjen genom att krönbalken gjuts ned ett stycke under lågvattenytan. Vid dimensionering av ny kaj kan korrosionen i undervattenszonen beaktas genom tillämpning av rostmån eller elimineras med katodiskt skydd. På befintlig kaj kan pågående korrosion i undervattenszonen motverkas med katodiskt skydd.
- Korrosionsbenägenheten hos olegerat och låglegerat stål i jord kan inte påverkas genom ändrad sammansättning hos stålet. Användning av plåtar av rostfritt stål torde vara orealistiskt ur ekonomisk synpunkt.

Kostnader för skyddsåtgärder

- För plåtar i jord innebär tillämpning av rostmån normalt lägre kostnad än användning av

aktiva skyddsåtgärder. På stålrovspålar i korrosivt vatten, där rostman inte kan tillämpas ensamt, har i normalfallet skydd med PE-mantel lägst kostnad bland aktiva skyddsåtgärder. Kombinerat PE-mantel med katodiskt skydd med offeranod blir kostnadsökningen endast marginell.

Korrosivitetsklassning av jord och vatten

- I undersökningen har, för första gången i Sverige, olika jordarters och vattentypers korrosivitet mot oskyddade stålplåtar och stålspons graderats, varvid korrosiviteten har uttryckts som medelavfrätning i $\mu\text{m}/\text{år}$. Avsikten är att korrosivitetsklassningen, i väntan på allmänna svenska anvisningar, skall utgöra ett hjälpmedel vid dimensionering av rostman och vid val av andra skyddsåtgärder på stålplåtar och stålspons.

10. Referenser

- [1] Eriksson, A Ch: Litteraturundersökning av korrosion på stålplåtar. Internrapport (50 sid) 1976-03-06 i Pålkommisionens beständighetsgrupp,. IVA Pålkommisionen, Stockholm, 1976.
- [2] Bredenberg, H & Eriksson, U & Eriksson, A & Camitz, G: Stålplåtar - Användningsområden och praxis för utförande. IVA-Pålkommisionen. Rapport nr 69. Stockholm 1983.
- [3] Romanoff, M: Corrosion of steel pilings in soils. NBS Monograph 58. U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards. Washington 1962.
- [4] Sederholm, B & Svensson, T & Vinka, T-G: Korrosion på metaller i jordar med olika surhetsgrad och vattenhalt. Rapport R7:1992. Statens råd för byggnadsforskning (BFR), Stockholm 1992.
- [5] Eriksson, F; Korrosionsinstitutet: Personligt meddelande 1980.
- [6] Gerhold, W F: Corrosion behaviour of ductile cast iron pipes in soil environments. Journ. AWWA(1976) No. 12. pp 674-678.
- [7] Brooks, F E & Fuller, A G & Crews, D L: Notes and comments - Corrosion behaviour of ductile castiron pipe in soil environments. Journ. AWWA(1977) No. 2. pp. 110-114.
- [8] Linder, M: Korrosionshårdigheten i vatten hos gråjärn, segjärn och aducerjärn - Litteraturläsa. Rapport nr 51552, 1982-09-02. Korrosionsinstitutet, Stockholm. Se även Gjuterinytt nr 488, 1982-12-07. Svenska Gjuteriföreningen, Jönköping.
- [9] Sandegren, E: Korrosion på stål - vertikalt orienterat - i jord, slutrapport. Statens Järnvägars huvudkontor. Avdelningen för geoteknik och ingenjörsgologi. Meddelande nr 26. Stockholm 1988.
- [10] Camitz, G & Vinka, T-G: Corrosion of steel and metalcoated steel in Swedish soils - effects of soil parameters. I: Effects of soil characteristics on corrosion. ASTM STP 1013 (V Chaker & J D Palmer, Eds.). American Society for Testing and Materials, Philadelphia 1988. s 37-53.
- [11] Troselius, L: Korrosionsrisker under mark - stagförankringar i ställverk och spont i dammar. Föredrag vid Korrosionsinstitutets konferens korrosionsskydd av vattenkraftverk, 9-10 april 1991.
- [12] Vinka, T-G & Sederholm, B: Korrosion på blykablar och stålstolpar i jord - samband med jordparametrar. Under publicering vid Korrosionsinstitutet.

- [13] Romanoff, M: Performance of steel pilings in soils. Paper No. 82. Proc. 25th NACE Conf. March 1969, Houston.
- [14] Rosenqvist, I Th: Subsoil corrosion of steel, Norges Geotekniske Institutt. Oslo 1961.
- [15] Tungesvik, K & Moum, J & Fischer, K P: Investigations of corrosion rates on steel piles in Norwegian marine sediments. Proc. 7th Scandinavian Corrosion Congress. Trondheim 1975.
- [16] Tungesvik, K: Investigations of corrosion rates on steel piles in Norwegian marin sediments. Technical Report No. 14. Norges Geotekniske Institutt. Oslo 1976.
- [17] Fischer, K P & Bue, B: Corrosion and corrosivity of steel in Norwegian marine sediments. I: Underground Corrosion. ASTM STP 741 (Edward Escalante; editor) American Society for Testing and Materials. Philadelphia, 1981. s 24-32.
- [18] Ohsaki, Y: Corrosion of steel piles driven in soil deposits. Soils and Foundations, Vol. 22, 1982, No. 3, pp 57-76.
- [19] Romanoff, M: Corrosion evaluation of steel test piles exposed to permafrost soils. Paper No. 81, Proc. 25th NACE Conf. March 1969.
- [20] Sandegren, E: Korrosionsrisker och motåtgärder vid jordförlagda metallkonstruktioner - stålplåtar, stålsponter och dragstag. Föredrag vid Korrosionsinstitutets konferens Korrosionsskydd i jord. Stockholm, 9-10 maj 1984.
- [21] Eriksson, K & Mattsson, L-E & Klingenberg, H & Wannerberg, C: Skador i konstruktioner i svenska sjöfartsanläggningar beroende på den marina miljön. BFR-Rapport R54:1985. Byggforskningsrådet, Stockholm 1985.
- [22] Klingenberg, H & Bergström, H: Swedish experience of corrosion on steel sheet piling quays in the Baltic. Proceedings från: Baltic Conference on design, construction and maintenance of harbour structures. Norrköping, 24-25 sept. 1987. Statens Geotekniska Institut, Linköping.
- [23] Sund, G: Korrosion i havsvatten på olika djup. KI-Rapport 1990:6. Korrosionsinstitutet, Stockholm 1990.
- [24] Håkansson, A & Sandberg, B & Vinka, T-G: Cathodic protection of road culverts in freshwater. Föredrag F-75, proceedings: 11th Scandinavian Corrosion Congress. Stavanger, June 19-21, 1989.
- [25] Johnsson, T & Sederholm, B: Korrosionsinstitutets undersökningsprotokoll 51 904/1, Korrosionsskydd av vägtrummor. Slutrapport. Resultat efter fyra års exponering på försöksstationer. Stockholm, 1990-11-18.

- [26] Korrosion i jernspunsvaegge. Meddelelse nr 4 fr. Havnekorrosionsutvalget i Danmark. Korrosionscentralen, numera FORCE Institutterne, Brøndby, (Köpenhamn) 1963.
- [27] Escalante, E et al: Corrosion and protection of steel piles in a natural seawater environment. NBS Monograph No. 158. U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards. Washington D.C. 1977.
- [28] Edwards, Willard, E: "Marine corrosion: Its cause and cure", Proc. of 8th Annual Appalachian underground short course, Technical Bulletin No. 69, West Virginia University Bulletin, October 1963.
- [29] Morley, J (Morley & Atlay Ltd., U.K.): Personligt meddelande 1983.
- [30] Girnau, G: Konstruktion, Korrosion und Korrosionsschutz unterirdischer Stahltragwerke - Spundwände, Tübbings, Bleche. Band 14 (183 sid). Utgivare: Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen, Düsseldorf & Alba Buchverlag, Düsseldorf. Oktober 1973.
- [31] Wijngaard, B H: Steel piling corrosion in marine environments - a survey. Commission of the European Communities, technical steel research. Report EUR 7430 EN. Metaalinstituut TNO, Apeldorn, Holland, 1982.
- [32] Polyetenbelagda stålrör från Rautaruukki. Broschyr PUR 5/91, utgiven av Rautaruukki Oy, 1991.
- [33] Nakamura, M; Nippon Steel Corporation: Personligt meddelande 1983.
- [34] von Baeckmann, W & Barckmann, H: Kathodisch geschützte Rohrleitungen an Kreuzungen mit Verkehrswegen. GWF-Gas/Erdgas, Vol. 113(1972), Heft 2. s 80-82.
- [35] NS-PAC withstands severe corrosive offshore environments. Broschyr EXE 546, utgiven av Nippon Steel Corporation, 1983.
- [36] Rinvoll, A: 5 års testing av korrosjonsbeskyttende maling og belegg for stålkonstruksjoner i ferskvann. Föredrag vid Korrosionsinstitutets konferens: Rostskyddsmålning '93. Stockholm, 9-10 februari 1993.
- [37] Troselius, L: Långtidsprovning av rostskyddsfärger i vatten. FUD-rapport BEK3-LT/HH-TE 20. Vattenfall, Stockholm, 1991-02-08. (rekvireras från Vattenfall Utveckling AB i Älvkarleby).
- [38] Sederholm, B & Eriksson, F: Korrosionsskyddsegenskaper hos organiska pulverbeläggningar. KI-Rapport 1989:6. Korrosionsinstitutet, Stockholm 1989.
- [39] Johnsson, T: Korrosionshärdigheten hos beläggningar av aluminium, zink och deras legeringar. Resultat av elva års exponering i jord. KI-Rapport 1992:4. Korrosionsinstitutet, Stockholm 1992.

- [40] Camitz, G & Molander, A: Katodiskt skydd av omålad, permanent stålsponskaj i sötvatten. KI-Rapport 1981:4. Korrosionsinstitutet, Stockholm 1981.
- [41] Hans Klingenberg; KFS-Anläggningskonstruktörer AB, Stockholm: personligt meddelande 1993.
- [42] Arne Sjöberg; Rautaruukki Rör AB: personligt meddelande 1992.
- [43] Sven Hedman; Korrosionsinstitutet: personligt meddelande 1992.
- [44] Nordisk Förzinkningsförening: personligt meddelande 1992.
- [45] Gustavsson, Evert; Bergsöe Anti Corrosion AB: personligt meddelande 1993.

APPENDIX 1

Klassning av olika jordars och vattens korrosivitet mot stålplåtar och stålspons

I IVA Pålskommissionens arbetsgrupp ”Korrosion på stålplåtar” har man gjort en klassning av korrosiviteten hos olika jordar och vatten. Klassningen är baserad på Pålskommissionens rapport ”Korrosion och korrosionsskydd av stålplåtar och stålspons i jord och vatten” samt på erfarenheter hos arbetsgruppens ledamöter och vid Korrosionsinstitutet.

Avsikten med korrosivitetsklassningen är att peka ut jord- och vattenförhållanden som kräver att särskild hänsyn tas till korrosionen men samtidigt att visa under vilka förhållanden som korrosionen är liten. Meningen är att klassningen skall kunna utgöra ett hjälpmedel vid projektering av grundläggning med stålplåtar eller stålspons.

Jordarnas och vattnens korrosivitet är uttryckt som medelavfrätning (dvs en relativt jämn avfrätning av stålytan) i $\mu\text{m}/\text{år}$. $1 \mu\text{m} = 0,001 \text{ mm}$. I korrosivitetsklassningen har hänsyn inte tagits till utpräglad lokal korrosion som i vissa fall kan uppstå på stålplåtar i jord, främst i den luftade zonen mellan markytan och grundvattenytan. Anledningen härtill är att det experimentella underlaget för närvarande är otillräckligt för säkra angivelser av den lokala korrosionens storlek. Hänsyn har heller inte tagits till effekter av eventuell, kraftig isnötning på plåtar och sponter i vatten. Klassindelningen av jordkorrosiviteten gäller endast för stålplåtar och stålspons som drivs ned.

I angivna värden på medelavfrätningen i jord finns en viss säkerhetsmarginal. Detta innebär att medelavfrätningen i verkligheten är lägre än angivna värden. Säkerhetsmarginalen varierar från fall till fall, varför det inte är möjligt att ange marginalens storlek. I allmänhet är dock marginalen mindre i starkt korrosiv jord än i svagt korrosiv jord.

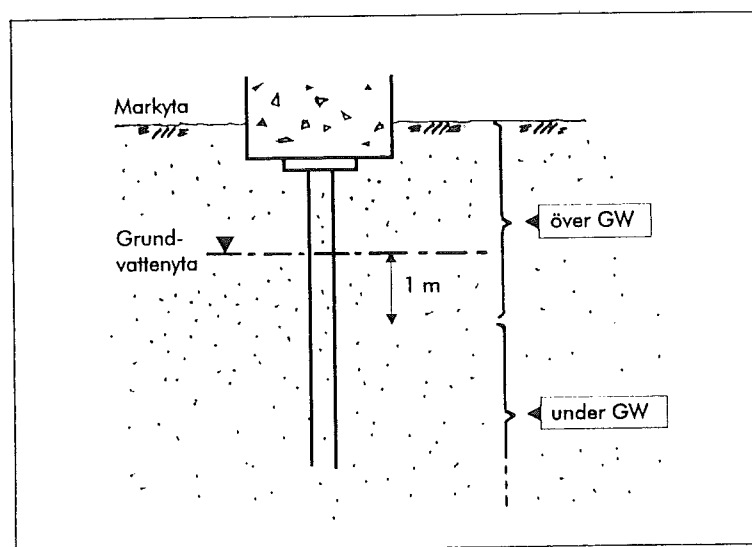
I vatten är medelavfrätningen större och varierar inom betydligt mera vida gränser än i jord. Säkerhetsmarginalen i angivna värden på medelavfrätningen i vatten varierar därför i högre grad än i jord. I vissa fall, särskilt i havsvatten, kan säkerhetsmarginalen vara mycket liten.

Underlag för dimensionering av rostmån (korrosionstillägg) på stålplåtar och stålspond i svenska jordar.
- Förslag.

Jordart	Dimensionerande värde Medelavfrätning $\mu\text{m}/\text{år}$	
	över GW	under GW ⁽¹⁾
Sand, grus, sandiga/grusiga moräner	20	20
Lera, silt leriga/siltiga moräner	30	20
Gyttjig lera/silt, gyttja, torv, dy	40	30
Strandnära jordar på västkusten (starkt saltigt grundvatten)	50	30
Okontrollerad fyllning (naturlig jord)	40	30
Sprängsten, grovt grus, grov kross etc i vatten	behandlas som påle i vatten	behandlas som påle i vatten

GW = grundvattenytan

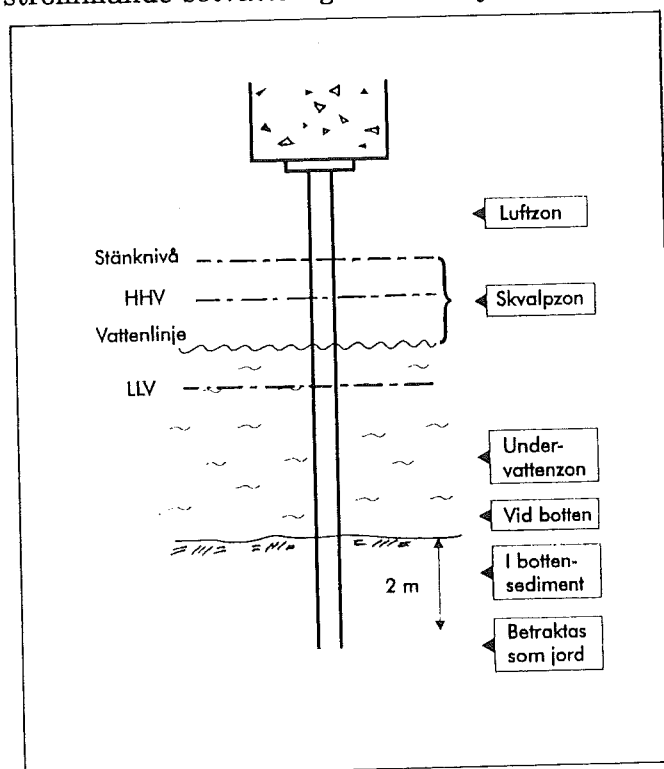
1) Under GW = 1 m under lägsta grundvattenyta och därunder.



Underlag för dimensionering av rostmån respektive val av korrosionsskydd på stålplåtar eller stålspons i svenska vatten. - Förslag.

Zon ¹		Dimensionerande värde Medelavfrätning, $\mu\text{m}/\text{år}$			
		Sötvatten		Bräckt vatten	Havs- vatten
		icke strömmande	strömmande ³		
Luftzonen strax ovan skvalpzonen		≤ 50	≤ 50	≤ 100	≤ 100
Skvalpzonen		≤ 200	≤ 200	≤ 300	≤ 300
Undervattenszonen		≤ 50	≤ 100	$\leq 100^{(2)}$	$\leq 100^{(2)}$
Vid botten	Icke eroderande bottensediment	≤ 50	≤ 100	$\leq 100^{(2)}$	$\leq 100^{(2)}$
	Eroderande bottensand	≤ 200	≤ 200	≤ 300	≤ 300
I bottensediment		≤ 20	≤ 20	≤ 20	≤ 50

- 1) Beträffande zonernas belägenhet, se vidstående figur.
- 2) Medelavfrätningen är $\leq 200 \mu\text{m}/\text{år}$ i undervattenszonen och vid botten på plåtar och spons under kajer med tät fartygstrafik.
- 3) Värdena för strömmande sötvatten gäller för mjukt vatten i vattendrag.



APPENDIX 2

Observationer vid den omfattande korrosionsundersökningen i 10 svenska hamnar, vilken beskrivs i kapitel 5.2.1

De redovisade mätningarna i Sverige har utförts på spont av olika kvalitet och utformning:

- U-spont, Z-spont och flatspont
- Spont med koppartillsats (0,25-0,35 %) och utan koppartillsats
- Varierande hållfasthet
- Inga undersökta sponter var försedda med katodiskt skydd
- Sponthuvud av betong, som omsluter sponten ner till olika nivåer

De faktorer som på olika sätt påverkar den totala korrosionsprocessen kan indelas i tre huvudgrupper: Kemiska, fysikaliska och mikrobiologiska faktorer. Om detta finns åtskilligt beskrivet i litteraturen. Nedan redovisas endast de speciella förhållanden som bedöms ha stor betydelse för korrosionshastigheten på sjöfartsanläggningar i Sverige:

- De korrosionsformer, som på undersökta konstruktioner bedöms vara väsentliga för avrostningen är allmänkorrosion, gropkorrosion och erosionskorrosion. Erosionskorrosion är en kombinerad mekanisk och elektrokemisk påverkan på stålet. Det mekaniska slitaget bidrar till att ständigt exponera stålytan för korrosion.
- Signifikanta skillnader i korrosionshastighet mellan sponter med olika utformning, stålkvalitet och koppartillsats har inte noterats. Förändringar i de marina miljöbetingelserna längs spontytan påverkar sannolikt korrosionshastigheten mera än vad olika spontprofiler och olika stålkvalitet gör
- Avrostningen är mindre på spont, som är kringgjuten av en krönbalk ner till lågvattenytan. Betongbalken utgör ett gott skydd för sponten i den zon där det mekaniska slitaget (erosionskorrosion till följd av bl a isrörelser) och där luftsyretillförseln normalt är störst.
- Gropkorrosionen kan lokalt vara upptill 5 a 10 ggr större än den allmänna korrosionen.
- Korrosionen sker huvudsakligen på utsidan av sponten och avrostningen på baksidan är normalt mindre än 10 % av korrosionen på utsidan.
- En faktor som påverkar korrosionsutvecklingen är strömningsförhållandena i vattnet orsakade av bl a vågskvalp och propellerströmmar. Propellerströmmarnas intensitet har ökat under senare år på grund av ökad färjetrafik och bogpropellrar på nya fartyg. Vattenhastigheter uppemot 15 m/sek förekommer. Fartygen blir dessutom större vilket leder till att kajerna utsätts för större påfrestningar av is när fartygen utan isbrytning eller bogserhjälp

lägger till vid kaj eller lämnar kaj.

- Generell påväxt kan medföra att syretillförseln starkt begränsas under en bevuxen stålyta. Detta kan i vissa fall skydda spanten mot allmän korrosion men i andra fall leda till att anaeroba förhållanden uppkommer. Detta kan medföra korrosion orsakad av sulfatreducerande bakterier. Lokal påväxt kan medföra gropkorrosion eftersom en luftningscell uppkommer beroende på att syretillgången är liten under påväxt (anodiskt område) och stor utanför detta område (katodiskt område). Bakterier kan även orsaka att miljöbetingelserna förändras t ex genom pH-sänkning, som befrämjar korrosion.